

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Génie Electrique

Département d'Électrotechnique

Thèse présentée par :

MAAMMAR Mohamed

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en science en Electrotechnique

Option : Haute tension

Intitulé de thèse :

*Modélisation et optimisation des séparateurs
électrostatiques : multifonctionnel et à tambour*

Présentée devant le jury composé de :

Président	Pr. TILMATINE Amar	Université de Sidi Bel Abbès
Directeur de thèse	Pr. AKSA Wessim	Université de Sidi Bel Abbès
Co-Directeur de thèse	Pr. DASCALESCU Lucien	Université de Poitiers-ISAE ENSMA
Examineur	Pr. MILOUA Farid	Université de Sidi Bel Abbès
Examineur	Pr. ZELMAT Mohamed El Mouloud	Université des Sciences et de la Technologie d'Oran
Examineur	Pr. OUIDDIR Rabah	Université des Sciences et de la Technologie d'Oran

Soutenue en : Février 2022

Remerciements

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.

En préambule à ce travail, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à tous ceux qui m'ont apporté leur soutien et leur aide.

Je tiens à exprimer ma gratitude au directeur de thèse Monsieur Wessim AKSA qui s'est toujours montré à l'écoute par sa disponibilité, son intérêt et son soutien tout au long de la réalisation de cette thèse.

J'exprime ma profonde reconnaissance au co-directeur de thèse Monsieur Lucien DASCALUSCU qui m'a accueilli pendant 18 mois, au sein de son équipe au Laboratoire d'Étude Aérodynamique PPRIME-IUT d'Angoulême de l'université de Poitiers, ce travail n'aurait pu être mené à bien sans son accueil bienveillant. Je le remercie pour tout ce qu'il a apporté à cette thèse, ainsi que pour ses encouragements et son soutien.

Par la même occasion, je voudrais également remercier chaleureusement messieurs Karim MEDLES, Thami ZEGHLOUL et Seddik TOUHAMI pour leurs aides précieuses et leurs conseils éclairés.

En outre, j'adresse mes remerciements les plus sincères à monsieur Amar TILMATINE pour avoir accepté de présider le jury, tout comme j'adresse ma profonde reconnaissance à messieurs : Farid MILOUA, Rabah OUIDDIR et Mohamed El Mouloud ZELMAT pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Je tiens à remercier mes collègues et mes amis membres des laboratoires APELEC, IRECOM et PPRIME.

Tables des matières

Introduction générale	2
Chapitre 1 Etat de l'art de la séparation électrostatique.....	5
1.1. Technologies de recyclage des DEEE par la séparation électrostatique.....	5
1.1.1. Gestion des DEEE	5
1.1.2. Processus de séparation des DEEE	10
1.2. Dispositifs de charge	15
1.2.1. Induction électrostatique.....	15
1.2.2. L'effet couronne.....	16
1.2.3. L'effet triboélectrique.....	18
1.3. Séparateurs électrostatiques.....	19
1.3.1 Séparateurs à électrodes statiques.....	19
1.3.2 Séparateurs à électrodes dynamiques.....	24
1.4 Evaluation des facteurs influents.....	28
1.4.1 Facteurs contrôlables.....	28
1.4.2 Facteurs non contrôlables.....	29
1.4.3 Facteurs d'entrées.....	29
1.4.4 Interaction factorielle.....	30
1.4.5 Exemples de la littérature.....	30
1.5 Modélisation et optimisation expérimentales.....	35
1.5.1 Modélisation expérimentale (modèle type boîte noire).....	36
1.5.2 Modélisation analytique (par modèle physique ou modèle type boîte blanche)...	38
Chapitre 2 Techniques expérimentales et numériques mises en œuvre.....	41
2.1. Installations expérimentales.....	41
2.1.1 Séparateur électrostatique multifonctionnel.....	41
2.1.2 Séparateur couronne-électrostatique à tambour	42
2.2 Procédure expérimentale	44
2.2.1 Matériaux utilisés	44
2.2.2 Mesure simultanée de charge et de masse	44

2.2.3 Visualisation des trajectoires des particules.....	46
2.3. Modélisation numérique des processus de séparation électrostatique.....	47
2.3.1. Calcul du champ électrique	47
2.3.2. Charges et forces électrostatiques	48
2.3.3. Équations du mouvement	51
Chapitre 3 Simulation numérique et étude expérimentale des trajectoires des particules dans le séparateur multifonctionnel	56
3.1. Présentation du séparateur multifonctionnel	56
3.2. Modélisation numérique et simulation du mouvement des particules dans le séparateur multifonctionnel	58
3.2.1. Calcul du champ électrique.....	58
3.2.2. Chargement des particules.....	58
3.2.3 Forces exercées sur une particule chargée	59
3.2.4 Comportement des particules avant et après le point de décollage.....	62
3.2.5 Résolution numérique de l'équation de mouvement.....	65
3.3 Procédure expérimentale.....	66
3.4 Résultats et analyses	68
3.4.1 Analyse des résultats de simulation numérique	68
3.4.2 Analyse et comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulation numérique.....	74
Chapitre 4 Modélisation et simulation des trajectoires des particules dans le séparateur à tambour (PRODEKOLOGIA).....	80
4.1. Modélisation numérique et simulation du mouvement des particules dans le séparateur électrostatique à tambour rotatif.....	81
4.2. Procédure expérimentale.....	84
4.3 Résultats et analyses	86
4.3.1 Analyse et comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulation numérique pour les tests effectués sur les particules conductrices.....	86
4.3.2 Analyse et comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulation numérique pour les tests effectués sur les particules isolantes.....	91
Conclusion générale.....	96
Références bibliographiques	98

Introduction générale

Le progrès technologique ainsi que le mode de consommation actuellement accélèrent l'obsolescence des équipements électriques et électroniques utilisés à des fins industrielles ou domestiques, des ordinateurs aux téléphones portables, et des réfrigérateurs aux machines à café. La consommation de ces équipements augmentant à un rythme rapide, des quantités de plus en plus importantes de déchets sont générées et doivent être recyclées [1].

En 2019, il y avait $53,6 \times 10^6$ t de déchets électroniques (e-wastes), mais seulement 17,4 % (l'équivalent de $9,32 \times 10^6$ t) d'entre eux étaient officiellement répertoriés comme étant collectés et recyclés de manière appropriée. Depuis 2014, la masse des déchets électroniques collectés annuellement a augmenté de $1,8 \times 10^6$ t, soit beaucoup moins que la croissance de $9,2 \times 10^6$ t de la quantité totale d'équipements hors d'usage qui aurait dû l'être [2].

Les plastiques sont des déchets générés en grandes quantités, non-biodégradables et se trouvant partout autour de nous ; chaque être vivant est exposé à ces déchets, qui contaminent l'air, l'eau et en conséquence la nourriture. La quantité de plastiques ingérée par un humain en une semaine peut atteindre 5 g [3].

Entre 1950 et 2015, 6,3 milliards de tonnes de déchets plastiques ont été produites, et seule une petite partie a été traitée (9 % recyclée et 12 % incinérée), tandis que la majeure partie (79 %) a été mise en décharge ou tout simplement rejetée directement dans la nature . Pour faire face à cette pollution, des efforts importants ont été déployés dans la recherche de nouvelles techniques de recyclage mécanique, chimique ou organique. Le problème est que ces nouvelles techniques ne permettent qu'une récupération partielle des matériaux primaires consommés et génèrent parfois des substances difficilement recyclables et ayant un mauvais impact sur l'environnement [4].

Parmi la grande diversité des méthodes de recyclage, la séparation électrostatique, anciennement utilisée pour exploiter les minerais, est considérée comme une solution écologique efficace, car elle se caractérise principalement par des coûts de conception, d'exploitation et de maintenance relativement faibles [5]. Parmi les nombreuses applications de l'électrostatique, tel que la précipitation des poussières, la peinture, l'électro-photographie, la séparation des particules est actuellement l'axe de recherche le plus riche en communications et publications dans la littérature scientifique .

La simplicité de conception et d'utilisation de la séparation électrostatique cache une grande complexité du réglage optimal de ses paramètres, due à l'interaction de plusieurs phénomènes électriques et mécaniques. En effet, la séparation électrostatique est un processus multifactoriel, dont le réglage nécessite une expérience conséquente, ou la réalisation d'un grand nombre d'expériences préliminaires.

La versatilité des processus de la séparation électrostatique implique une étude approfondie du point de vue physique et mécanique, dans le but de rendre le séparateur efficace et robuste en termes de rendement et pureté des produits séparés. Les réglages optimaux des variables de contrôle (généralement la haute tension appliquée au système d'électrodes, la position de l'électrode et la vitesse de rotation de l'électrode...) sont fréquemment établis en utilisant la méthode du plan d'expériences [6]. La modélisation numérique des trajectoires des particules a également été utilisée pour évaluer les effets des différents facteurs qui pourraient influencer le résultat de la séparation.

La modélisation numérique du processus de séparation est une étape clé pour éviter l'explosion du nombre d'expériences nécessaires, car elle permet une compréhension globale des différents phénomènes impliqués. Ainsi, la simulation numérique des trajectoires des particules a été utilisée par plusieurs chercheurs pour évaluer les effets de divers facteurs qui influenceront le résultat de la séparation afin de mieux contrôler le processus et de l'optimiser [7-10].

Les modèles numériques ont progressivement intégré la plupart des phénomènes physiques impliqués dans le processus, tels que les impacts avec les électrodes ou la variabilité de la taille des particules, mais ils n'ont été que partiellement validés par la mesure indirecte des masses récupérées dans les boîtes du collecteur.

L'objectif de cette thèse est l'optimisation de la séparation électrostatique en mettant en œuvre un modèle numérique permettant d'étudier le mouvement des particules dans deux séparateurs électrostatiques fréquemment utilisés, le séparateur multifonctionnel et le séparateur à tambour rotatif.

L'un des aspects importants de l'optimisation de la séparation électrostatique est la maîtrise des trajectoires des particules. Pour cela, il faut avoir la possibilité de simuler numériquement ces trajectoires et les comparer aux trajectoires réelles captées par une caméra ultra-rapide afin de valider notre modèle numérique. Ce modèle basé sur une étude approfondie, tiendra compte des interactions des phénomènes mécaniques et électriques lesquelles gouvernent le mouvement des particules, ainsi que des impacts de celles-ci avec les électrodes qui sont fixes

ou en mouvement. Cette étude approfondie aide à la décision dans le choix des paramètres de contrôle optimaux qui conduisent à une meilleure séparation électrostatique.

Cette thèse comporte quatre chapitres organisés de la façon suivante :

Le premier chapitre présente l'état de l'art de la séparation électrostatique et sur le positionnement de cette technique dans le domaine du recyclage.

Le deuxième chapitre concerne les matériaux et les méthodes utilisés dans la séparation électrostatique généralement, ainsi que les phénomènes physiques qui sont impliqués dans ce processus.

Le troisième chapitre décrit la mise en œuvre d'un procédé expérimental permettant d'observer le comportement des particules de différents types à l'aide d'une caméra ultra rapide, afin de mieux comprendre les différents phénomènes qui se produisent. Les données expérimentales obtenus dans le séparateur électrostatique multifonctionnel sont ensuite comparées aux résultats des simulations numériques.

Le quatrième chapitre sera consacré à l'adaptation du modèle numérique élaboré dans un autre type de séparateur électrostatique : le séparateur à tambour rotatif. D'autres séries d'expériences sont menées, où les trajectoires sont captées à l'aide de la caméra ultra rapide et comparées aux résultats obtenus par simulation numériques.

Enfin nous clôturons cette thèse par une conclusion générale et les perspectives envisagées pour les futurs travaux dans cette thématique.

Chapitre 1

Etat de l'art de la séparation électrostatique

Initialement utilisée au traitement des minerais [11-13], la technique de la séparation électrostatique trouve actuellement sa place dans plusieurs applications visant le recyclage des *DEEE* parmi lesquelles: - séparation couronne-électrostatique du cuivre et du PVC des déchets de câbles électriques [14-16] et de cartes électroniques; [17-18]; - séparation tribo-électrostatique à chute libre des mélanges de plastiques granulaires [19-22].- séparation tribo-aéro-électrostatique des déchets de plastiques micronisés [23-24]. Dans l'ensemble de ces applications et afin d'augmenter la capacité productive des chaînes de tri, les séparateurs électrostatiques peuvent-être exploités en combinaison avec d'autres installations qui incluent des techniques basées sur des procédés mécaniques, magnétiques, hydrauliques,...etc.

L'adaptation d'un séparateur électrostatique pour une application donnée se fait généralement par l'ajustement approprié des paramètres géométriques, cinématiques et électriques de l'installation elle-même. Cette tâche peut être effectuée à l'aide d'une analyse systématique de la liaison fonctionnelle qui relie les facteurs et les réponses de l'installation.

Cette analyse a fait le sujet de plusieurs travaux de recherche [25-29]. Le but commun de tous ces travaux entre dans le cadre de la détermination d'une procédure destinée à l'optimisation du fonctionnement des processus de séparations électrostatiques.

1.1. Technologies de recyclage des DEEE par la séparation électrostatique

1.1.1. Gestion des DEEE

Plusieurs directives internationales et européennes ont été élaborées afin de contrôler la gestion de ces déchets. Elles imposaient leur collecte sélective, le traitement des substances dangereuses qu'ils contenaient, et préconisent également la réutilisation, le recyclage et la valorisation des autres matières [30]. Ces directives visent à restreindre, voir à interdire l'utilisation de substances dangereuses dans les EEE. Elles ont pour objectif d'obliger au remplacement de ces substances par des produits plus respectueux de l'environnement tout en garantissant au moins le même niveau de protection du consommateur. L'objectif est de promouvoir la valorisation des DEEE dans le sens où les EEE doivent être conçus et fabriqués de manière à faciliter leur démantèlement et de favoriser la réutilisation et le recyclage plutôt que leur destruction.

La gestion des déchets doit être améliorée par la mise en place de collectes sélectives et d'un traitement adapté des DEEE en séparant certains composants, tout en évitant la dispersion des substances dangereuses. C'est aux producteurs (fabricants, vendeurs, revendeurs et importateurs) d'être responsables (Responsabilité Etendue du Producteur REP) de la collecte, du traitement et de la valorisation des DEEE. La quantité des DEEE devait également être réduite.

a) État du gisement des DEEE

Chaque année, environ 641 millions d'équipements, sont mis sur le marché, soit 25 kg/hab/an, dont plus de 80% de ces équipements sont de type ménager [31]. L'augmentation du taux de recyclage rend nécessaire la connaissance de la composition des DEEE.

La figure I.1 donne une moyenne des proportions de matériaux ferreux, non ferreux, plastiques et de matériaux non récupérables présents dans les DEEE, hors écrans et lampes. Le recyclage des métaux ferreux et non ferreux est maîtrisé et constitue une source d'approvisionnement de matière première secondaire (MPS) [32]. Parallèlement, la majorité des matières plastiques, qui représentent plus de 20% de la masse des DEEE, ne sont actuellement pas recyclées mais incinérées. Il est donc pertinent de s'intéresser à leur recyclage. Cependant, comme le montre la figure I.2, ces matières plastiques sont composées d'environ une dizaine de polymères. Trois polymères sont majoritairement présents : l'ABS et ses alliages ABS-PC, le PP (Polypropylène) et le PS (Polystyrène principalement sous la forme HIPS) [33]. En raison d'un si grand nombre de polymères utilisés, il est particulièrement difficile d'en assurer une séparation idéale et donc un recyclage exempt d'impuretés. Actuellement, aucune filière de retraitement des plastiques n'est en mesure d'assurer un tri aussi sélectif.

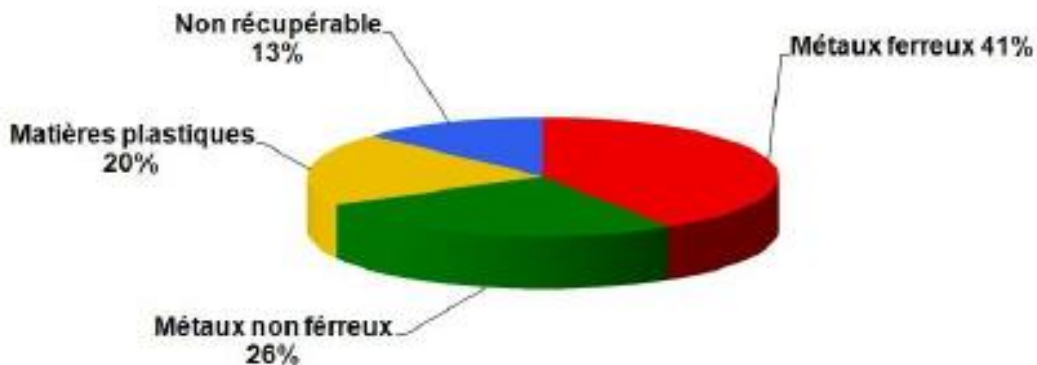


Figure 1.1. Type et proportion de matériaux existant dans les DEEE [34]

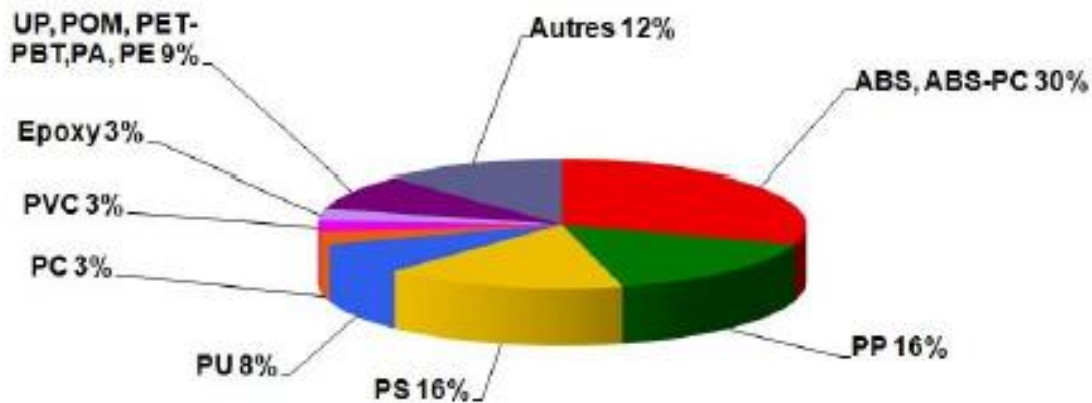


Figure 1.2. Proportion des plastiques selon leur nature dans les DEEE [35]

b) Voies de traitement des DEEE

Une fois collectés, les déchets sont traités selon 5 voies (figure 1.3) [36-37] :

- (1) Le réemploi, ou réutilisation des équipements entiers qui a pour but de remettre en état de marche et de revendre l'équipement d'occasion pour le même usage que celui de départ ;
- (2) La réutilisation en pièces qui consiste à récupérer des pièces détachées sur un appareil hors service afin de réparer d'autres équipements ou bien de les réintégrer à la fabrication de nouveaux EEE ;
- (3) Le recyclage, ou valorisation de la matière qui consiste à démanteler, à dépolluer, à broyer et puis à trier les différentes matières. Après avoir subi une remise en forme, la matière peut être utilisée comme matière première secondaire (MPS).
- (4) La valorisation énergétique, ou incinération avec récupération d'énergie. Un traitement thermique des déchets non recyclables permet de récupérer une partie de leur contenu énergétique à condition que ceux-ci ne contiennent pas de substances dangereuses (par exemple les retardateurs de flamme bromés) [38].
- (5) La destruction qui consiste à éliminer le déchet sans valorisation (mise en décharge ou incinération sans récupération d'énergie).

c) Tri des polymères

Le gisement de plastiques issus des DEEE est constitué d'environ 15 polymères différents et de leurs alliages. Lors de leur arrivée sur la chaîne de tri, ces plastiques préalablement broyés, se retrouvent mélangés.

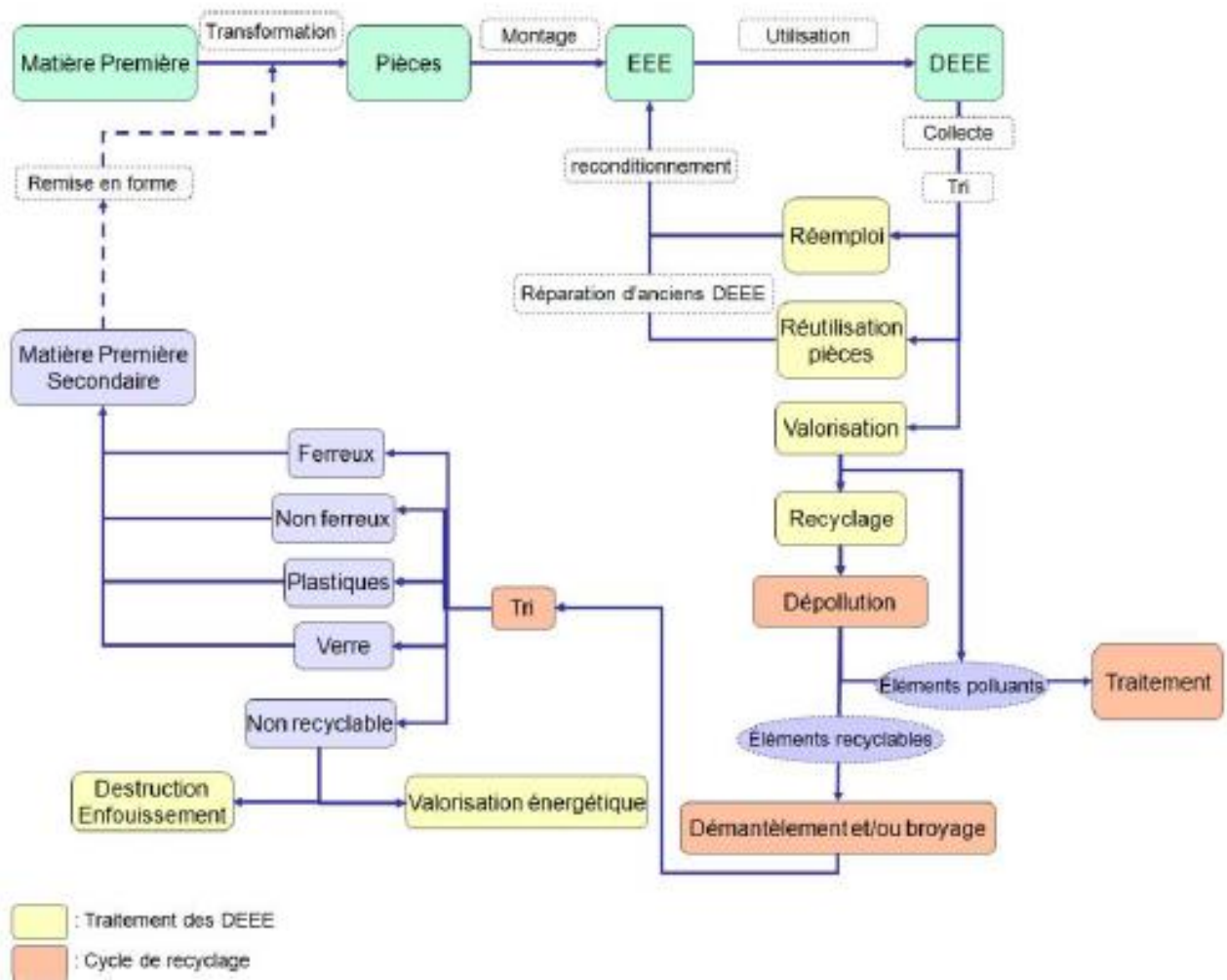


Figure. 1.3. Schéma du cycle de vie d'un EEE

Ce gisement ne peut pas être recyclé tel quel car la plupart des polymères ne sont pas miscibles entre eux. C'est pourquoi, plusieurs auteurs insistent sur le fait que le tri est l'une des étapes primordiales du recyclage pour réduire l'effet de contamination par d'autres polymères [39-43]. Ainsi, la très grande diversité de polymères présents dans ce gisement requiert le développement de techniques de tri automatique, rapides, économiques et efficaces.

Les procédés les plus répandus sont : le tri par voie sèche, comme la spectroscopie infra rouge, proche infra-rouge et le tri électrostatique, ou par voie humide, basée sur la différence de densité ou de solubilité [44-49]. Les techniques actuelles de tri admettent un taux d'impureté de 1 à 5%. Obtenir un polymère pur à 99% nécessite plusieurs étapes de tri, ce qui implique un surcoût et par conséquent une mauvaise rentabilité. Il faut considérer que la présence d'impuretés est donc inévitable.

d) Méthodes de valorisation des plastiques et contraintes

Deux grandes méthodes de valorisation des plastiques existent : la valorisation énergétique et la valorisation de la matière. En terme de valorisation de la matière qui seule nous intéresse ici, deux types de procédés de recyclage peuvent être envisagés : le recyclage chimique et le recyclage mécanique [50].

Le recyclage chimique consiste à décomposer le polymère en constituants de base (monomères, oligomères). Les processus classiquement utilisés font appel à la pyrolyse, l'hydrogénation, la gazéification, la décomposition chimique par voie liquide (hydrolyse, alcoololyse,...etc.) Les matières premières sont alors réutilisables dans les raffineries ou dans les filières de la pétrochimie et de la chimie. Ces techniques de décomposition sont bien adaptées à des polymères « purs » comme le polyuréthane, le polyéthylène téréphtalate, le polyamide et le poly-méthacrylate de méthyle. Il est en revanche beaucoup plus complexe et coûteux de produire des matières premières réutilisables, de manière rentable, lorsqu'il s'agit de polymères de commodité, de mélanges ou d'alliages de polymères. De plus, certaines techniques comme la dissolution par voie liquide possèdent un gros inconvénient car elles nécessitent l'utilisation de solvants [51-52], même si certaines études proposent une solution pour recycler le solvant [53].

Le recyclage mécanique consiste, après avoir éliminé les constituants dangereux puis broyer le polymère sous forme de paillettes, à le ramollir sous l'effet de la chaleur par extrusion. Le jonc ainsi obtenu est ensuite réduit sous forme de granulés. Cette méthode apparaît de loin comme la voie la plus appropriée pour le traitement des polymères issus des DEEE. Des études montrent que le recyclage mécanique est en général préférable à d'autres procédures en termes d'optimisation de la consommation énergétique et de la minimisation d'émissions de gaz à effet de serre [54]. Il s'avère, par ailleurs, moins coûteux que le recyclage chimique. Ces transformations peuvent toutefois engendrer, par exemple, des dégradations thermomécaniques de la matière causée par des températures et des taux de cisaillement élevés durant la mise en œuvre [55].

Le recyclage électrostatique consiste à éliminer les substances dangereuses puis broyer les matériaux plastiques sous forme de granulé de différentes tailles (grosses particules, petites particules, sous-millimétriques et micronisées) [56]. Les méthodes de séparation électrostatiques utilisent les forces agissant sur des granules chargés ou polarisés, soumis à l'action d'un champ électrique. Ces technologies se développent aujourd'hui essentiellement en rapport avec de nouvelles applications dans le domaine du recyclage des déchets.

Le recyclage magnétique consiste à soumettre des morceaux de déchets à des forces magnétiques et mécaniques développées par un séparateur magnétique [57-59]. Suivant les propriétés magnétiques des déchets, il y a lieu d'employer soit la force attractive soit la force répulsive. La séparation magnétique s'applique industriellement depuis le début du 20^{ème} siècle. Cette séparation est utilisée aussi bien dans la préparation des matières fortement magnétiques que pour celles qui sont faiblement magnétiques. C'est au cours des dernières décennies que les méthodes d'enrichissement des matières faiblement magnétiques ont été développées. Il est possible de constater que les techniques du recyclage magnétique jouent un rôle très important également dans le domaine du recyclage des déchets de métaux non ferreux issus des DEEE.

1.1.2 Processus de séparation des DEEE

Les Equipements Electriques et Electroniques EEE sont devenus omniprésents dans notre vie quotidienne. L'analyse des éléments constituant ce type d'équipements montre que leurs procédés de fabrication sont très consommateurs de matières premières tels que les plastiques (ABS ; PS ; PC ; PVC...), les métaux (Or ; Argent ; Cuivre ; étain ; Plomb ...), ou encore les terres rares principalement utilisées dans l'industrie du verre et de la céramique [58-62]. La figure 1.4 montre un exemple d'un EEE (*défecteur électromagnétique du tube cathodique*).

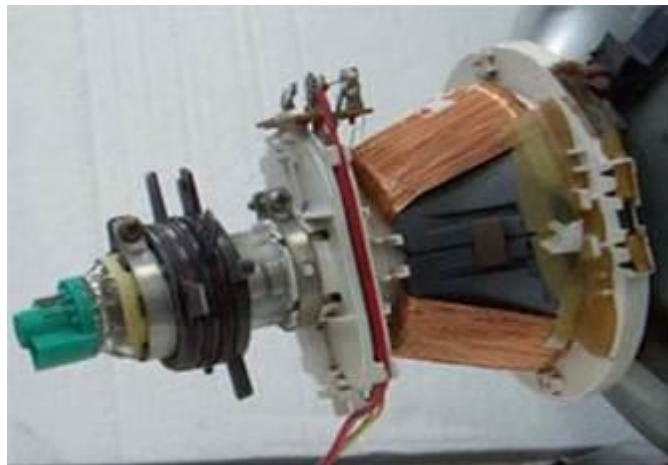


Figure 1.4. Défecteur électromagnétique d'un tube cathodique comportant des éléments en cuivre plastic ; résine époxy ; acier ; verre ; céramique... etc. [59]

Cet élément contient plusieurs matériaux de natures différentes à savoir : le cuivre ; verre ; plastique ; résine époxy ; acier ; céramique, ...etc. Actuellement là plupart de ces

matériaux sont considérés comme non renouvelables, en voie d'épuisement. Par conséquent, il est devenu indispensable de trouver des solutions qui permettraient de réutiliser les DEEE pour prolonger le cycle de vie des matériaux et in fine réduire le taux d'épuisement des ressources naturelles [59].

Pour commencer à apporter des solutions à ce problème, nombreuses entreprises dans le monde procèdent au recyclage des DEEE en fin de vie. La table 1.1 montre les informations sur le pourcentage des matériaux qui peuvent être récupérés à partir de quatre équipements électriques et électroniques utilisés au Japon [60].

Table 1.1. Pourcentage des matériaux utilisés dans la fabrication de quatre EEE différents

Matériaux	Télévision	Machine a lavé	Climatiseur	Réfrigérateur
Verre	57	-	-	-
Plastique	23	36	11	40
Fer	10	53	55	50
Cuivre	3	4	17	4
Aluminium	2	3	7	3
Autres	5	4	10	3

Selon *K. Makenji & al* [61] et d'un point de vue énergétique, le recyclage des matériaux à partir des *DEEE* est plus rentable par rapport à l'extraction de ces produits à partir des ressources naturelles. Le tableau 1.2 indique l'estimation de l'énergie économisée lors du recyclage de quelques matériaux récupérés à partir des *DEEE*.

Table I.2 : Energie économisée par le recyclage des DEEE

Matériaux	Energie économisé (%)
Aluminium	95
Cuivre	85
Plomb	65
Produit en plastic	> 80

Bien que le recyclage des DEEE permette d'économiser une quantité considérable d'énergie, il faut en amont passer par l'étape de tri sélectif qui demeure très compliquée lorsqu'il s'agit du traitement des équipements constitués par des éléments hétérogènes. Dans

des situations similaires un traitement manuel est appliqué au début de la chaîne de tri (figure 1.5). Dans cette chaîne de tri, des opérateurs procèdent à la sélection et au tri des DEEE transportés par un tapis convoyeur. Chaque opérateur peut sélectionner un ou plusieurs types de déchets en même temps. Le but de cette opération consiste à sélectionner les éléments homogènes des équipements et les envoyer vers une chaîne de recyclage. La pureté des déchets homogènes obtenus par cette opération dépasse généralement les 95%.



Figure 1.5. Traitement manuel des DEEE. [61]

Le reste, c'est-à-dire les éléments hétérogènes des *DEEE*, sont expédiés généralement vers d'autres chaînes de traitement où ils vont subir une réduction de taille en première étape donc une dissociation des éléments de matériaux différents. Le produit obtenu peut être traité ensuite par des techniques qui incluent des procédés mécaniques, électriques, magnétiques, thermiques, hydrauliques, ...etc. (figure 1.6)

a) Réduction de la taille des DEEE

Le traitement des *DEEE* hétérogènes commence généralement par une étape de réduction de taille (déchiquetage et/ou broyage et/ou granulation). Dans cette étape les *DEEE* sont soumis à l'action des forces brutales des marteaux, boules ou des lames en mouvement dans un compartiment fermé [62]. Le but de ces procédés consiste à libérer les éléments constituant un objet hétérogène. Le même procédé est utilisé généralement dans l'industrie minière, ainsi que dans l'industrie chimique et pharmaceutique.

Dans le cas du traitement des *DEEE*, l'utilisation d'un procédé de granulation doit porter le déchet à un certain degré de dissociation [62]. Selon *W. Schubert* [63] le degré de

dissociation d'un déchet récupéré à la sortie d'un broyeur est défini par le pourcentage du produit dissocié par rapport à la masse totale de l'échantillon.

$$D_d = \frac{M_{hm}}{M_{ech}} \quad (1.1)$$

où D_d est le degré de dissociation des déchets récupérés à la sortie d'un broyeur, M_{hm} la masse du produit homogène et M_{ech} la masse de l'échantillon.

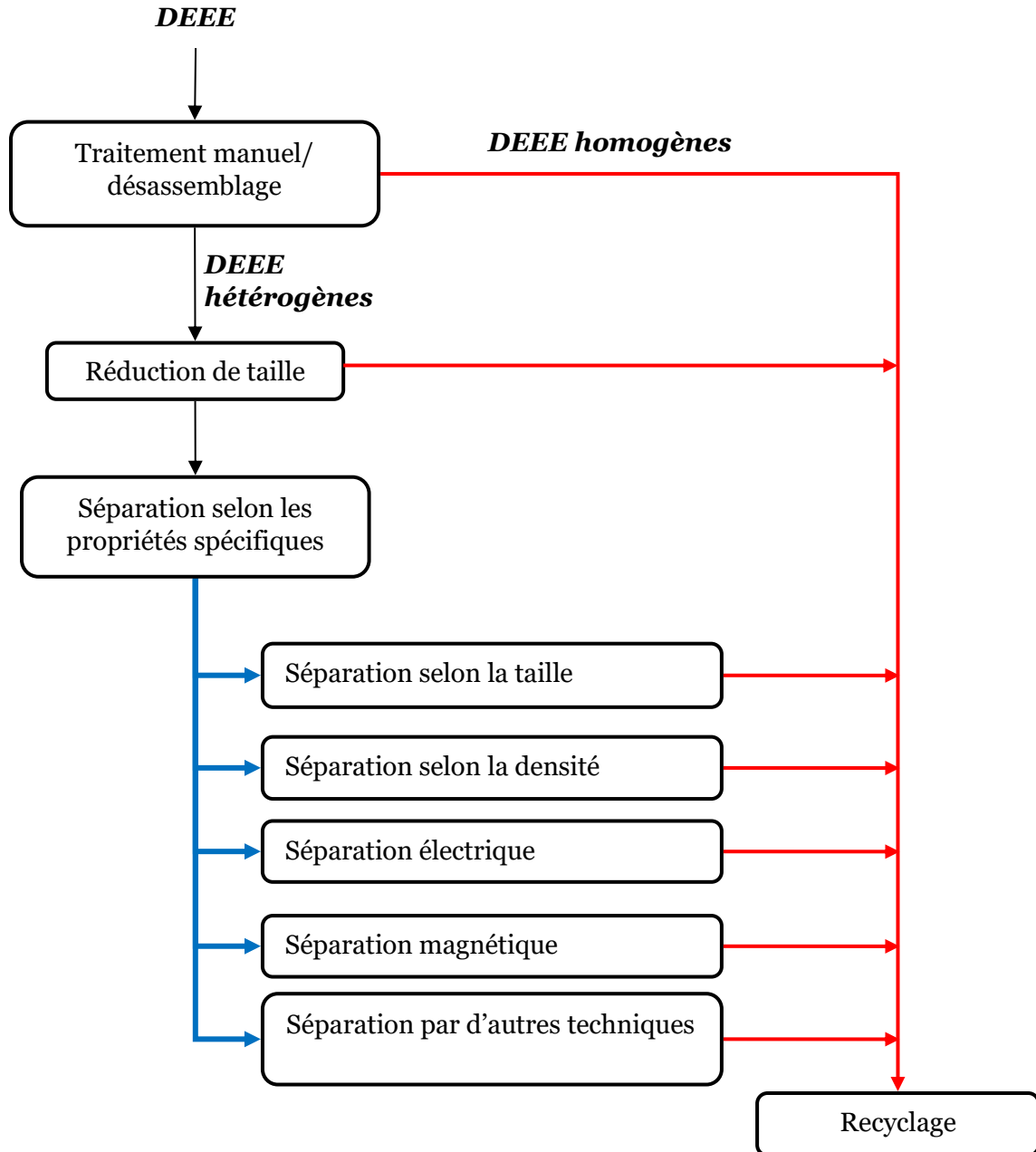


Figure 1.6. Méthode de séparation des DEEE basées sur les méthodes de traitement des minerais [58].

La figure 1.7 montre un exemple d'un échantillon de déchets de câbles électriques récupéré à la sortie d'un broyeur. La présence des particules de cuivre encapsulées par des matériaux isolants réduit le degré de dissociation de l'échantillon. Ainsi la pureté des produits récupérés à la sortie des processus de séparation exécutés dans l'étape suivante se trouve-t-elle diminuée.

Le degré de dissociation D_d représente un paramètre très important dans la réussite ou non d'un processus de séparation quelconque. D'un côté et selon *S. Zhang & al* [64] le broyage des circuits imprimés électroniques à des tailles inférieures à 2 mm permet l'obtention d'un produit granulaire caractérisé par un degré de dissociation très élevé. D'un autre coté les travaux de *H. Masuda & al* [65] montrent que l'énergie consommée dans l'étape de broyage est inversement proportionnelle à la taille des particules obtenues à la sortie du broyeur. Donc une minimisation excessive de la taille des particules est parfois inutile et engendre une perte d'énergie considérable.



Figure 1. 7. Déchet de câble électrique récupéré à la sortie d'un broyeur (a-b) : granules homogènes ; (c) : granules hétérogènes

1.2 Dispositifs de charge

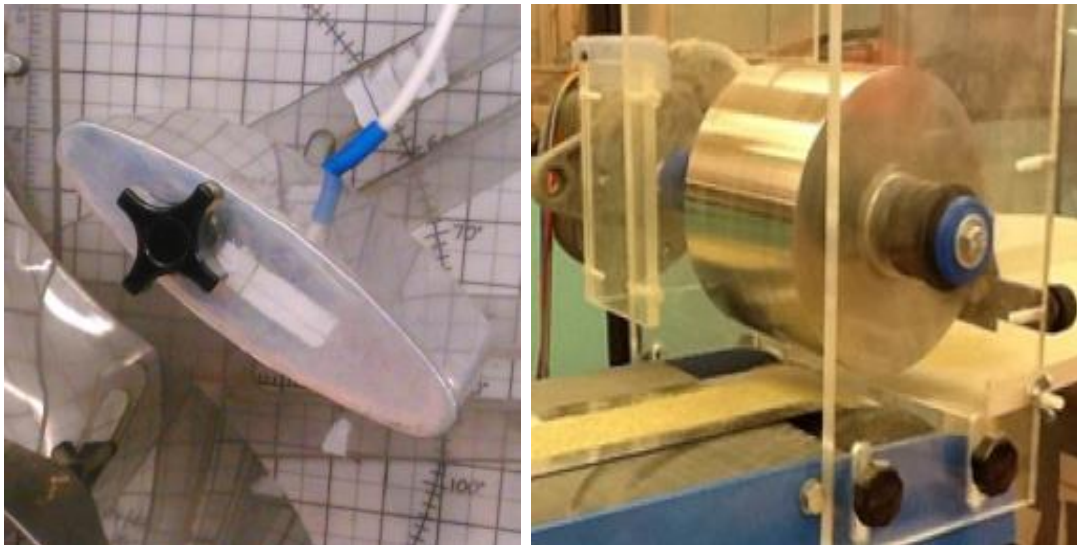
Une des conditions de la séparation électrostatique d'un mélange de matériaux, granulaires ou pulvérulents, est que les composants du mélange doivent acquérir des charges différentes en intensité et/ou en polarité. Plusieurs mécanismes physiques peuvent générer ces charges électriques [66-69]. Les trois principales techniques sont : l'induction électrostatique, la décharge couronne et la triboélectricité.

1.2.1 Induction électrostatique

L'induction électrostatique est un phénomène créant un déplacement de charges électriques dans un objet, initialement électriquement neutre, par le biais d'un second objet électriquement chargé, sans contact direct entre eux. L'objet chargé génère un champ électrique qui provoque la polarisation de l'objet neutre. Ainsi, les charges positives et négatives présentes dans l'objet neutre vont se séparer et s'organiser en deux pôles situés aux deux extrémités de l'objet. Si celui-ci est conducteur et en contact avec la terre, les charges proches du point de contact s'évacuent vers la terre. De ce fait, lorsque l'objet est détaché de la terre, il emporte une charge non nulle.

Par définition un objet isolant ne transmet pas de charges électriques. Il ne peut donc pas être chargé par induction électrostatique [70].

Les électrodes utilisées pour générer un champ électrique nécessaire à l'induction électrostatique sont souvent de forme cylindrique ou elliptique. La présence d'arrêtes sur ces électrodes est déconseillé afin d'éviter toute décharge et diminuer le risque de passage à l'arc électrique. La forme elliptique est beaucoup utilisée dans les séparateurs électrostatiques pour étendre et uniformiser le champ. La figure 2.3 représente deux configurations d'électrodes [71-72].



(a)

(b)

Figure 2.3. Electrodes utilisées pour l'induction électrostatique ; (a) : Electrode elliptique ; (b) : Electrode cylindrique tournante.

1.2.2 L'effet couronne

L'effet couronne possède actuellement bon nombre d'applications dans divers domaines. Cet effet est notamment utilisé dans les générateurs d'ozone pour le traitement de l'eau et le contrôle des odeurs, la neutralisation [73], le chargement électrique de films plastiques et de média textiles [74]. Et bien évidemment dans la séparation électrostatique [75-76].

La décharge couronne est créée entre deux électrodes fortement dissymétriques dont l'une dite cathode se présentant sous forme d'un fil ou d'une pointe ayant un faible rayon de courbure relié à la source haut tension et l'autre est l'anode, qui est une plaque reliée à la terre. La décharge couronne apparaît au voisinage de l'électrode de faible rayon si le champ électrique est suffisant pour ioniser le gaz. Sous l'effet de champ électrique, les électrons naturellement libres présents dans l'air accélèrent et acquièrent suffisamment d'énergie cinétique pour ioniser une molécule d'air ainsi libérant un électron ou plus. En multipliant leurs nombres et continuant leur trajectoire vers l'électrode de polarité opposée (anode) provoquant le phénomène d'avalanche électronique (Figure 2.4). Les molécules ayant libéré des électrons sont devenues des ions positifs et sont donc attirés par l'électrode cathode. De cette façon, elles regagnent un électron et redeviennent neutres. Ce phénomène cesse jusqu'à ce que l'électron accéléré ne peut plus ioniser d'autre molécule à cause de son énergie cinétique réduite, donc ce phénomène est limité dans l'espace, il se passe à quelques micromètres de l'électrode couronne. Au-delà de cette zone, les électrons vont alors s'associer

aux molécules de l'air et forment des ions négatifs, formant une charge d'espace qui se dirigera vers l'électrode anode. Ces ions entrent en contact avec les particules isolantes et leurs durées de vie sont suffisamment longues pour que la séparation des matériaux ait lieu [77-78].

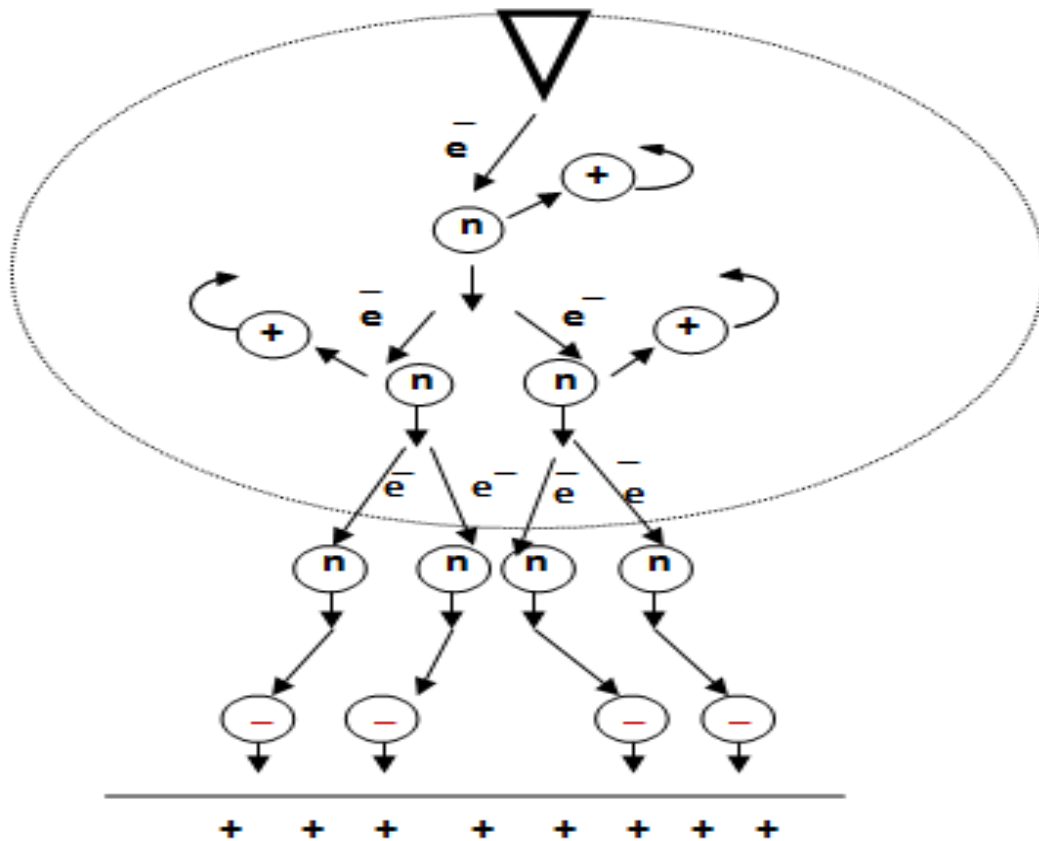
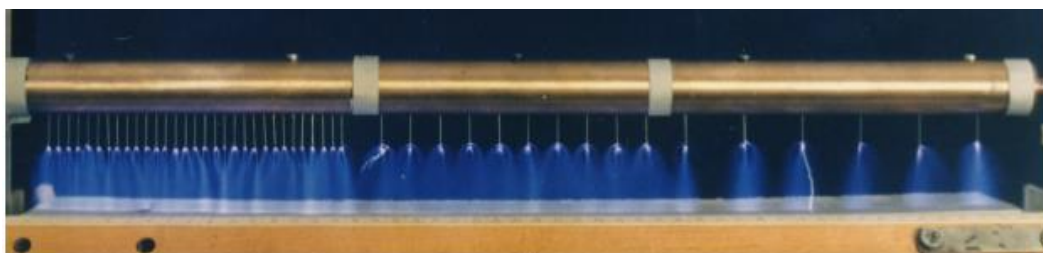


Figure 2.4. Génération d'une avalanche électronique et de la décharge couronne

Plusieurs types de configurations d'électrodes capables de produire la décharge couronne sont décrites dans la littérature. Les électrodes les plus couramment utilisées sont les électrodes à fil fin (Figure 2.5.b) et les électrodes à aiguilles (Figure 2.5.a). Les électrodes couronne à fil fin sont les plus utilisées dans l'industrie, à cause de la facilité de réalisation et leur faible coût.



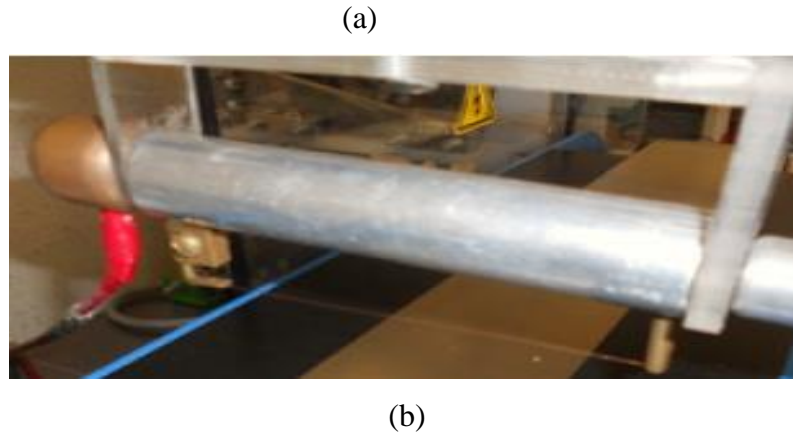


Figure 2.5. Différentes configurations d'électrodes couronnes. (a) Photographie d'une décharge couronne avec une électrode à aiguilles ; (b) : Photographie d'une électrode couronne à fil.

1.2.3 L'effet triboélectrique

Il s'agit d'un transfert de charges électriques entre différents matériaux : lorsque deux matériaux électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement [80-81]. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation et de nouveaux contacts auront pour effet de produire de nouveaux transferts de charges. L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux [82-84], ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés (Figure 2.6). C'est le mécanisme physique le plus utilisé pour charger des matériaux granulaires ou micronisées plastiques en vue de leur séparation dans un champ électrique intense [85].

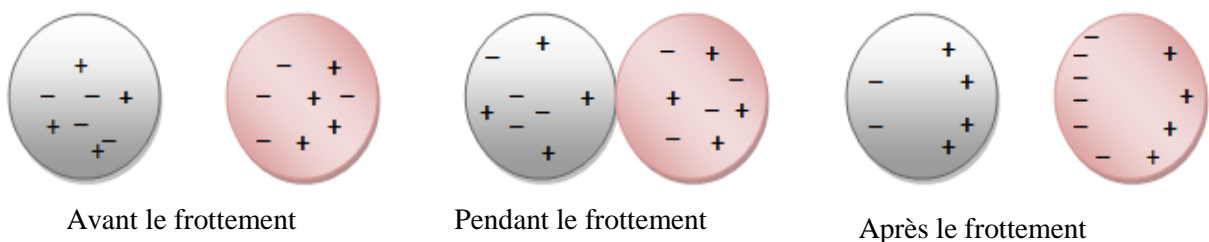


Figure 2.6. Transferts de charges électriques dus au frottement de deux corps ; l'un s'électrise positivement et l'autre négativement.

Plusieurs recherches ont été effectuées sur les dispositifs de chargement triboélectrique de matériaux isolants : cylindre tournant, lames ou hélices rotatives [86], dispositif de vibration [87-88], cyclone [89-90] ou encore lits fluidisés [91-92].

1.3. Séparateurs électrostatiques

Les séparateurs électrostatiques peuvent être classés selon plusieurs critères. Pour cette thèse nous allons le faire en fonction de l'état de mouvement des électrodes (statique ou dynamique). Ce mouvement est l'un des paramètres influents sur l'efficacité de l'installation et la réussite de la séparation.

1.3.1 Séparateurs à électrodes statiques

1.3.1.1 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages

a) Description

L'installation est composée de deux étages superposés, détachables, attachées à un même support vertical. Le séparateur tribo-aéro-électrostatique, situé à l'étage supérieur, est une enceinte parallélépipédique, ayant deux parois transparentes, afin de permettre la visualisation des phénomènes. Les parois latérales, opaques, ont des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces internes. Ces électrodes sont connectées à deux alimentations haute tension continue variable avec des polarités différentes, afin de créer un champ électrique suffisamment intense pour attirer les granules chargés et contrôler ainsi leurs trajectoires.

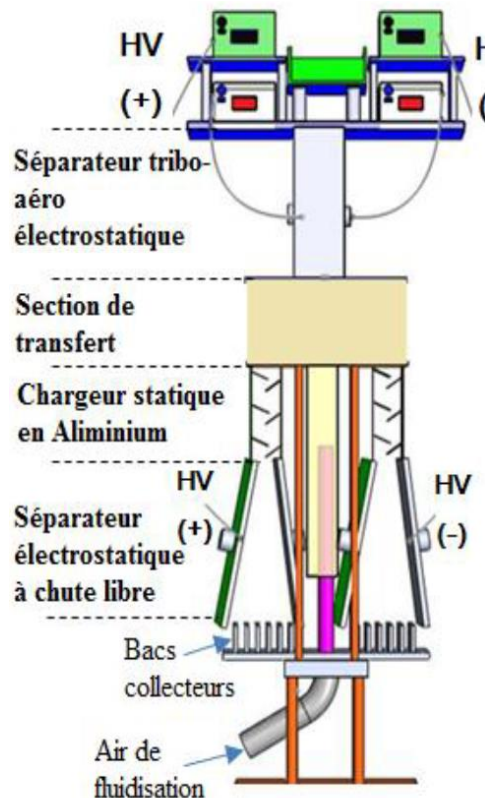


Figure 1.8. Schéma descriptif du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages

L'air de fluidisation est fourni par une soufflante à débit variable. Le diffuseur d'air (une plaque perforée située à l'extrémité inférieure de l'étage supérieur de l'installation) assure l'uniformité de la fluidisation du lit de granules. Ceux-ci sont introduits dans l'enceinte de séparation par un entonnoir, alimenté par un vibro-transporteur à débit ajustable. Sous l'action combinée des forces électriques, aérodynamiques et gravitationnelles, ils se séparent essentiellement en fonction de la polarité de leur charge et sortent par le bas de cette enceinte (Figure 1.8).

Deux chambres dirigent les deux flux de granules ainsi créés vers l'étage inférieur de l'installation, composé de deux séparateurs électrostatiques à chute libre. Les électrodes de ces séparateurs sont collées sur quatre plaques isolantes. Les extrémités supérieures de ces quatre plaques sont positionnées aux deux pivots, afin de se déplacer et former des angles allant de 0° jusqu'à 45° par rapport à la verticale. Les deux plaques centrales sont reliées à la terre, tandis que les deux électrodes extérieures, connectées à des alimentations haute tension de polarités opposées. La récupération des produits séparés est faite dans deux collecteurs identiques, comportant chacun dix compartiments. [93]

b) Principe de fonctionnement

Le mélange de particules à séparer est introduit dans l'enceinte de séparation par un entonnoir. Les particules sont ensuite mises en agitation à l'aide d'une soufflante à débit variable ce qui provoque la tribo-électrification des particules qui acquièrent des charges de signes opposés. Le champ électrique généré par les électrodes de séparateur (situé à l'étage supérieur) permet d'attirer les particules chargées et les séparer. Les granules séparés se dirigent et tombent librement entre les électrodes des deux séparateurs électrostatiques à chute libre (situé à l'étage inférieur) qui effectuent un second tri sélectif des matériaux. Les produits séparés sont récupérés dans deux collecteurs identiques.

Tableau 1.3. Caractéristiques d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille de mélange	Mode de chargement
Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages	Prototype de laboratoire	1 m × 0.3 m × 1.6 m	Isolant/Isolant/Isolant (multiple)	Granulaire > 1 mm	Effet tribo-électrique

1.3.1.2 Séparateur électrostatique à plaque

a) Description

Le séparateur est composé de deux électrodes dont l'une est de forme elliptique connectée à un générateur de haute tension continue tandis que l'autre est une plaque métallique reliée à la terre (Figure 1.9 et 1.10).

b) Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de l'électro-séparateur à plaque peut être décrit comme suit : les granules à séparer (mauvais et bon conducteurs) sont transportés par le vibro-transporteur électromagnétique et déposés sur l'électrode plaque reliée à la terre. Les particules glissent ensuite à la surface de la plaque et se comportent différemment suivant selon leurs caractéristiques électriques. [94].

- **Les granules conducteurs** : en arrivant dans la zone du champ électrique généré par l'électrode statique de forme elliptique, ils 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.
- **Les granules non conducteurs** : vu leur résistivité élevée, ils n'acquièrent aucune 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.

Tableau 1.4. Caractéristique d'un séparateur à plaque

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille de mélange	Mode de chargement
Séparateur à plaque	Modèle de laboratoire	0.8 m ×0.35m× 0.9 m	Isolant- conducteur Conducteur- conducteur	- Granulaire > 1 mm -Sous- millimétrique < 1 mm	Induction électrostatique

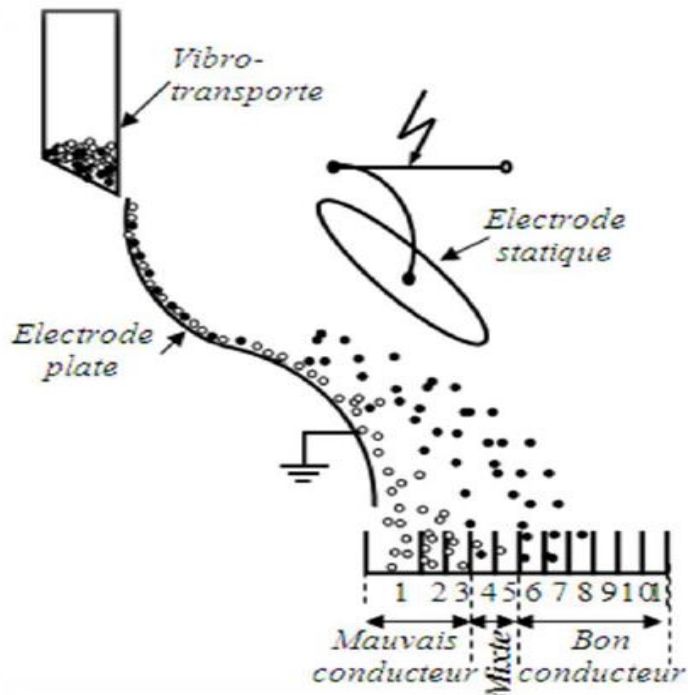


Figure 1.9 Schéma simplifié du principe de l'électro-séparation à plaque



Figure 1.10. Photographie de l'électro-séparateur à plaque

1.3.1.3 Séparateurs tribo-électrostatique à chute libre

a) Description

Le séparateur électrostatique de la (Figure 1.11), utilisé par l'Institut National de la Recherche Agronomique de Montpellier (INRA) a la particularité que les mélanges pulvérulents subissent un chargement triboélectrique dans un tube isolant, grâce à l'injection d'air par une soufflante. Une fois chargées, les particules sortent vers le séparateur à chute libre à travers un clapet commandé [95-96].

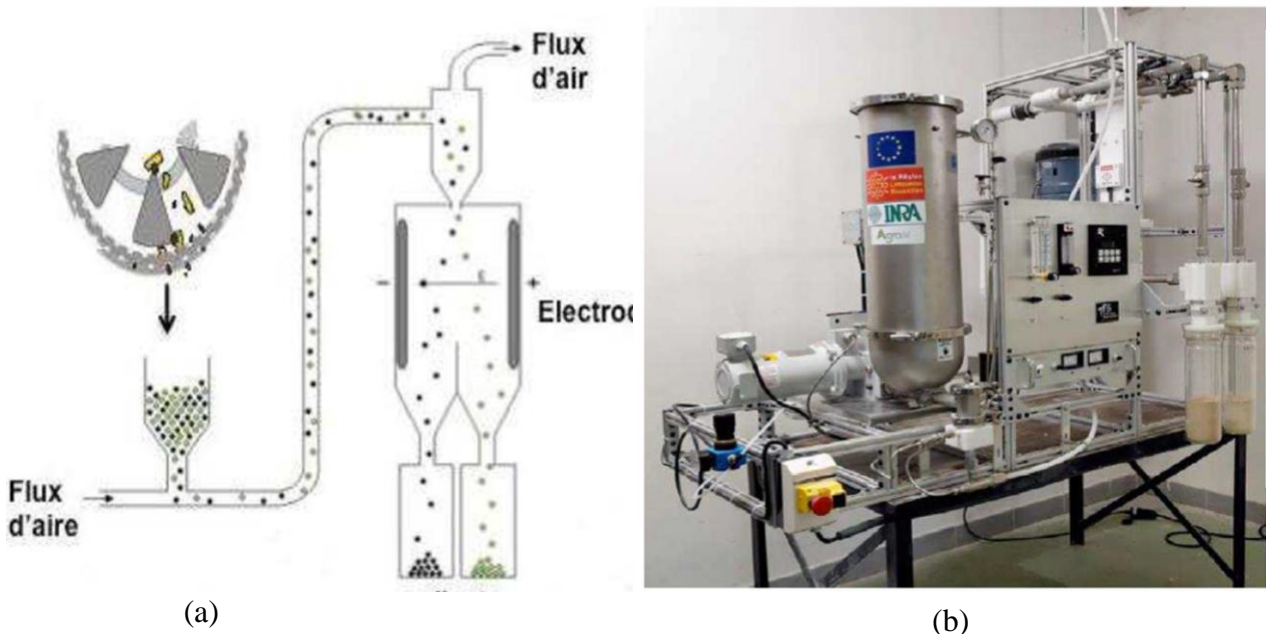


Figure 1.11. Séparateur tribo-aéroélectrostatique (INRA) ; (a) Schéma descriptif de l'installation, (b) Photographie

b) Principe de fonctionnement

Le mélange est chargé par effet triboélectrique (Figure 1.11 a), il tombe ensuite dans un fort champ électrique horizontal produit entre deux électrodes et situé dans une chambre isolante. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge.

Tableau 1.5 Caractéristique d'un séparateur tribo-électrostatique à chute libre

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement

Séparateurs tribo-électrostatique à chute libre	Modèle de laboratoire	2,10 m×0.6×0.9 m	Isolant – isolant (agroaliminaire)	Pulvérulent 50 µm à 1000 µm	Effet tribo électrique
---	-----------------------	------------------	------------------------------------	-----------------------------	------------------------

1.3.2 Séparateurs à électrodes dynamiques

1.3.2.1 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses

a) Description

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à bande transporteuse [97-100] a la particularité que ses électrodes sont deux convoyeurs métalliques liés à des générateurs de haute tension continue (Figure 1.12).

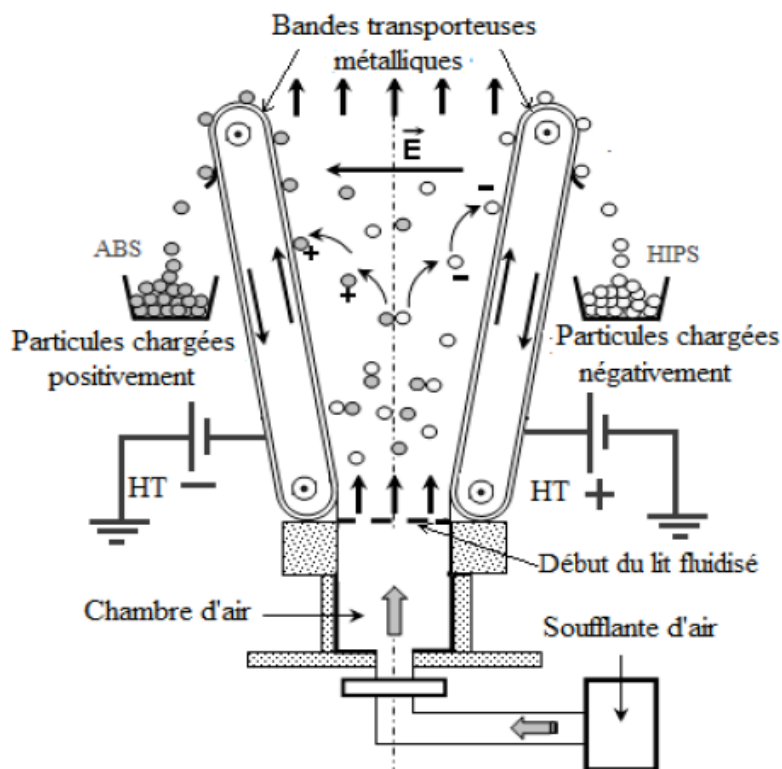


Figure 1.12. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses.

b) Principe de fonctionnement

Les granules chargés dans le lit fluidisé sont attirés par les convoyeurs et collés à la surface de la bande métallique de ces derniers par les forces électriques. La rotation des convoyeurs conduit ces particules jusqu'à des bacs de récupération prévus à cet effet.

Tableau 1.6 Caractéristiques du séparateur à bandes transporteuses

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement
Séparateur à bandes transporteuses	- Modèle de laboratoire - Prototype semi-industriel	1.2 m × 0.65 m × 1.1 m	Isolant /isolant	-Granulaire > 1 mm - Grosses particules 1mm à 4 mm	Effet tribo électrique

1.3.2.2 Séparateur à chute libre Carpco

a) Description

Le séparateur Carpco [101-102] (Figure 1.13), réalisé par la société américaine CARPCO est un séparateur tribo-électrostatique à chute libre, de grande capacité, pour la séparation de deux ou plusieurs matériaux. La nouvelle conception de cette installation est facilement adaptable à diverses applications, notamment à la séparation des minerais et des plastiques. Le séparateur électrostatique utilise un champ électrique produit par deux électrodes cylindriques rotatives, connectées à deux sources variables de haute tension, de polarités opposées, ajustables dans la gamme 0-60 kV.

b) Principe de fonctionnement

Après l'introduction du mélange granulaire isolant dans un champ électrique intense généré par deux électrodes cylindriques rotatives de polarités opposées ; l'une attire les particules chargées positivement et l'autre attire les particules chargées négativement.

Tableau 1.7. Caractéristique d'un séparateur à chute libre Carpco

Installation	Utilisation	Type de mélange	Taille des granules	Mode de chargement
Séparateur à chute libre Carpco	industrielle	Isolant- isolant	-Granulaire > 1 mm - Grosses particules 1mm à 4 mm	Effet tribo électrique

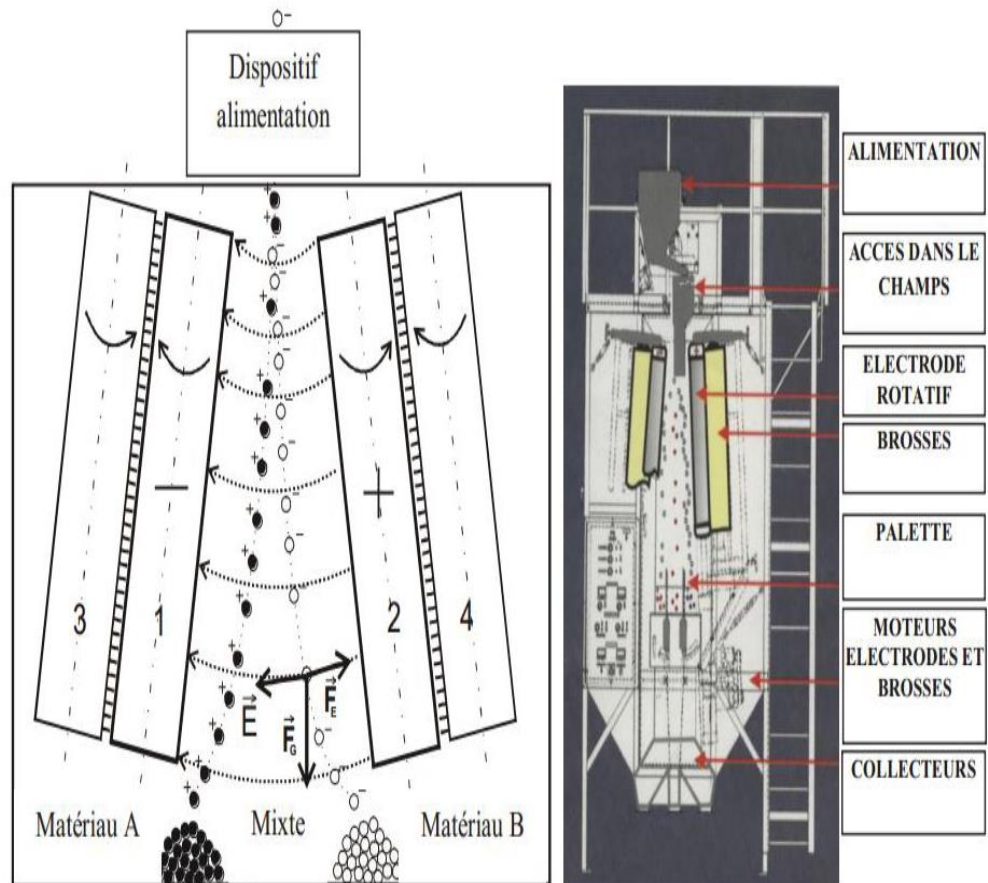


Figure 1.13. Séparateur tribo électrostatique à chute libre Carpco.

1.3.2.3 Séparateur tribo-aero-électrostatique a disques tournants

a) Description

Une quantité de matériaux est introduite dans un lit fluidisé généré dans une chambre de séparation ((2) ; 160 x 160 x 240 mm,) composée de parois en PMMA transparent. Une turbine de 1.5 kW (7) fourni le débit d'air souhaité. Le lit fluidisé se forme grâce à une plaque poreuse qui distribue uniformément l'air.

Les effets électrostatiques dans un lit fluidisé sont dus à des collisions entre les particules elles-mêmes et entre les particules et les parois de la chambre de séparation (2). Il en résulte la tribo-électrification des matériaux [103]. Le champ électrique est généré entre deux disques tournants ((3) ; diamètre : 220 mm ; épaisseur : 2 mm) plongés dans un lit fluidisé et situés à une distance d comprise entre 40 mm et 120 mm l'un de l'autre. Chaque disque est relié à un générateur de haute tension de polarité opposée et est entraîné en rotation par un moteur à vitesse variable (1). Les produits sont récupérés dans deux boîtes collectrices (5) placées à l'extérieur de la chambre de séparation.

b) Principe de fonctionnement

Les particules se chargent dans le lit fluidisé. Les disques tournants qui sont reliés à deux sources haute tension de polarité opposée attirent les particules contrairement polarisées. Des ballais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques vers le collecteur.

Tableau 1.8 Caractéristiques d'un séparateur à deux disques tournants

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement
séparateur tribo-aéro électrostatique à disques tournants	- Prototype de laboratoire - Prototype semi-industriel	1,8 m × 0,8 m × 0,6	Isolant-Isolant	Micronisé (50 µm à 1000 µm)	Effet triboélectrique



Figure 1.14. Photographie d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques (1) Moteurs électriques ; (2) Chambre de séparation ; (3) Electrodes-disques tournants ; (4) Collecteurs ; (5) Cages de Faraday ; (6) Balances électroniques ; (7) Turbine ; (8) Armoire électrique

1.4 Evaluation des facteurs influents

Dans toutes les entreprises, et quel que soit 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 (figure 1.15).

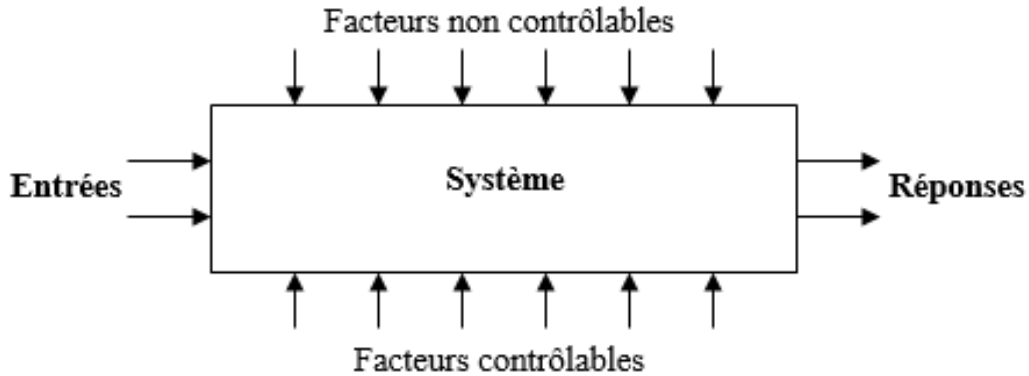


Figure 1.15. Schéma de L'environnement du système

Parmi les facteurs, on distinguera :

- ✓ Les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix.
- ✓ Les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment des choix (conditions climatiques, environnement d'utilisation..., etc.)
- ✓ Les facteurs d'entrées telles que la matière première dans un processus de fabrication.

La séparation électrostatique est un phénomène multifactoriel, le processus comprend plusieurs phases, chacune de ces phases est caractérisée par plusieurs facteurs mécaniques, électrique, électrostatiques, aérodynamique, ...etc. Il n'est pas simple de réaliser de telles relations entre réponse et facteurs, surtout s'il existe des interactions entre les facteurs.

1.4.1 Facteurs contrôlables

Dans un processus de séparation électrostatique, on ne peut pas étudier tous les facteurs susceptibles d'agir sur une réponse. Il faudra cependant en faire une liste aussi exhaustive que possible et distinguer les facteurs étudiés, les facteurs contrôlables mais non retenus dans l'étude (leur valeur devra être maintenue constante pendant toute l'étude).

Généralement les facteurs contrôlables habituellement rencontrés dans un séparateur électrostatique sont :

- La haute tension appliquée aux électrodes ;
- La distance inter-électrodes ;
- La polarité du potentiel appliqué sur une électrode ;
- La valeur du champ électrostatique ;
- Les courbures d'une électrode (ce paramètre concerne quelques types des électrodes bien déterminées) ;
- L'angle d'inclinaison d'une électrode par rapport à la verticale et/ou l'horizontale ;
- La vitesse de rotation d'une électrode (si l'électrode est dynamique) ;
- Le débit du produit à séparer ;
- La masse du produit à séparer ;
- Le taux du chargement du produit à séparer ;
- La fluidisation du produit à séparer (si le séparateur est un dispositif à lit fluidisé) ;
- La position du collecteur pendant la séparation ;
- La vitesse du transport du produit à séparer vers la zone de séparation (si le séparateur est un dispositif à convoyeur).

1.4.2 Facteurs non contrôlables

Les facteurs non contrôlables, dont les niveaux varient de façon anarchique d'une étude à l'autre lors de l'expérimentation, ont pour effet de faire fluctuer la réponse mesurée. On devra donc s'assurer que ces fluctuations sont aléatoires et estimer cette dispersion des réponses afin d'en tenir compte lors de l'analyse des résultats. Pour ce faire, il est fréquent d'être obligé d'effectuer des études complémentaires. Dans la séparation électrostatique, ce type des facteurs sont, ordinairement :

- Des conditions climatiques (température et humidité) ;
- L'environnement externe d'utilisation du séparateur ;
- Matériaux constituant le séparateur ;
- Quelques phénomènes physiques à la fois indésirable et inévitable lors du processus de séparation.

1.4.3 Facteurs d'entrées

Un système de séparation électrostatique est utile principalement pour trier un mélange des particules qui représentent le facteur principal d'entrée d'un tel système. Ces particules

généralement sont issues du processus de broyage, préalablement chargé électriquement dans certains cas. Elles peuvent être des isolants, des conducteurs ou des semi-conducteurs. Leurs tailles varient selon le broyage et le tamisage, elles peuvent être des particules pulvérisées, micronisées, sous-millimétriques, millimétriques ou grosses particules.

1.4.4 Interaction factorielle

Quand les facteurs agissent indépendamment on dit alors qu'il n'y a pas d'interaction entre les facteurs. Si l'effet d'un facteur dépend du niveau de l'autre : on dit qu'il y a interaction entre les facteurs. Elle se définit en grandeur comme la moitié de la différence entre l'effet moyen d'un facteur au niveau haut de l'autre et de l'effet moyen de ce facteur au niveau bas de l'autre.

On trouve souvent dans les applications des interactions de 2 facteurs, il est tout à fait envisageable que 2 facteurs n'agissent pas indépendamment sur la réponse. En revanche, l'existence d'une interaction de 3 facteurs suppose un système complexe mettant en jeu ces 3 facteurs simultanément et se rencontre très rarement.

Concernant un processus de séparation électrostatique, c'est des interactions de second ordre qu'on en retrouve. L'une des conditions primordiales de la réussite de la séparation est l'application d'un champ électrique intense dans la zone de tri, un tel champ devient désavantageux pour le tri des particules de très petite masse (pulvérisées et micronisées) qui vont être soumises à des forces électrostatiques très dominantes par rapport aux autres forces, ce qui conduit à diminuer la qualité de séparation. Ces deux paramètres (masse et champ électrique) représentent une interaction factorielle.

Un autre exemple d'une interaction entre les facteurs du second ordre, se manifeste entre la vitesse de rotations d'une électrode tournante et la tension appliquée sur cette électrode. Pour les applications industrielles, un débit élevé du produit à récupérer est exigé, même mentionné sur le cahier de charge de l'installation. Pour satisfaire cette exigence, il faut augmenter la vitesse du processus, si le procédé est dynamique donc il faut augmenter la vitesse de rotation de l'électrode tournante et/ou de la bande tournante, et comme conséquence on aura une grande force centrifugeuse, qu'elle va détacher les particules avant leur chargement suffisant à la bonne séparation. On doit trouver un compromis entre ces deux facteurs qui sont en interaction (la tension et la vitesse de rotation).

1.4.5 Exemples de la littérature

Cette partie est consacrée à la mise en place d'une étude factorielle du comportement réel d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant (Figure 1.16) qualifié de complexe à

cause de l'interaction d'un ensemble de phénomènes. Vu la complexité de ces phénomènes il est envisageable d'étudier le comportement de cette installation par un modèle empirique.

On cherche à travers cette étude à améliorer le comportement d'un séparateur électrostatique utilisé dans la récupération des produits conducteurs et isolants à partir des déchets de câbles électriques (Figure 1.17). L'installation utilisée dans cette application est équipée de trois compartiments réservés aux produits conducteurs, isolants et mixtes.



Figure 1.16 : Séparateur électrostatique à cylindre tournant SELMEG (Laboratoire IRECOM ; Université de Sidi Bel Abbese ; Algérie)

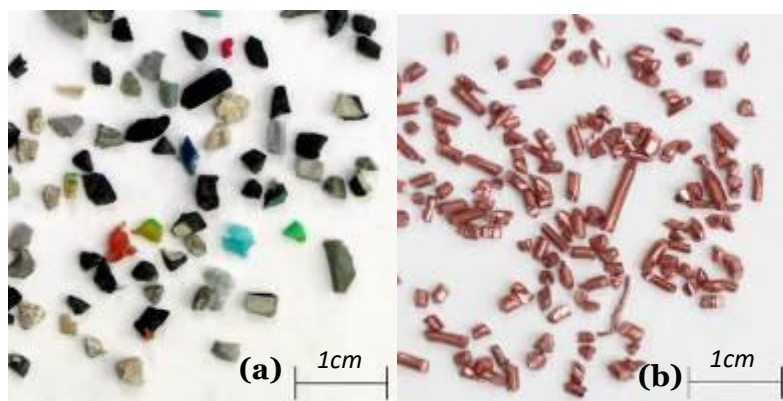


Figure 1.17. Déchets de câbles électriques récupérés à la sortie d'un broyeur (a) : granules isolantes (b) : granules conductrices

Dans cette installation la qualité d'une séparation peut être quantifiée par plusieurs critères de performances tels que : la *récupération* et la *pureté* des produits conducteurs et isolants et le *pourcentage* du produit mixte définis respectivement par les relations (1.2-1.4) [104-105]

$$Réc(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \times 100 \quad (1.2)$$

$$Pur(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tci}} \times 100 \quad (1.3)$$

$$M(\%) = \frac{M}{m_t} \quad (1.4)$$

Avec

- m_t : masse totale du mélange granulaire introduit dans le séparateur,
- m_{it} : masse totale du produit i introduit dans le séparateur ;
- m_{ic} : masse du produit i collecté dans la partie qui lui est réservé,
- m_{tci} : masse totale du produit collecté dans le compartiment réservé au produit i .
- M : masse totale du produit mixte

L'étude des effets des facteurs d'un séparateur à cylindre tournant utilisé pour le traitement des *DEEE* montre la présence d'un nombre important de facteurs liés aux paramètres géométriques et électriques de l'installation [106-107]. Ces facteurs exercent une influence significative sur l'ensemble des critères de performance de l'installation.

Dans cette étude la qualité d'une séparation est modélisée en fonction de trois facteurs contrôlés électriquement. Ces facteurs sont : la vitesse de rotation du cylindre tournant « n [tr/min] », la valeur de la haute tension appliquée aux électrodes couronne et statique « u [kV] » ; et le débit du mélange introduit dans le séparateur électrostatique « d [kg/h] ». Des essais préliminaires ont permis de déterminer les plages de variation de chaque facteur susceptible de conduire à des séparations optimales (table 1.9)

Un modèle des critères de performance du séparateur en fonction des facteurs regroupés dans la table 1.9 peut être réalisé à l'aide d'un modèle empirique. Ce type de modèle (*modèle type boîte noire*) est généralement construit à partir d'une base de données expérimentales, qui regroupe des valeurs numériques du critère de performance étudié et les niveaux des facteurs associés.

Table 1.9 : Domaine d'étude

Facteur	min	Max
Vitesse n [tr/min]	60	100
Tension u [kV]	26	30
Débit d [kg/h]	6	12

Dans cette étude on veut choisir une forme de modèle qui définit correctement la réponse d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant en fonction de la valeur de la haute tension appliquée aux électrodes couronne et statique de la vitesse de rotation du cylindre et du débit du mélange traité. Parmi tous les modèles possibles on cherche celui qui possède le nombre le plus faible de paramètres et qui peut être mis en place à partir d'un nombre limité d'expériences. On commence par la mise en place d'un modèle polynomial du premier ordre dont la forme est définie par la relation suivante :

$$Y = a_0 + a_1n + a_2u + a_3d \quad (1.5)$$

Où n , u , d sont les facteurs liés au critère de performance Y .

Etant donné qu'on a retenu trois facteurs, on a au total 4 coefficients à déterminer; la base de données expérimentale devra donc être constituée au minimum de 4 expériences. Pour réaliser ces expériences chaque facteur doit être doté d'au moins 2 modalités.

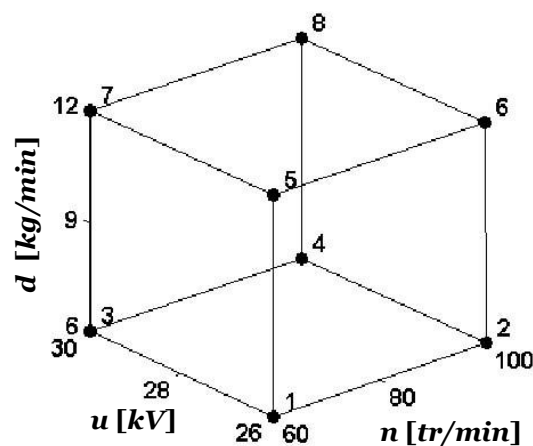


Figure 1.18 : Distribution des points expérimentaux utilisés dans l'élaboration d'un modèle linéaire

Pour définir le domaine expérimental associé à cette application on va exploiter les règles d'orthogonalité et la permutation entre les modalités des facteurs. Les combinaisons possibles entre les modalités de ces facteurs permettent de réaliser 8 expériences. La distribution de ces expériences dans l'espace de recherche est représentée par la figure 1.18.

Dans chaque expérience, le séparateur électrostatique est alimenté par 200 g de produit granulaire issu de déchets de câbles électriques. Le mélange contient 100 g du produit conducteur et 100 g du produit isolant.

Après la séparation, la masse du produit récupéré à la sortie du séparateur est mesurée avec une balance électronique à haute précision (0,01 g). Les résultats expérimentaux de la récupération du produit non conducteur sont regroupés dans le tableau 1.10.

Tableau 1.10 : Expériences réalisées pour l'élaboration d'un modèle linéaire

Expérience	<i>n</i>	<i>u</i>	<i>D</i>	<i>Y_{mes}</i>
N°	[tr/min]	[kV]	[kg/min]	[%]
1	60	26	6	78,73
2	100	26	6	74,39
3	60	30	6	87,62
4	100	30	6	75,25
5	60	26	12	43,15
6	100	26	12	19,48
7	60	30	12	58,12
8	100	30	12	73,87

Le modèle obtenu est représenté mathématiquement par la relation (1.6) et deux surfaces de réponses sont représentées sur la figure 1.19.

$$Y_{cal} = 63.83 - 3.08 n + 9.89 u - 15.17 d \quad (1.6)$$

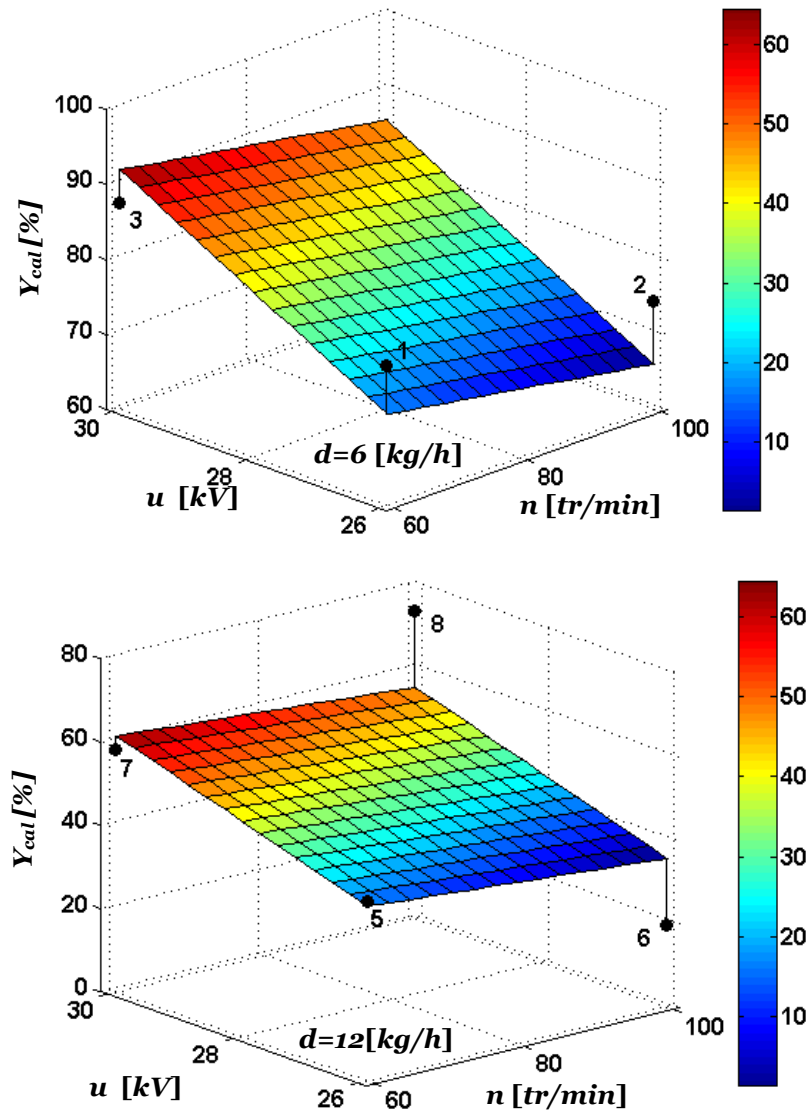


Figure 1.19. Surfaces de réponses du modèle linéaire de la récupération du produit non conducteur élaboré à partir des expériences { 1-8 }

1.5 Modélisation et optimisation expérimentales

Une expérience est une intervention volontaire dans un système en fonctionnement pour mesurer les effets de cette intervention. Seule l'expérience est capable d'apporter des renseignements sur les relations de cause à effets.

L'expérimentation coûte cher, il faut avoir pour objectif d'obtenir les informations les plus fiables et les plus efficaces possibles en un minimum d'essais, donc il y a une nécessité d'une recherche expérimentale bien planifiée, l'expérimentation doit être optimisée.

Un facteur (quantitatif ou qualitatif) est un état du système étudié dont la variation est susceptible d'en modifier le fonctionnement. La réponse du système correspond au paramètre mesuré ou observé pour connaître l'effet des facteurs étudiés sur le système.

Lors de l'étude d'un phénomène, plusieurs questions se posent, auxquelles répondent différents types de plans. On peut distinguer 3 grandes étapes dans l'acquisition des connaissances :

- ① Recherche des facteurs influents
- ② Modélisation
- ③ Optimisation

Parmi tous les facteurs susceptibles d'influer sur la ou les réponses mesurées du phénomène :

- lesquels ont une influence significative ?
- que vaut quantitativement cette influence ?
- existe-t-il des interactions entre facteurs ?

Quand les facteurs influents ont été identifiés et leur importance quantifiée, on recherche ensuite l'équation permettant de décrire les variations de la réponse étudiée en fonction de celles des facteurs influents ; cette seconde étape constitue la modélisation.

Pour finir, on cherche en général à déterminer quelles conditions expérimentales permettent d'obtenir le meilleur résultat pour la réponse. Cette étape porte le nom d'optimisation.

Les divers aspects du phénomène étudié se traduisent par autant de réponses possibles ; les réponses choisies seront celles qui caractérisent le mieux les propriétés intéressantes à l'expérimentateur pour son application ; chaque réponse sera analysée d'abord seule, puis une synthèse globale sera faite ensuite en tenant compte des résultats obtenus avec toutes les réponses.

Il existe deux types de modélisation, modélisation expérimentale et modélisation analytique :

1.5.1 Modélisation expérimentale (modèle type boîte noire)

Ce type de modèle (modèle type boîte noire) est généralement construit à partir d'une base de données expérimentales, qui regroupe des valeurs numériques du critère de performance étudié et les niveaux des facteurs associés. La modélisation dans ce cas consiste à estimer les paramètres du modèle mathématique pour qu'il soit capable de prédire les résultats expérimentaux.

Dans la littérature on trouve deux types de modèles qui sont adaptés à la problématique de la séparation électrostatique à savoir les modèles linéaire et non linéaire [108]. Le premier type de modèle a été largement exploité dans la modélisation des processus électrostatiques

autour d'un point de fonctionnement optimal [109-111]. La forme généralisée des fonctions linéaires utilisées dans l'ensemble de ces travaux est :

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i h_i(x) \quad (1.7)$$

Où les $h_i(x)$ sont des fonctions non paramétrées d'une ou plusieurs variables groupées dans le vecteur x , et α_i les paramètres de la fonction $f(x)$.

Le deuxième type de modèle qui est considéré comme non linéaire a aussi été largement utilisé pour la modélisation des processus industriels [112-113]. Cependant, l'exploitation de ce type de modèle dans le domaine de la séparation électrostatique reste limitée. La forme généralisée de ce type de modèle est :

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i h_i(x, \beta_i) \quad (1.8)$$

Où les β_i sont des combinaisons linéaires de fonctions paramétrées qui représentent des vecteurs de paramètres des fonctions h_i , et α_i représentent les paramètres de la fonction $f(x)$.

Quand l'objectif est la modélisation et l'optimisation d'un processus de séparation électrostatique, il est recommandable d'utiliser la méthodologie des plans d'expériences, par cette méthode, il est possible d'obtenir le maximum de renseignements sur le fonctionnement d'un processus avec le minimum d'essais. Cette méthode prescrit le nombre d'expériences à accomplir afin d'atteindre un objectif bien déterminé et prédit le comportement des systèmes dans le domaine d'utilisation en fonction de plusieurs facteurs qui peuvent varier simultanément ; elle permet d'évaluer les effets de ces facteurs et leurs interactions [114-116]. La modélisation ainsi que l'optimisation de ce processus [117-118] peut se faire par la réalisation, soit d'un plan factoriel polynôme de premier degré, soit par un plan factoriel composite qui conduit à un modèle polynôme de second degré. Les plans d'expériences complets sont les plus simples, ils sont aussi les plus utilisés.

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

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,i} x_i^2, i, j = 1, 2, \dots, m \quad (1.9)$$

Où x_i a la valeur -1 pour le niveau inférieur $u_{i\min}$ du facteur et la valeur +1 pour le niveau supérieur du même facteur $u_{i\max}$.

La construction de plans composites centrés consiste à rajouter des points en étoile à partir d'un plan factoriel complet. Ces points sont positionnés à une distance $\pm\alpha$ du centre du domaine suivant les axes des facteurs (figure 1.20).

L'ensemble de ces points constitue un système au sein duquel on ne fait varier qu'un seul facteur à la fois. Il y a donc $2k$ points en étoile, k est le nombre des variables du plan d'expériences.

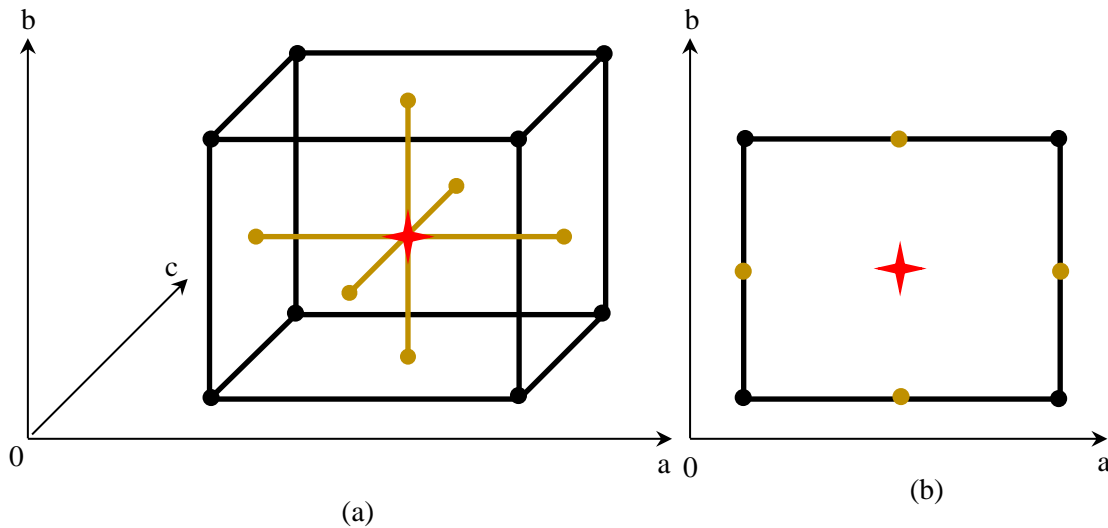


Figure 1.20. Représentation graphique des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences composite pour un domaine défini par 3 facteurs (a) ou 2 facteurs (b)

Le domaine de variation d'un facteur est représenté par un segment, tandis que le point de mesure est marqué par un point. L'étoile marque le centre du domaine total de la variation, correspondant du centre de chaque facteur. Le nombre total des essais N , pour K facteurs s'écrit:

$$N = 2^k + 2.k + 3 \tag{1.10}$$

1.5.2 Modélisation analytique (par modèle physique ou modèle type boîte blanche)

Une modélisation type boîte blanche (de l'anglais white box), ou boîte transparente, est un module d'un système dont on peut prévoir le fonctionnement interne car on connaît les caractéristiques de fonctionnement de l'ensemble des éléments qui le composent. Autrement dit une boîte blanche est un module qui comporte aussi peu de boîtes noires que possible.

Cette modélisation est réalisable théoriquement en faisant exclusivement appel à des modèles de type boîte blanche basés sur les équations non-linéaires de la physique régissant le fonctionnement du procédé. Par définition, cette procédure demande à l'utilisateur d'avoir des

connaissances très avancées dans de nombreux domaines et conduit généralement à des modèles complexes.

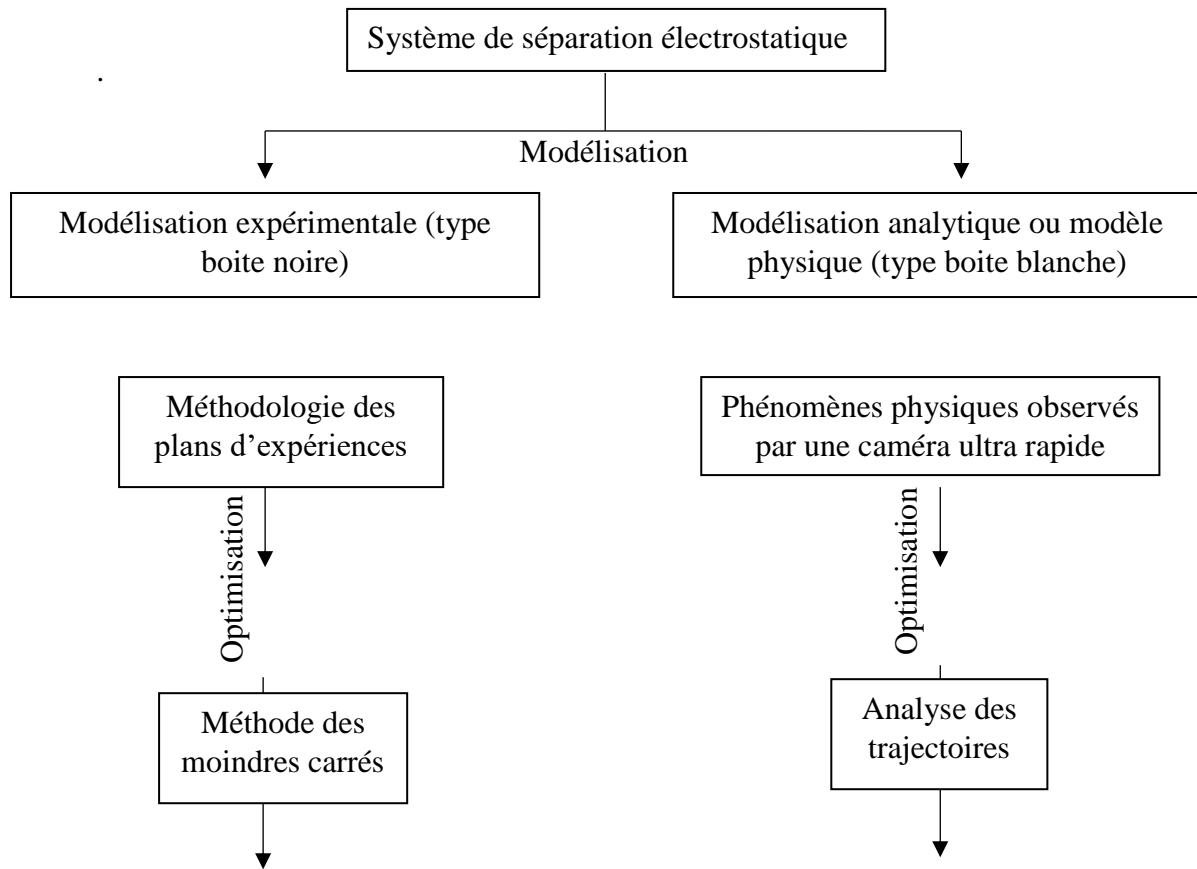


Figure 1.21. Représentation schématique de la modélisation et de l'optimisation d'un système de séparation électrostatique

Conclusion

La séparation électrostatique est une technologie de recyclage efficace et robuste, caractérisée par un faible coût, une consommation d'énergie réduite et une remarquable facilité d'utilisation. Il existe une multitude d'installations électrostatiques qui traitent différents types de mélange de matériaux comme les déchets DEEE, dont la quantité ne cesse d'augmenter, et qui sont composés d'un mélange de matériaux dont les caractéristiques mécaniques et électriques sont totalement différentes.

Le processus de séparation électrostatique est multifactoriel, où plusieurs phénomènes physiques interagissent. Cela nécessite une étude approfondie sur les différents facteurs qui interviennent dans ce processus, afin d'optimiser le fonctionnement du séparateur électrostatique et déterminer judicieusement les paramètres électriques et géométriques.

Chapitre 2

Techniques expérimentales et numériques mises en œuvre

L'optimisation du processus de séparation électrostatique nécessite l'élaboration d'un modèle numérique permettant de prédire les trajectoires des particules de différentes natures et formes, qu'on peut trouver dans les déchets DEEE. Les travaux sont menés sur deux installations électrostatiques à l'institut PPRIME. Ces installations permettent notamment d'étudier les phénomènes de charge des matériaux par induction électrostatique et par décharge couronne, en vue de leur séparation dans un champ électrique intense.

Les modes de chargement de particules, les différentes techniques de mesure utilisées ainsi que l'outil d'acquisition d'images ultra rapide vont être présentés dans ce présent chapitre. La modélisation numérique du processus de séparation électrostatique et qui résout l'équation du mouvement ainsi que les phénomènes qui se produisent au cours de la séparation sont aussi illustrées dans ce chapitre.

2.1. Installations expérimentales

2.1.1 Séparateur électrostatique multifonctionnel

a) Description

Le séparateur électrostatique multifonctionnel (Figure 2.1) [119-122], est capable de trier des matériaux micronisés granulaires ou sous-millimétriques grâce à l'utilisation de trois mécanismes physiques différents de chargement électrique : l'effet triboélectrique, l'effet couronne et l'induction électrostatique. Les particules à séparer sont déposées en monocouche sur la surface du convoyeur à bande métallique (1) (longueur : 700 mm ; largeur : 70 mm), qui est connecté à la terre et entraîné en par un moteur (2) lui-même relié à un variateur de vitesse électronique. Une électrode cylindrique tournante (3) (acier inoxydable ; diamètre : 30 mm ; longueur : 70 mm) est connectée à un générateur de haute tension (4) réversible (positive ou négative).

b) Principe de fonctionnement

Une zone de champ électrique intense est générée entre l'électrode cylindrique reliée à la haute tension et le convoyeur à bande métallique mis à la terre. L'électrode haute tension

attire les particules contrairement polarisées (produit A) et repoussent celles de même signe (produit B), permettant ainsi la séparation.

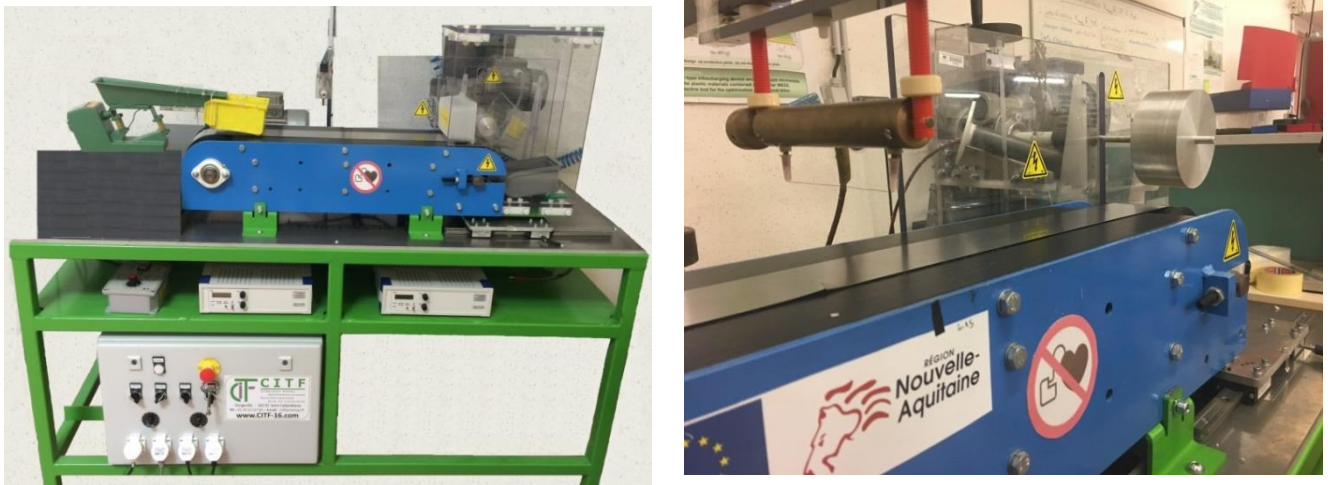


Figure 2.1. Séparateur électrostatique à tapis roulant.

Tableau 2.1 Caractéristiques d'un séparateur électrostatique multifonctionnel

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement
Séparateur multifonctionnel	Prototype de laboratoire	0.9 m × 0.2 m × 0.2 m	- Isolant/ Conducteur - Isolant/ Isolant - Conducteur/ conducteur	- Granulaire > 1 mm - Sous-millimétrique < 1mm - Pulvérulent 50µm à 1000µm	- Induction électrostatique - Effet couronne - Effet triboélectrique

2.1.2 Séparateur couronne-électrostatique à tambour

a) Description

Le séparateur à tambour [123], illustré sur la (Figure 2.2), est le modèle le plus utilisé. Il est composé de trois électrodes, dont deux électrodes sont connectées à un générateur haute tension et une électrode cylindrique tournante est reliée à la terre.

b) Principe de fonctionnement

Son principe de fonctionnement consiste à la création de charges électriques par ionisation de l'air grâce à une électrode couronne. Ainsi les granules déposés par le vibro-transporteur sur le cylindre tournant (tambour) acquièrent une charge électrique de même polarité que la haute tension appliquée.



Figure 2.2 séparateur couronne-électrostatique à tambour

Les particules non-conductrices, chargées par effet couronne, sont collées à la surface du tambour sous l'effet de la force électrique et la force d'image.

Les granules conducteurs perdent rapidement leurs charges à travers le tambour relié à la terre, en arrivant dans la zone du champ électrostatique généré par l'électrode statique de forme elliptique, ils acquièrent par induction électrique une charge de polarité opposée à la haute tension appliquée. Ils sont ensuite attirés par l'électrode elliptique et déposés dans la partie droite du collecteur.

Tableau 2.2 Caractéristiques d'un séparateur à tambour

Installation	Utilisation	Dimensions	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement
Séparateur à tambour	- Prototype de laboratoire - Prototype industriel	1.1 m × 0.5 m × 0.8 m	Isolant – conducteur	- Granulaire > 1 mm - Grosse particules 1 mm à 4 mm - Sous-millimétrique < 1 mm	- Induction électrostatique - Effet couronne

2.2 Procédure expérimentale

2.2.1 Matériaux utilisés

Les particules utilisées pour l'étude expérimentale dans le 3ème chapitre et le 4ème chapitre sont de différentes natures et formes, nous utiliserons des particules isolantes de polypropylène PP, HIPS et ABS issue du broyage de différentes tailles.

Pour étudier le comportement des particules conductrices nous allons prendre des particules en plastique (PP) sphérique, et les recouvrir d'une fine couche conductrice de Nickel, dans le but de réduire leurs masses, sachant que les matériaux conducteurs ont une densité assez élevée, la force de gravité sera dominante, et il faut une tension très élevée pour pouvoir contrôler leurs trajectoires.

2.2.2 Mesure simultanée de charge et de masse

La mesure de la charge électrique est un processus fortement sensible aux conditions environnementales, il peut être à l'origine de nombreuses erreurs lors du traitement des données. C'est pour cela que l'interprétation de ces données ne peut être faite que par la bonne compréhension des processus physiques et les hypothèses qui sont proposées.

Le dispositif le plus connu et le plus utilisé pour la mesure de cette charge est la cage de Faraday, souvent constituée de deux cylindres concentriques séparés par un isolant. Le cylindre extérieur est relié à la terre pour réduire les perturbations électriques extérieures tandis que le cylindre intérieur est connecté à un électromètre qui permet d'évaluer la charge électrique des particules accumulées dans la cage [124].

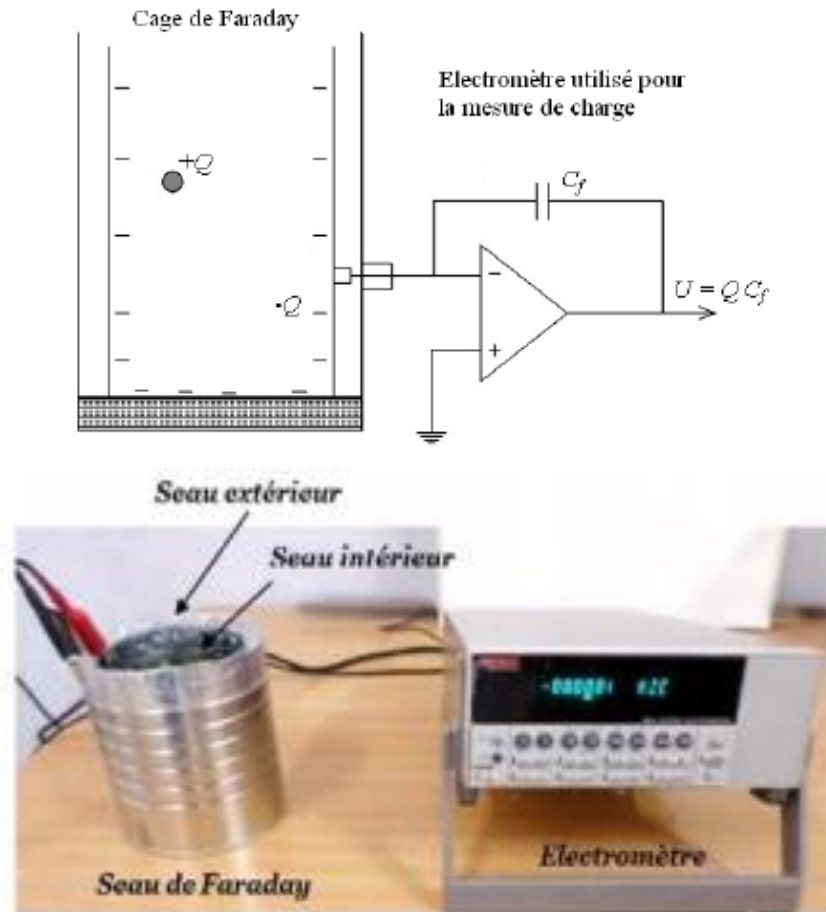


Figure 2.3. Mesure de la charge des particules collectées dans une cage de Faraday connectée à un électromètre

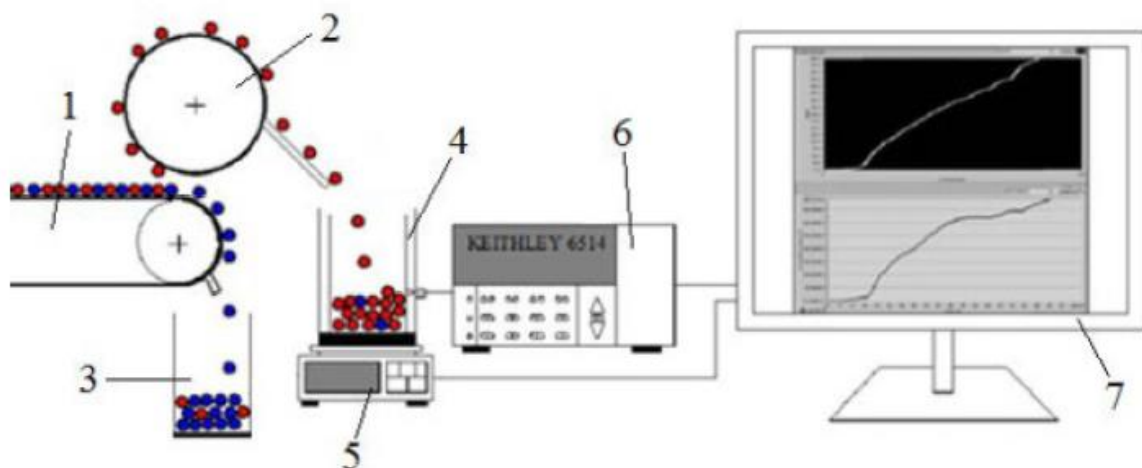


Figure 2.4. Schéma de principe du système de mesure simultanée de la charge et de la masse des particules collectées après séparation ; 1 : Convoyeur à bande métallique (électrode liée à la terre) ; 2 : Electrode cylindrique tournante ; 3 : Collecteur des produits restés attachés à la bande métallique liée à la terre ; 4 : Cage de Faraday où sont collectés les particules attachées à l'électrode cylindrique tournante ; 5 : Balance électronique (résolution : 0,001 g) ; 6 : Electromètre utilisé pour la mesure de charge ; 7 : PC équipé de carte d'acquisition et du logiciel Labview, pour enregistrer les valeurs instantanées de la charge et de la masse des particules collectées après séparation.

Les valeurs de charges mesurées peuvent être enregistrées en connectant l'électromètre (Keithley Instruments, modèle 6514) à un PC équipé d'une carte d'acquisition de données, en utilisant un instrument virtuel, créé avec LabView (Figure 2.3), la masse peut être mesurée simultanément en utilisant une balance électronique (KERN, modèle PCB 250-3, résolution 0,001 g), connectée au même ordinateur (Figure 2.4).

2.2.3 Visualisation des trajectoires des particules

Les trajectoires des particules sont enregistrées à l'aide d'une caméra ultra rapide SpeedSense VEO series, avec une résolution égale à 4 MP, et une fréquence d'acquisition qui peut atteindre 800 fps (Frame Per Seconde).



Figure 2.5. Caméra ultra-rapide SpeedSense VEO (IUT d'Angoulême)

La caméra est pilotée par un logiciel d'acquisition et de traitement d'image DynamicStudio fourni par la société « Dantec Dynamics » qui développe et commercialise des systèmes de mesure intégrés pour le diagnostic et la recherche en mécanique des fluides, mécanique des solides, microfluidique, analyse de pulvérisation et technologie de combustion, ces systèmes sont basés sur des technologies d'optique laser, d'imagerie et de capteurs haut de gamme.

Dans nos travaux, nous avons utilisé le module « Shadow Tracking & sizing », ce mode nous a permis de capturer des images de bonne qualité où les particules sont très facilement détectables dans la zone de séparation, cette technique nécessite une source de lumière dans l'arrière-plan. Nous avons utilisé des panneaux à LED caractérisés par une lumière blanche constante. Dans la Figure 2.6 le panneau à LED est placé derrière les électrodes.

Pour la visualisation des trajectoires complètes et les convertir en images exploitables nous avons utilisé le module de traitement d'image min-max sur l'ensemble des images enregistrées pour chaque particule.



Figure 2.6. Disposition du séparateur électrostatique Prodecologia et de la caméra vidéo à haute vitesse SpeedSense.

2.3. Modélisation numérique des processus de séparation électrostatique

2.3.1. Calcul du champ électrique

Dans une configuration électrode fil-plan, que nous avons utilisé pour les deux séparateurs électrostatiques (fil-convoyeur et fil-tambour), la distribution du potentiel est gouvernée par l'équation de Poisson :

$$\Delta V + \frac{\rho}{\varepsilon_0} = 0 \quad (2.1)$$

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \vec{j} = 0 \quad (2.2)$$

Où \vec{j} est la densité du courant définie par la forme approximative suivante :

$$\vec{j} = \rho K_i \vec{E} \quad (2.3)$$

Tels que $\vec{j} = \rho K_i \vec{E}$ la densité du courant de la décharge couronne lorsque le courant de diffusion est négligé et K_i la mobilité des ions.

Dans un régime stationnaire l'équation de la conservation de charge prend la forme suivante :

$$\text{div} \vec{j} = 0 \quad (2.4)$$

L'utilisation des grandeurs de références telles que la distance inter électrode d et la tension appliqué à l'électrode couronne V_0 permettent de définir des paramètres de références tel que :

- Le rapport V_0/d pour le champ électrique,
- L'expression $\varepsilon_0 V_0/d^2$ pour la densité de charge,
- L'expression $K\varepsilon_0 V_0^2/d^3$ pour la densité de courant j

Où ε_0 est la permittivité du vide (la permittivité de l'air est très proche de celle du vide). Sous forme adimensionnelle les équations (2.1) et (2.3) s'écrivent :

$$\Delta V = -\rho \quad (2.5)$$

$$\text{div}(\vec{j}) = \text{div}(\rho \cdot \vec{E}) = -\text{div}(\rho \cdot \text{grad}(V)) = 0 \quad (2.6)$$

Avec les expressions

$$\vec{j} = \rho \cdot \vec{E} \quad (2.7)$$

$$\vec{E} = -\text{grad}(V) \quad (2.8)$$

2.3.2. Charges et forces électrostatiques (hypothèses de calculs et formules usuelles)

Au résultat de l'action des forces électriques du champ, crée entre l'électrode couronne et l'électrode cylindrique, les charges électriques se trouvant dans une particule conductrice se séparent. Les électrons libres de la particule conductrice se mettent en mouvement dans la direction opposée à la direction du champ électrique. A cet effet, les particules conductrices en contact avec le cylindre tournant relié à la terre acquièrent des charges électriques « *charges induites* » de signes opposés par rapport à la polarité de l'électrode couronne. La charge maximale Q_{\max} emportée par une particule sphérique en contact avec le cylindre tournant peut être évalué par la formule suivante :

$$Q_{\max} = \frac{2}{3} \pi^3 \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2 \cdot E \quad (2.9)$$

Tels que :

ε_0 : Permittivité du vide

r : Rayon de la particule sphérique

La charge maximale induite dans une particule conductrice donne la naissance à une force électrique d'attraction entre la particule et l'électrode couronne. La forme analytique de la force électrique exercée sur une particule est évaluée par :

$$F_e = Q_{\max} \cdot E \quad (2.10)$$

Lorsque la particule est en contact avec le cylindre tournant elle est soumise à la force de l'attraction terrestre F_g , la force électrique F_e et la force de contre réaction du cylindre tournant F_{cr} .

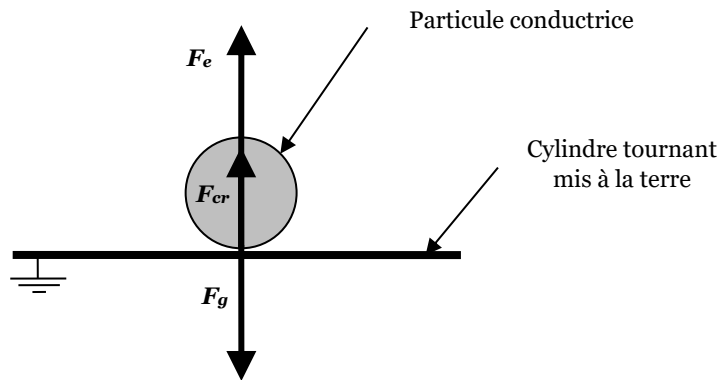


Figure 2.7. Les forces agissent sur une particule conductrice en contact avec le cylindre tournant

Au moment où la particule n'est plus en contact avec l'électrode cylindrique sa charge $Q_{t=0} = Q_{\max}$ est neutralisée progressivement par bombardement ionique. La variation de la charge Q de la particule en fonction du temps est régit par l'équation suivante :

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{(Q - Q_s)^2}{\tau \cdot Q} \quad (2.11)$$

La constante du temps τ est définie par :

$$\tau = \frac{4\varepsilon_0}{\rho K_i} \quad (2.12)$$

Tels que :

τ : Constante du temps

K_i : Mobilité des ions dans l'air $K_i = 2 \times 10^{-4} m^2 / V \cdot s$

ρ : Densité de la charge d'espace

Q_s Représente la charge de saturation de la particule conductrice définie par :

$$Q_s = -12 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2 \cdot E \quad (2.13)$$

En examinant les équations précédentes, il s'avère que l'évaluation de la charge acquise par une particule conductrice implique la connaissance de l'intensité du champ électrique E et la densité de charge ρ dans l'espace inter électrode.

Selon la relation (2.9), la charge maximale acquise par une particule conductrice en contact avec le cylindre tournant dépend exclusivement de l'intensité du champ électrique au voisinage de l'électrode mise à la terre.

Les particules non conductrices se différencient des particules conductrices par l'absence d'électrons libres. Sous l'effet d'un champ électrique il y aura un écartement élastique des charges électriques dans la matière des particules au niveau moléculaire. La charge positive d'une molécule se déplace dans le sens du champ électrique et la charge négative dans le sens opposé. Au résultat de l'influence du champ électrique, des charges électriques apparaissent sur la surface de la particule. Ce phénomène porte le nom de *polarisation du diélectrique*.

Différemment des charges induites sur une particule conductrice, les charges polarisées d'un diélectrique ne peuvent être séparées les unes des autres. Quand le champ électrique disparaît, la polarisation du diélectrique disparaît aussi. Donc, la polarisation n'a aucun intérêt dans le processus de séparation électrostatique. Cependant, sous un bombardement ionique, une particule non conductrice de rayon r et de constant diélectrique ε_r acquiert une charge électrique dont la valeur varie en fonction du temps suivant l'équation (2.11). La charge de saturation Q_s d'une particule non conductrice peut être évaluée par la relation (2.14) :

$$Q_s = 12 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2 \cdot E \cdot \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \quad (2.14)$$

L'utilisation de ce modèle mathématique du champ électrique et la charge d'espace permet l'évaluation de la charge électrique acquise par une particule non conductrice dans la zone de la décharge couronne. Pratiquement, le chargement de particule commence lorsque la particule entre dans la zone de la décharge couronne. La charge acquise par une particule non conductrice atteint une valeur maximale lorsque la particule coïncide avec l'axe de symétrie de l'électrode couronne.

La charge électrique acquise par une particule non conductrice donne la naissance à une force qui permet aux particules de coller à la surface du cylindre tournant. Cette force est connue généralement sous le nom de la *force d'image*. Dans le cas d'une particule sphérique de rayon r , la valeur de la force d'image peut être évaluée par la relation (2.15) :

$$F_i = \frac{Q^2}{16 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r^2} \quad (2.15)$$

2.3.3. Équations du mouvement (le cas général)

Si on néglige le mouvement oscillatoire des particules on peut dire que ces particules sont entraînées par le cylindre avec une vitesse tangentielle v défini par la relation

$$v = w \cdot R_{cylindre} \quad (2.16)$$

Tels que w et $R_{cylindre}$ représentent respectivement la vitesse de rotation et le rayon du cylindre tournant. Le point de détachement des particules conductrices est défini par l'angle θ qui peut être définie à partir de la condition

$$F_g \cdot \sin(\theta) = F_e + F_c \quad (2.17)$$

A partir de l'angle de décollage θ on peut définir les coordonnées cartésiennes du point de décollage par :

$$\begin{aligned} x_0 &= R_{cylindre} \cos(\theta) \\ y_0 &= R_{cylindre} \sin(\theta) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Les particules jetées de la surface du cylindre tournant subissent un mouvement de projectile « Figure 2.8 » dans un champ électrostatique généré entre l'électrode statique et

l'électrode tournante. Le mouvement des particules dans cette zone est défini par le système d'équation :

$$\begin{aligned} m \cdot a_x &= F_x \\ m \cdot a_y &= F_y - mg \end{aligned} \quad (2.18)$$

Au point de décollage la valeur de la vitesse et l'accélération de la particule peuvent être évaluées respectivement par les équations :

$$\begin{aligned} v_x(x_0, y_0) &= w \cdot R_{\text{cylindre}} \sin(\theta) \\ v_y(x_0, y_0) &= w \cdot R_{\text{cylindre}} \cos(\theta) \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} a_x(x_0, y_0) &= [-6 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot v_x(x_0, y_0) + Q_{\text{max}} E_x(x_0, y_0)] / m \\ a_y(x_0, y_0) &= ([6 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot v_y(x_0, y_0) + Q_{\text{max}} E_y(x_0, y_0)] / m) - g \end{aligned} \quad (2.20)$$

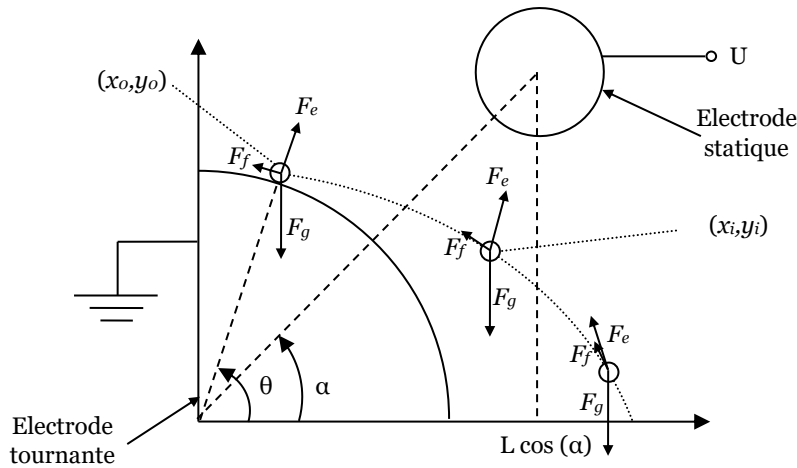


Figure 2.8. Les forces agissent sur la particule conductrice dans la zone de séparation électrostatique

Après le décollage, les particules sont soumises à la force de gravité, la force électrique et la force due au frottement de la particule avec l'air. La force de gravité est constante, la force de Stocks (force de frottement avec l'air) varie proportionnellement avec la vitesse de la particule et la force électrique varie en fonction de la position de la particule dans la zone de séparation. D'après la trajectoire des particules on peut définir deux sections

différentes. La première est caractérisé par $x_i < L \cos(\alpha)$ dans cette section, l'équation du mouvement peut être écrit sous la forme :

$$m \cdot a_x(x_i, y_i) = F_{ex}(x_i, y_i) + F_{fx}(x_i, y_i) \quad (2.21)$$

$$m \cdot a_y(x_i, y_i) = F_{ey}(x_i, y_i) + F_{fy}(x_i, y_i) - F_g$$

La deuxième section caractérisé par $x_i > L \cos(\alpha)$ dans cette section l'équation du mouvement est représenté par :

$$m \cdot a_x(x_i, y_i) = -F_{ex}(x_i, y_i) + F_{fx}(x_i, y_i) \quad (2.22)$$

$$m \cdot a_y(x_i, y_i) = F_{ey}(x_i, y_i) + F_{fy}(x_i, y_i) - F_g$$

Tels que : $F_{fx} = -6 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot r \cdot \frac{dx}{dt}$ Et $F_{fy} = -6 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot r \cdot \frac{dy}{dt}$ représente les composantes de la

force de frottement avec l'air suivant l'axe des abscisses et des ordonnées. $\gamma = 1.81 \cdot 10^{-5} \text{ Nsm}^{-2}$

Représente la viscosité de l'air.

Pratiquement, en se basant sur l'organigramme illustré dans la figure 2.9, on peut utiliser différentes méthodes numériques pour calculer une approximation de la trajectoire des particules. Selon la méthode d'Euler, la position de la particule est évaluée par :

$$x_{i+1} = x_i + (v_x(x_i, y_i) \cdot \Delta t) + (0.5 \cdot a_x(x_i, y_i) \cdot \Delta t^2) \quad (2.23)$$

$$y_{i+1} = y_i + (v_y(x_i, y_i) \cdot \Delta t) + (0.5 \cdot a_y(x_i, y_i) \cdot \Delta t^2)$$

Tels que

$$v_x(x_i, y_i) = v_x(x_{i-1}, y_{i-1}) + a_x(x_{i-1}, y_{i-1}) \cdot \Delta t \quad (2.24)$$

$$v_y(x_i, y_i) = v_y(x_{i-1}, y_{i-1}) + a_y(x_{i-1}, y_{i-1}) \cdot \Delta t$$

Et

$$a_y(x_i, y_i) = \left(\left[6 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot v_y(x_{i-1}, y_{i-1}) + Q_{\max} E_y(x_{i-1}, y_{i-1}) \right] / m \right) - g \quad (2.25)$$

La composante de l'accélération des particules suivant l'axe des abscisses est évaluée selon la position de la particule :

Lorsque $x_i < L \cos(\alpha)$:

$$a_x(x_i, y_i) = [-6 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot v_x(x_{i-1}, y_{i-1}) + Q_{\max} E_x(x_{i-1}, y_{i-1})] / m \quad (2.26)$$

Lorsque $x_i > L \cos(\alpha)$

$$a_x(x_i, y_i) = [-6 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot v_x(x_{i-1}, y_{i-1}) - Q_{\max} E_x(x_{i-1}, y_{i-1})] / m \quad (2.26)$$

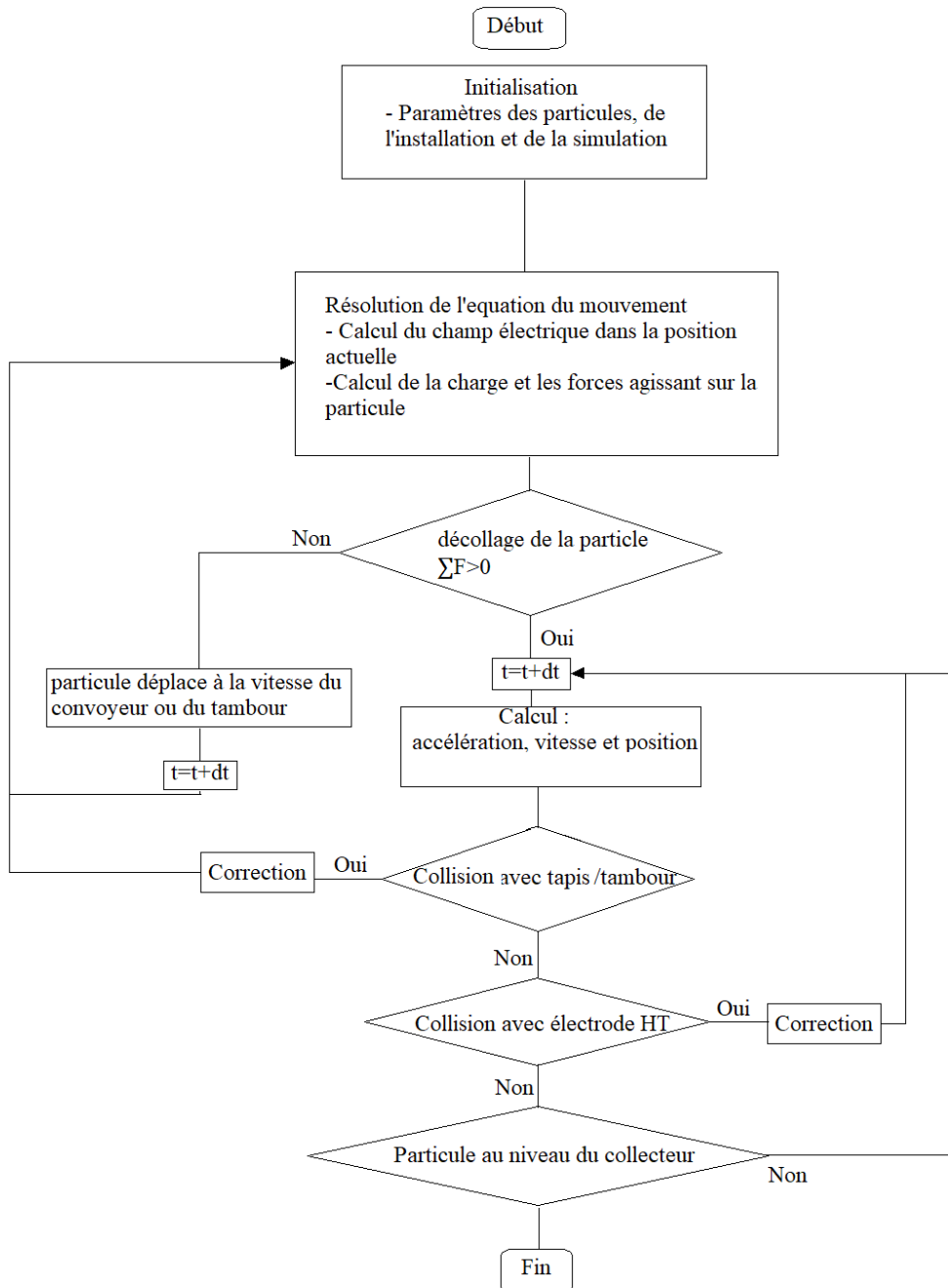


Figure 2.9. Organigramme de la simulation numérique des trajectoires des particules

Conclusion

Lors de l'étude des phénomènes de séparation électrostatiques, plusieurs questions se posent, auxquelles répondent différents types de méthodologies. On peut distinguer 3 grandes étapes dans l'acquisition des connaissances :

- Recherche des facteurs influents
- Modélisation
- Optimisation

La modélisation numérique du processus de séparation représente une étape clé permettant d'éviter un grand nombre d'expériences requise pour l'ajustement des paramètres d'un séparateur électrostatique, car elle permet une compréhension globale des différents phénomènes impliqués.

Ainsi, la simulation numérique des trajectoires des particules a été utilisée par plusieurs chercheurs pour évaluer les effets de divers facteurs qui influenceront le résultat de la séparation afin de mieux contrôler le processus et de l'optimiser.

La méthodologie adoptée dans cette thèse associe l'étude expérimentale et la simulation numérique, afin d'aboutir à un modèle fiable, d'où l'intérêt de l'utilisation d'outils informatiques de pointe, et de matériels d'acquisition d'images ultra-rapides.

Chapitre 3

Simulation numérique et étude expérimentale des trajectoires des particules dans le séparateur multifonctionnel

Les installations de séparation électrostatique sont connues pour leur fiabilité, ainsi que pour leur faible coût d'exploitation et de maintenance. Dans les lignes de recyclage des matériaux contenus dans les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), la séparation électrostatique est utilisée pour le tri des métaux non ferreux et des plastiques. Le séparateur électrostatique à convoyeur a été d'abord conçu pour la purification des minerais, puis proposé comme une solution technique fiable pour trier les constituants des mélanges granulaires des déchets industriels.

En raison de la complexité des interactions entre les forces de natures diverses qui régissent le mouvement des particules dans les séparateurs électrostatiques, les études expérimentales doivent être associées à des modélisations numériques ; les premières affinent les secondes qui elles-mêmes économisent les premières. Une telle approche pourrait améliorer significativement la qualité de la séparation, et assurer le bon fonctionnement de l'installation. En effet, la simulation numérique des trajectoires des particules permet d'éviter de nombreuses expériences préliminaires et d'obtenir une meilleure compréhension des différents phénomènes physiques en jeu.

Dans ce chapitre nous allons mettre au point un modèle numérique permettant de simuler les trajectoires de différents types de particules dans le séparateur électrostatique multifonctionnel. Ce modèle prend en considération les différents facteurs qui influent le mouvement des particules.

3.1. Présentation du séparateur multifonctionnel

Le séparateur électrostatique multifonctionnel (Fig. 3.1), se compose essentiellement d'un convoyeur à bande métallique mis à la terre et d'une électrode cylindrique rotative reliée à la haute tension. Le champ électrique créé entre les deux électrodes permet de dévier sélectivement les particules chargées ou polarisées vers des compartiments distincts d'un système collecteur.

Ce séparateur est souvent dédié au traitement de mélanges binaires (isolant / isolant, isolant / conducteur ou conducteur / conducteur) caractérisés par une distribution granulométrique relativement étroite des constituants granulaires. Dans les applications industrielles, les

mélanges peuvent être composés de plus de deux matériaux, caractérisés par des distributions de tailles plus importantes.

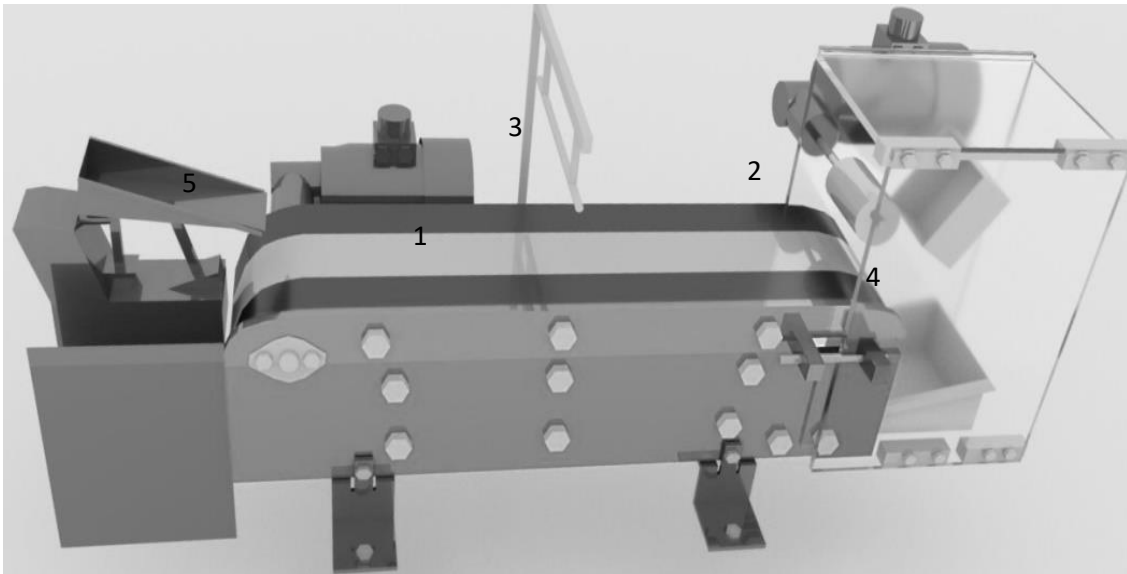


Figure 3. 1. Représentation du séparateur multifonctionnel. 1 : convoyeur métallique relié à la terre ; 2 : électrode rotative ; 3 : électrode de charge corona ; 4 : boîtes de collecteur ; 5 : dispositif vibrant d'alimentation de produit en monocouche.

Parfois, des particules légères sont attirées par l'électrode tournante, lesquelles vont adhérer à la paroi de cette électrode, cela offre la possibilité d'installer un racleur et un bac de récupération au niveau de cette électrode.

Le séparateur électrostatique multifonction met en œuvre trois mécanismes de chargement :

- par effet triboélectrique,
- par décharge corona,
- par induction électrostatique [120], [125].

L'avantage du séparateur électrostatique multifonctionnel à convoyeur conçu sur le site d'Angoulême de l'Institut PPRIME [120]-[121] est sa capacité à traiter des mélanges de matériaux granulaires ayant des tailles et des caractéristiques électriques différentes. La distinction entre ces matériaux se fait par rapport à leur conductivité qui définit leur capacité à conserver la charge acquise par effet triboélectrique, par décharge corona ou par induction électrostatique [125].

L'induction électrostatique éventuellement associée à la décharge corona peut être utilisée comme mécanisme de charge électrique pour séparer les particules conductrices et isolantes contenues dans un mélange granulaire. Lorsque l'objectif est de séparer plusieurs

types de plastiques [84], [126], les particules sont chargées par effet triboélectrique avant d'être soumises à un champ électrique intense [127], [69].

3.2. Modélisation numérique et simulation du mouvement des particules dans le séparateur multifonctionnel

3.2.1. Calcul du champ électrique

Au cours de leurs mouvements, les particules chargées ou polarisées sont soumises à une force électrostatique due à l'action du champ électrique intense dans la zone inter-électrodes (Fig.3.2). Le champ électrique généré entre l'électrode tournante reliée à la haute tension et le convoyeur à bande métallique relié à la terre qui peut être considéré comme bidimensionnel, est donné par l'équation suivante :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (3.1)$$

où E représente le champ électrique et V la différence de potentiel entre les électrodes.

3.2.2. Chargement des particules

En traversant une zone de décharge corona, une particule sphérique de rayon R acquiert une charge Q [128] :

- pour une particule conductrice :

$$Q = 12\pi\epsilon_0 E_0 R^2 \quad (3.2)$$

- pour une particule isolante :

$$Q = 12\pi\epsilon_0 \left[\frac{\epsilon_r}{(\epsilon_r + 2)} \right] E_0 R^2 \quad (3.3)$$

$\epsilon_0 = 8,854187 \times 10^{-12}$ F/m est la constante diélectrique de l'air, ϵ_r la constante diélectrique du matériau isolant et E_0 est l'intensité du champ électrique.

Les particules transportées par le convoyeur sont exposées à un champ électrostatique intense généré entre l'électrode rotative et le convoyeur métallique relié à la terre. Les particules isolantes conservent leurs charges tandis que les particules conductrices perdent leurs charges, mais elles se rechargent à nouveau par induction électrostatique selon [129] :

$$Q = \left(\frac{2}{3} \right) \pi^3 \epsilon_0 E_0 R^2 \quad (3.4)$$

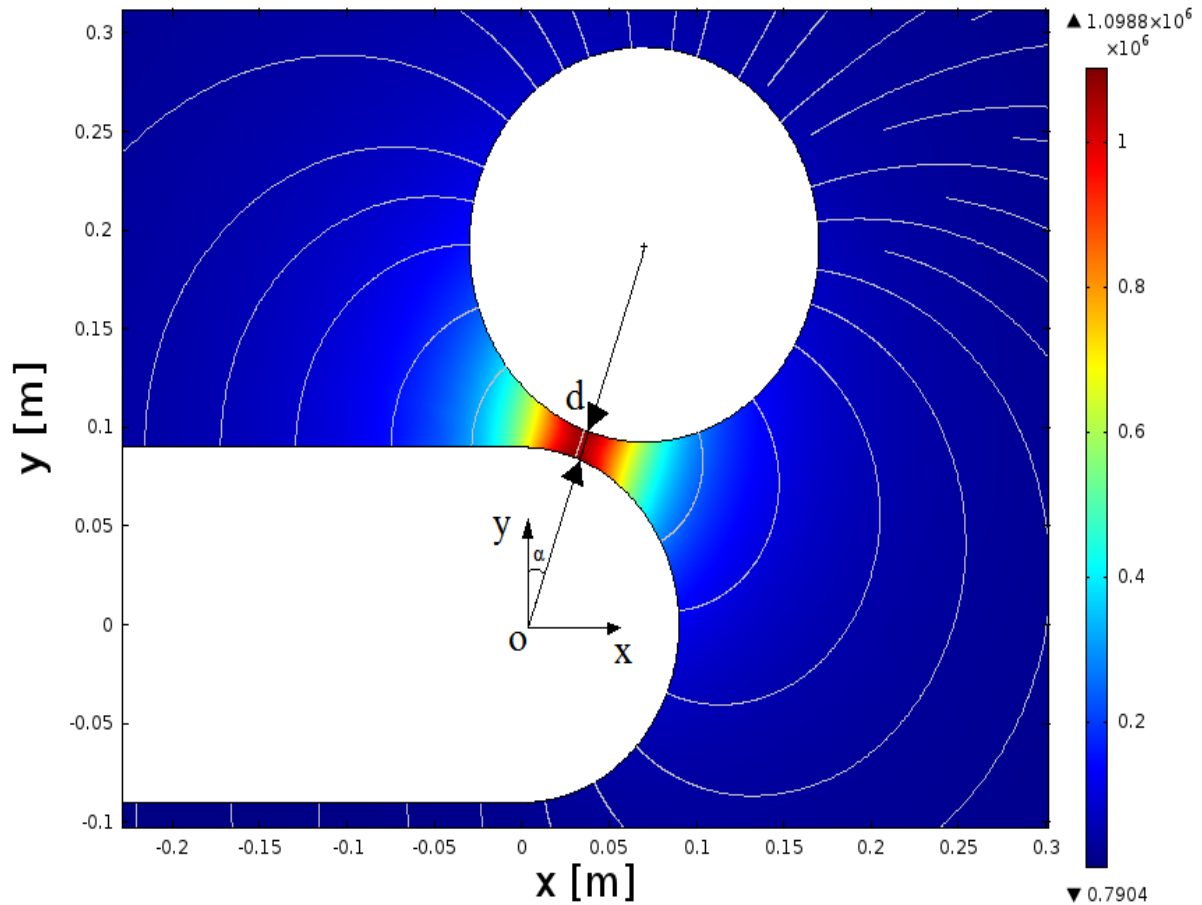


Figure 3.2. Distribution du champ électrostatique E et des lignes de champ électrique.

d : distance électrode convoyeur ; α position angulaire.

3.2.3 Forces exercées sur une particule chargée

Le mouvement d'une particule chargée dans le champ électrique E du séparateur se produit sous l'action de la somme des forces F qui agissent sur elle [7-10] :

$$m \vec{a} = \sum \vec{F} \quad (3.5)$$

où m et a représentent respectivement la masse et l'accélération de la particule.

a) Force de gravité : La gravitation est la force exercée sur tout corps de masse m dans le champ de pesanteur terrestre.

$$\vec{F}_g = (0, -mg) \quad (3.6)$$

avec $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

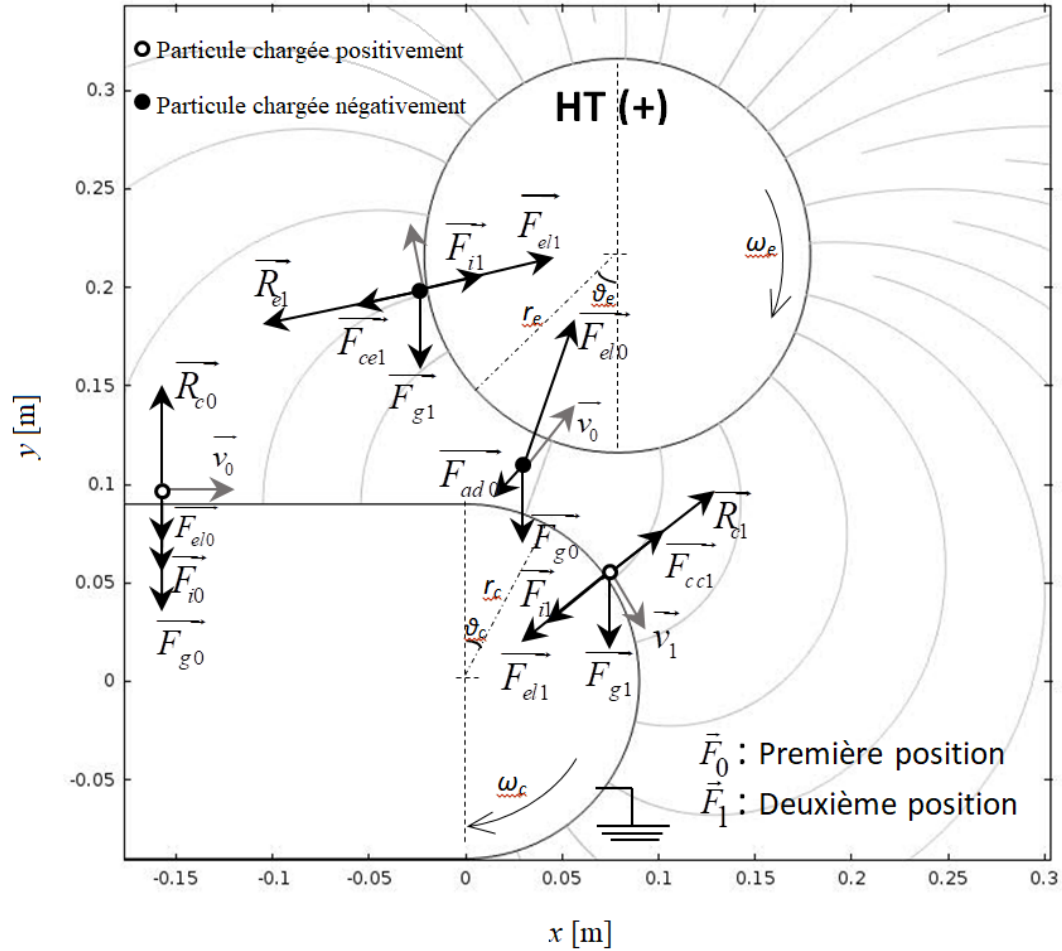


Figure 3.3. Forces agissant sur des particules chargées des différentes polarités dans le séparateur multifonctionnel.

b) Force électrostatique : évaluée à partir de la loi de coulomb dans le séparateur électrostatique, cette force exerce une attraction ou une répulsion de la particule par rapport à l'électrode reliée à la haute tension.

Dans le cas d'une particule isolante sphérique, la force électrique avant et après le décollage est :

$$\begin{aligned} \vec{F}_{el} &= Q\vec{E} \\ &= \begin{pmatrix} QE_x(x, y), \\ QE_y(x, y) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.7)$$

E_x est la composante horizontale du champ électrique tandis que E_y est la composante verticale, Q est la charge électrique acquise par la particule, E représente le champ électrostatique créé entre les deux électrodes dans la zone de séparation, [10], [131].

Selon Felici [129], la force électrostatique exercée sur une particule conductrice sphérique avant le décollage est :

$$\begin{aligned}\vec{F}_{el} &= 0.832QE \\ &= \begin{pmatrix} 0.832QE_x(x, y), \\ 0.832QE_y(x, y) \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (3.8)$$

Cette formule représente la combinaison de la force électrostatique qui tend à détacher la particule du convoyeur et de la force d'image qui la maintient attachée au convoyeur. Une fois la particule détachée, la force d'image disparaît, et la force électrique sera à nouveau calculée à partir de l'équation (3.7).

c) Force centrifuge : cette force tend à détacher la particule de la surface du convoyeur, ainsi que de la surface de l'électrode cylindrique rotative à haute tension, comme le montre la relation suivante :

$$\vec{F}_{Cj} = m\omega_j^2 r_j \vec{n}_j \quad (3.9)$$

Avec $j=c$ pour le convoyeur, ou $j=e$ pour l'électrode cylindrique, m est la masse de la particule, ω est la vitesse de rotation, r est le rayon du cylindre du convoyeur et \vec{n} la normale unitaire extérieure à la surface. Lorsque la particule se détache, cette force disparaît.

d) Force d'image électrique : Sous l'action de cette force, les particules isolantes chargées sont " attachées " au convoyeur. Cette force représente l'attraction de Coulomb entre la charge électrique d'une particule isolante et son image ($-Q$) située à une distance $2r_p$.

$$\vec{F}_i = \frac{-(Q^2)}{4\pi\epsilon_0(2r_p)^2} \vec{n} \quad (3.10)$$

ϵ_0 est la constante diélectrique de l'air ($\epsilon_0 = 8.854187 \times 10^{-12}$ F/m).

e) Force de résistance de l'air : La force aérodynamique appliquée à une particule sphérique homogène peut être exprimée par la relation suivante [132]:

$$\vec{F}_{ad} = -\left(\frac{1}{2}C_f \rho S \vec{v}_r^2(x, y)\right) \vec{u} \quad (3.11)$$

où S représente la surface perpendiculaire au flux d'air (m^2) ; v_r vitesse relative de la particule (m/s) ; $\vec{u} = \vec{v}_r / \|\vec{v}_r\|$ est le vecteur unitaire dans la direction de déplacement de la particule;

$\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$ est la densité de l'air ambiant à $20 \text{ }^\circ\text{C}$; $C_f = 0,5$ est le coefficient de frottement pour une forme sphérique.

3.2.4 Comportement des particules avant et après le point de décollage

La condition pour qu'une particule se détache du convoyeur est la suivante :

$$\sum \overline{F}_{nc} > 0 \quad (3.12)$$

$\sum \overline{F}_{nc}$ est la somme des forces projetées sur le vecteur normal à la surface du convoyeur. La figure 3.3. donne une disposition des forces agissant sur deux types de particules avant et après le décollage.

a) Décollage dans la section plane supérieure du convoyeur

Les forces appliquées à la particule sont : la force électrostatique, la force de gravité et la force d'image.

$$\sum \overline{F} = Q \overline{E}_y(x, y) + \left(\frac{-(Q^2)}{4\pi \varepsilon_0 (2r_p)^2} \right) \overline{n}_c - m \overline{g} + \overline{R}_c \quad (3.13)$$

Avant le détachement, le mouvement de la particule est imposé par le mouvement du convoyeur

$$\begin{aligned} V_{0x} &= V_{convoyer} \\ V_{0y} &= 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

b) Décollage dans la section circulaire du convoyeur

Dans cette section, la force centrifuge donnée par (5) est ajoutée aux forces exercées sur la particule.

$$\sum \overline{F} = Q \overline{E}(x, y) + (m \omega_c^2 r_c) \overline{n}_c + \left(\frac{-Q^2}{4\pi \varepsilon_0 (2r_p)^2} \right) \overline{n}_c - m \overline{g} + \overline{R}_c \quad (3.15)$$

Avant le détachement, la vitesse des particules est de :

$$\begin{aligned} V_{0x} &= \omega_c r_c \cos(\theta_c) \\ V_{0y} &= -\omega_c r_c \sin(\theta_c) \end{aligned} \quad (3.16)$$

avec θ_c la position angulaire de la particule sur le convoyeur.

c) Après le décollage

Dans cette situation, le mouvement de la particule est fortement influencée par la force électrostatique, elle est donc attirée ou repoussée par l'électrode cylindrique en rotation. La particule peut heurter l'électrode cylindrique et se comportera différemment, en fonction de plusieurs facteurs qui sont analysés ci-après. Une fois soulevée, la particule se déplace en mouvement libre selon la formule suivante :

$$\vec{a}(x, y) = \left(\frac{1}{m} \right) \left(Q\vec{E}(x, y) - \left(\frac{1}{2} C_f \rho S v_r^2(x, y) \right) \vec{u} - m\vec{g} \right) \quad (3.17)$$

d) Adhérence de la particule à l'électrode cylindrique tournante

Dans le cas d'impact avec l'électrode cylindrique à haute tension, la particule adhère à l'électrode si :

$$\sum \vec{F}_{ne} < 0 \quad (3.18)$$

$\sum \vec{F}_{ne}$ est la somme des forces projetées sur le vecteur normal à la surface de l'électrode cylindrique tournante.

$$\sum \vec{F} = -Q\vec{E}(x, y) + (m\omega_e^2 r_e) \vec{n}_e + \left(\frac{-(Q^2)}{4\pi\epsilon_0 (2r_p)^2} \right) \vec{n}_e - m\vec{g} + \vec{R}_e \quad (3.19)$$

Le mouvement des particules est alors imposé par le mouvement de l'électrode cylindrique :

$$\begin{aligned} V_{0x} &= -\omega_e r_e \cos(\theta_e) \\ V_{0y} &= \omega_e r_e \sin(\theta_e) \end{aligned} \quad (3.20)$$

avec θ_e la position angulaire de la particule sur l'électrode cylindrique. Dans le cas contraire, elle rebondit et poursuit sa trajectoire en mouvement libre selon (3.17) vers le collecteur inférieur. Les vitesses des particules après l'impact sont calculées selon la méthode expliquée ci-après.

Lorsqu'une particule rebondit après un contact avec l'électrode cylindrique rotative, la composante normale de sa vitesse est inversée et diminuée par un facteur de restitution e , qui dépend des caractéristiques mécaniques de la particule et de la nature du choc :

$$V'_n = -e \times V_n \quad (3.21)$$

où V'_n est la vitesse normale de la particule après l'impact et V_n sa vitesse normale avant l'impact [18]. La composante tangentielle de la vitesse est augmentée d'un facteur k , qui tient compte du frottement entre la particule et la paroi de l'électrode pendant l'impact [19] tel que :

$$V'_t = V_t + k \times V_{te} \quad (3.22)$$

où V'_t représente la vitesse tangentielle de la particule après l'impact, V_t est la vitesse tangentielle de la particule avant l'impact, V_{te} la vitesse tangentielle de l'électrode cylindrique, $0 < k < 1$ est le coefficient de frottement entre les deux surfaces.

Les valeurs du coefficient de restitution $e = 0,8$ et du coefficient de friction $k = 0,02$ adoptées pour les simulations ont été choisies selon les suivis de trajectoires réalisés par une caméra vidéo ultra-rapide.

e) Détachement de la particule de l'électrode cylindrique rotative

Dans certains cas, la particule adhère à l'électrode puis se détache, cela se produit lorsque la force électrostatique décroît, puisque la particule s'éloigne de la zone de séparation où le champ électrique est maximal.

La modélisation numérique établie est basée sur ces hypothèses simplificatrices :

- Les particules non plates de taille sous-millimétrique qui composent les mélanges granulaires généralement traités dans ce type de séparateur électrostatique sont de formes quasi-sphériques ; la variation de la distance entre le centre de gravité d'une particule et sa surface est négligeable par rapport à la distance elle-même : c'est l'hypothèse du solide indéformable.
- Compte tenu des caractéristiques de fonctionnement de la plupart des dispositifs de tribochargement, la charge est répartie assez uniformément sur la surface des particules. Les tailles des particules étant inférieures à 1/10 de la distance inter-électrodes, le champ électrique peut être considéré constant dans son voisinage. Par conséquent, la charge peut être concentrée au centre de la particule. Dans la résolution de l'équation de mouvement, la particule est considérée comme un point matériel qui porte une charge égale à l'intégrale de la densité de charge de surface de la particule réelle.

- Les particules forment une monocouche non compacte à la surface de l'électrode à bande. Il s'agit d'une condition essentielle pour une bonne séparation électrostatique, qui peut être obtenue par une conception appropriée du système d'alimentation.
- Dans ces conditions d'alimentations optimales, il y a peu de collisions entre les particules. Par conséquent, l'effet triboélectrique associé aux collisions particule-particule peut être négligé.
- La force de Coulomb entre les particules peut être négligée, car elle représente moins de 10% de celle due au champ électrique dans la zone active du séparateur.
- Le système d'électrodes présente une symétrie plane bidimensionnelle (2-D). Avec des particules dont les tailles représentent moins d'un dixième de la distance inter-électrodes et compte tenu du système d'alimentation spécifique vibrant qui maintient la particule dans un plan, un modèle 2-D est également bien adapté pour les calculs des trajectoires des particules.

3.2.5 Résolution numérique de l'équation de mouvement

Chacun des systèmes de (3.13), (3.15), (3.17), et (3.19) est résolu en utilisant l'algorithme d'Euler-Cromer [133], [134]. Le schéma itératif de l'algorithme est décrit par :

$$\begin{aligned}\vec{v}_{n+1} &= \vec{v}_n + \vec{a}_n \cdot \Delta t \\ \vec{p}_{n+1} &= \vec{p}_n + \vec{v}_{n+1} \cdot \Delta t\end{aligned}\tag{3.23}$$

où a_n , v_n , et P_n , représentent respectivement l'accélération, la vitesse, et la position des particules à l'instant $n \cdot \Delta t$.

Le choix du pas de temps Δt a été fait après plusieurs essais numériques où sa valeur a été réduite de façon itérative, et les coordonnées de la position finale pour chaque pas ont été comparées. La valeur retenue pour Δt était celle pour laquelle la variation de la position finale entre deux itérations était inférieure à celle du rayon de la particule.

Au début de chaque itération du programme de simulation des trajectoires des particules, la valeur initiale de l'accélération est calculée en utilisant les valeurs du champ électrique calculé par le logiciel COMSOL et la charge électrique, qui est un paramètre préalablement défini expérimentalement. Cette valeur est substituée dans (3.23) pour évaluer la position et la vitesse à l'instant Δt .

Le programme de simulation est codé sous MATLAB et comporte plusieurs étapes [135] :

- premièrement, le calcul du champ électrostatique par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel COMSOL,
- deuxièmement, le calcul de la trajectoire par la méthode d'Euler-Cromer,
- troisièmement, le calcul des coordonnées du point d'impact des particules avec la paroi de l'électrode cylindrique rotative,
- quatrièmement, le calcul de la position et de la vitesse de la particule après l'impact,
- et cinquièmement, la représentation graphique des résultats obtenus.

Pendant la simulation, les particules sont introduites dans la zone de séparation électrostatique avec une vitesse initiale qui correspond à la vitesse du convoyeur ; la valeur et la direction du vecteur vitesse sont considérées comme des paramètres variables. Le tableau I montre les paramètres constants choisis lors des simulations.

3.3 Procédure expérimentale

La première partie des résultats représente une série des simulations en utilisant des particules isolantes sous millimétrique, les paramètres de simulation sont résumé dans le tableau suivant :

TABLE I : paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Tension appliquée à l'électrode	$V = 16 \text{ kV}$
Vitesse du convoyeur	$V = 1 \text{ m/min}$
Coefficient de frottement avec l'air	$C_f = 0.5$ (particule sphérique)
Distance inter-électrodes	$d = 15 \text{ mm}$

Quelques paramètres sont modifiés pour différentes simulations, cela sera indiqué avec les résultats reportés dans la section suivante.

La seconde partie des résultats représente deux série d'expériences comparées aux simulations numériques, la première série d'expérience a été réalisée avec des particules conductrices : des sphères de polypropylène (PP) recouvertes d'une fine couche de nickel, de 2 mm de diamètre (masse : 5,5 mg) et de 4 mm de diamètre (masse : 31 mg). La seconde série d'expériences a été réalisée avec des particules isolantes obtenues par broyage de déchets de PP et caractérisées par des formes non homogènes (rayons équivalents : 1,07 mm et 1,28 mm ; masses : 4,7 mg et 8,2 mg, respectivement).

Ces particules ont été chargées par une électrode à effet corona en utilisant une tension de +22 kV. La haute tension appliquée à l'électrode cylindrique a été variée de - 30 kV à - 15 kV, et la vitesse du convoyeur a été comprise entre 2,4 m/min et 6 m/min (qui représentent respectivement 40 % et 100 % de la limite supérieure), pour une distance inter-électrode de 27 mm. L'électrode cylindrique faisait un angle de 30° par rapport à la verticale. Toutes les trajectoires des particules ont été enregistrées à une fréquence d'images de 300 fps, en utilisant une caméra haute vitesse (série SpeedSense VEO, résolution de 4 MP et fréquence d'images jusqu'à 800 fps).

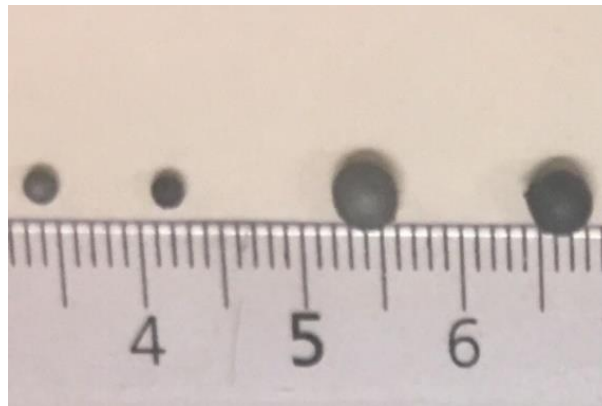


Figure 3.4. Particules conductrices de polypropylène (PP) recouvertes de couches de nickel, de 2 mm de diamètre et de 4 mm de diamètre

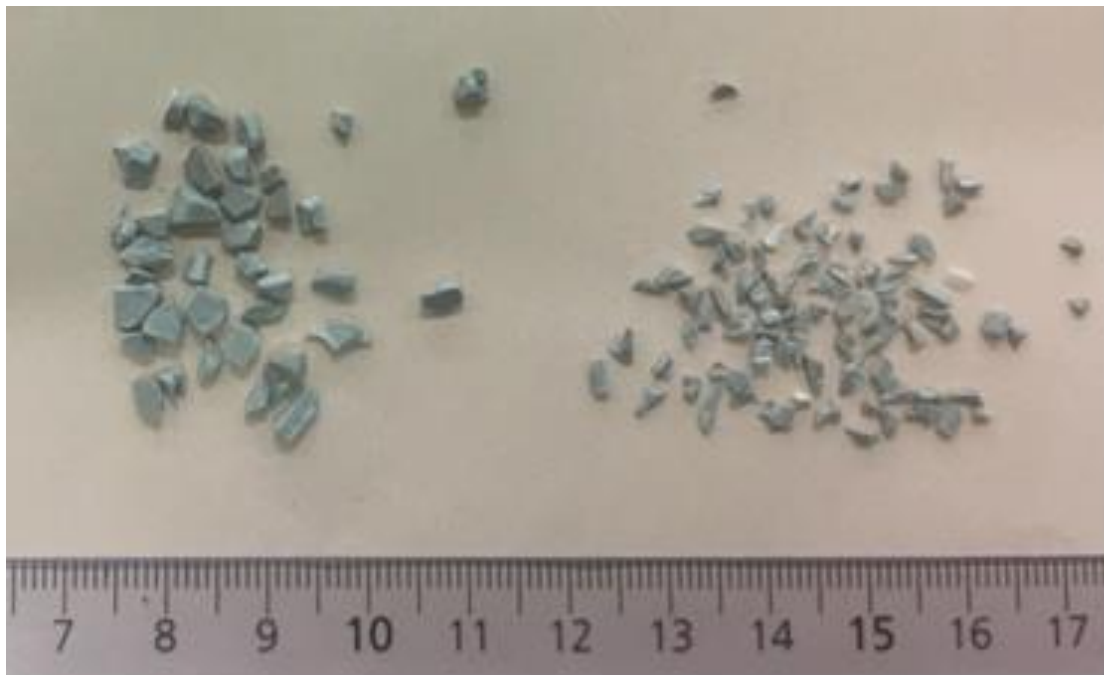


Figure 3.5. Particules isolantes de PP (rayon équivalent : 1,07 mm et 1,28 mm)

3.4 Résultats et analyses

3.4.1 Analyse des résultats des simulations numériques

Dans cette partie, comme mentionné précédemment, nous avons modélisé le comportement des particules isolantes dans un séparateur électrostatique, l'objectif est d'étudier l'influence de plusieurs paramètres qui interviennent dans le processus de séparation, sachant qu'il existe des paramètres liés aux particules et d'autres liés au séparateur multifonctionnel : la charge électrique, le rayon et la masse des particules ; le rayon, la vitesse de rotation et la position angulaire de l'électrode cylindrique haute tension.

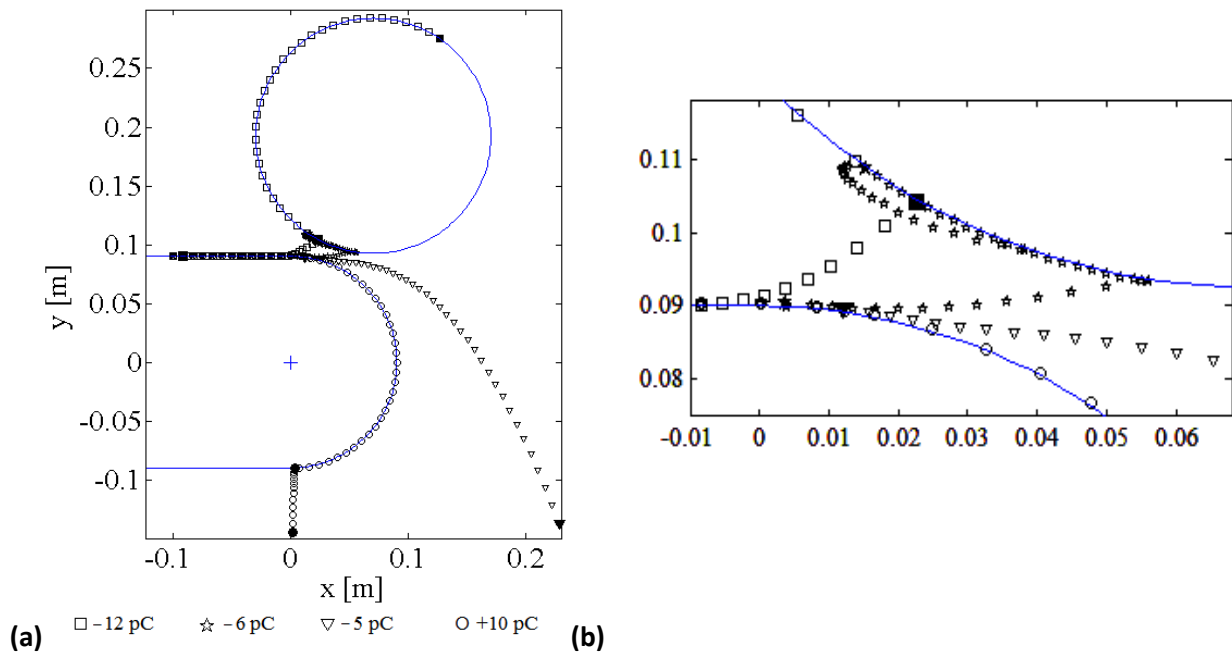


Figure 3.6 Trajectoires des particules pour différentes valeurs de la charge Q (a) et zoom sur la zone de détachement des particules (b).

Table II : Coordonnées Des Point De Détachement En Fonction Des Charges Des Particules

Vitesse de rotation de l'électrode $n_{el} = 10$ tr/min		
Rayon de la particule $r_p = 0.3$ mm		
Masse de la particule $m = 0.5$ mg		
Position angulaire de l'électrode = 20°		
Rayon de l'électrode = 100 mm		
Détachement	x[mm]	y[mm]
□ -12 pC	-95	90.3
☆ -6 pC	2.52	90.26
▽ -5 pC	12.22	89.47
○ +10 pC	0	-90.3

La figure 3.6 montre les trajectoires obtenues par la simulation pour différentes valeurs de la charge Q . L'augmentation de la charge accentue l'attraction de la particule par l'électrode rotative. Une charge $Q = -5$ pC n'est pas suffisante pour être récupérée au niveau du cylindre, alors qu'une particule de même taille ayant une charge $Q = -12$ pC reste attachée au cylindre et est évacuée dans le collecteur supérieur. Une particule de charge $Q = -6$ pC adhère à l'électrode cylindrique pendant un certain temps, puis se détache et adhère à nouveau plusieurs fois ; ce comportement peut être expliqué par le fait que la force électrique diminue alors que la particule s'éloigne de la zone de séparation. Une particule chargée positivement $+10$ pC est soumise à une force de répulsion par l'électrode cylindrique rotative et reste "attachée" à la surface de la bande transporteuse mise à la terre [20].

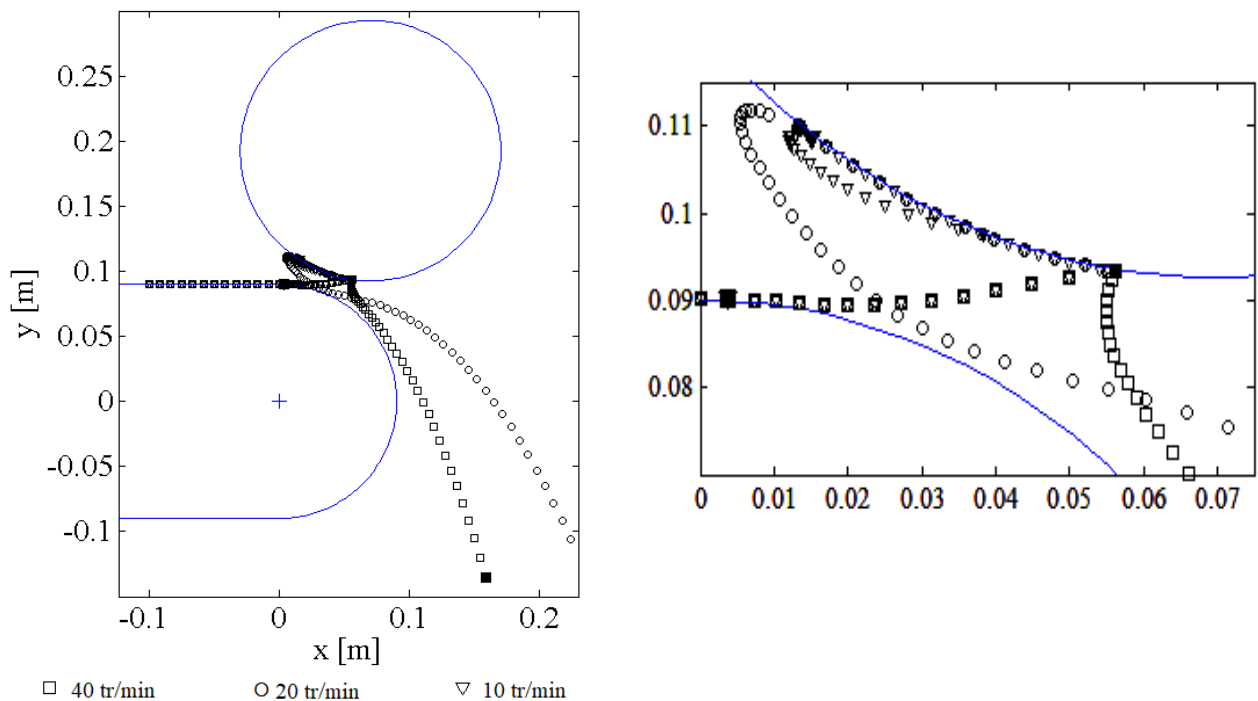


Figure 3.7. Trajectoires des particules pour différentes valeurs de la vitesse de rotation de l'électrode tournante (tr/min)

Tableau III : paramètres fixés pour étudier la variation de la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique

Charge de la particule $Q = -6$ pC
Rayon de la particule $r_p = 0.3$ mm
Masse de la particule $m = 0.5$ mg
Position angulaire de l'électrode = 20°
Rayon de l'électrode = 100 mm

On considère que l'électrode cylindrique tourne dans le sens horaire, ce qui est pratique pour récupérer les particules séparées. Les trois simulations pour les vitesses de rotation de l'électrode cylindrique considérées ont donné le même point de détachement (x, y)

= (2,52 ; 90,26) (mm) et le même point d'impact avec l'électrode en rotation. La force centrifuge tend à détacher les particules, elle augmente proportionnellement avec la vitesse de rotation de l'électrode, ce qui explique que les particules n'ont pas adhéré à l'électrode.

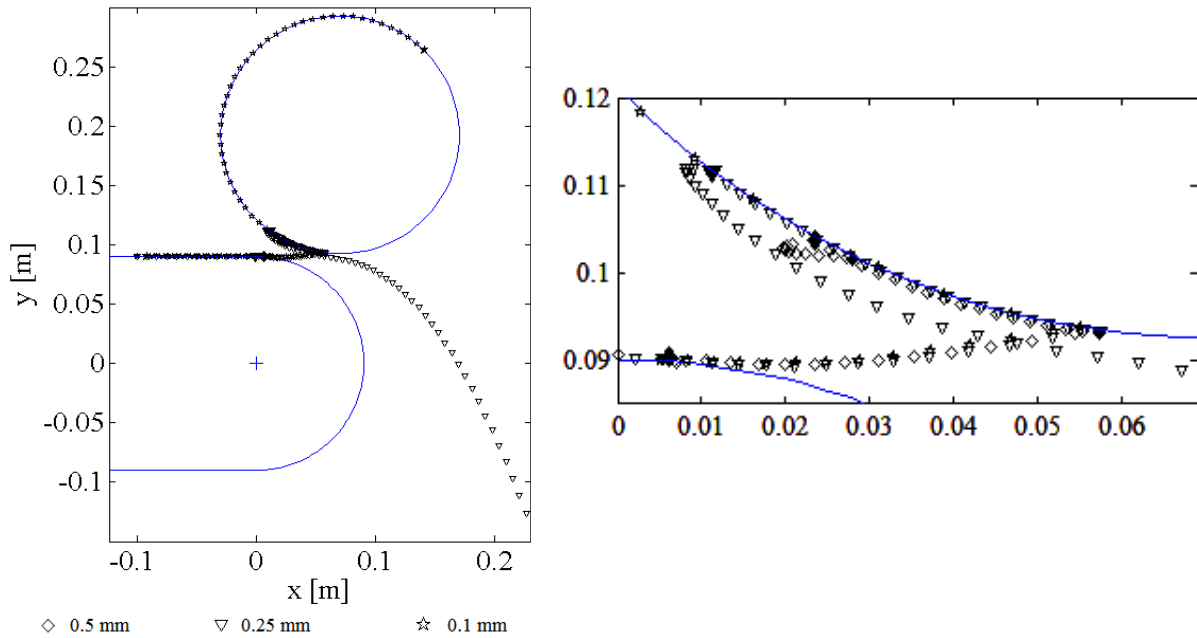


Figure 3.8. Trajectoires des particules en fonction du rayon de la particule (mm)

Tableau IV : coordonnées du point de détachement en fonction du rayon de la particule

Vitesse de rotation de l'électrode $n_{el} = 10$ rpm		
Charge de la particule $Q = -6$ pC		
Masse de la particule $m = 0.5$ mg		
Position angulaire de l'électrode = 20°		
Rayon de l'électrode = 100 mm		
détachement	x [mm]	y [mm]
☆ 0.1 mm	-94.99	90.1
▽ 0.25 mm	-0.78	90.25
◇ 0.5mm	7.16	90.22

L'effet de la variation du rayon de la particule r_p est représenté sur la Figure 3.8. La diminution du rayon entraîne une augmentation de la force d'image électrique F_i , ainsi la particule de rayon $r_p = 0,1$ mm adhère à la surface de l'électrode alors que les particules de rayons $r_p = 0,25$ mm et $r_p = 0,5$ mm se détachent de l'électrode en rotation (Tableau IV). Les différences entre les trajectoires sont en partie dues à la force aérodynamique (force de résistance de l'air). En effet, une particule de rayon 0.5 mm ayant une plus grande surface exposée à la force aérodynamique qu'une particule de 0.25 mm, cette dernière poursuit une trajectoire en chute libre.

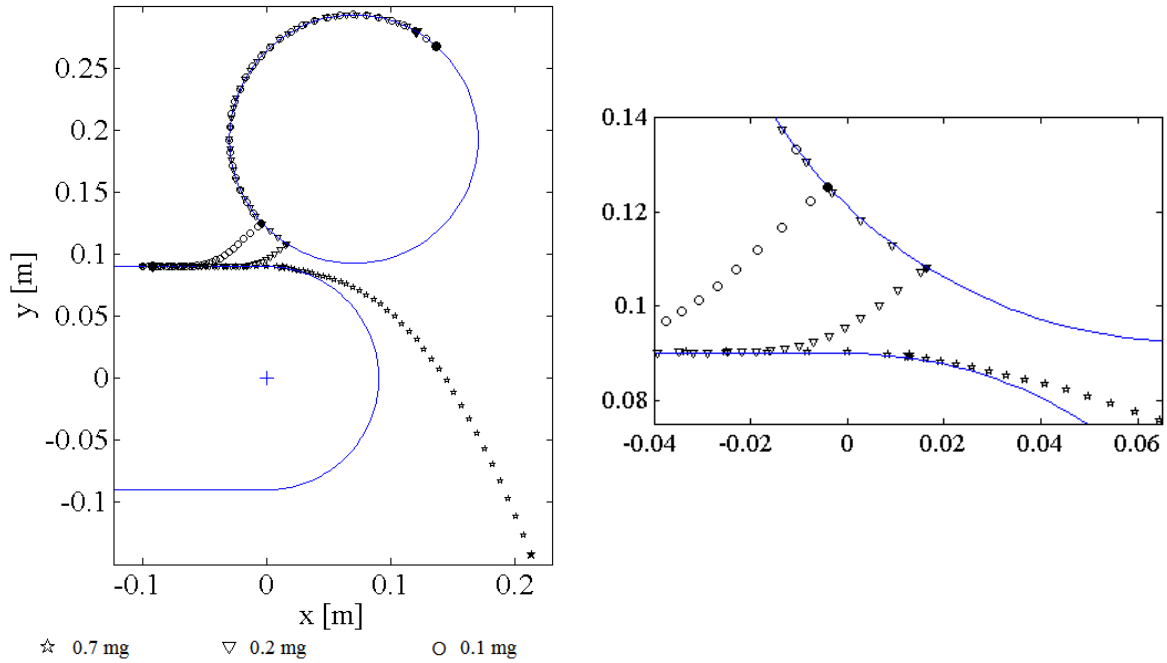


Figure 3.9. Trajectoires des particules en fonction de leurs masses (mg).

Tableau V : coordonnées du point de détachement en fonction de la masse de la particule

Vitesse de rotation de l'électrode $n_{el} = 10$ rpm Charge de la particule $Q = -6$ pC Rayon de la particule $r_p = 0.25$ mm Position angulaire de l'électrode = 20° Rayon de l'électrode = 100 mm		
détachement	x [mm]	y [mm]
○ 0.1 mg	-95.02	90.25
▽ 0.2 mg	-95	90.25
☆ 0.7 mg	12.65	89.36

La masse de la particule influence considérablement sa trajectoire comme le montre la figure 3.9. Les particules de masse $m = 0,1$ mg et $m = 0,2$ mg se détachent facilement sous l'effet de la force électrostatique F_{el} car la force gravitationnelle F_g est plus faible (Tableau V). La force gravitationnelle domine dans le cas de particules plus lourdes, qui se détacheront aussi sous l'action de la force centrifuge.

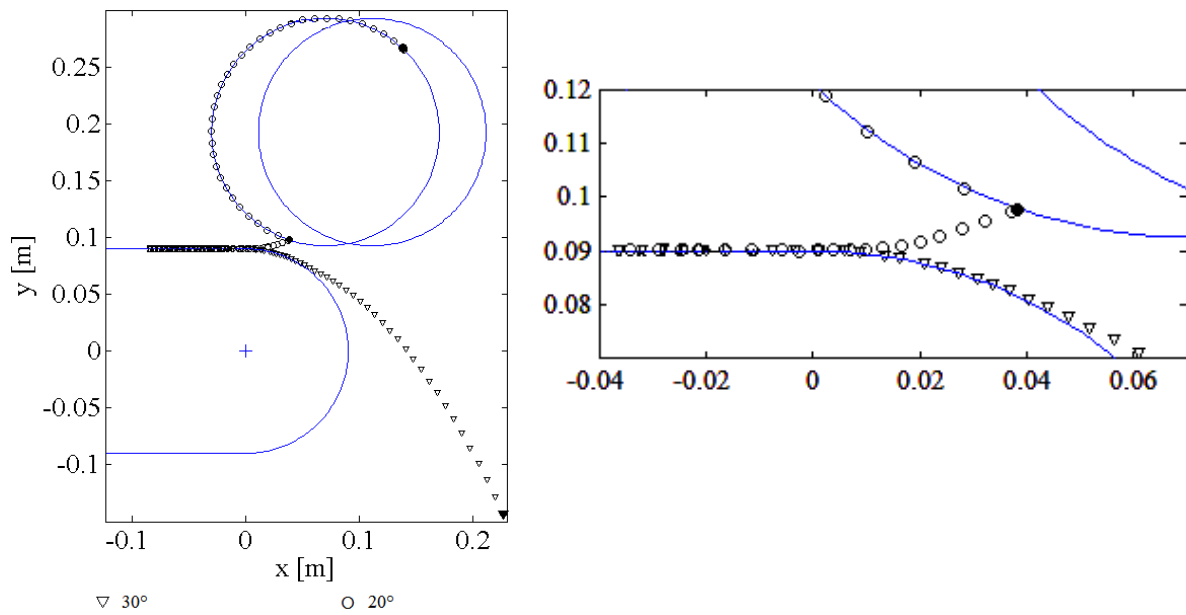


Figure 3.10. Trajectoires des particules en fonction de la position de l'électrode

Tableau VI : coordonnées des points de détachement en fonction de la position de l'électrode

Charge de la particule $Q = -6 \text{ pC}$ Rayon de la particule $r = 0.15 \text{ mm}$ Masse de la particule $m = 0.4 \text{ mg}$ Rayon de l'électrode = 100 mm		
Détachement	$x[\text{mm}]$	$y[\text{mm}]$
$\nabla 30^\circ$	-95	90.15
$\circ 20^\circ$	-95.01	90.15

Pour améliorer les forces du champ électrique, il est recommandé de modifier la position angulaire α de l'électrode cylindrique, comme l'illustre la figure 3.10. en réduisant l'angle α , la distance inter-électrode d diminue et donc le champ électrique devient plus intense, facilitant le détachement des particules de la surface du convoyeur (Tableau VI). En pratique il faut veiller à ne pas trop réduire l'espace inter-électrodes pour ne pas dépasser la rigidité diélectrique de l'air $E_c = 30 \text{ kV/cm}$.

L'augmentation du rayon de l'électrode peut également avoir un effet avantageux, figure 3.11. Une électrode plus grande génère une zone de champ électrique étendue et attire mieux les particules portant une charge de polarité opposée (tableau VII).

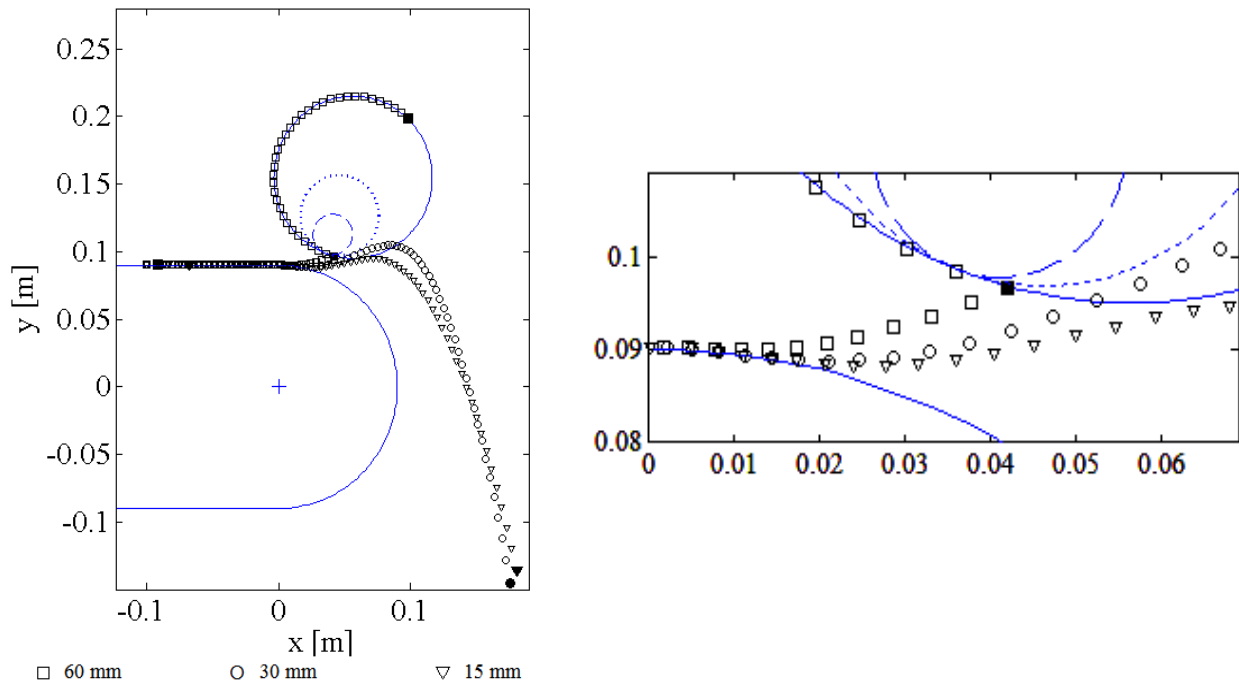


Figure 3.11. Trajectoires des particules en fonction du rayon de l'électrode

Tableau VII : coordonnées des point de détachement en fonction du rayon de l'électrode

Charge de la particule $Q = -6 \text{ pC}$ Rayon de la particule $r = 0.15 \text{ mm}$ Masse de la particule $m = 0.4 \text{ mg}$ Position angulaire de l'électrode $= 20^\circ$		
Détachement	$x[\text{mm}]$	$y[\text{mm}]$
▽ 15 mm	-67.44	90.15
○ 30 mm	-95	90.15
□ 60 mm	-95	90.15

La figure 3.12. montre les trajectoires de particules d'ABS et de PS ayant les mêmes masses ($m = 0,5 \text{ mg}$) et tailles ($r = 500 \text{ }\mu\text{m}$). Les paramètres de simulation sont basés sur les résultats des études expérimentales : charge massique (PS) = -15 nC/g , charge massique (ABS) = 30 nC/g , la haute tension appliquée à l'électrode cylindrique $V = -16 \text{ kV}$, distance entre cette électrode et le convoyeur $d = 15 \text{ mm}$, vitesse de rotation de l'électrode cylindrique $n = 10 \text{ tr/min}$ et vitesse du convoyeur métallique $v = 1 \text{ m/min}$. La séparation des particules d'ABS et de PS est assurée, et le séparateur multifonctionnel offre la possibilité de récupérer les particules d'ABS au niveau de l'électrode rotative (tableau VIII).

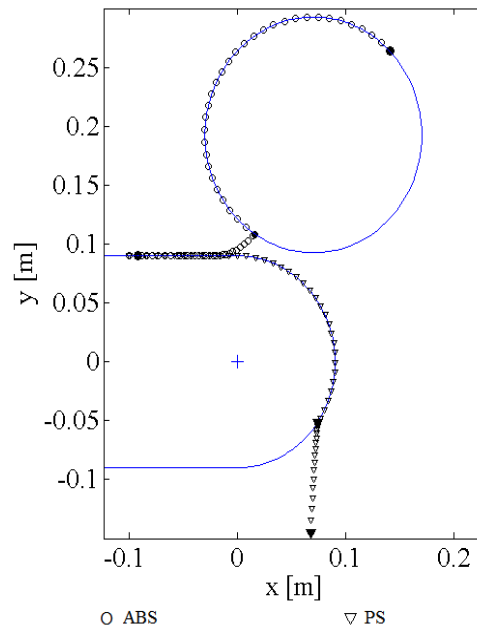


Figure 3.12. Trajectoires des particules ABS et PS

Tableau VIII coordonnées des point de détachement pour les particules ABS et PS

Vitesse de rotation de l'électrode $n_{el} = 10$ rpm		
Masse de la particule $m = 0.5$ mg		
Rayon de la particule $r_p = 0.25$ mm		
Rayon de l'électrode = 100 mm		
détachement	x [mm]	y [mm]
○ ABS	-94.84	90.25
▽ PS	73.21	-52.78

3.4.2 Analyse et comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats des simulations numériques

Les figures 3.13 et 3.14 montrent les trajectoires d'une particule conductrice enrobée de nickel d'un diamètre de 2 mm pour quatre valeurs de la haute tension - 30 kV, - 25 kV, - 20 kV et - 15 kV. Une haute tension de - 30 kV a créé un champ électrique très intense dans la zone active de l'espace de séparation entre le convoyeur et l'électrode rotative. La particule, chargée positivement par induction électrostatique, a été attirée vers l'électrode rotative. L'impact avec cette électrode a inversé le signe de la charge de la particule. En conséquence, la particule a été repoussée pour atteindre la surface du convoyeur, au contact de celui-ci elle s'est à nouveau chargée par induction et le phénomène se répète 2 fois. Finalement, la particule pourra être piégée sur son chemin de retour vers le convoyeur en plaçant un collecteur dans la position appropriée.

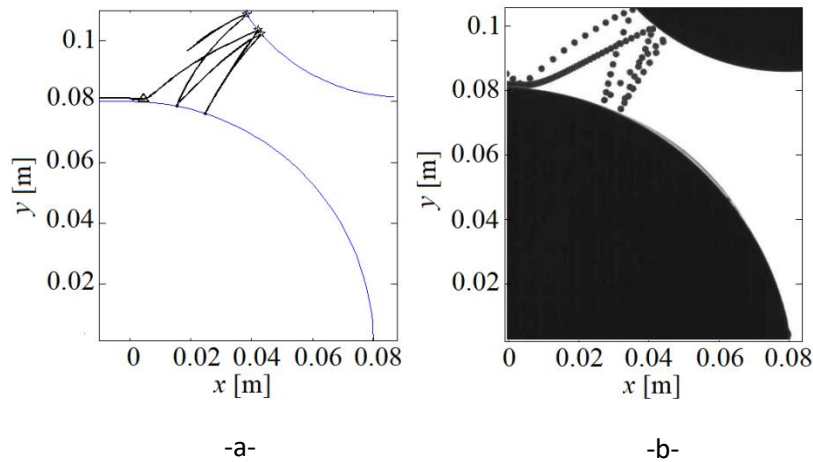


Figure 3.13. Trajectoires simulées (a) et expérimentales (b) des particules couvertes de nickel de 2 mm de diamètre pour une haute tension = -30kV.

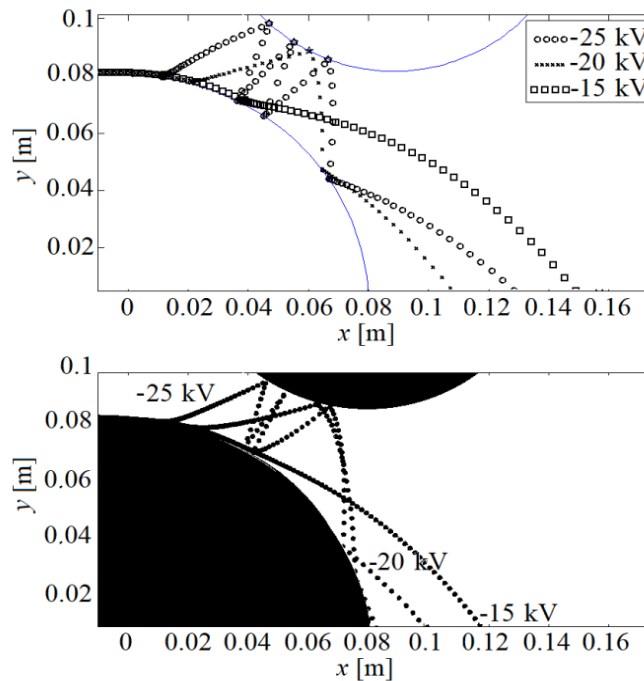


Figure 3.14. Trajectoires calculées et expérimentales des particules conductrices de nickel de 2 mm de diamètre, en fonction de la haute tension.

En diminuant la tension à - 25 kV, la particule fait des rebonds, puis se dirige vers la zone de récupération. Pour - 20 kV, la force de Coulomb diminue, et les collisions avec l'électrode tournante se sont réduites. Pour ces paramètres géométriques de positionnement de l'électrode tournante, une tension de - 15 kV s'est avérée idéale pour éviter les impacts avec l'électrode tournante et contrôler la trajectoire de la particule dans le séparateur multifonctionnel.

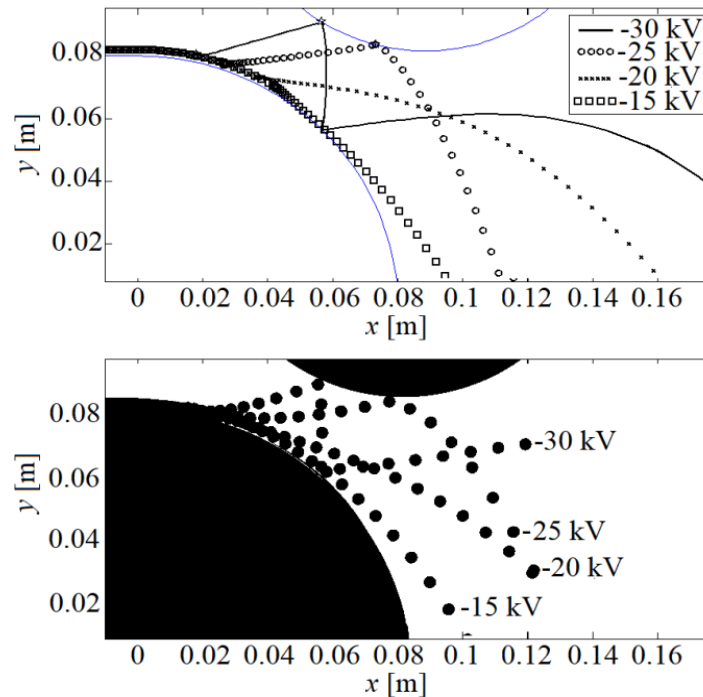


Figure 3.15. Trajectoires calculées et expérimentales des particules conductrices de nickel de 4 mm de diamètre, en fonction de la haute tension.

Les mêmes expériences et simulations ont été réalisées sur une particule recouverte de nickel d'un diamètre de 4 mm (figure 3.15). La force gravitationnelle exercée sur la particule de 4 mm était plus importante que celle exercée sur la particule de 2 mm. Pour le même niveau de tension - 30 kV, la particule a eu moins d'impacts avec l'électrode rotative. La tension de - 20 kV s'est avérée idéale pour attirer la particule vers la zone de séparation, tandis que l'excitation des électrodes à - 15 kV n'était même pas suffisante pour dévier la particule de 4 mm de diamètre.

Les figures 3.16 et 3.17 représentent les trajectoires de particules isolantes (polypropylène) de diamètres 2 mm et 4 mm, en fonction de trois valeurs de la haute tension appliquée à l'électrode rotative. Les grandes particules nécessitent des valeurs plus élevées de la tension appliquée pour être déviées.

Pour les particules isolantes petites et légères, des impacts avec l'électrode rotative peuvent se produire. Dans nos expériences, les particules ne peuvent pas se coller sur l'électrode, elles rebondissent et poursuivent leur mouvement, mais sont toujours attirées par l'électrode. Le phénomène d'adhésion des particules à la surface de l'électrode a été observé pour les particules micronisées.

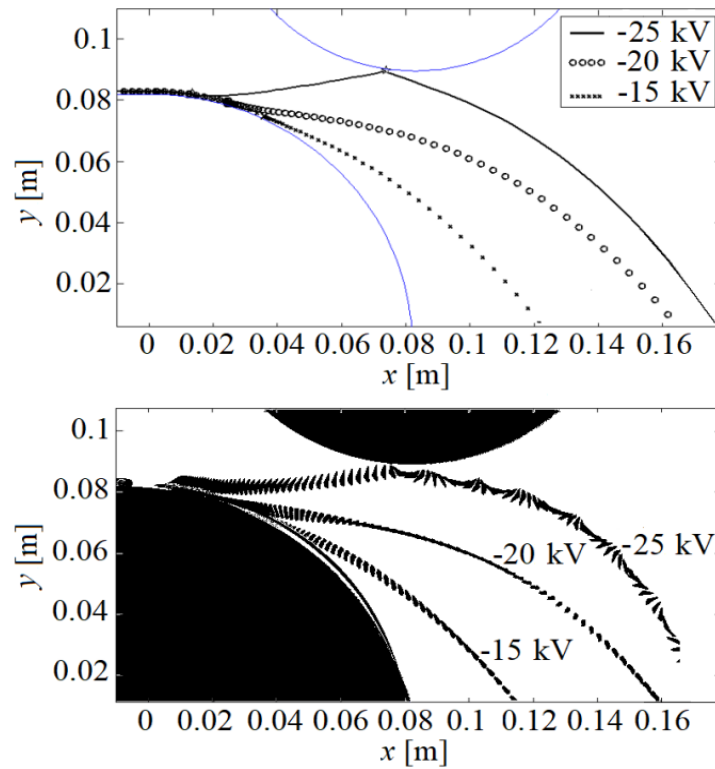


Figure 3.16. Trajectoires calculées et expérimentales de la particule isolante de 2 mm de diamètre, en fonction de la haute tension.

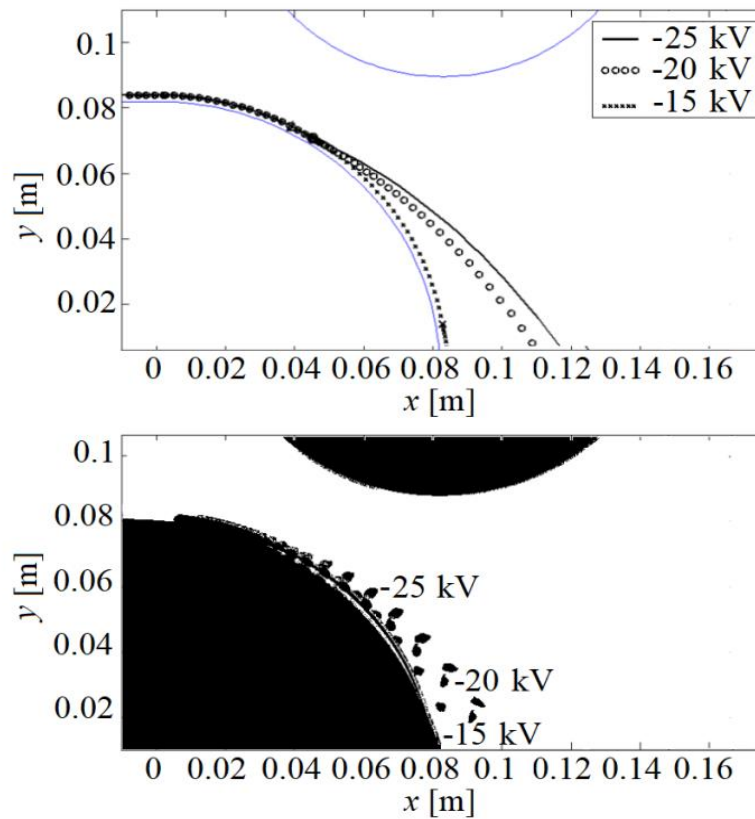


Figure 3.17. Trajectoires calculées et expérimentales de la particule isolante de 4 mm de diamètre, en fonction de la haute tension.

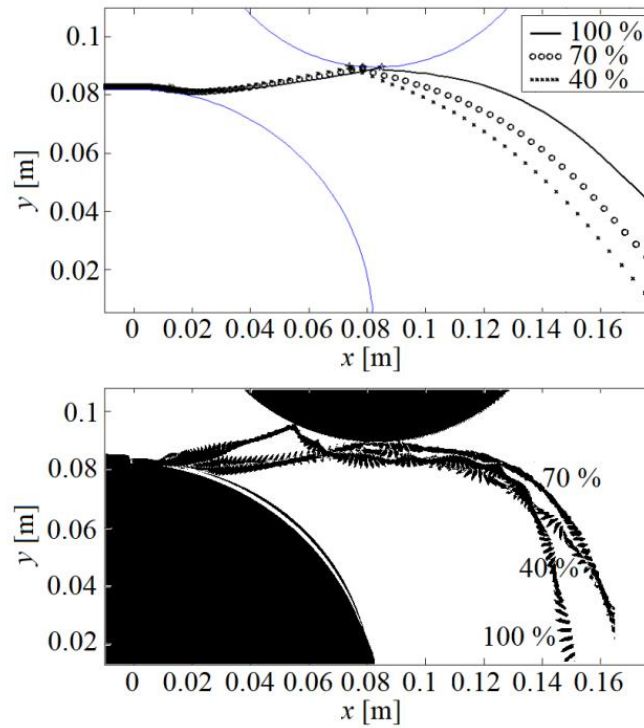


Figure 3.18. Trajectoires calculées et expérimentales de la particule isolante de 2 mm de diamètre, en fonction de la vitesse du convoyeur, exprimée en pourcentage de la valeur maximale.

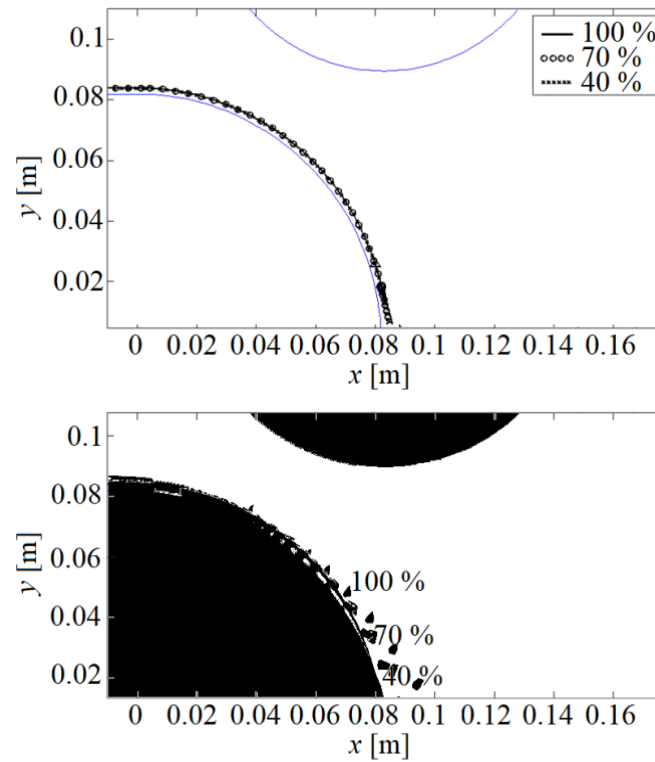


Figure 3.19. Trajectoires calculées et expérimentales de la particule isolante de 4 mm de diamètre, en fonction de la vitesse du convoyeur.

Les figures 3.18 et 3.19 montrent l'influence de la vitesse du convoyeur. La force centrifuge, qui dépend de la masse de la particule et du rayon de la section circulaire du convoyeur, peut modifier leurs trajectoires. Par conséquent, la variation de la vitesse du convoyeur a une influence plus forte sur les plus grosses particules.

Conclusion

Les travaux de ce chapitre visaient à modéliser numériquement les trajectoires des particules isolantes et conductrices dans un séparateur électrostatique multifonctionnel. Le modèle, qui consiste en la résolution d'un système d'équations différentielles, a pris en compte les différentes forces qui dépendent de la nature du matériau (isolant ou conducteur) et qui agissent sur les particules en mouvement.

Dans les séparateurs électrostatiques, la qualité de la séparation est évaluée par la pureté des produits séparés, laquelle est principalement altérée par les impacts des particules avec l'électrode statique, qui peuvent modifier radicalement leurs trajectoires et les conduisent vers des boîtes inappropriées du collecteur. Ces trajectoires sont influencées par la valeur de la haute tension, la charge, la masse, la taille et la forme des particules, ainsi que par le positionnement de l'électrode statique et, dans une moindre mesure, par la vitesse du convoyeur.

Une étude expérimentale de l'influence de chacun de ces paramètres aurait été extrêmement coûteuse en temps, même en utilisant la méthodologie des plans d'expériences. L'outil numérique prouve ici toute son utilité puisqu'il peut guider le chercheur pour fixer les limites du domaine de variation des facteurs considérés dans les expériences.

La simulation numérique a permis de prédire la trajectoire d'une particule (isolante ou conductrice), en commençant par le calcul de son point de décollage de l'électrode mise à la terre. La validation du modèle numérique a été rendue possible par l'utilisation d'une caméra à très haute vitesse. Les trajectoires des particules obtenues par simulation avec le modèle numérique étaient en très bon accord avec celles enregistrées par la caméra à haute vitesse.

L'objectif du chapitre suivant sera de mettre au point cette procédure de validation expérimentale dans un autre type de séparateur électrostatique, dans le but de généraliser le modèle numérique, et d'apporter des améliorations.

Chapitre 4

Modélisation et simulation des trajectoires des particules dans le séparateur à tambour (PRODEKOLOGIA)

Intégrée à un processus de recyclage "standard" (tri manuel → séparation magnétique → broyage) [136][137], la séparation électrostatique peut traiter un large panel de produits plastiques ou métalliques usagés, tels que les câbles électriques [138], les circuits imprimés [137][139][140] et autres déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) [141], ainsi que les véhicules hors d'usage [142], [143].

Parmi tous les modèles de séparateurs électrostatiques existants, ceux à tambour rotatif (Fig. 4.1) sont les plus largement utilisés pour le tri sélectif des constituants de divers mélanges granulaires dans la exploitation des minerais, le conditionnement des semences et les industries de recyclage des déchets [141][142]. En raison de la complexité de la configuration des électrodes et des mécanismes physiques impliqués dans son fonctionnement (décharge corona, induction électrostatique), on qualifie la séparation électrostatique d'être un processus multifactoriel. Afin de l'optimiser et de maximiser son efficacité, la simulation numérique est une solution adéquate, car elle permet une compréhension approfondie des différents phénomènes et l'optimisation du procédé de sa conception à son exploitation.

Les réglages des variables de contrôle (typiquement la haute tension appliquée au système d'électrodes, la position de l'électrode et la vitesse de rotation du tambour rotatif mis à la terre) sont fréquemment établis en utilisant la méthode des plans d'expériences [6]. La modélisation numérique des trajectoires des particules a également été utilisée pour évaluer les effets des différents facteurs pouvant influencer le résultat de la séparation [8] [139], [140], . Les modèles numériques ont progressivement intégré la plupart des phénomènes physiques impliqués dans le processus, tels que les impacts avec les électrodes ou la variabilité de la taille des particules, mais ils n'ont été que partiellement validés par la mesure de la récupération et de la pureté des produits récupérés dans les boîtes du collecteur [144].

L'électrode rotative à tambour (1), mise à la terre, a un rayon de 135 mm et une largeur de 130 mm. L'électrode active (2), connectée à l'alimentation haute tension de polarité positive ou négative, a une longueur de 157 mm, une largeur de 130 mm ; le rayon de son

extrémité supérieure est $R_e = 13$ mm et celui de son extrémité inférieure est 2,5 mm. La distance entre les deux électrodes est toujours maintenue à $d : 32$ mm.

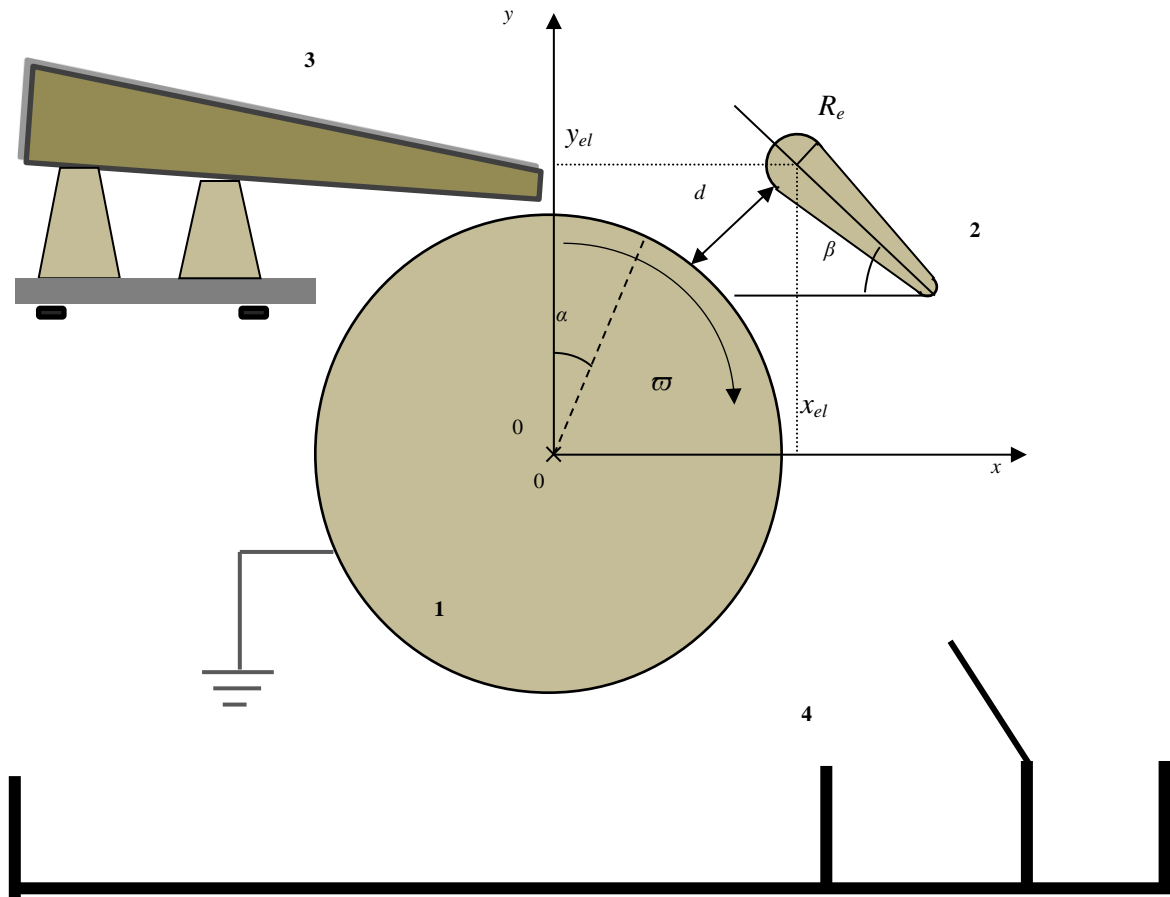


Figure 4. 1. Séparateur corona-électrostatique à tambour produit par la société PRODECOLOGIA, Rivne, Ukraine ; 1 : électrode à tambour rotatif mise à la terre ; 2 : électrode active ; 3 : goulotte vibrante d'alimentation ; α : position angulaire de la particule ; β : angle d'inclinaison horizontal de l'électrode ; x_{el} , y_{el} : coordonnées d'un point repère de l'électrode active.

4.1. Modélisation numérique et simulation du mouvement des particules dans le séparateur électrostatique à tambour rotatif

Le modèle numérique développé sous MATLAB prend en compte les principales forces exercées sur les particules chargées (figure 4.2), ce modèle résout l'équation du mouvement et calcule les trajectoires des particules.

Le champ électrique (figure 4.3) est créé entre l'électrode active reliée à la haute tension et le tambour mis à la terre.

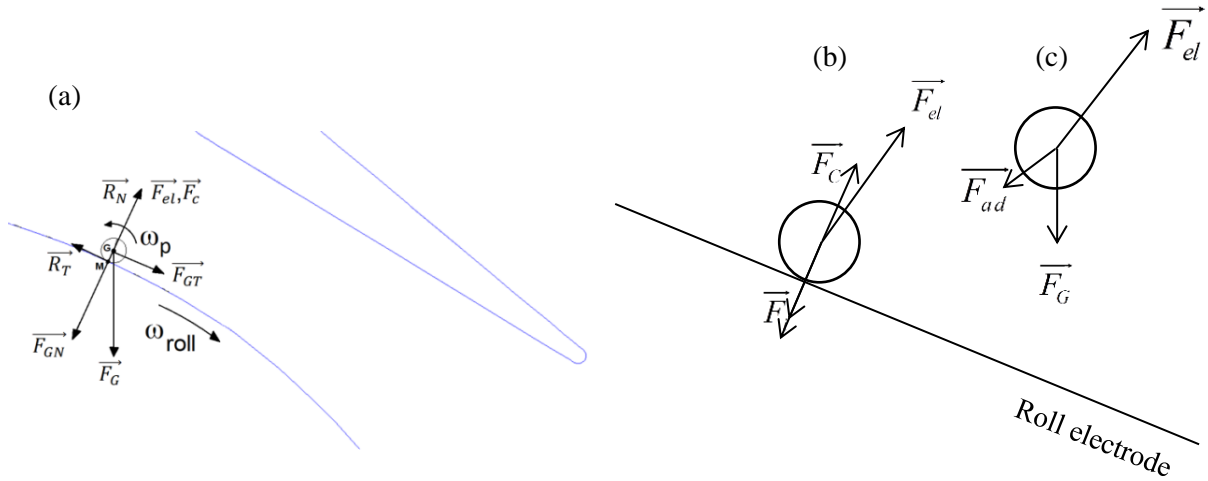


Figure 4. 2. Principales forces qui agissent sur une particule conductrice sphérique (a), et sur une particule isolante chargée avant détachement (b) après détachement (c).

Durant le processus de séparation, les particules sont plongées dans ce champ électrique, qui est responsable de leur charge (dans le cas des particules conductrices) et de la force électrique qui contribue majoritairement à leur mouvement.

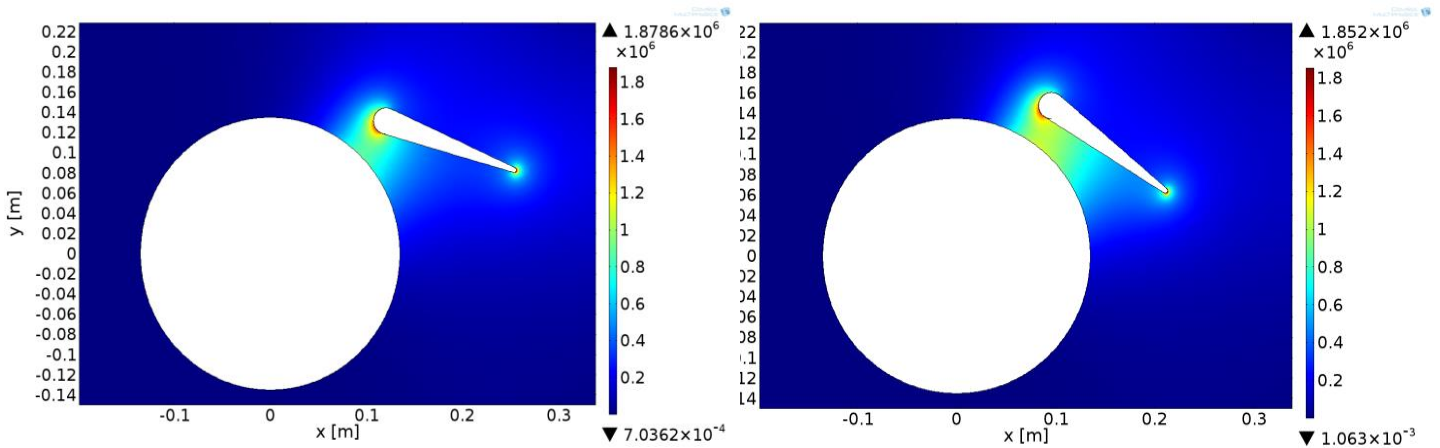


Figure 4. 3. Intensité du champ électrique calculé par le logiciel COMSOL pour deux positions de l'électrode statique haute tension et pour une tension de 30 kV.

En effet le mouvement des particules est régi par une ensemble de forces gravitationnelles, centrifuges, électriques et aérodynamiques [9][10][139]. Selon la loi de Newton :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F} \quad (4.1)$$

$$I_p \frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = \sum M_G(\vec{F}) \quad (4.2)$$

où m représente la masse de la particule et a son accélération, F désignant les forces agissant sur cette particule, ω_p la vitesse de rotation de la particule, M_G le moment au point G des forces extérieures, I_p le moment d'inertie de la particule.

$$I_p = \frac{2}{5} mR^2 \quad (4.3)$$

En résolvant cette équation différentielle, il est possible de calculer la position et la vitesse de la particule pour chaque pas de temps, en utilisant la méthode Euler-Cromer [9]-[10] :

$$\begin{aligned} \vec{v}_{n+1} &= \vec{v}_n + \vec{a}_n \cdot \Delta t \\ \vec{p}_{n+1} &= \vec{p}_n + \vec{v}_{n+1} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (4.4)$$

Le modèle mathématique complet des trajectoires des particules a été établi en utilisant les hypothèses simplificatrices suivantes : (i) les particules sont introduites sur la surface du rouleau-électrode en rotation à une vitesse initiale nulle ; (ii) sous l'effet de la rotation du tambour, de l'inertie et du frottement avec la surface de cette électrode, chaque particule roule et glisse en effectuant un mouvement complexe de translation dans le plan (Ox , Oy) et de rotation autour de son propre axe Oz . Ainsi, le modèle numérique permet le calcul des trajectoires à trois degrés de liberté (3 DoF). (iii) des impacts particule/électrode peuvent se produire au cours du processus de séparation ; la composante normale de la vitesse de la particule est inversée et réduite par un facteur de restitution e , qui dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques de la particule et de l'électrode [20] :

$$\begin{aligned} \vec{V}_p &= \vec{V}_{pN} + \vec{V}_{pT} \\ \vec{V}_{pN}' &= -e \vec{V}_{pN} \\ \vec{V}_{pT}' &= \vec{V}_{pT} \end{aligned} \quad (4.5)$$

où \vec{V}_{pN} et \vec{V}_{pN}' sont les composantes normales de la vitesse de la particule avant et après l'impact, respectivement ; \vec{V}_{pT} et \vec{V}_{pT}' , les composantes tangentielles de la vitesse de la particule avant et après l'impact.

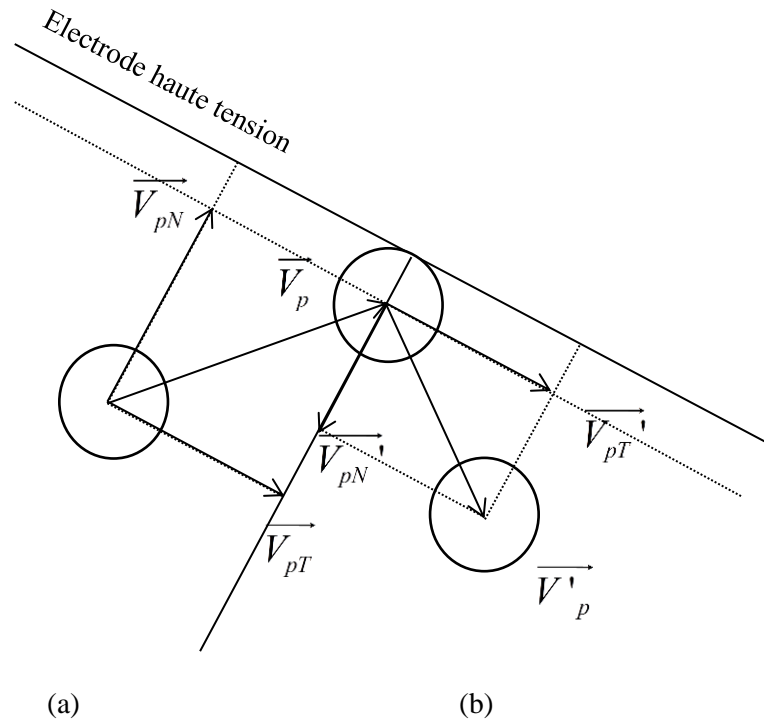


Figure 4. 4. Vitesse de la particule chargée avant (a) et après l'impact (b) avec l'électrode haute tension.

4.2. Procédure expérimentale

La première série d'expériences concerne les particules conductrices. Ces expériences ont été réalisées avec deux tailles (2 mm et 4 mm) de particules plastiques sphériques de Polypropylène (PP) recouvertes d'une fine couche de nickel (PP). Dans le séparateur corona-électrostatique à tambour (Prodecologia, Rivne, Ukraine), l'électrode active a été placée dans deux positions :

(I) $x_{el} = 0,124$ m, $y_{el} = 0,135$ m, $\beta = 25^\circ$.

(II) $x_{el} = 0,1$ m ; $y_{el} = 0,154$ m ; $\beta = 35^\circ$.

La haute tension appliquée au système d'électrodes a été réglée à 10 kV, 20 kV et 30 kV, et la vitesse de rotation de l'électrode à tambour a été ajustée à plusieurs valeurs entre 10% et 100% qui représentent respectivement 7 tr/min et 70 tr/min, de manière à faire varier les forces électrostatiques et centrifuges exercées sur les particules. Durant ces expériences, un facteur est maintenu à sa valeur minimale, tout en modifiant l'autre, afin d'étudier l'influence de chaque paramètre séparément.

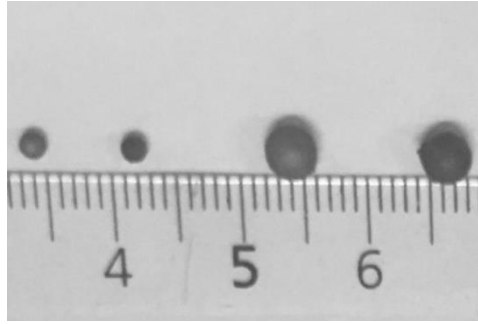


Figure 4. 5. Particules conductrices de polypropylène (PP) recouvertes d'une fine couche de nickel, de 2 mm de diamètre et de 4 mm de diamètre

La seconde série d'expériences est consacrée aux particules isolantes, les expériences ont été réalisées en utilisant des échantillons de deux tailles de particules isolantes d'ABS et de HIPS avec un rayon équivalent de 1,63 mm et 2,41 mm respectivement (Fig. 4.6). Les particules, caractérisées par des formes non uniformes, ont été obtenues par broyage du plastique contenu dans les déchets d'équipements électriques et électroniques. Les coordonnées de positionnement de l'électrode active étaient :

$$x_{el} = 0,1 \text{ m} ; y_{el} = 0,154 \text{ m} ; \beta = 35^\circ.$$

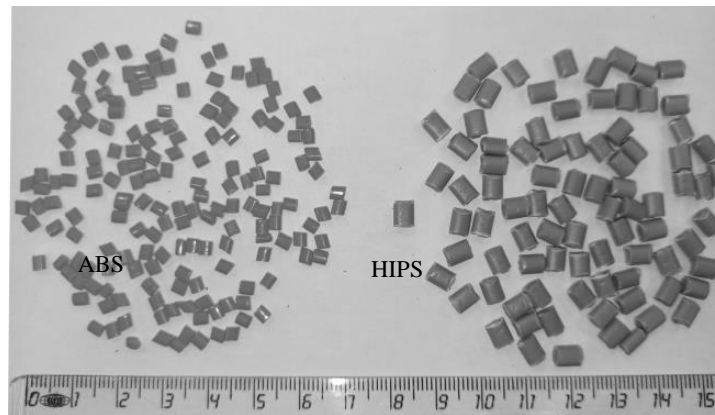


Figure 4. 6. Formes et tailles des particules d'ABS et de HIPS utilisées.

Les particules isolantes ont été chargées par une électrode à effet corona en utilisant la surface du convoyeur métallique mis à la terre du séparateur multifonctionnel. Pour ce faire, une électrode corona à fil de 0,26 mm de diamètre a été placée à une hauteur de 45 mm du convoyeur, en appliquant une tension de + 22 kV pour les petites particules, et de + 28 kV pour les grandes. La charge des particules a été mesurée directement en les collectant à la sortie du convoyeur dans la cage de Faraday relié à un électromètre (Keithley, modèle 6514). Les particules chargées sont ensuite déposées dans le dispositif d'alimentation vibrant du séparateur et transférées dans la zone de séparation.



Figure 4. 7. Disposition du séparateur électrostatique Prodecologia et de la caméra vidéo à haute vitesse SpeedSense.

Les trajectoires des particules conductrices et isolantes ont été enregistrées à l'aide d'une caméra à haute vitesse avec un taux d'acquisition de 200 fps (images par seconde) (série SpeedSense VEO, 4 MP) pour deux positions de l'électrode, comme le montre la figure 4.7.

4.3 Résultats et analyses

4.3.1 Analyse et comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de la simulation numérique pour les tests effectués sur les particules conductrices

Les résultats représentés sur la figure 4.8 montrent que la rotation des particules autour de leur propre axe Oz a un effet très limité sur leurs trajectoires. Cependant, cet effet a été pris en compte dans toutes les simulations présentées dans ce chapitre, bien que la rotation n'ait pas été représentée sur les autres figures, car elle les aurait encombrées inutilement.

Les trajectoires visualisées expérimentalement et calculées numériquement d'une particule de 2 mm de diamètre sont représentées sur la figure 4.9 pour différentes tensions appliquées au système d'électrodes. En raison de la masse faible de la particule, la force électrique est la plus grande et la déviation augmente avec la tension. L'analyse des trajectoires des particules facilite le choix du bon emplacement des boîtes du collecteur.

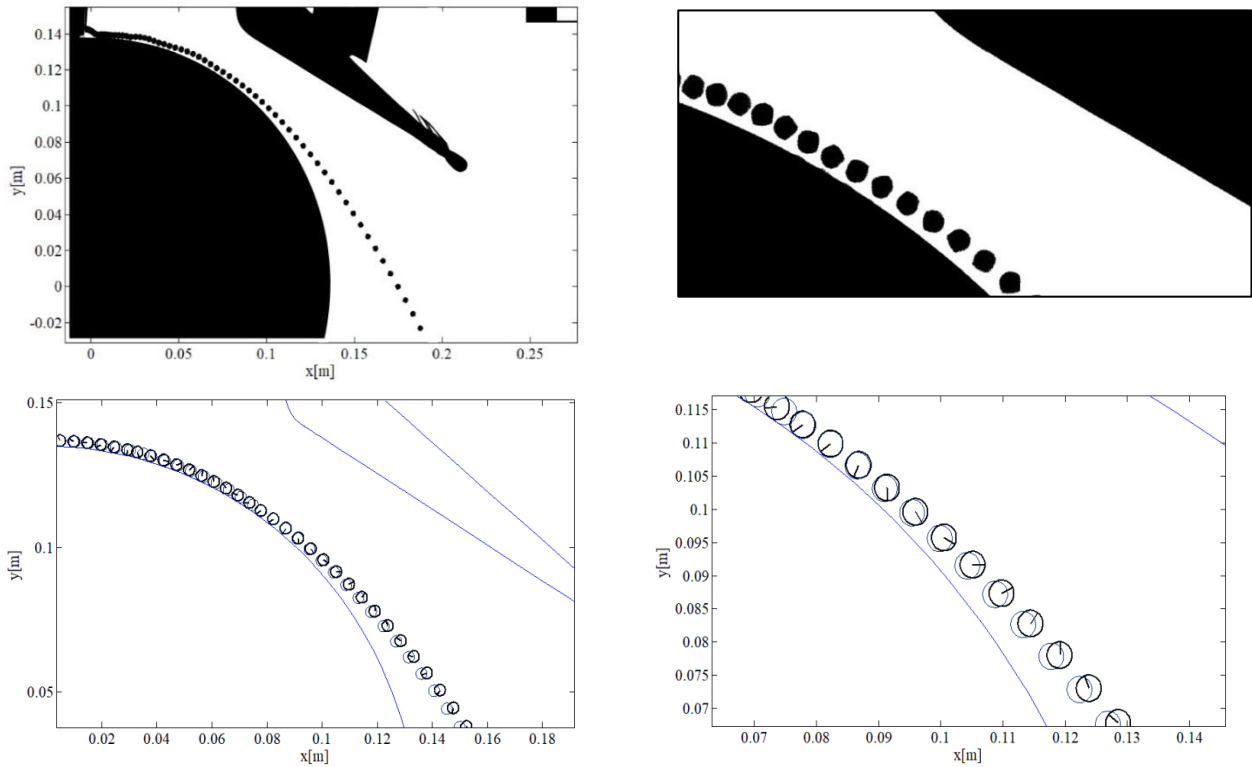


Figure 4. 8. Trajectoires visualisées (a) et simulées (b) d'une particule de 4 mm de diamètre, en tenant compte de la rotation autour de son propre axe Oz , à 10 kV et 70 tr/min ; (c) Un zoom de la trajectoire de la particule au moment du décollage.

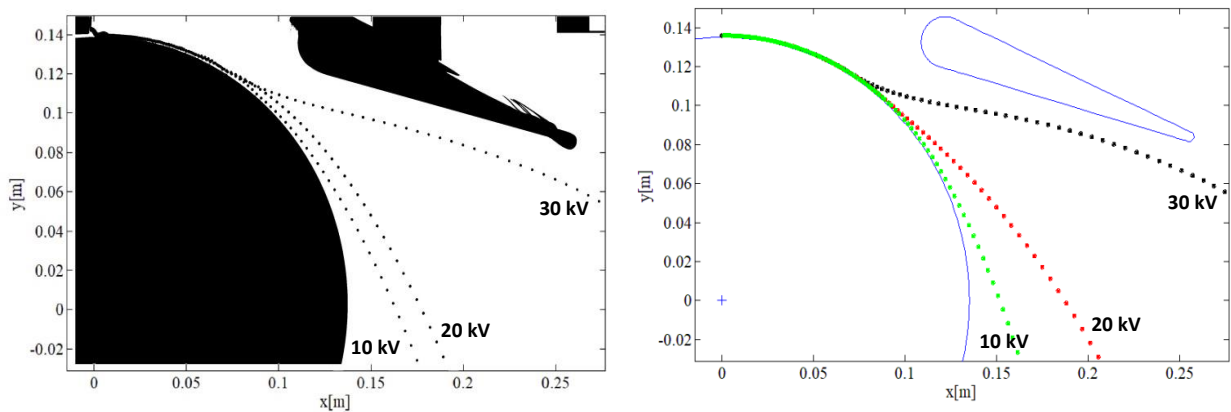


Figure 4. 9. Trajectoires visualisées (a) et simulées (b) d'une particule conductrice de 2 mm en fonction de la haute tension appliquée, pour la position (I) de l'électrode active.

La figure 4.10 illustre le cas où la position de l'électrode a été modifiée de sorte que la zone du champ électrique intense soit plus étendue par rapport aux situations précédentes. Cette modification a modifié les trajectoires des particules car la force électrique agit dans une zone plus large.

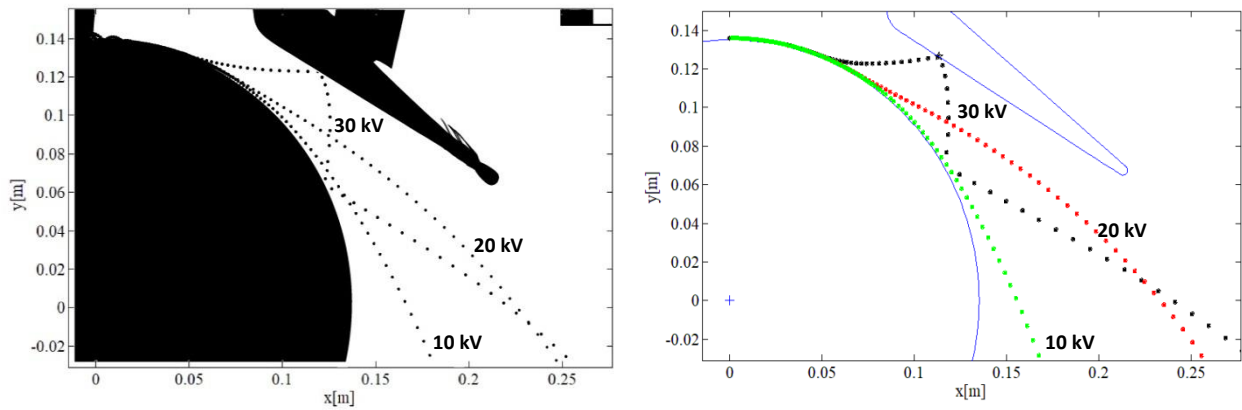


Figure 4. 10. Trajectoires visualisées (a) et simulées (b) d'une particule conductrice de 2mm en fonction de la haute tension appliquée, pour la position (II) de l'électrode active.

Lorsqu'une tension de 30 kV a été appliquée au système d'électrodes, la particule est entrée en collision avec l'électrode statique. Lors de l'impact, la particule conductrice a acquis une charge du même signe que cette électrode et a ensuite été repoussée. Les collisions électrode/particule doivent être évitées, car ce type de phénomènes réduit la pureté du produit séparé.

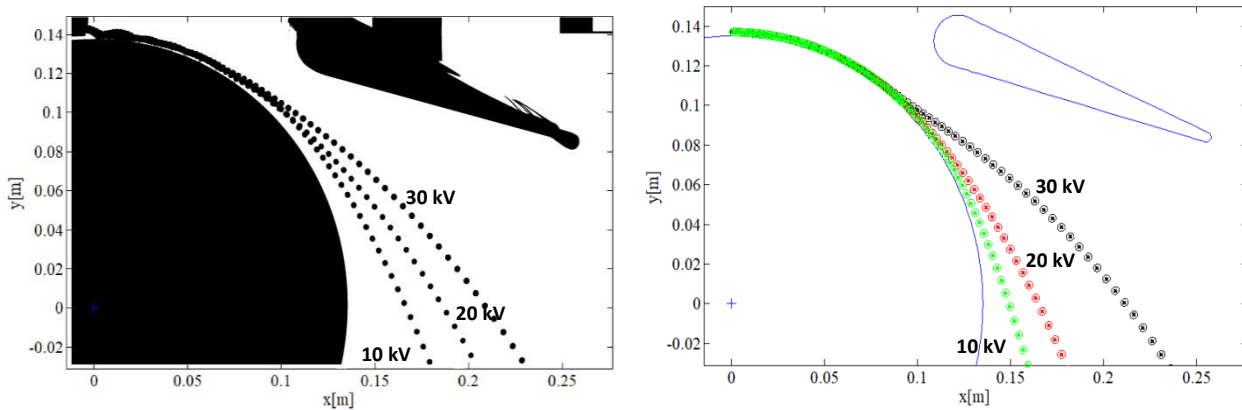


Figure 4. 11. Trajectoires visualisées (a) et simulées (b) d'une particule conductrice de 4 mm en fonction de la haute tension appliquée, pour la position (I) du système d'électrodes.

Une particule de 4 mm de diamètre étant plus lourde, le rapport entre les forces électriques et mécaniques diminue, et une tension plus élevée était nécessaire pour modifier sa trajectoire (figure 4. 11). La figure 4. 12 montre que la position (II) renforce l'effet de la force électrostatique, ce qui conduit à un meilleur résultat de la séparation électrostatique.

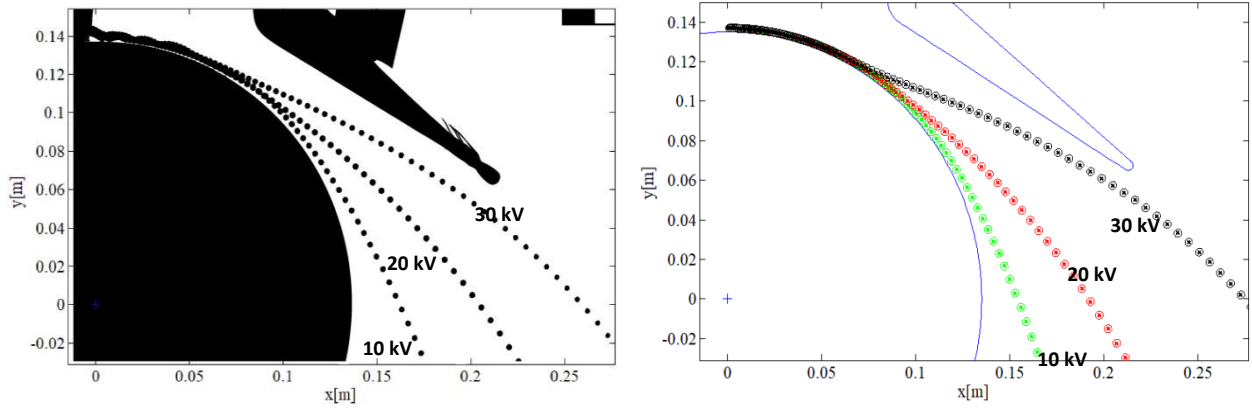


Figure 4. 12. Trajectoires visualisées (a) et simulées (b) d'une particule conductrice de 4 mm en fonction de la haute tension appliquée, pour la position (II) du système d'électrodes.

Comme prévu, afin de contrôler la trajectoire des particules les plus lourdes, des tensions relativement plus élevées doivent être choisies. Lorsque la haute tension appliquée était seulement de 10 kV, les déviations des particules étaient presque les mêmes pour les deux positions de l'électrode parce que le mouvement était principalement influencé par les forces mécaniques.

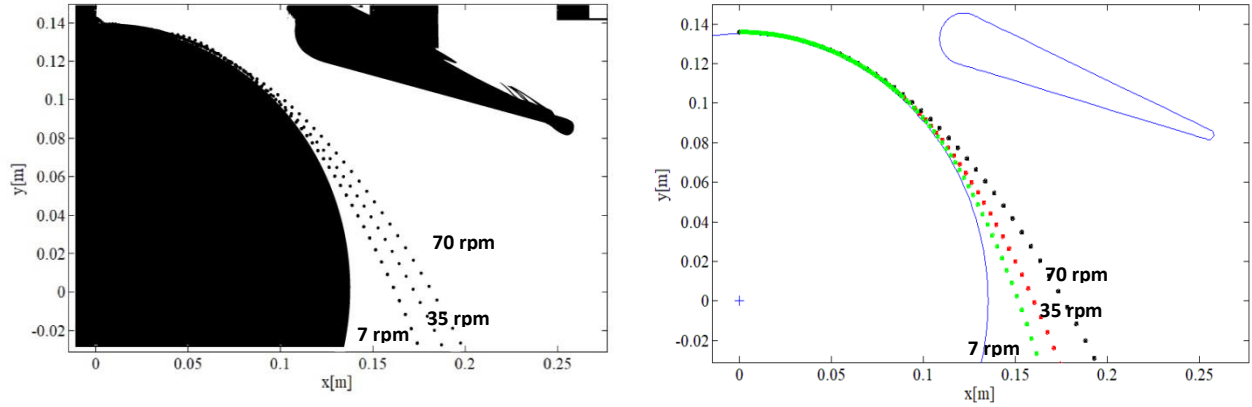


Figure 4. 13. Trajectoires visualisées (a) et simulées (b) d'une particule conductrice de 2 mm en fonction de la vitesse de rotation du tambour, pour la position (I) du système d'électrodes.

Lorsque la tension est fixée à 10 kV, les trajectoires obtenues pour les particules de 2 mm à différentes valeurs de la vitesse du tambour sont principalement gouvernées par les forces gravitationnelles et centrifuges, pour les deux positions (I) et (II) du système d'électrodes (figures 4.13 et 4.14).

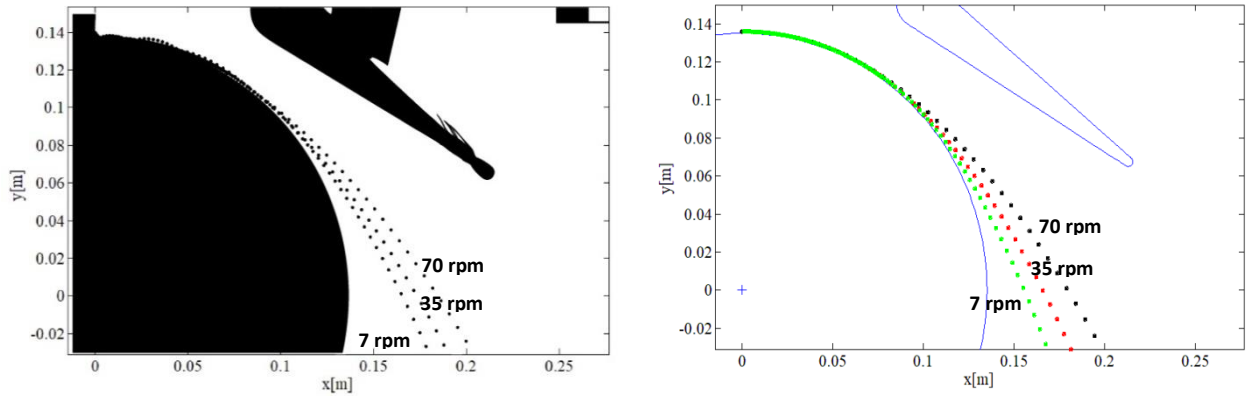


Figure 4. 14. Trajectoires visualisées (a) et simulées (b) d'une particule conductrice de 2 mm en fonction de la vitesse de rotation du tambour, pour la position (II) du système d'électrodes.

Bien que le champ électrique soit relativement plus intense dans le dernier cas, la contribution de la force électrostatique est insignifiante comparée aux forces mécaniques, et les trajectoires sont typiquement les mêmes pour les deux positions.

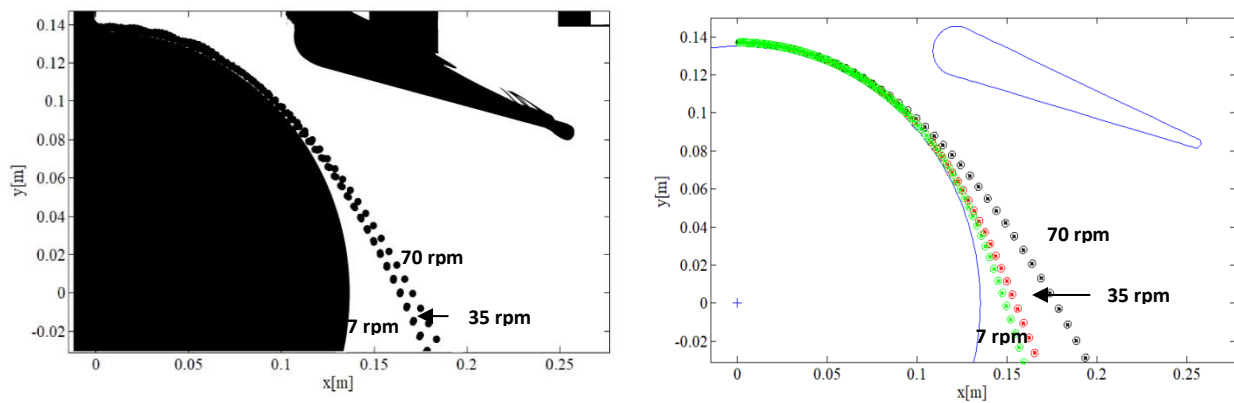


Figure 4. 15. Trajectoires visualisées (a) et simulées (b) d'une particule conductrice de 4 mm en fonction de la vitesse de rotation du tambour, pour la position (I) du système d'électrodes.

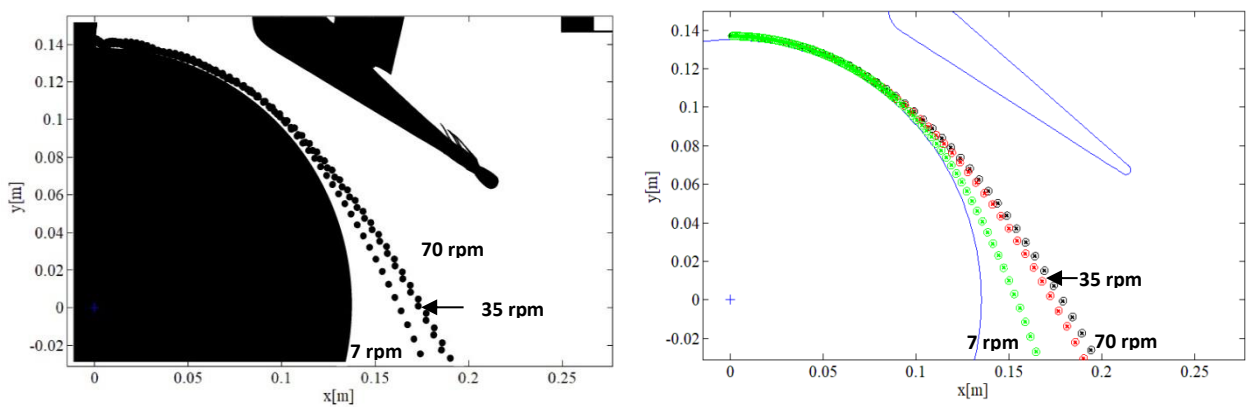


Figure 4. 16. Trajectoires visualisées (a) et simulées (b) d'une particule conductrice de 4 mm en fonction de la vitesse de rotation du tambour, pour la position (II) du système d'électrodes.

Pour les particules plus lourdes de diamètre 4 mm, le mouvement est influencé par la force gravitationnelle, les trajectoires sont presque les mêmes pour les différentes valeurs de la vitesse de rotation du tambour et pour les deux positions (figures 4.15 et 4.16).

4.3.2 Analyse et comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de la simulation numérique pour les tests effectués sur les particules isolantes

Les expériences de chargement par effet corona ont permis d'évaluer la charge massique des particules :

- pour les petites particules (rayon : 1,6 mm) : $13,7 \text{ nC/g} \pm 0,7 \text{ nC/g}$,
- pour les grandes particules (rayon : 2,4 mm) : $11,7 \text{ nC/g} \pm 0,8 \text{ nC/g}$.

Sur la base de ces mesures, les charges moyennes individuelles des petites particules et grandes particules ont été évaluées respectivement à 0,26 nC et 0,7 nC. Ces valeurs ont ensuite été utilisées pour le calcul des trajectoires des particules.

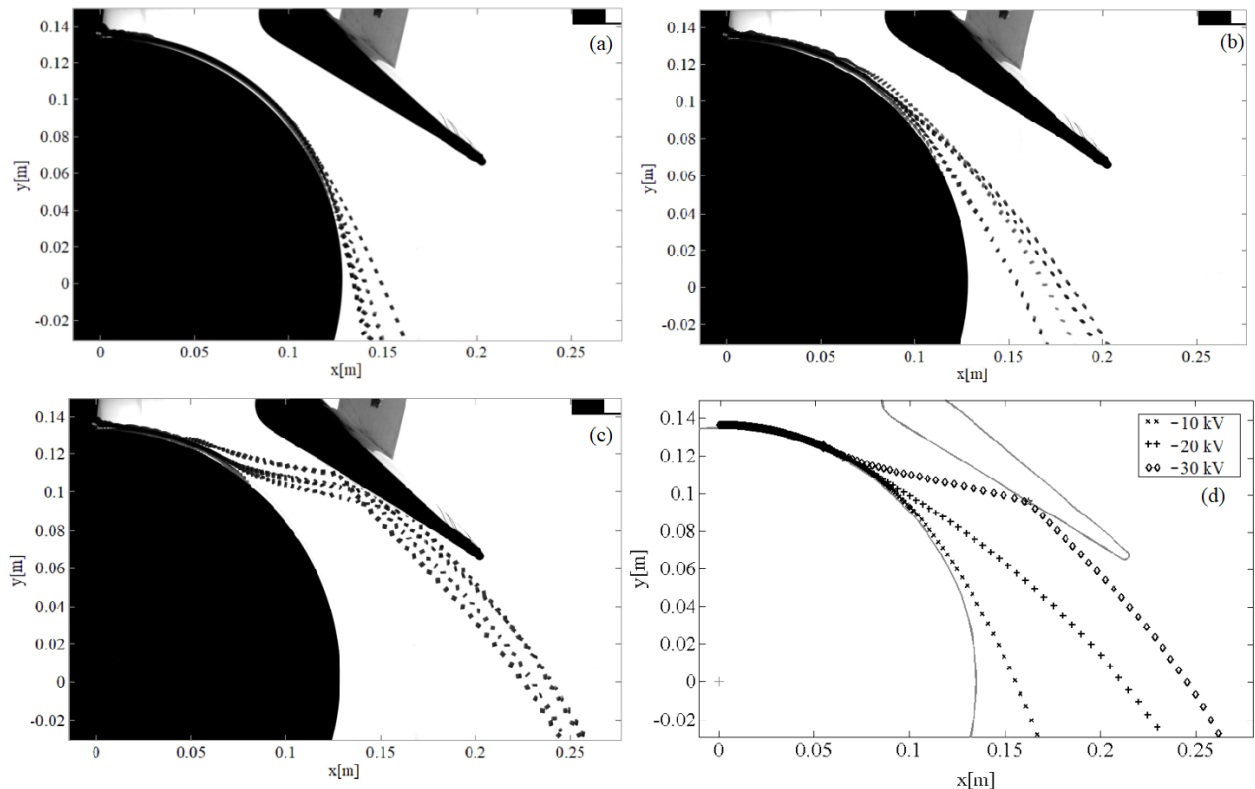


Figure 4. 17. Trajectoires expérimentales enregistrées à une vitesse de rotation fixe de l'électrode à tambour de 7 tr/min, et pour trois valeurs de la haute tension : 10 kV (a) ; 20 kV (b) ; 30 kV(c) ; résultats des simulations numériques pour les trois valeurs de tension, pour des particules isolantes de rayons 1.6 mm (d)

La figure 4.17 représente les trajectoires enregistrées et simulées des petites particules pour trois valeurs de la haute tension appliquée à l'électrode active et à une vitesse de rotation de l'électrode à tambour de 7 tr/min. À basse tension (10 kV), la force électrostatique n'était pas assez forte et le mouvement était principalement régi par la force de gravité (figure 4.17, a). En augmentant la tension à 20 kV (figure 4.17, b), les particules ont été soumises à des forces électrostatiques plus fortes qui les ont déviées vers la boîte de récupération adéquate. La dispersion des trajectoires enregistrées est due au fait que les particules n'étaient pas rigoureusement de mêmes tailles, formes et charges.

En réglant la tension à sa valeur maximale (30 kV), les particules ont heurté l'électrode, comme le montre la figure 4.17, (c). Les impacts ont changé la direction du mouvement, et les particules ont été projetées vers une boîte de récupération inappropriée. Les trajectoires prédites par les simulations numériques ont montré les mêmes tendances (figure 4.17, d).

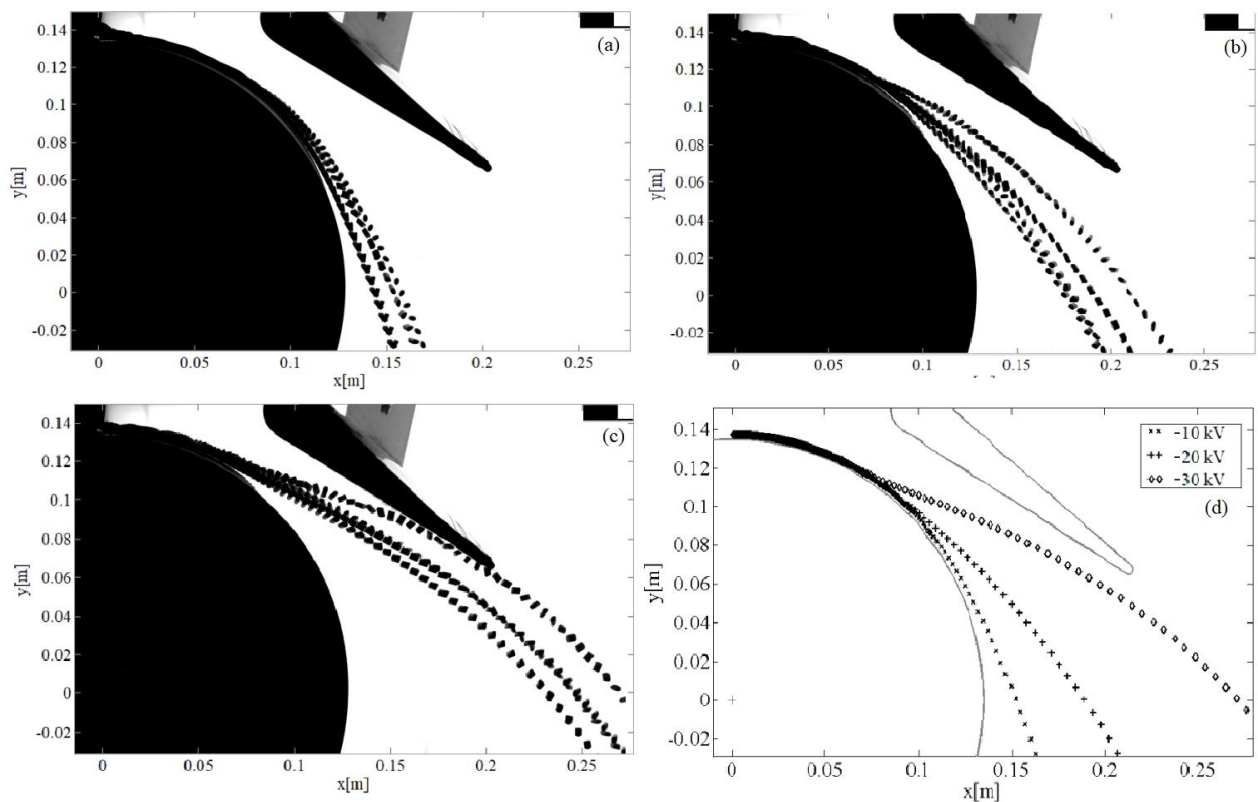


Figure 4. 18. Trajectoires expérimentales enregistrées à une vitesse de rotation fixe de l'électrode à tambour de 7 tr/min, et pour trois valeurs de la haute tension : 10 kV (a) ; 20 kV (b) ; 30 kV(c) ; résultats des simulations numériques pour les trois valeurs de tension, pour des particules isolantes de rayons 2.4 mm (d).

Les trajectoires des particules les plus grandes (rayon : 2,4 mm) ont été plus affectées par la force de gravité (figure 4.18). Aucun impact avec l'électrode haute tension ne s'est

produit, même à 30 kV (figure 4.18, c). Les trajectoires simulées dans la figure 4.18, (d) illustrent l'effet de la force électrostatique qui augmente avec la tension appliquée mais son effet de déviation est moins prononcé par rapport aux petites particules.

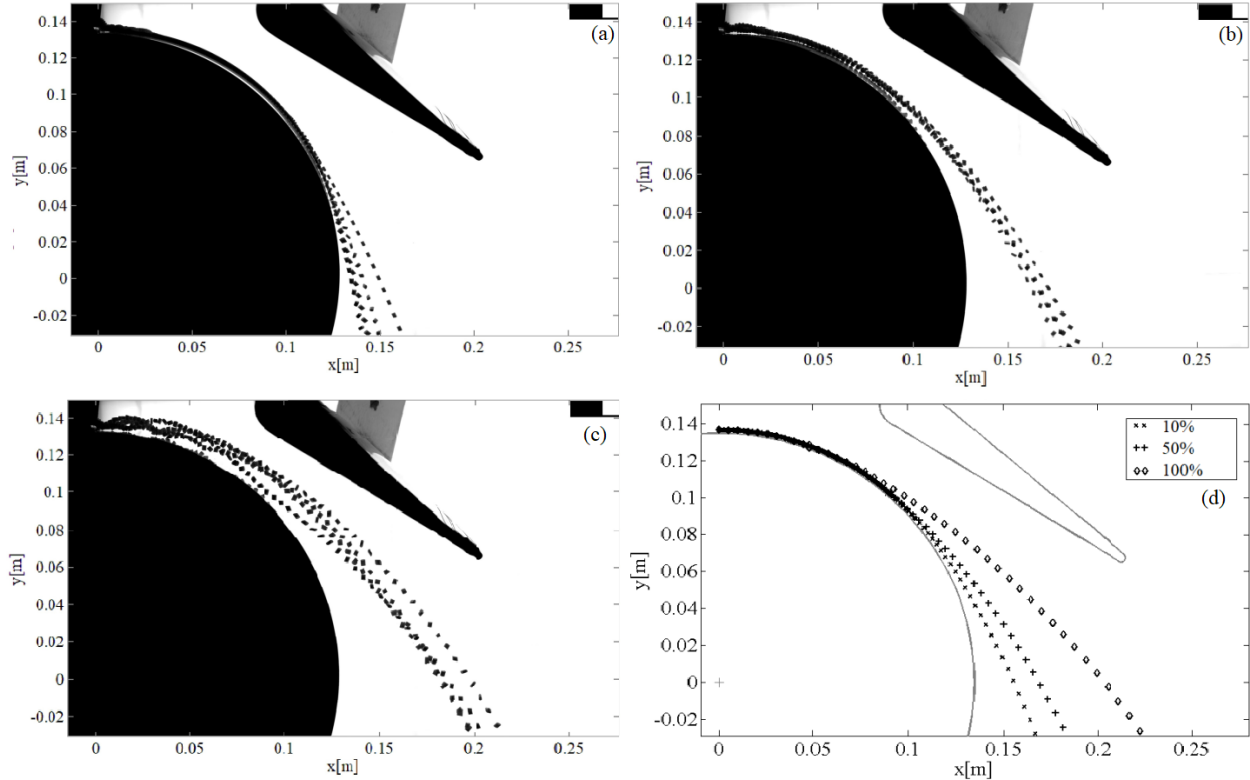


Figure 4.19. Trajectoires expérimentales enregistrées à une haute tension appliquée de 10 kV, et des vitesses de rotation du tambour représentant 10% (a) ; 50% (b) ; 100% (c) de la valeur maximale de 70 tr/min ; résultats des simulations numériques pour les trois valeurs de vitesse de rotation, pour des particules isolantes de rayons 1.6 mm (d).

L'effet de la vitesse de rotation de l'électrode à tambour peut être examiné en se référant aux images enregistrées sur la figure 4.19. Toutes les expériences ont été réalisées à la valeur basse de la tension appliquée, 10 kV. À la vitesse minimale de 7 tr/min (la figure 4.19, a), les plus petites particules (rayon : 1,6 mm) ont eu tendance à rester collées à l'électrode à tambour, car la force centrifuge est inférieure à la force d'image électrique. En augmentant la vitesse de rotation, la force centrifuge augmente et dépasse la force d'image électrique et les particules ont été projetées loin de l'électrode à tambour (la figure 4.19, b et c). L'effet de la vitesse de rotation de l'électrode à tambour peut être facilement évalué en examinant les trajectoires simulées représentées sur la figure 4.19, (d).

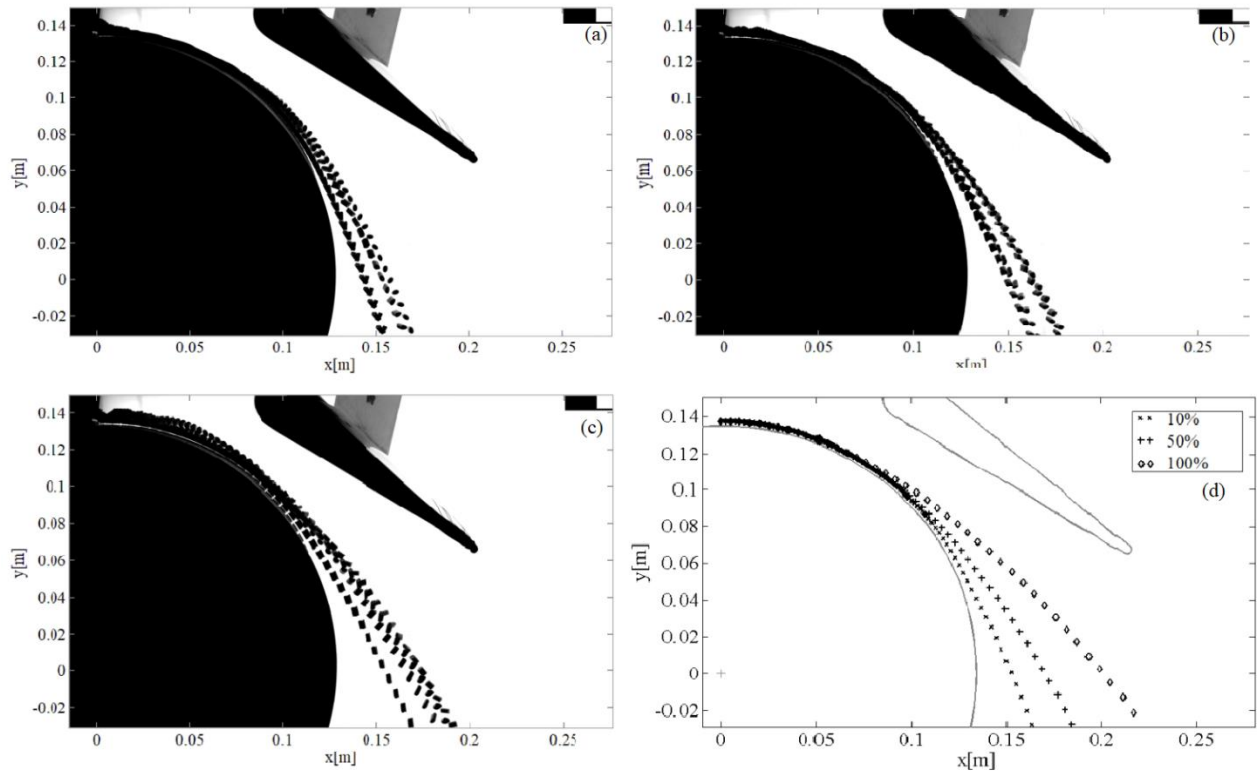


Figure 4.20. Trajectoires expérimentales enregistrées à une haute tension de 10 kV, et des vitesses de rotation du tambour représentant 10% (a) ; 50% (b) ; 100% (c) de la valeur maximale de 70 tr/min ; résultats des simulations numériques pour les trois mêmes valeurs, pour des particules isolantes de rayons 2.4 mm (d).

L'effet de la force centrifuge est plus fort et celui de la force d'image électrique est plus faible dans le cas des grandes particules (rayon : 2,4 mm), comme le montrent les images de la figure 4.20. Sur la figure 4.20, (a), la particule étant plus grosse et la force centrifuge étant plus forte que la force électrique, le mouvement est principalement régi par des forces mécaniques. En augmentant la vitesse de rotation de l'électrode à tambour, la déviation est de plus en plus importante (figure 4.20, b et c) ; il faut noter que la déviation est relativement faible par rapport à la déviation créée par les forces électriques à des tensions plus élevées.

Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de valider le modèle numérique de simulation des trajectoires des particules conductrices et isolantes et d'étudier l'influence des différents facteurs qui modifient les trajectoires des particules de différentes tailles dans le séparateur électrostatique à tambour. La comparaison entre les résultats de la simulation numérique et les données expérimentales a conduit aux conclusions suivantes :

L'outil d'acquisition d'images s'est révélé très efficace pour une étude approfondie des différents phénomènes qui se produisent lors du processus de séparation électrostatique.

La précision et la robustesse du modèle numérique proposé, qui tient compte de toutes les forces électriques et mécaniques qui régissent le mouvement des particules, sont confirmées par le bon accord avec les observations expérimentales.

Les observations expérimentales et les simulations numériques soulignent la nécessité d'opérer à des niveaux de tension élevés qui doivent être proportionnels au poids des particules et à la vitesse du tambour rotatif, afin d'éviter les impacts des particules avec l'électrode active, ce qui altère la pureté des produits récupérés.

Conclusion générale

La séparation électrostatique a la réputation d'être une technologie de recyclage efficace et robuste, caractérisée par un faible coût, une consommation d'énergie réduite et une grande facilité d'utilisation. Cependant, le processus de séparation est multifactoriel et nécessite un choix judicieux des paramètres électriques et géométriques afin de permettre le traitement de différents mélanges de matériaux et d'obtenir un résultat optimal.

La maîtrise du processus de séparation électrostatique nécessite une étude plus approfondie du comportement des particules chargées ou polarisées, soumises à l'action d'un champ électrique. La méthodologie adoptée dans cette thèse associe l'étude expérimentale et la simulation numérique, afin d'aboutir à un modèle fiable, d'où l'intérêt de l'utilisation d'outils informatiques de pointe, et de matériels d'acquisition d'images ultra-rapides.

Cette étude avait pour but d'étudier les différents facteurs qui influencent les trajectoires des particules isolantes et conductrices dans les champs électriques continus intenses d'un séparateur électrostatique multifonctionnel et d'un séparateur à tambour rotatif. Nos travaux se sont focalisés sur la modélisation dite : « boîte blanche » complémentaire à la modélisation dite « boîte noire », qui avait été largement employé au paravent dans notre laboratoire et qui s'appuie sur la méthodologie des plans d'expériences. Cette méthodologie est très fiable et permet d'optimiser le processus de séparation en définissant les paramètres de contrôle, son inconvénient est la nécessité d'opérer pour chaque nouveau mélange de produits une longue série d'expériences couteuse en temps. La modélisation numérique se présente donc comme un outil qui pourrait faciliter l'optimisation du processus de séparation électrostatique, en réduisant le temps des expérimentations, la simulation des trajectoires des particules permettant d'éviter de nombreuses expériences préliminaires et d'obtenir une meilleure compréhension des différents phénomènes physiques et mécaniques en jeu.

Ainsi une étude expérimentale paramétrique associée à la modélisation numérique du processus de séparation électrostatique permet d'améliorer significativement la qualité de la séparation électrostatique, et assurer le bon fonctionnement des séparateurs. Une telle étude permet aussi de tester des nouveaux systèmes d'électrodes de formes et de configurations différentes, dans le but de proposer des solutions avant la conception/modification d'une installation de séparation électrostatique.

Conclusion générale

Pour atteindre les objectifs de ce travail, nous nous sommes appuyés sur une modélisation mathématique fidèle à l'expérimental, pour une optimisation de l'installation et une augmentation de la robustesse du procédé, afin de répondre aux exigences industrielles : pureté des produits supérieures à 95% et taux de récupérations supérieurs à 80% ; faible sensibilité aux fluctuations des conditions environnantes ; facilité d'utilisation et de maintenance.

L'outil d'acquisition d'images a permis une observation précise du comportement des particules chargées, permettant ainsi de vérifier la capacité prédictive du modèle numérique élaboré, et a contribué à une meilleure compréhension de l'influence des différentes forces qui régissent le mouvement des particules. L'outil numérique a également prouvé ici son utilité en fournissant des informations susceptibles de guider le chercheur pour fixer les limites du domaine de variation des facteurs considérés dans les expériences.

Plusieurs perspectives sont envisagées pour la continuation de cette étude :

- Développer un logiciel capable de s'adapter à tous les types des séparateurs électrostatiques, afin d'optimiser le processus de séparation électrostatique dès la phase de conception.
- Réaliser la simulation numérique d'un flux de particules de différentes natures et prendre en compte d'autres phénomènes physiques liés à l'interaction entre les particules.
- Affiner l'étude technico-économique préparatoire pour la réalisation d'un séparateur électrostatique industriel. Ceci impliquera, entre autres, la conception du système de commande et de contrôle du séparateur, en vue d'un fonctionnement continu régulé.

Références bibliographiques

- [1] S. Zhang, Y. Ding, B. Liu, C. C. Chang, “Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE”, Waste Management, vol. 65, pp. 113-127, 2017.
- [2] V. Forti, C. P. Balde, R. Kuehr, G. Bel, “The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential”, 2020.
- [3] K. Senathirajah, S. Attwood, G. Bhagwat, M. Carbery, S. Wilson, T. Palanisami, “Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment”, Journal of Hazardous Materials 404, 124004, 2020.
- [4] C. J. Rhodes, “Plastic pollution and potential solutions”, Science progress 101(3), 207-260, 2018.
- [5] Y. Matsushita, N. Mori and T. Sometani, “Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades”, Electrical Engineering in Japan, vol. 127, pp. 33- 40, 1999.
- [6] K. Medles, A. Tilmatine, F. Miloua, A. Bendaoud, M. Younes, M. Rahli, L. Dascalescu, “Set Point Identification and Robustness Testing of Electrostatic Separation Process,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 43, pp. 618-626, 2007.
- [7] S. Touhami, W. Aksa, K. Medles, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, “Numerical simulation of the trajectories of insulating particles in a tribo-aero-electrostatic separator”, IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 51(5), pp. 4151–4158, Sep. 2015.
- [8] J. Li, L. Dascalescu, M. Bilici, Z. Xu, “Numerical modeling of the trajectories of plastic granules in a tribo-aero-electrostatic separator”, Journal of Electrostatics 71, no 3, 281-286, 2013.
- [9] H. Labair, S. Touhami, A. Tilmatine, S. Hadjeri, K. Medles, L. Dascalescu, “Study of charged particles trajectories in free fall electrostatic separators”, Journal of Electrostatics 88, 10-14, 2017.
- [10] S. Touhami, W. Aksa, **M. Maammar**, T. Zeghloul, K. Medles, L. Dascalescu, “Numerical simulation of the behavior of insulating particles in a free fall tribo-electrostatic separator with four vertical cylindrical electrodes”, Journal of Electrostatics 97, 8-14, 2019.
- [11] L.I. Blake, L.N. Morcher, “Process of electrical separation of conductors from non-conductor”, Lucian I. Blake and Lawrence N. Morscher, United States Patent Office, USA668791, 1901.
- [12] C.H. Huff. “Apparatus for electrostatic separation of substances of diverse electric susceptibilities”, Charles H Huff, United States Patent Office, USA801380, 1904.
- [13] Carpco Res & Engineering Inc , “High tension separator”, Carpenter James H, United States Patent Office, US3370703 A, 1964.
- [14] L. Dascalescu, R. Morar, Al. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, “Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes”, Part. Sci. Technol. 16, 25-42, 1998.
- [15] A. Tilmatine, K. Medles, S.E. Bendimerad, F. Boukholda, L. Dascalescu, “Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures”, Waste Management 29, 228–232, 2009.
- [16] K. Medles, L. Dascalescu, A. Tilmatine, A. Bendaoud M. Younes, “Experimental Modeling of the Electrostatic Separation of Granular Materials”, Particulate Science and Technology, 25:2, 163-171, 2007.
- [17] J.K. Lee, J.H. Shin, “Triboelectrostatic separation of PVC materials from mixed plastics for waste plastic recycling”. Korean J. Chem. Eng. 19, 267–272, 2002.
- [18] J. Li, Z. Xu, Y. Zhou, “Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards” , Journal of Electrostatics 65 ,p.233–238, 2007.
- [19] H.S. Jeon, C.H. Park, B.G. Cho, J.K. Park, “Separation of PVC and rubber from covering plastics in communication cable scrap by tribo-charging”. Sep. Sci. Technol. 44, 190–202, 2009.
- [20] A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S.E. Bendimerad, M. Miloudi, K. Medles, “Experimental Investigation of Electrostatic Separators of Plastic Particles using Different Charging Devices”, Separation Science and Technology, vol 49, pp. 464–468, 2014.
- [21] L. Calin , A. Mihalcioiu, Al. Iuga, L. Dascalescu, “Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification”, Part.Sci.& Technol., vol.25, p. 205-211, 2007.
- [22] I.I. Inculet, G.S.P. Castle, J.D. Brown, “Electrostatic separation of plastics for recycling”, Part. Sci. Technol. 16, 91-100, 1998.
- [23] Y. Brahami, A. Tilmatine, R. Ouiddir, A. Bendaoud, K. Medles, L. Dascalescu, “Modeling of a New Triboelectrostatic Separation Process for Micronized Plastics”, IEEE trans, Ind, Appl. 51, p.4145-4150, 2015.

Références bibliographiques

- [24] A.M. Benhafssa, K. Medles, M.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., 51, 4166-4172, 2015.
- [25] R. Morar, A. Iuga, L. Dascalescu, A. Samuila, “*Factors which influence the insulation-metal electro separation*”, J. Electrostat., vol. 30, pp. 403- 412, 1993.
- [26] V. Neamtu, Al. Iuga, R. Morar, I. Suarasan, L. Dascalescu, “*Influence of high-voltage polarity on insulation-metal electro separation*”, J. Electrostat., vol. 30, pp. 423-432, 1993.
- [27] L. Dascalescu, A. Samuila, A. Iuga, R. Morar, I. Csorvasy, “*Influence of material superficial moisture on insulation-metal electro separation*”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, pp. 844-852, 1994.
- [28] M. Mihailescu, A. Samuila, A. Urs, R. Morar, Al. Iuga, L. Dascalescu, “*Computer-assisted experimental design for the optimisation of electrostatic separation processes*”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 38, no. 5, pp. 1174–1181, 2002.
- [29] L. Dascalescu, A. Tilmatine, F. Aman, M. Mihailescu, “*Optimisation of Electrostatic Separation Processes Using Response Surface Modelling*” IEEE Trans. Ind. Appl., vol.40, pp. 53-59, 2004.
- [30] Directive 2002/96/ce du parlement européen et du conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Journal officiel de l'Union européenne, n° L037 du 13/02/2003, pp. 24-38. 2003.
- [31] E.Ademe Labouze, M.Hestin, A.Deprouw, G.Pageot, Rapport annuel sur la mise en œuvre de la réglementation sur les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques(DEEE). Données 2009.2010.
- [32] L.Berreur, B. Bellot, B.Rivollet, R.Lilamand Les voies de l'innovation dans les métiers de la métallurgie. 2005.
- [33] G. Martinho,A.Pires,L.Saraiva, R.Ribeiro, “*Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling*”, Waste Management, vol.32(6), pp.1213-1217, 2012.
- [34] L. Flahaut et al, “*Etude pour une filière de recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques sur le territoire national*”, Rapport final, Screlec 2004.
- [35] C.Delavelle, D. Fayolle, “*Caractérisation des plastiques contenus dans les DEEE et état des lieux de la valorisation de ces plastiques*”, AJI-EUROPE, ADEME, 138p, 2006.
- [36] J.Hopewell, R.Dvorak, E.Kosior, “*Plastics recycling: Challenges and opportunities*”, Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, vol. 364(1526), pp. 2115-2126, 2009.
- [37] S.Jofre, T. Morioka, “*Waste management of electric and electronic equipment: Comparative analysis of end-of-life strategies*”, Journal of Material Cycles and Waste Management, vol. 7(1), pp. 24-32, 2005.
- [38] M.Schlummer, L.Gruber, A.Mäurer, G.Wolz, R.Van Eldik, “*Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management*”, Chemosphere, vol. 67(9), pp. 1866-1876. 2007.
- [39] S. M.AL-Salem, P.Lettieri, J.Baeyens, “*Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review*”, Waste Manage, vol. 29(10), pp. 2625-2643,2009.
- [40] P.Brachet, L. T. Høydal, E. L.Hinrichsen, F. Melum, “*Modification of mechanical properties of recycled polypropylene from post-consumer containers*”, Waste Management, vol. 28(12), pp. 2456-2464, 2008.
- [41] X. Fu, M.Ding, C.Tang, B.Li, Z.Zhao, D. Q.Chen, Q.Zhang, Q.Fu, H.Long, T.Tan, “*Toughening of recycled polystyrene used for TV backset*”, J ApplPolymSci, vol. 109(6), pp. 3725-3732. 2008.
- [42] C. G. Hagberg, J. L. Dickerson, “*Recycling Nylon carpet via reactive extrusion*”, Plastics Engineering, vol. 53(4),pp. 41-43, 1997.
- [43] P.Chancerel, S.Rotter, “*Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment*”, Waste Manage, vol. 29 (8), pp. 2336-2352. 2009.
- [44] N.Menad, S.Guignot, J. A.Van Houwelingen, “*New characterisation method of electrical and electronic equipment wastes (WEEE)*”, Waste Management, vol. 33(3), pp.706-713. (2013).
- [45] R.Taurino, P.Pozzi, T.Zanasi, “*Facile characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) for mechanical recycling*”, Waste Management, vol. 30 (12), pp. 2601-2607. 2010.

Références bibliographiques

- [46] L. Dascalescu, T. Zeghloul, K. Medles, “*Method and device for electrostatic separation of granular materials*”, F.R. Pat. no. 3,078,638, issued Sep. 13. 2019.
- [47] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, R. Ouiddir, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, “*Modeling and optimization of a separator for granular mixtures composed of multiple insulating materials*”, IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 51(6), pp. 4743–4751, Nov. 2015.
- [48] R. Siddique, J.Khatib, I.Kaur , “*Use of recycled plastic in concrete: A review*”, Waste Management, vol. 28(10), pp. 1835-1852.2008.
- [49] D. S.Achilias, E. V.Antonakou, E.Koutsokosta, A. A. Lappas, “*Chemical recycling of polymers from waste electric and electronic equipment*”, Journal of Applied Polymer Science, vol. 114(1), pp. 212-221, 2009.
- [50] A. Arostegui, M. Sarrionandia, J.Aurrekoetxea, I. URRUTIBEASCOA, “*Effect of dissolution-based recycling on the degradation and the mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer*”, PolymDegradationStab, vol. 91(11) pp. 2768-2774. 2006.
- [51] M. T. García, I.Gracia, G.Duque, A. Lucas, J. F. Rodríguez, “*Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process*”, Waste Manage, vol. 29(6) pp. 1814-1818. 2009.
- [52] F.Vilaplana, S.Karlsson, “*Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials: A review*”, Macromol Mater Eng, vol. 293(4), pp. 274-297, 2008.
- [53] I.González, J. I.Eguiazábal, J.Nazábal, “*On the use of the essential work of fracture procedure in the determination of the fracture energy of tough polymeric materials*”, Polymer Testing, vol. 28(7), pp. 760-763, 2009.
- [54] B. E.Tiganis, L. S.Burn, P.Davis, A. J.Hill , “*Thermal degradation of acrylonitrilebutadiene-styrene (ABS) blends*”, Polym Degradation Stab, vol. 76(3) pp. 425 434, 2002.
- [55] D.Fletcher, R.Gerber, P. Lawson, and J.Boehm, “*Eddy-current separation of nonferrous conductors and non-conductors: theory and initial experiments*”, IEEE transactions on magnetics, vol.27(6), pp.5375–5377. 1991.
- [56] S. Hayashi, F. Mishima, Y. Akiyama and S. Nishijima, “*Study on high gradient magnetic separation for selective removal of impurity from highly viscous fluid*”, IEEE Trans Appl Supercond, vol.21(3), pp.2055–2058. (2011).
- [57] D.Wang, X.Ma, , X.Zhi, , S.Zhang, “*Research review of scrap metals eddy current separation technology*”, Sens. Transducers, vol.158 (11), pp.242–248,2013.
- [58] H.M. Veit, A.M. Bernardes, “*Electronic Waste: Generation and Management*”, Electronic waste. Springer, Cham ,pp. 3-12, Springer, 2015.
- [59] A.C. Kasper, A.P. Gabriel, E.L.B. de Oliveira, N.C. de Freitas Juchneski , H.M. Veit, , “*Electronic waste recycling*”, Electronic Waste, pp 87-127, Springer, Cham2015.
- [60] M. Goosey, (2012) “*Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook: The materials of WEEE*”, (V. Goodship and L. N. Stevels, Eds), pp 123-144, Woodhead,UK.
- [61] K. Makenji , M. Savage, “*Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook : Mechanical methods of recycling plastics from WEEE*”, (V. Goodship and L. N. Stevels, Eds), pp 212-238, Woodhead,UK, 2012.
- [62] A.C. Kasper, N. Cristina, F. Juchneski , H.M. Veit, “*Electronic Waste : Mechanical Processing*”, (H.M. Veit, and A.M . Bernardes, Eds), pp 19-38, Springer, NY, 2015.
- [63] W. Schubert, J. Tomas, “*Liberation of valuables embedded in particle compounds and solid waste*”, Hand book Powder Technol. 12 . pp 989–1017, 2007.
- [64] S. Zhang, E. Forsberg, “*Intelligent Liberation and classification of electronic scrap*”, Powder Technol. 105. pp 295–301, 1999.
- [65] H. Masuda, K. Higashitani, H. Yoshida, “*Powder technology: handling and operations, process instrumentation, and working hazards*”, Taylor and Francis Group, 2007.
- [66] 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.
- [67] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, V. Neamtu and I. Suarasan, “*Corona charging of particulates in the corona field of roll-type electro separators*”, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 27, pp. 1242-1251, 1994.

Références bibliographiques

- [68] J.M. Crowley, *“Fundamentals of Applied Electrostatics”*, Morgan Hill, California: Laplacian Press, 1999.
- [69] C.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.
- [70] M. Govi, *“Quelques expériences sur l’induction électrostatique”*, Journal de Physique Théorique et Appliquée, vol. 4, pp. 264-266, 1875.
- [71] A. Younes, H. Sayah, M. Younes, A. Samuila and L. Dascalescu, *“Behavior of Conducting particles in a new electrostatic separator with two high-voltage electrodes”*, vol. 28, pp. 207-216, 2010.
- [72] C. Mayer-Laigle, A. Cadin, S. Messal, L. Dascalescu, and X. Rouau, *“Dry fractionation of plant material powders using an electrostatic corona separator: a model study”*, 5th International Congress on Green Process Engineering, 2016 Canada.
- [73] B.He, , T.Li, , Y.Xiu, , H. Zhao, , Z.Peng, , and Y.Meng, *“Study on law of negative corona discharge in microparticle-air two-phase flow media”*, Aip Advances, vol. 6(3), pp.035114, 2016.
- [74] J.A. Giacometti, S. Fedosov and M.M. Costa, *“Corona charging of polymers: recent advances on constant current charging”*, Brazilian Journal of Physics, vol. 29, pp. 269-279, 1999.
- [75] 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.
- [76] K. Senouci, K. Medles and L. Dascalescu, *“Effective solutions for monitoring the electrostatic separation of metal and plastic granular waste from electric and electronic equipment”*, Waste Management and Research, vol. 31, pp. 160-168, 2013.
- [77] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, I. Saurasan, A. Samuila and D. Rafiroiu, *“Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators”*, J. Electrostat, vol. 29(3), pp. 221-225, 1993.
- [78] B. Tabti, R. Mekideche, M. Plopeanu, L. Dumitran and L. Dascalescu, *“Corona Charging and Charge Decay Characteristics of Non-woven Filter Media”*, IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 46, pp. 634-640, 2010.
- [79] Dumitran, L. M., Dascalescu, L., Atten, P., & Notingher, P. V., *“Computational and Experimental Study of Ionic Space Charge Generated by Combined Corona–Electrostatic Electrode Systems”*, IEEE Transactions on Industry Applications, 42(2), 378–384, 2006.
- [80] W.R. Harper, *“Contact and Frictional Electrification”*, Morgan Hill, CA: Laplacian Press, 1998.
- [81] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, and L. Dascalescu, *“Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device”*, J. Electrostat, vol. 63, pp. 937-942, 2005.
- [82] 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.
- [83] L.H. Lee, *“Dual mechanism for metal polymer contact electrification”*, J. Electrostat ,vol. 32, pp. 1-29, 1994.
- [84] G.S.P. Castle, *“Contact charging between insulators”*, J. Electrostat, vol. 40 and 41, pp. 13- 18, 1997.
- [85] V. Gente, F.L. Marca, F. Lucci and P. Massacci, *“Electrical separation of plastics coming from special waste”*, Waste Manag, vol. 23, pp. 951-958,2003.
- [86] M. Blajan, A. Samuila, V. Neamtu, R. Beleca, L. Caliap, D. Vadan, A. Iuga and L. Dascalescu, *“Experimental modeling of particle electrification in vibrated zigzag shaped metallic tubes”*, In: Proceedings of ESA/IEJ/IEEE-IAS/SFE Joint Conference on Electrostatics, June 6-9, 2006, University of California, and Berkeley, California. pp. 538-543, 2006. ISBN-0-7803-9209-4.
- [87] G. Buda, M. Bilici, A. Samuila and L. Dascalescu, *“Experimental study of the tribocharging process of plastic granular materials on a vibratory feeder device”*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, pp. 1489-1496, 2013.
- [88] M. Zemat, M. Rizouga, A. Tilmatine, A. Bendaoud, K. Medles and L. Dascalescu, *“Experimental analysis of a vibrating tribocharging device of plastic particles for a free-fall electrostatic separator”*, IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 50, pp. 4228-4232, 2014.

Références bibliographiques

- [89] D. K. Yanar and B. A. Kwetkus, “*Electrostatic separation of polymer powders*”, J. of Electrostat, vol. 35, pp. 257–266, 1995.
- [90] G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki and T. Fujita, “*Electrostatic separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone*”, Magnetic and Electrical Separation, vol. 11, pp. 63-92, 2002.
- [91] L. Calin, A. Mihalcioiu, A. Iuga and L. Dascalescu, “*Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification*”, Part. Sci. Technol, vol. 25, pp. 205-211, 2007.
- [92] M. Sarki et A. Masumoto, “*Electrostatic separation of chopped waste electric cables*”, Journal of Environmental Engineering, vol. 2, pp. 227-236, 2007.
- [93] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, M.F. Boukhoulda, M. Bilici, L. Dascalescu, “*two stage electrostatic separator for the recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment*”, J. Electrostat, vol 71, p 681-688,2013.
- [94] S. Das, K. Medles, M. Younes, C. Dragan et L. Dascalescu, “*Separation of fine granular mixtures in S-plate-type electrostatic separators*”, IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 43, pp. 1137-1143, 2007.
- [95] C. Barron, J. Abécassis, M. Chaurand, V. Lullien-Pellerin, F. Mabile, X. Rouau, A. Sadoudi, et M.F. Samson, “*Accès à des molécules d'intérêt par fractionnement par voie sèche*”, Innovations Agronomiques, vol. 19, pp. 51-62, 2012.
- [96] Y. Hemery, X. Rouau, V. Lullien-Pellerin, C. Barron, and J. Abecassis, “*Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality*”, Journal of Cereal Science, vol.46, pp. 327–347, 2007.
- [97] M. Miloudi, K. Medles, A. Bendaoud, A. Tilmatine and L. Dascalescu, “*Improvement of the industrial pilot of a tribo-aero-electrostatic separator for binary mixtures of granular insulating materials*”, IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 51, pp. 3479- 3484, 2015.
- [98] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine and L. Dascalescu, “*Experimental study of the optimum operating conditions of a pilote-scale tribo aeroelectrostatic separator of mixed granular solids*”, IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 49, pp. 699-706, 2013.
- [99] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, S. El-Mossouess and K. Medles, “*Tribo aeroelectrostatic separator for coarse granular insulating materials*”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20(5), pp. 1510-1515, 2013.
- [100] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, K. Medles and A. Tilmatine, “*Improved overall performances of a tribo-aero-electrostatic separator for granular plastics from Waste Electric and Electronic Equipment*”, IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 51, pp. 4159- 4165, 2015.
- [101] Carpco Inc., Jacksonville, USA, “*Carpco application sheet. Rejection of PVC from PET flake using the Carpco V-STAT separator*”, In: Bulletin No. 97713.
- [102] Carpco Inc., Jacksonville, USA, “*The Solution to Separation*”, Tehnical Information Bulletin, 1997.
- [103] S. Messal, A. Mekhalef, K. Medles, T. Zeghloul et L. Dascalescu, “*Factors that influence the efficiency of a tribo-aero-electrostatic separator for finely grinded matter*”, chez Proc. Electrostatics Joint Conference, West Lafayette, USA, 2016.
- [104] I.I. Inulet, G.S.P. Castle, J.D. Brown, “*Electrostatic separation of plastics for recycling*”, Part. Sci. Technol. 16, 91-100, 1998.
- [105] L. Dascalescu, Al. Iuga, R. Morar, “*Corona-electrostatic separation: an efficient technology for the recovery of metals and plastics from industrial wastes*”, Magnetic and Electrical Separation, 4, 241-255, 1993.
- [106] R. Morar, A. Iuga, L. Dascalescu , A. Samuila, “*Factors which influence the insulation-metal electro separation*”, J. Electrostat., vol. 30, pp. 403- 412, 1993.
- [107] V. Neamtu, Al. Iuga, R. Morar, I. Suarasan, L. Dascalescu, “*Influence of high-voltage polarity on insulation-metal electro separation*”, J. Electrostat., vol. 30, pp. 423-432, 1993.
- [108] E. Walter, L. Pronzato, “*Identification de modèles paramétriques à partir de données expérimentales*”, Editions Masson, Paris, 1994.
- [109] M. Mihailescu, A. Samuila, A. Urs, R. Morar, Al. Iuga, L. Dascalescu, “*Computer-assisted experimental design for the optimisation of electrostatic separation processes*”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 38, no. 5, pp. 1174–1181, 2002.

Références bibliographiques

- [110] L. Dascalescu, A. Tilmatine, F. Aman, M. Mihailescu, “*Optimisation of Electrostatic Separation Processes Using Response Surface Modelling*”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.40, pp. 53-59, 2004.
- [111] K. Medles, A. Tilmatine, F. Miloua, A. Bendaoud, M. Younes, M. Rahli, L. Dascalescu, “*Set Point Identification and Robustness Testing of Electrostatic Separation Process*”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, pp. 618-626, 2007.
- [112] R.M. Miller, K. Itoyama, A. Uda, H. Takada, N. Bhat, “*Modeling and control of a chemical waste water treatment plant*”, *Computers and Chemical Engineering*, 21, Supplement 1, S 947–52, 1997.
- [113] I. Rivals, L. Personnaz, “*Black Box Modeling With State Neural Networks*”, In *Neural Adaptive Control Technology* I.R. Zbikowski and K.J. Hunt eds., World Scientific, 1995.
- [114] N.L. Frigon, and D. Mathews, “*Practical Guide to Experimental Design*”, New York: Wiley, 1996.
- [115] C.R. Hicks, and K.V. Turner Jr., “*Fundamental Concepts in the Design of Experiments*”, Oxford: Oxford University Press, 1999.
- [116] J. Goupy, “*Experimental Design for Response Surfaces (in French, Plans d’expériences pour surfaces de réponse)*”, Paris: Dunod, 253- 255.1999.
- [117] Y. Hemery, X. Rouau, C. Dragan, M. Bilici, R. Beleca, and L. Dascalescu, “*Electrostatic properties of wheat bran and its constitutive layers: Influence of particle size, composition, and moisture content*”, *Journal of Food Engineering*, Vol. 93, pp. 114–124, 2009.
- [118] Hemery Y., Rouau X., Lullien-Pellerin V., Barron C., Abecassis, J., “*Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality*”, *Journal of Cereal Science*, 46, 327-347, 2007.
- [119] L.Dascalescu, C. Dragan, M. Bilici, R. Beleca, Y. Hemery, and X. Rouau, “*Electrostatic bases for separation of wheat bran tissues*”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, pp. 659 – 665, 2010.
- [120] S. Messal, R. Corondan, I. Chetan, R. Ouiddir, K. Medles and L. Dascalescu, “*Electrostatic separator for micronized mixtures of metals and plastics originating from waste electric and electronic equipment*”, *Journal of Physics - Conference Series*, vol. 646, 2015.
- [121] S. Messal, T. Zeghloul, A. Mekhalef Benhafssa, and L. Dascalescu, “*Belt-type corona electrostatic separator for the recovery of conductive and non-conductive products from micronized wastes*”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, October 2016.
- [122] S. Messal, A. Mekhalef Benhafssa, C. Mayer-Laigle, X. Rouau, and L. Dascalescu, “*Séparation électrostatique des matières végétales finement divisées*”, 10^{ème} conférence de la Société française d’électrostatique (SFE), Poitiers, France, Aout 29- 31, 2016.
- [123] A. Tilmatine, K. Medles, S.E. Bendimered, F. Boukhoulda, K. Medles, and L. Dascalescu, “*Electrostatic separators of particles. Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures*”, *Waste Manage.*, vol. 29(1), pp. 228–232, 2009.
- [124] M.A. Noras, “*Non-contact surface charge/voltage measurements, capacitive probe Principle of operation*”, TREK Application Note, N° 3001, 2002.
- [125] S. Messal, T. Zeghloul, A. Mekhalef Benhafssa, and L. Dascalescu, “*Sorting of finely-grinded granular mixtures using a belt-type coronelectrostatic separator*”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, pp. 1424–1430, 2017.
- [126] E.G. Kelly and D.J. Spottiswood, “*The theory of electrostatic separations: a review, part 1, Fundamentals*”, *Miner Eng.*, vol. 2, pp. 33–46, 1989.
- [127] T. Zeghloul, S. Touhami, G. Richard, M. Miloudi, O. Dahou, and L. Dascalescu, “*Optimal operation of a plate-type corona-electrostatic separator for the recovery of metals and plastics from granular wastes*”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, pp. 2506–2512, 2016.
- [128] Pauthenier, Mo, and Mme Moreau-Hanot. “*La charge des particules sphériques dans un champ ionisé*”, *J. Phys. Radium* 3.12: 590-613, 1932.
- [129] N. J. Félici, “*Forces et charges de petits objets en contact avec une électrode affectée d’un champ électrique*”, *Rev. Gén. Elect.*, vol. 75, pp. 1145–1160, 1966.
- [130] W. Aksa, S. Touhami, M. Rezoug, K. Medles, L. Dascalescu, “*Simulation numérique de la trajectoire des particules isolantes dans le séparateur tribo-aero-électrostatique à deux étages*”, in *Proc. 10th Conf. Fr. Soc. Electrostatic*, Poitiers, France, Aug. 2016.

Références bibliographiques

- [131] J.Wu, J. Li, and Z.M.Xu, “An improved model for computing the trajectories of conductive particles in roll-type electrostatic separator for recycling metals from WEEE”, *J. Hazardous Mater.*, vol. 167, pp. 489–493, 2009.
- [132] C. Kevin, C. Muammer, T. M. Dario, C. Vincent, and O. Stephen, “Modelling of particle motion in an internal re-circulatory fluidized bed”, *Chem. Eng. J.*, vol. 164, no. 2/3, pp. 393–402, Nov. 2010.
- [133] H. Gould, J. Tobochnik, and W. Christian, *An Introduction to Computer Simulation Methods*. San Francisco, CA, USA: Addison-Wesley, 2007.
- [134] J. Kiusalaas, “*Numerical Methods in Engineering With MATLAB*”. New York, USA: Cambridge Univ. Press, 2005.
- [135] **M. Maammar**, W. Aksa, M. F. Boukhoulda, S. Touhami, L. Dascalescu, T. Zeghloul, “Modeling and simulation of nonconductive particles trajectories in a multifunctional electrostatic separator”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no 5, pp. 5244-5252, 2019.
- [136] Y. Higashiyama, K. Asano, “Recent progress in electrostatic separation technology”, *Particulate Science and Technology*, vol. 16, pp. 77-90, 1998.
- [137] M. Kaya, “Recovery of Metals and Nonmetals from Waste Printed Circuit Boards (PCBs) by Physical Recycling Techniques”, in *Energy Technology*, pp. 433-451, 2017.
- [138] G. Bedeković, R. Trbović, “Electrostatic separation of aluminum from residue of electric cables recycling process”, *Waste Management*, vol. 108, pp. 21-27, 2020.
- [139] J. Li, Z. Xu, Y. Zhou, “Theoretic model and computer simulation of separating mixture metal particles from waste printed circuit board by electrostatic separator”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 153, no 3, pp. 1308-1313, 2008.
- [140] H. Lu, J. Li, J. Guo, Z. Xu, “Movement behavior in electrostatic separation: Recycling of metal materials from waste printed circuit board”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 197, no 1-3, pp. 101-108, 2008.
- [141] L. Dascalescu, T. Zeghloul, and A. Iuga, “Electrostatic separation of metals and plastics from waste electrical and electronic equipment”, In *WEEE Recycling. Research, Development, and Policies* (A. Chagnes, G. Cote, E. Ekberg, M. Nilsson, T. Retegan, Eds), Elsevier, Amsterdam, 2016, pp. 75-106.
- [142] B.-U. Kim, C.-H. Park, “Electrostatic Separation of Copper and Glass Particles in Pretreated Automobile Shredder Residue”, *Metals*, vol. 8, no. 11, p. 879, Oct. 2018.
- [143] B. U. Kim, O. H. Han, H. S. Jeon, S. H. Baek, C. H. Park, “Trajectory Analysis of Copper and Glass Particles in Electrostatic Separation for the Recycling of ASR”, *Metals*, vol. 7, no 10, pp. 434, 2017.
- [144] A. Younes, M. Younes, H. Sayah, M. Bilici, A. Samuila, L. Dascalescu, “Effect of spark-discharges on the trajectories of insulating particles in roll-type corona-electrostatic separators. Experimental and numerical study”, *Journal of Electrostatics*, vol. 71, no 1, pp. 84-91, 2013.

ملخص

يُعرف الفرز الكهروستاتيكي بأنه تقنية إعادة تدوير فعالة وقوية تتميز بتكلفة منخفضة واستهلاك منخفض للطاقة وسهولة في الاستخدام. ومع ذلك، فإن عملية الفصل متعددة العوامل وتتطلب اختيارًا دقيقًا للعوامل الكهربائية والهندسية من أجل السماح بمعالجة مواد مختلفة. كان الهدف من هذه الرسالة دراسة العوامل المختلفة التي تؤثر على مسارات الجزيئات من أجل تحسين نتائج الفرز الكهروستاتيكي. للقيام بذلك، تم تطوير نموذج رقمي، بناءً على المبادئ الأساسية للحركة، لمحاكاة حركة الجسيمات. للتحقق من دقة النموذج الرقمي، أجريت عدة تجارب على جسيمات ذات طبيعة مختلفة في جهازين مختلفين للفرز الكهروستاتيكي تم تسجيل مسارات الجسيمات بكاميرا عالية السرعة ومقارنتها مع تلك التي تم الحصول عليها بواسطة المحاكاة الرقمية.

Résumé

La séparation électrostatique est connue comme une technologie de recyclage efficace et robuste, caractérisée par un faible coût, une consommation d'énergie réduite et une facilité d'utilisation. Cependant, le processus de séparation est multifactoriel et nécessite un choix judicieux des paramètres électriques et géométriques afin de permettre le traitement de différents matériaux. L'objectif de cette thèse était d'étudier les différents facteurs qui influencent les trajectoires des particules afin d'optimiser les résultats de la séparation électrostatique. Pour ce faire, un modèle numérique, basé sur les principes fondamentaux de la dynamique, a été élaboré afin de simuler le comportement des particules. Pour vérifier l'exactitude du modèle numérique, plusieurs expériences ont été réalisées sur des particules de différentes natures dans deux séparateurs électrostatiques. Les trajectoires des particules ont été enregistrées avec une caméra à haute vitesse et comparées à celles obtenues par la simulation numérique.

Abstract

Electrostatic separation is known as an efficient and robust recycling technology, characterized by low cost, low energy consumption and ease of use. However, the separation process is multifactorial and requires a careful choice of electrical and geometrical parameters to allow the treatment of different materials. The objective of this thesis was to study the different factors that influence the trajectories of the particles in order to optimize the results of the electrostatic separation. For this purpose, a numerical model, based on the fundamental principles of dynamics, was developed to simulate the behavior of the particles. To verify the accuracy of the numerical model, several experiments were performed on particles of different natures in two electrostatic separators. The trajectories of the particles were recorded with a high speed camera and compared to those obtained by the numerical simulation.