

REPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MUSTAPHA STAMBOULI DE MASCARA



FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

LABORATOIRE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'EAU

THESE

Présentée par

AÏ BOUARGOUB

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat de 3^{ème} cycle en ELECTROTECHNIQUE

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

SPECIALITE : ELECTROTECHNIQUE

THÈME

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA SEPARATION

ELECTROSTATIQUE DES MATERIAUX GRANULAIRES

ET PULVERULENTS

Soutenue le : 15/04/2025

Présentée devant le jury composé de :

MILOUDI Kaddour	MC-A-, Université de Mascara, Algérie	Président
BENMIMOUN Youcef	Professeur, Université de Mascara, Algérie	Directeur de thèse
BEKKARA Mohamed Fethi	MC-A-, Université de Mascara, Algérie	Co-directeur de thèse
OUIDIR Rabah	Professeur, U.S.T.M.B. Oran, Algérie	Examineur
AZZEDINE Hocine abdelhak	MC-A-, Université de Mascara, Algérie	Examineur

2024/2025

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier, en tout premier lieu, **Pr. Lucien DASCALESCU**, et le directeur de l'Institut universitaire de technologie (IUT) d'Angoulême, France, **Dr. Thami ZEGHLOUL** de m'avoir accueilli dans l'Institut PPRIME à l'IUT d'Angoulême, et pour leur confiance, leur accompagnement, leur aide précieuse et leurs conseils avisés.

Mes remerciements s'adressent aussi aux rapporteurs et aux examinateurs de la thèse pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

- **Dr. Kaddour MILOUDI**
- **Dr. Rabah OUIDIR**
- **Dr. Hocine AZZEDDINE**

Je suis profondément reconnaissant à mes directeurs de thèse, **Pr. Youcef BENMIMOUNE** et **Dr. Fethi BEKKARA**, d'avoir assuré avec compétence et efficacité l'encadrement de mes travaux de thèse. Merci pour votre gentillesse, pour votre patience et pour vos précieux conseils. J'ai beaucoup apprécié l'opportunité de travailler à vos côtés, tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Je garde toujours beaucoup de plaisir à discuter avec vous et à bénéficier de vos conseils.

Je remercie très chaleureusement les membres de l'équipe le laboratoire LSTE de l'Université de Mascara, Algérie, et l'équipe de l'Institut PPRIME à l'IUT d'Angoulême, France, qui m'ont beaucoup aidé et encouragé : Amine CHELIH, Djemaa BENZERGA, Sofiane BENDILMI, et Imed Eddine ACHOURI.

Enfin, je tiens à remercier mes chers parents pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon éducation et mon bien-être, et mes sincères remerciements à mes frères et sœurs, pour leurs encouragements et leur amour.

Je dédie ce travail :

A ma famille ; Papa, Maman, mes frères et sœurs.

je ne vous remercierai jamais assez, c'est grâce à vous que j'en suis arrivé là.

Je vous admire autant que je vous aime !

A tous les membres de ma famille et à tous mes amis

A vous cher lecteur

إهداء

إلى أعظم رجل
وأحن رجل
وأغلى ما أملك
إلى أبي

إلى السيدة الأولى
إلى المرأة التي كادت أن تكون الكاملة
لولا ان الكمال لله وحده
إلى أمي

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	8
Chapitre I : Etat de l'art.....	12
I.1.Introduction	13
I.2.Chargement triboélectrique des matériaux granulaires isolants.....	13
I.2.1.Mécanismes physiques.....	16
I.2.2.Facteurs influents sur la charge triboélectrique.....	20
I.3.Dispositifs de chargement triboélectrique des matériaux granulaires isolants.....	25
I.4.Forces aérodynamiques et électrostatiques	35
I.5.Séparation électrostatique des matériaux granulaires et pulvérulents	39
I.6.Installations industrielles	47
I.7.Conclusions.....	52
Chapitre II : Chargement Triboélectrique des matériaux isolants.....	54
II.1.Introduction.....	55
II.2.Mise en oeuvre expérimentale	55
II.2.1.Dispositif du chargement triboélectrique a lit fluidise.....	55
II.2.2.Dispositif de séparation électrostatique	57
II.2.3.Mesure de la température et de l'humidité relative	58
II.2.4.Mesure de la charge électrique.....	58
II.2.5.Mesure de masse granulaire.....	60
II.3.Chargement des matériaux granulaires.....	61
II.3.1.Description des matériaux	61
II.4.Procédure expérimentale.....	63
II.5.Résultats et discussion.....	64
II.5.1. Effet des parois du dispositif de chargement électrique sur la charge massique du PVC et de l'ABS	64
II.5.2. Effet des parois du dispositif de chargement électrique sur la séparation électrostatique	67
II.5.3. Effet du temps de chargement sur la charge électrique des granulés	68
II.5.4. Effet de la tension appliquée sur la séparation électrostatique	69
II.6.Conclusion	71

Chapitre III : Séparation électrostatique des flocons de polymère	73
III.1.Introduction.....	74
III.2.Matériels et méthodes.....	74
III.2.1.Description des matériaux	74
III.2.2.Séparateur électrostatique.....	76
III.2.3.Dispositif du chargement triboélectrique	77
III.2.4.Diviseur d'échantillons Retsch Riffelteiler type 6.5.....	78
III.2.5.Dispositif d'analyse IRAffinity-1S	79
III.2.6.Électromètre numérique Keithley	79
III.3.Procédure expérimentale	80
III.3.1.Analyse des paillettes par spectrométrie IR (IRAffinity 1S Shimadzu)	81
III.3.2.Simulation numérique des trajectoires des particules	84
III.4.Résultats et discussion.....	86
III.4.1. Effet du temps sur la charge électrique des particules	86
III.4.2.Étude comparative des résultats.....	87
III.4.3.Résultats de la simulation	89
III.4.3.1. Résultats de la simulation du potentiel électrique et du champ électrique ...	89
III.4.3.2. Résultats de la simulation des trajectoires des particules	91
III.4.4.Effet de tension	93
III.5.Conclusions.....	94
Chapitre IV : Séparation électrostatique de mélanges de polymères granulaires	97
IV.1.Introduction	98
IV.2.Matériels et méthodes	98
IV.2.1.Description des matériaux	98
IV.2.2.Dispositif de séparation électrostatique	100
IV.2.3.Dispositif de chargement triboélectrique a lit fluidise	101
IV.3.Procédure expérimentale	102
IV.3.1.Simulation numérique des trajectoires des particules	103
IV.4.Résultats et discussion	105
IV.4.1.Effet de la durée de triboélectrisation.....	105
IV.4.2.Effet de la durée de triboélectrisation sur la séparation électrostatique.....	107
IV.4.3.Résultats de l'étude comparative.....	109
IV.4.4.Résultats de la simulation.....	111

_ IV.4.4.1. Résultats de la simulation du potentiel électrique et du champ électrique .	111
_ IV.4.4.2. Résultats de la simulation des trajectoires des particules	112
IV.4.5.Effet de la tension	114
IV.5.Conclusions	116
CONCLUSION GENERALE	117
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	119
PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS	130

INTRODUCTION GENERALE

L'augmentation de la consommation d'équipements électriques et électroniques (EEE) est un phénomène mondial lié à la modernisation, à l'urbanisation, et à la numérisation croissante des sociétés. Ces appareils comprennent les téléphones portables, les ordinateurs, les télévisions, les appareils électroménagers, etc. Cette consommation accrue est encouragée par l'innovation technologique, le désir de nouvelles fonctionnalités, ainsi que la baisse des prix des équipements électroniques.

Avec l'accélération de la consommation d'équipements électriques et électroniques, il y a une croissance parallèle des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE ou e-déchets) [1]. Les équipements électriques et électroniques ont souvent une durée de vie limitée en raison de l'obsolescence programmée, des pannes ou des mises à jour technologiques qui incitent les consommateurs à acheter de nouveaux produits. En conséquence, des millions de tonnes de DEEE sont générées chaque année à travers le monde, posant de sérieux problèmes environnementaux. Ces déchets contiennent souvent des substances dangereuses comme le mercure, le plomb ou les retardateurs de flamme, qui peuvent polluer l'air, l'eau et les sols s'ils ne sont pas traités correctement. Leur gestion inclut donc la collecte, le tri, le traitement et le recyclage, dans le but de récupérer des matériaux réutilisables et de minimiser leur impact environnemental [2].

Le recyclage des DEEE est essentiel pour réduire l'impact environnemental, préserver les ressources naturelles et éviter la pollution. En raison de la diversité des matériaux utilisés dans les EEE, leur recyclage nécessite souvent des étapes de tri en fractions séparées, car les matériaux mélangés perdent leurs propriétés d'origine. Différentes technologies de tri, telles que le tri optique [3,4], densimétrique [5,6], la flottaison [7,10] et la séparation tribo-électrostatique, sont utilisées dans l'industrie pour séparer les composants des DEEE de manière efficace [11].

Le plastique représente une part importante des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) [12]. En moyenne, le plastique constitue environ 20 à 25 % de la masse totale des DEEE, bien que cette proportion puisse varier selon les types d'équipements et leur conception. La production mondiale de plastique a atteint 370 millions de tonnes en 2019. Sur les 29 millions de tonnes de déchets plastiques collectés en Europe, un tiers a été recyclé, alors

Introduction générale

qu'au niveau mondial, 15 % des déchets plastiques sont collectés pour être recyclés, 25 % sont incinérés et 60 % sont mis en décharge [13].

Ces dernières années, une nouvelle tendance est apparue dans le recyclage des matières plastiques, à savoir la séparation électrostatique, qui constitue le sujet principal de notre recherche.

La séparation électrostatique est une technique efficace pour trier et recycler les matériaux issus des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) [14,15]. Elle permet de récupérer avec précision et efficacité divers composants, tels que les plastiques et les métaux. Grâce à sa faible consommation énergétique et à ses coûts d'exploitation et d'entretien réduits, cette technologie se révèle être une solution économiquement viable pour le recyclage des DEEE. La séparation tribo-électrostatique offre un tri sélectif des matériaux polymères en fonction de leurs propriétés de charge, générées par contact et frottement. Ce procédé se décompose en deux étapes, qui peuvent se dérouler de manière successive ou simultanée : d'abord, le chargement des éléments du mélange par effet triboélectrique [16,19], suivi de la séparation électrostatique dans un champ électrique intense.

L'objectif de la thèse est d'améliorer l'efficacité des processus de charge triboélectrique et d'optimiser les techniques de séparation électrostatique à chute libre en expérimentant des configurations innovantes de séparateurs à chute libre, et de montrer la faisabilité et les particularités de la séparation tribo-électrostatique de matériaux granulaires isolants. L'étude inclura également la simulation des trajectoires des particules pour comprendre et expliquer leur comportement dans ces systèmes de séparation, en vue d'une application industrielle plus performante. Cette étude servira ensuite de base pour l'optimisation de la charge tribo-électrostatique et la séparation électrostatique.

Ce mémoire de thèse est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, une synthèse bibliographique sur la triboélectricité sera effectuée, en mettant en lumière les mécanismes dominants du transfert de charge. Par ailleurs, différents dispositifs de charge triboélectrique seront présentés. En complément, les séparateurs électrostatiques seront abordés avec une brève explication de leur principe de fonctionnement.

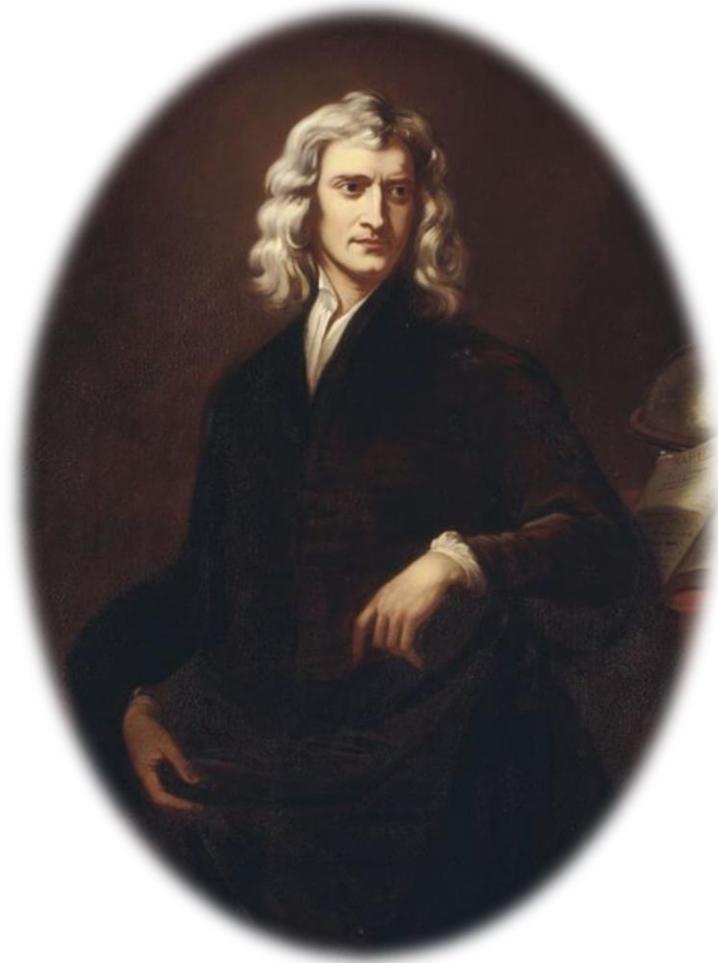
Dans le deuxième chapitre, un dispositif de chargement à lit fluidisé triboélectrique multicylindre a été conçu dans le laboratoire LSTE de l'Université de Mascara, et l'effet des parois du dispositif de chargement à lit fluidisé sur le chargement massique des granules et sur la séparation électrostatique a été étudié.

Introduction générale

Le troisième chapitre présentera une étude expérimentale portant sur la séparation tribo-électrostatique de flocons plastiques issus du traitement des déchets d'emballage chez GRANUPLAST, à Jassans-Riottier, France. Une configuration modifiée du séparateur à chute libre a été conçue pour éviter l'effet des collisions de particules avec les électrodes et obtenir de meilleurs résultats de séparation électrostatique pour les mélanges granulaires-plastiques. Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'Institut PPRIME de Poitiers, l'IUT d'Angoulême et le Laboratoire LSTE de l'Université de Mascara. Il fait partie du programme « Investissements d'avenir » de France 2030 (LABEX INTERACTIFS, référence ANR-11-LABX-0017-01). Une partie de ces travaux a été financée par l'Union européenne dans le cadre du FEDER-ELECTRINOV.

La séparation électrostatique de mélanges isolants granulaires sera étudiée dans le quatrième chapitre, à travers la conception d'un séparateur à chute libre équipé d'électrodes courtes. Les résultats seront comparés à ceux d'un séparateur standard. Une simulation du trajet des particules chargées a également été réalisée à l'aide du programme COMSOL Multiphysics.

Enfin, la conclusion générale mettra en valeur les apports de cette étude et proposera des perspectives pour la suite de ce travail.



Isaac Newton

(1643-1727)

“What we know is a drop, what we don't know is an ocean.”

Chapitre I

Etat de l'art

I.1. Introduction

La séparation électrostatique est un processus qui repose sur l'utilisation des forces électriques statiques pour séparer différentes particules ou matériaux en fonction de leurs propriétés électriques. La séparation des mélanges de plastiques est un processus essentiel dans le recyclage et la gestion des déchets plastiques. Les matériaux sont chargés électriquement par effet triboélectrique (par frottement), puis les particules chargées passent dans un champ électrique puissant qui les dévie différemment selon leur charge et leur taille. [20]

Ces dernières années, de nombreux procédés et dispositifs de séparation électrostatique ont été développés pour la récupération des DEEE [21, 22]. Des avancées significatives ont été réalisées dans l'efficacité de cette technologie, notamment grâce à l'intégration de systèmes automatisés, de capteurs sophistiqués, et de contrôles plus précis. Ces améliorations permettent de traiter une gamme plus large de matériaux, incluant les déchets électroniques et les plastiques mixtes [23-26]. Ces innovations rendent la séparation plus rapide et plus fine, répondant ainsi aux exigences croissantes en matière de recyclage et de valorisation des ressources.

Le paragraphe I-2 traite des mécanismes physiques de chargement électrique des matériaux isolants granulaires. Le paragraphe I-3 décrit les principaux dispositifs de chargement triboélectrique des matériaux isolants granulaires. Enfin, les paragraphes I-4, I-5 et I-6 illustre les forces aérodynamiques et électrostatiques exercées sur les matériaux granulaires et une synthèse des informations essentielles sur les différents types d'installations de séparation par champ électrique, appliquées au recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques.

I.2. Chargement triboélectrique des matériaux granulaires isolants

Le principe de base de la séparation électrostatique de mélanges de matériaux, granulaires ou pulvérulents, est la charge électrique des matériaux [27-29]. La séparation électrostatique de mélanges de matériaux ne se produit que si les matériaux portent des charges électriques différentes. Plusieurs mécanismes physiques [30] peuvent générer ces charges électriques comme l'effet couronne [31-34], l'induction électrostatique [35, 36] et l'effet triboélectrique [37, 38]. Ce dernier mécanisme est spécifiquement utilisé pour la séparation des mélanges plastiques granulaires.

La triboélectricité (du grec « *tribein* » signifiant frotter), également appelée électrification par contact, est un phénomène électrostatique qui se produit lorsque deux matériaux de nature différente sont mis en contact ou frottés, Ce processus entraîne un transfert de charges

électriques entre les surfaces des matériaux, Créant ainsi des objets chargés positivement et négativement.

La polarité et la quantité de charges acquises dépendent de la nature chimique du matériau, de la taille de l'objet, de son état de surface, de sa température, de son état de contrainte mécanique, des polluants gazeux, des champs électriques externes... [39-41]. Plusieurs mécanismes physiques ont été suggérés comme explications potentielles des échanges de charges : transfert d'électrons, d'ions ou de matières causés par des différences de propriétés de surface et/ou de volume des matériaux en contact. L'effet triboélectrique est majoritairement utilisé pour la charge de matières isolantes ou faiblement conductrices, [42-46]. C'est donc le mécanisme le plus utilisé pour charger des matières granulaires ou micronisées plastiques en vue de leur séparation électrostatique dans un champ électrique intense, [47-50].

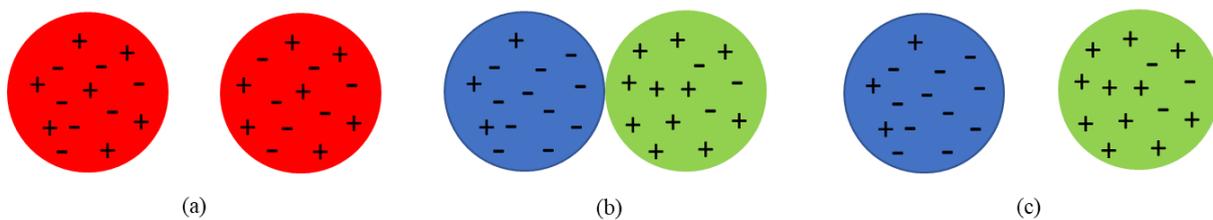


Figure I-1. Charge triboélectrique de deux particules en contact. (a) Particules électriquement neutres sans contact entre elles ; (b) Contact et transfert de charge ; (c) Rupture du contact, particules chargées.

La série triboélectrique est une classification des matériaux selon leur tendance à acquérir une charge électrique lorsqu'ils sont frottés contre un autre matériau. Lorsqu'on frotte deux objets ensemble, l'un peut perdre des électrons et devenir positivement chargé, tandis que l'autre en gagne et devient négativement chargé [51]. Les matériaux sont donc classés en fonction de leur capacité à perdre ou à gagner des électrons.

Dans la série triboélectrique, les matériaux situés aux extrémités sont ceux qui génèrent les charges les plus fortes, soit positives, soit négatives. Par exemple, des matériaux comme le verre ou la laine ont tendance à se charger positivement, tandis que des matériaux comme le caoutchouc ou le téflon acquièrent généralement une charge négative. Plus les matériaux frottés sont éloignés dans cette série, plus la différence de charge sera importante.

Cependant, il n'existe pas de série triboélectrique universelle, car les résultats dépendent des conditions expérimentales, des impuretés et des additifs présents dans les matériaux. Cette série a évolué au fil du temps, avec des contributions historiques notables [52-57], comme celles

de Wilcke au XVIIIe siècle, Faraday au XIXe siècle, et Shaw au début du XXe siècle. Plus récemment, des chercheurs comme Bill Lee [58] ont introduit des concepts comme l'affinité triboélectrique, qui permet de mesurer la relation entre la charge échangée et l'énergie dépensée dans le frottement.

Tableau I-1. Série triboélectrique obtenue par Bill Lee [58].

Nom de l'isolant	Rapport de la charge [nC/J]	Charge acquise si frotté avec du métal (F : faible, N : normale)
Mousse de polyuréthane	+60	+N
Sorbothane	+58	-F
Bande d'étanchéité d'une boîte (BOPP)	+55	+F
Cheveux, la peau grasse	+45	+N
Polyuréthane solide, remplie	+40	+N
Fluorure de magnésium (MgF ₂)	+35	+N
Nylon, peau sèche	+30	+N
Huile pour machine	+29	+N
Nylatron (nylon rempli de MoS ₂)	+28	+N
Verre (soude)	+25	+N
Papier (copie non couché)	+10	-F
Bois (pin)	+7	-F
GE Silicone II marque (durcit à l'air)	+6	+N
Coton	+5	+N
Caoutchouc nitrile	+3	-F
Laine	0	-F
Polycarbonate	-5	-F
ABS	-5	-N
Côté acrylique (polyméthacrylate de méthyle)	-10	-N
Epoxy (circuit imprimé)	-32	-N
Caoutchouc en styrène-butadiène (SBR, Buna S)	-35	-N
Peintures en aérosol à base de Solvants	-38	-N
PET (mylar) chiffon	-40	-F
PET (mylar) solide	-40	+F

EVA caoutchouc pour les joints, rempli	-55	-N
Gomme de caoutchouc	-60	-N
Colle thermo-fusible	-62	-N
Polystyrène	-70	-N
Polyamide	-70	-N
Silicones	-72	-N
Vinyle: flexible (tuyau transparent)	-75	-N
Bande du carton d'étanchéité (BOPP), poncé	-85	-N
Oléfines (alcènes): LDPE, HDPE, PP	-90	-N
Le nitrate de cellulose	-93	-N
Support d'un ruban bureautique (copolymère de vinyle)	-95	-N
UHMWPE	-95	-N
Néoprène (polychloroprène, pas SBR)	-98	-N
PVC (vinyle rigide)	-100	-N
Latex (naturel) en caoutchouc	-105	-N
Viton, rempli	-117	-N
Caoutchouc d'épichlorhydrine, rempli	-118	-N
Caoutchouc en Santoprene	-120	-N
Caoutchouc en Hypalon, rempli	-130	-N
Le caoutchouc butyle, rempli	-135	-N
Caoutchouc en EPDM, remplie	-140	-N
Téflon	-190	-N

I.2.1. Mécanismes physiques

La triboélectricité est un phénomène complexe et multifactoriel, dont la compréhension reste partielle en raison de la diversité des mécanismes physico-chimiques en jeu. Elle implique le transfert de charges électriques entre deux corps mis en contact. Plusieurs hypothèses ont été formulées dans la littérature scientifique pour expliquer ce phénomène (Figure I-2), notamment le transfert d'électrons, d'ions ou encore de matière entre les surfaces en interaction [59, 60].

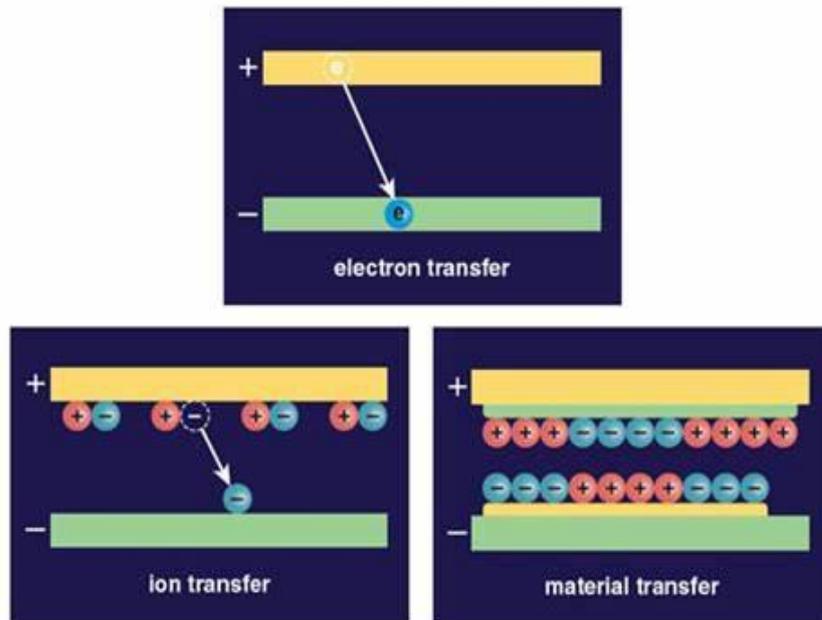


Figure I-2. Mécanismes possibles de transfert de charge [59].

a) *Transfert d'électrons*

Le transfert d'électrons est un processus clé dans lequel des électrons sont transférés d'un atome ou d'une molécule à un autre, jouant un rôle central dans de nombreux mécanismes chimiques, électriques et biologiques. Dans le cadre de la triboélectricité, lorsque deux matériaux sont frottés, des électrons peuvent passer de l'un à l'autre, créant ainsi une différence de charge. Un matériau perd des électrons et devient positivement chargé, tandis que l'autre en gagne et se charge négativement. Ce phénomène dépend de l'affinité électronique des matériaux impliqués : ceux avec une faible affinité pour les électrons en perdent plus facilement, tandis que ceux avec une affinité plus forte les captent.

Une approche différente du transfert d'électrons a été proposée par Bard et Lacks, qui ont étudié le contact entre le PTFE et le PMMA [61, 62]. Ils ont montré que la surface du PTFE chargé pouvait libérer des électrons libres, provoquant des réactions spécifiques, ce qui suggère la présence d'électrons libres sur le PTFE. Lowell et Truskott [63] ont également avancé que le contact entre deux surfaces pouvait libérer des électrons piégés dans des états de haute énergie (Figure I-3). Lors du frottement, un électron piégé dans un état de haute énergie peut être transféré vers un état de basse énergie sur une autre surface. Cette théorie est soutenue par le fait que l'humidité réduit la charge électrique, en formant une fine couche d'eau conductrice à la surface de l'isolant. Cette couche permet aux électrons de haute énergie piégés de s'échapper vers des états de plus basse énergie, réduisant ainsi la charge triboélectrique résultant du frottement [64].

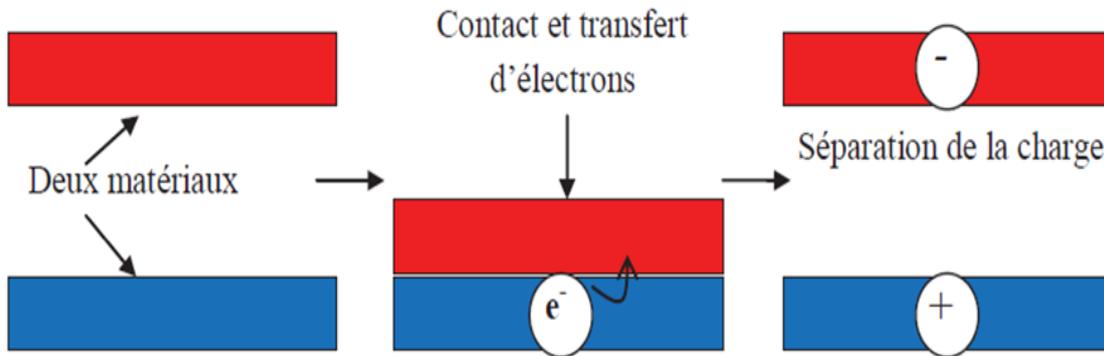


Figure I-3. Mécanisme de transfert de charge par un transfert d'électrons [66].

b) Transfert d'ions

Dans le contexte de la triboélectricité, bien que le transfert d'électrons soit souvent plus discuté, le transfert d'ions peut également jouer un rôle important. Lorsque deux matériaux sont frottés, des ions peuvent migrer d'une surface à l'autre, en fonction des propriétés chimiques des matériaux impliqués et de la présence éventuelle de couches superficielles d'eau ou d'autres contaminants ioniques. Ce transfert ionique peut contribuer à l'accumulation de charge électrique, tout comme le transfert d'électrons.

Whitesides et ses collègues ont apporté des preuves soutenant l'idée d'un transfert d'ions, notamment en lien avec la formation d'électrets [65, 66]. En utilisant une série d'électrets ioniques contenant des ions mobiles, ils ont suggéré que le transport d'ions pourrait expliquer la tribocharge des matériaux isolants. Ils ont montré que le verre peut acquérir une charge positive ou négative après contact avec des sphères métalliques, en fonction des ions se déplaçant à sa surface. Diaz a également proposé un mécanisme de transfert d'ions (Figure I-4), lié à la polarité, à l'amplitude de la charge, ainsi qu'à la structure et à la concentration des espèces ioniques [67, 68]. Ce modèle, basé sur celui de Lee [69] concernant l'équilibrage des charges entre deux surfaces, postule que l'échange ionique est proportionnel aux zones de contact entre les surfaces.

Le mécanisme peut aussi expliquer l'électrification des polymères contenant des additifs ioniques. Hogue et ses collaborateurs [70] ont suggéré que certaines surfaces présentent des régions avec des sites plus ou moins disponibles pour les ions, créant ainsi des déséquilibres de charge et des différences de potentiel électrique. Ils ont également observé que l'échange d'ions

et la charge diminuent à mesure que la pression atmosphérique baisse. Enfin, Yu et ses collègues [71] attribuent la tribocharge des particules à la mobilité variable des ions, tout en tenant compte des effets de la température sur ce phénomène.

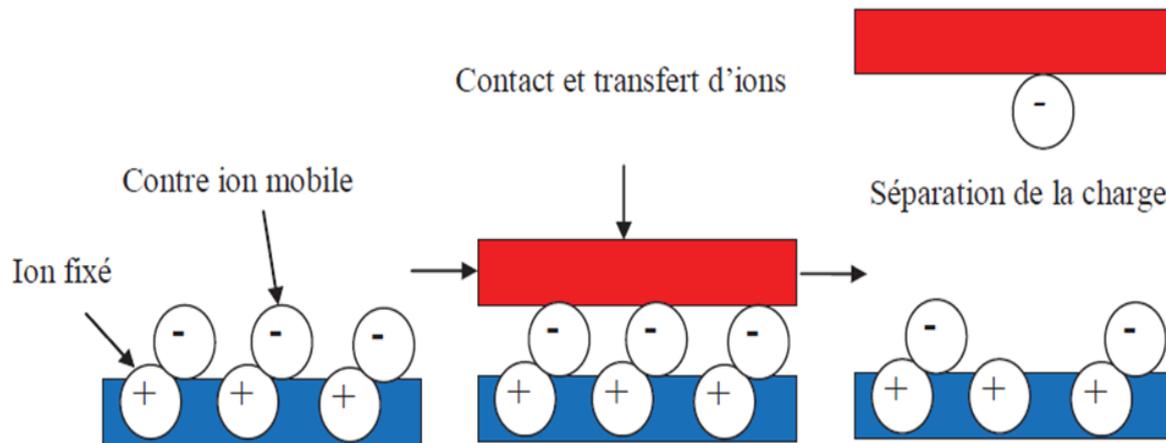


Figure I-4. Mécanisme de transfert de charge par un transfert d'ions [66].

c) *Transfert de matière*

Un mécanisme supplémentaire, relativement peu exploré, est celui du transfert de matière [72]. Lors du contact entre deux matériaux, de très petites quantités de matière peuvent être transférées d'une surface à l'autre [73]. Ce phénomène, bien que souvent négligé, peut altérer les propriétés électriques des surfaces en interaction et contribuer significativement à l'accumulation de charges électrostatiques (Figure I-5). Plusieurs travaux récents ont ravivé l'intérêt pour ce mécanisme, en soulignant son rôle potentiel dans certains cas spécifiques [74, 75].

Une étude notable a mis en évidence que le transfert de matière pourrait être à l'origine d'une inversion de la polarité des matériaux, observée après une période prolongée de contact. Cette observation suggère que, contrairement à l'idée communément admise, le transfert de matière pourrait jouer un rôle non négligeable dans le processus d'électrification des matériaux isolants.

Clark et collaborateurs [76] ont notamment étudié ce phénomène dans le cas de films de PTFE et de PET, deux polymères situés à des positions très éloignées dans la série triboélectrique. Ils ont observé un transfert de matière important, concomitant à un échange de

charges électrostatiques élevé. Ces auteurs ont souligné que la détection des charges est souvent plus aisée que celle de la masse transférée, ce qui peut conduire à une sous-estimation du rôle du transfert de matière. Ils affirment ainsi que : « Le transfert de masse ne peut être exclu comme mécanisme de transfert de charge dans le frottement. Au contraire, il doit impérativement être pris en compte dans les modèles de charge triboélectrique, compte tenu de la fréquence élevée à laquelle il se produit. »

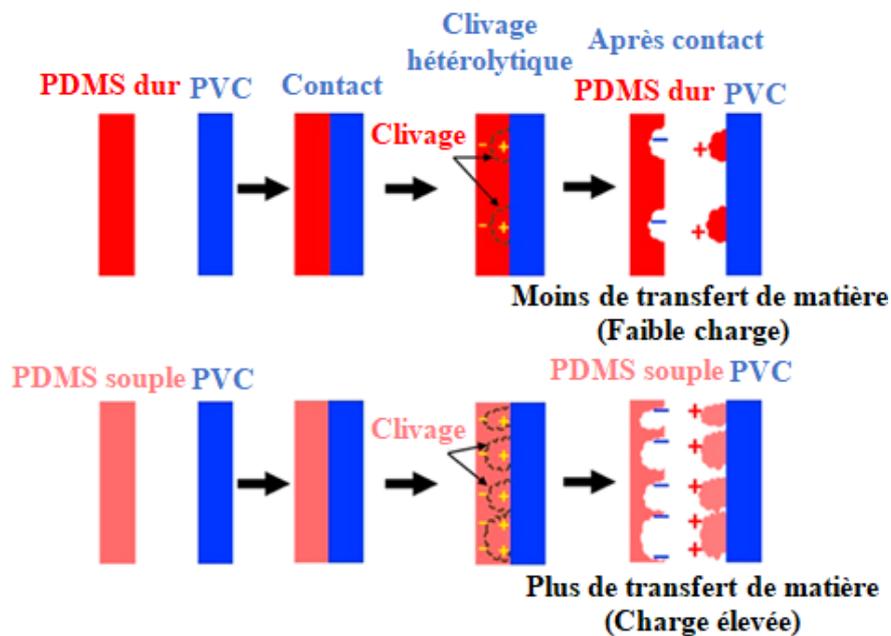


Figure I-5. Schéma illustrant le transfert de matière et le transfert de charge se produisant simultanément lors de l'électrification par contact de deux matériaux [77].

I.2.2. Facteurs influents sur la charge triboélectrique

La charge triboélectrique, qui résulte du frottement entre deux matériaux, est influencée par plusieurs facteurs physiques, chimiques et environnementaux. Voici les principaux éléments qui déterminent la quantité et la polarité des charges triboélectriques générées :

a) Effet de la structure et de la composition chimiques

La charge triboélectrique des polymères varie d'un matériau à un autre pour la simple raison que leur composition chimique est différente. La charge triboélectrique des polymères peut être influencée par les propriétés physico-chimiques des surfaces. Chaque matériau possède une affinité spécifique pour les électrons. Certains matériaux tendent à céder des

électrons facilement (deviennent positivement chargés), tandis que d'autres ont tendance à capter des électrons (deviennent négativement chargés). Ce comportement est décrit par la série triboélectrique, qui classe les matériaux selon leur propension à se charger positivement ou négativement lorsqu'ils sont frottés. Des études antérieures ont montré que des groupes chimiques comme NH₂, OCH₃, CH₃, C₂H₅, OH, H repoussent les électrons et causent une charge positive à la surface, certains groupes chimiques comme Br, I, COCH₃, NO₂, sont attractifs pour les électrons, qui provoquent la charge négative de la surface [78].

b) Effet de la rugosité de surface

La rugosité de surface a un impact direct sur le chargement triboélectrique, influençant le transfert de charge qui se produit lors du frottement entre deux matériaux. Des études ont montré que les matériaux polymères rugueux ont tendance à accumuler plus de charge que des polymères lisses. La rugosité de la surface affecte l'aire de contact et donc le transfert de charge et sa dispersion sur la surface [79-83].

L'importance de la rugosité de surface et son influence sur le tribo-chargement dans un contact glissant entre les matériaux polymères a été soulignée par Neagoe et al. [84] ; ils ont constaté que le contact entre deux polymères se produit généralement sur un certain nombre de points liés à la rugosité de surface. Pendant le contact glissant, un point de l'une des surfaces peut effectuer plusieurs contacts avec les points de l'autre surface. Plus le nombre des points de contact est élevé, plus la charge triboélectrique acquise est grande.

Les changements dans la microstructure des matériaux affecteront également le mécanisme de transfert de charge. Wang et al. [85] ont montré que les différences dans la microstructure de matériaux chimiquement identiques peuvent déclencher des comportements de charge tribologiques différents. En règle générale, la direction du transfert de charge n'est pas contrôlée. Cependant, lorsqu'un des échantillons est soumis à une contrainte de traction, un transfert de charge systématique se produit, de sorte que l'échantillon déformé acquiert une charge positive et se comporte triboélectriquement comme un matériau distinct [86].

En résumé, l'état de surface a un effet direct sur le chargement triboélectrique, en influençant la nature du contact, le transfert d'électrons ou d'ions, ainsi que la distribution des charges à la surface des matériaux. Optimiser ou modifier l'état de surface permet donc de contrôler, voire de réduire ou d'augmenter, le chargement triboélectrique.

c) Effet de la force normale appliquée au contact

La force normale appliquée au contact joue un rôle déterminant dans le processus de chargement triboélectrique. Une augmentation de cette force conduit généralement à un plus grand transfert de charge en augmentant la zone de contact réel et l'intensité du frottement [87]. Cependant, il existe une limite au-delà de laquelle l'augmentation de la charge devient négligeable, et des effets d'usure peuvent perturber la régularité du transfert de charge. Sous de faibles forces de contact, les irrégularités de surface ont des interactions faibles et présentent des comportements qui sont linéairement liés à la force appliquée.

d) Effet du temps de frottement

Le temps de frottement est un facteur clé dans le processus de chargement triboélectrique, car il détermine la durée pendant laquelle deux matériaux interagissent électriquement et mécaniquement. Plus le temps de frottement est long, plus le transfert de charge entre les matériaux est important. En effet, chaque cycle de frottement permet à davantage d'électrons ou d'ions de se déplacer d'un matériau à l'autre [87]. Cependant, il existe souvent une saturation au-delà d'un certain temps de frottement, où la charge maximale que les matériaux peuvent accumuler est atteinte. Une fois cette saturation atteinte, prolonger le temps de frottement n'augmente plus significativement la charge accumulée.

Cependant, un frottement prolongé peut également augmenter l'usure, la déformation des surfaces des polymères [88,89], provoquer un échauffement ou faciliter la dissipation des charges, ce qui peut affecter la dynamique du transfert de charge.

e) Effet de l'humidité

L'humidité ambiante peut réduire considérablement la quantité de charge triboélectrique accumulée lors du frottement. Cela s'explique par la formation d'une fine couche d'eau sur la surface des matériaux, qui agit comme un conducteur partiel. Cette couche d'eau permet aux charges accumulées de se dissiper plus facilement dans l'environnement, empêchant ainsi leur accumulation. La présence d'humidité modifie également la nature du contact entre les surfaces en frottement. L'eau peut agir comme un lubrifiant, réduisant ainsi la friction et, par conséquent, l'intensité du contact mécanique entre les matériaux. Cela peut réduire la génération de charge triboélectrique, car le contact entre les surfaces est moins intense et moins prolongé.

Les matériaux isolants, en particulier, sont très sensibles à l'humidité. En présence d'une humidité élevée, ces matériaux peuvent perdre une partie de leur capacité à accumuler des

charges électriques, car la couche d'eau formée à leur surface facilite le déplacement des charges. Ce phénomène peut réduire l'efficacité des isolants dans les systèmes triboélectriques. Greason [90,91] a constaté que l'augmentation de l'humidité relative de l'air ambiant provoquait une diminution de la charge nette créée entre une bille en acier inoxydable et divers isolants comme, par exemple, le verre, le PTFE, le polycarbonate et le nylon. Il a soupçonné que cette diminution pouvait être liée à une diminution de la résistivité de volume et de surface des isolants en raison de l'augmentation de l'humidité relative. D'autres auteurs ont également observé que la charge générée sur des particules de polymères diminue avec l'augmentation de l'humidité relative ambiante [92] [93-95].

Au contraire, Lungu [96] a constaté que la charge générée sur des particules de PE et de PS augmente significativement avec l'augmentation de l'humidité : les auteurs ont constaté que la charge électrique sur les polymères a connu une augmentation proportionnelle avec celle de l'humidité. Lungu a expliqué que cette augmentation repose sur le fait que la formation et l'extension du film d'eau impliquent une augmentation du champ de contact et aussi une augmentation de la surface de contact, ce qui rend un plus grand transfert de charge possible. Par conséquent, une plus grande quantité de charge peut être transférée. De plus, lorsque la valeur de 65 % pour l'humidité est dépassée, on observe une augmentation de la densité des charges ioniques obtenues par dissociation de l'eau en raison de l'augmentation du champ de contact. D'autres auteurs ont aussi suggéré que l'humidité peut modifier la conductivité des particules et donc faciliter la neutralisation des charges [97,98].

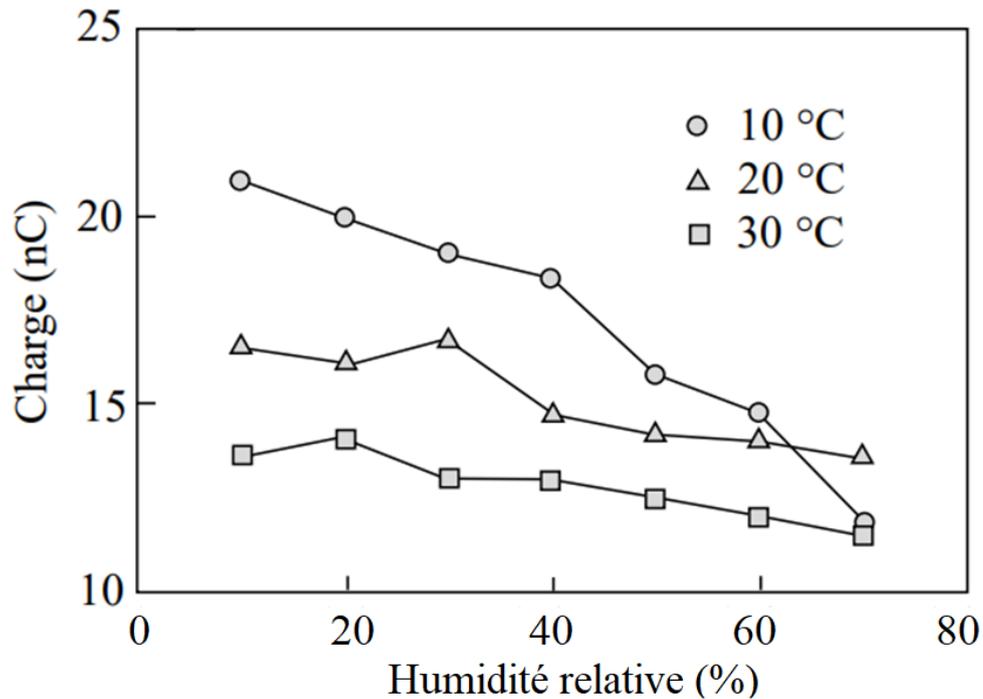


Figure I-6. Charge triboélectrique d'une sphère métallique de 12,7 mm de diamètre en fonction de l'humidité relative [88].

f) Effet de température

La température a un effet notable sur le chargement triboélectrique, influençant la manière dont les charges électriques se forment, se transfèrent et se dissipent lors du frottement entre deux matériaux.

À des températures élevées, les électrons et les ions dans les matériaux acquièrent plus d'énergie cinétique, ce qui augmente leur mobilité. Cela peut faciliter le transfert de charge entre les matériaux en frottement, permettant un échange plus rapide et plus efficace des électrons. Cependant, une mobilité accrue peut aussi conduire à une dissipation plus rapide des charges accumulées, réduisant ainsi la charge triboélectrique globale.

Les matériaux polymères, souvent utilisés dans les études triboélectriques, sont particulièrement sensibles aux variations de température. À des températures élevées, ces matériaux peuvent devenir plus souples ou fondre partiellement [99], ce qui altère la manière dont ils se frottent contre d'autres surfaces. Cela peut affecter la zone de contact et, par conséquent, la quantité de charge triboélectrique générée.

Des études ont montré qu'à des températures élevées, l'accumulation de charge triboélectrique diminue souvent. Cela s'explique par une combinaison de plusieurs facteurs, tels que l'augmentation de la conductivité des matériaux, la dissipation plus rapide des charges et la dégradation des propriétés isolantes de certains matériaux. Ainsi, dans des conditions de haute température, il est plus difficile de maintenir des charges élevées sur les surfaces frottées. [88]

À basse température, les charges triboélectriques peuvent persister plus longtemps, car la dissipation des charges est plus lente dans des matériaux refroidis, qui tendent à conserver leurs propriétés isolantes. Cela permet à la charge de rester sur la surface pendant une période plus longue avant de se dissiper. À haute température, en revanche, les charges se dissipent plus rapidement, ce qui réduit la durée de la charge triboélectrique.

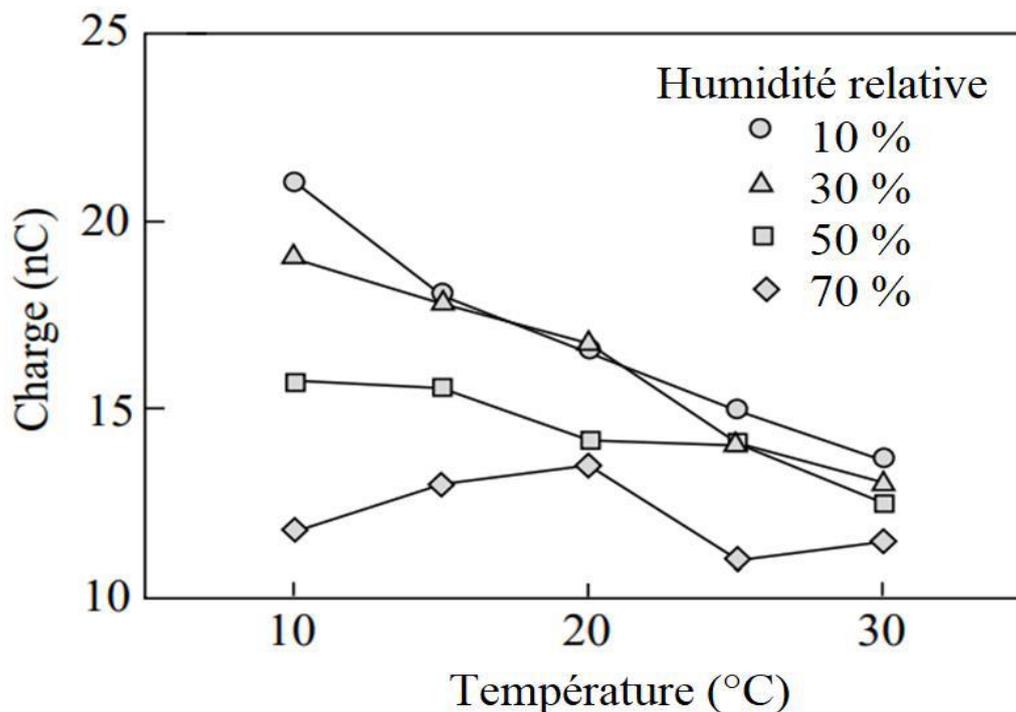


Figure I-7. Charge triboélectrique d'une sphère métallique de 12,7 mm de diamètre en fonction de la température [88].

I.3. Dispositifs de chargement triboélectrique des matériaux granulaires isolants

Les dispositifs de chargement triboélectrique pour les matériaux granulaires isolants sont conçus pour générer des charges électrostatiques en exploitant le phénomène de triboélectricité. Voici les principaux types de dispositifs et techniques couramment utilisés :

a) Dispositif de charge de type statique

Le dispositif de chargement statique est un appareil simple et efficace composé d'une enceinte parallélépipédique isolante, équipée de parois inclinées et détachables (Figure I-8). Les particules, en chute libre à l'intérieur de ce dispositif, glissent le long des parois sous l'effet de la gravité, et se chargent électriquement par frottement avec ces surfaces [100 102]. La structure permet d'adapter les plaques à différents matériaux, ce qui est essentiel dans le processus de séparation électrostatique des particules. Ce dispositif est particulièrement utile dans les applications de séparation de mélanges granulaires, grâce à sa capacité à accueillir plusieurs jeux de plaques interchangeables. Ainsi, le dispositif peut s'adapter au mélange que l'on souhaite séparer de manière à charger un type de particule positivement et le second type négativement.

Lorsque des mélanges de particules très fines sont utilisés, la gravité seule peut ne pas suffire à les déplacer le long des parois. Pour pallier ce problème, un vibreur est souvent associé au dispositif, afin de maintenir un flux de matière continu et éviter l'agglomération des particules fines. Les vibrations facilitent le glissement des particules et assurent ainsi une distribution uniforme des charges électrostatiques, optimisant le processus de séparation.

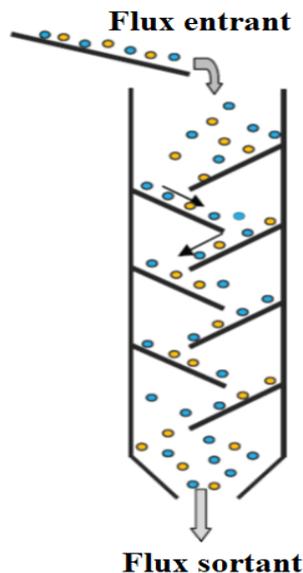


Figure I-8. Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [101].

b) Dispositif de charge à cylindre tournant

Le tube tournant est un dispositif simple et économe en énergie, couramment utilisé comme tribochargeur pour la séparation des déchets plastiques [103, 104]. Ce dispositif permet aux particules de plastique d'être introduites en continu dans le cylindre rotatif où elles se déplacent

sous l'effet de la gravité. Les particules de plastiques sont chargées électriquement par frottement lors de leurs collisions entre elles et avec les parois du tube [105]. Afin de créer l'agitation du mélange granulaire et d'augmenter son contact et sa charge triboélectrique, le tube est équipé d'ailettes faites de la même matière que le tube lui-même. Ils se prolongent radialement vers l'intérieur de la paroi du tube.

Les dispositifs à cylindre tournant (Figure I-9), [106], ont montré la possibilité de charger divers mélanges de polypropylène (PP) / polystyrène (PS) et polypropylène (PP) / polyéthylène à haute densité (HDPE) à diverses humidités relatives et températures ambiantes.

Cependant, la charge accumulée par les particules peut ne pas être suffisante dans tous les cas. Pour optimiser l'efficacité de ce processus, des ajustements peuvent être faits sur certains paramètres comme l'angle d'inclinaison du cylindre, la longueur du tube, ou encore l'intensité de l'agitation. En prolongeant le temps de séjour des particules dans le dispositif, le nombre de collisions augmente, améliorant ainsi la charge globale accumulée. Ces ajustements permettent une meilleure séparation des mélanges plastiques dans des conditions variables de température et d'humidité.

Comparé à d'autres dispositifs de chargement, comme ceux à vibrations ou les cyclones, le tube tournant présente un avantage en termes de réduction des agglomérats et de meilleure homogénéité de la charge. Dans certains systèmes, les particules mal chargées ou les agglomérats peuvent réduire la pureté des produits collectés. L'ajout d'ailettes dans le cylindre tournant permet d'éviter ces problèmes en favorisant un mélange plus dynamique et en augmentant la probabilité de collisions, assurant ainsi un chargement triboélectrique plus efficace.

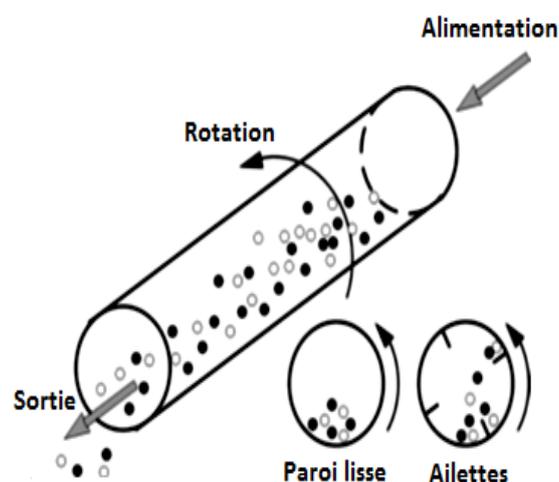


Figure I-9. Représentation schématique d'un dispositif de charge à cylindre tournant [106].

c) Dispositif de charge par vibrations

Ce dispositif à vibrations a été développé par Blajan et al [107] (Figure I-10). C'est un appareil qui utilise des vibrations pour provoquer le frottement entre les granules et entre le plateau ou les tubes vibrants [45], [108]., entraînant ainsi l'accumulation de charges électrostatiques. Ce type de dispositif fonctionne mieux sur les particules sous-millimétriques car l'intensité des frottements est faible. Le matériau à charger glisse dans des canaux en zigzag mis en mouvement vibratoire [109], [110] selon les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique et un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent principalement avec les parois du dispositif.

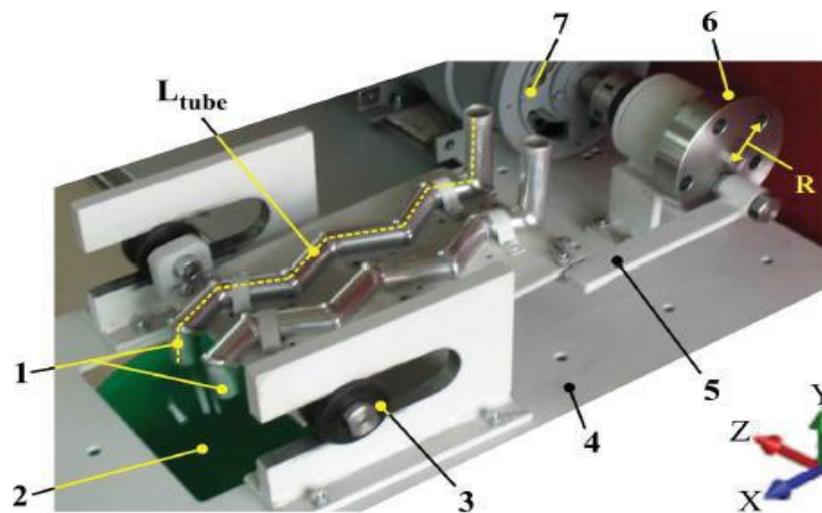


Figure I-10. Dispositif à vibrations ; 1 : tubes de charge ; 2 : sortie des particules chargées ; 3 : glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ; R : rayon de la manivelle ; X, Y, Z : directions du mouvement ; L_{tube} : longueur du tube.

Un autre dispositif de charge par vibration (figure I-11) [111.112]. Où des particules sont placées dans un récipient monté sur un plateau vibrant. Les vibrations du plateau se transmettent aux particules à travers le récipient, provoquant des frottements entre les particules elles-mêmes et entre les parois du récipient, ce qui permet l'acquisition de charges électrostatiques. La charge générée dépend de plusieurs facteurs : la nature du matériau du récipient, l'amplitude et la fréquence des vibrations, le temps de traitement et la quantité de particules. Ce type de dispositif permet de charger triboélectriquement plus facilement des particules sous-millimétriques que millimétriques.

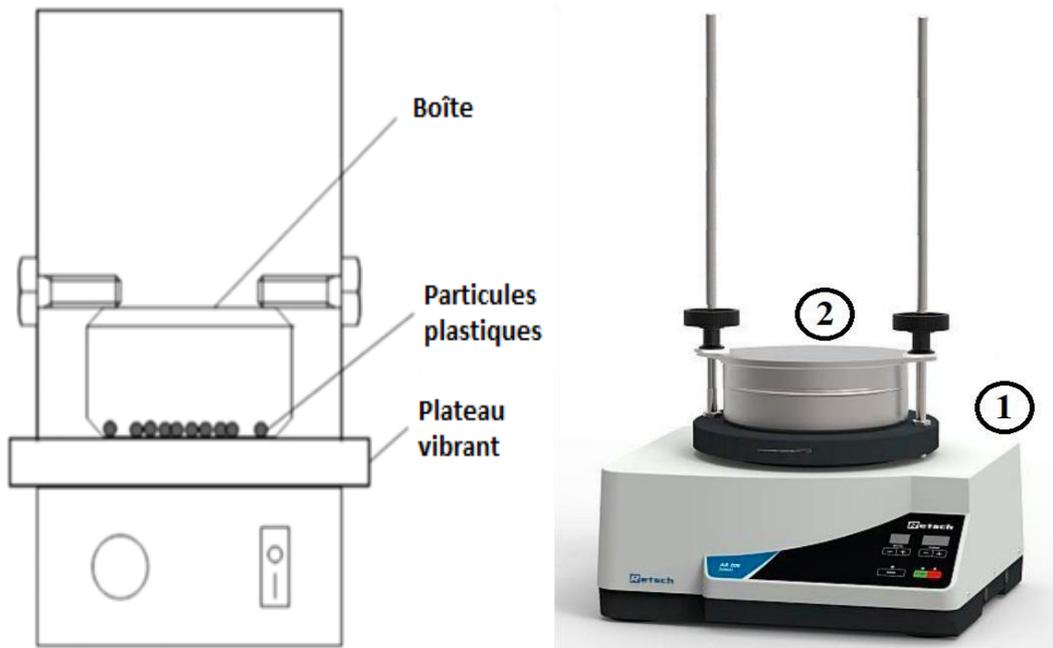


Figure I-11 : (a) Représentation schématique d'un dispositif de charge triboélectrique vibrant [113] ;
 (b) Dispositif de charge de marque Retsch ; (1) Dispositif vibrant ; (2) Boîte en acier inoxydable
 (Diam. : 160 mm).

d) Dispositif de charge par ventilateur

Le dispositif de chargement type ventilateur (Figure I-12) se compose d'un tube isolant, d'un moteur à courant continu, d'une hélice isolante et d'un support métallique [114, 115]. Lors de la mise en marche, l'hélice en rotation crée un courant d'air ascendant qui provoque des turbulences dans le tube contenant le mélange de particules. Ces turbulences entraînent des collisions multiples entre les particules et les parois du tube, produisant une charge triboélectrique par friction, essentielle pour la séparation des particules.

Pour assurer une récupération optimale des particules chargées, La récupération du mélange chargé, s'effectue par le pivotement du cylindre du dispositif sans arrêter le moteur afin d'éviter le collage des particules contre les parois et vider ainsi tout son contenu. Le matériau du cylindre, généralement sélectionné en fonction des propriétés des particules à traiter, est crucial pour maximiser la charge des particules. L'effet de la force centrifuge projette les particules vers les parois, augmentant le nombre de collisions et donc l'accumulation de charge.

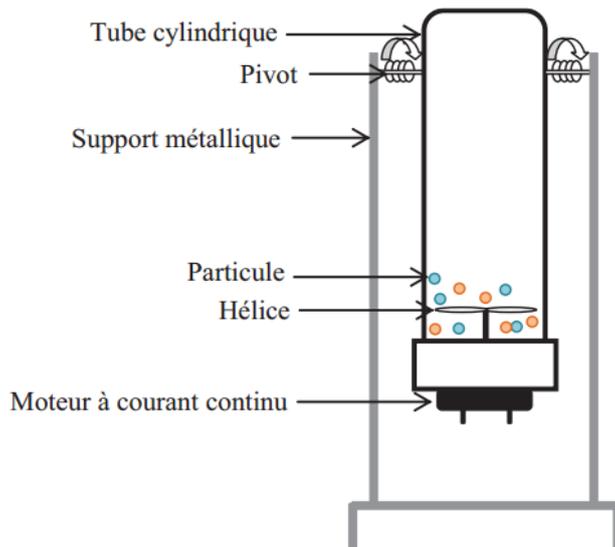


Figure I-12. Représentation schématique d'un dispositif de chargement à hélices [114].

Dans des configurations plus avancées figure I-13, plusieurs hélices peuvent être installées pour multiplier les turbulences et ainsi accroître le rendement de chargement triboélectrique [116], répondant aux besoins de traitements de grandes quantités de matériaux granulaires. Ce type de dispositif est adapté pour un fonctionnement continu, où les particules sont introduites par la partie supérieure du cylindre et récupérées chargées à la sortie inférieure.

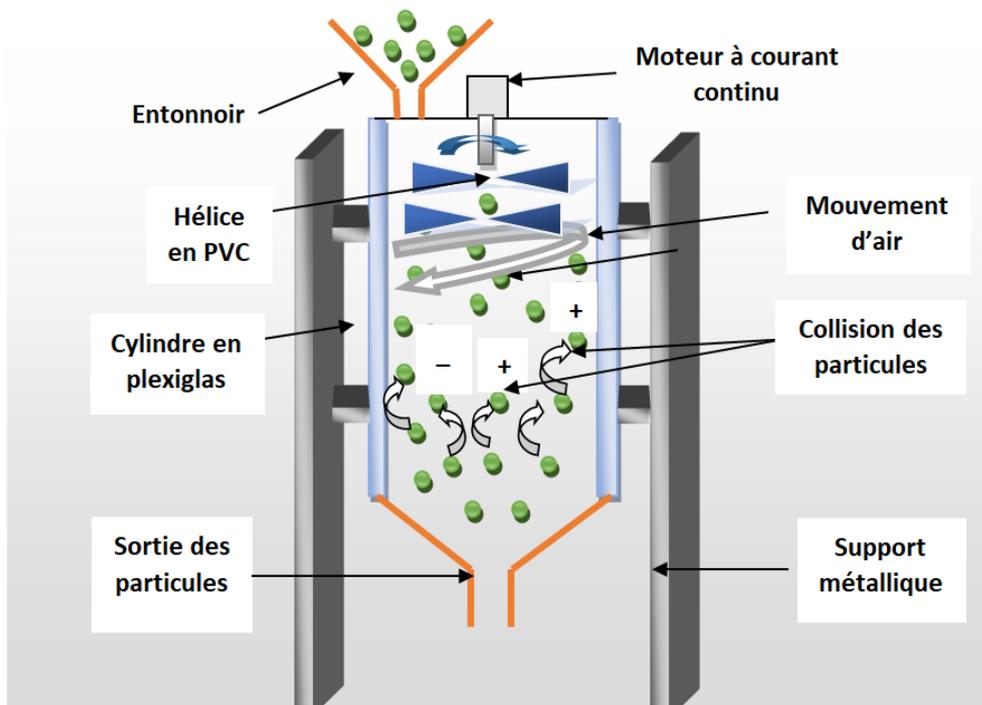


Figure I-13. Dispositif de charge tribo-électrique à plusieurs hélices et à fonctionnement continu [116].

e) Dispositif de charge par cyclone

Le dispositif de charge par cyclone est constitué d'un cylindre isolant (Figure I-14), positionné verticalement, dans lequel les matériaux granulaires ou pulvérulents sont introduits. Ces particules sont projetées radialement vers la paroi intérieure du cylindre grâce à un ventilateur dont la vitesse de rotation peut être ajustée. En frappant la paroi, les particules génèrent une charge électrostatique par frottement [117-122], processus clé dans le fonctionnement de ce dispositif.

Le dispositif permet une alimentation continue dans le séparateur électrostatique. Cependant, l'efficacité de ce dispositif avec des particules très fines reste à étudier, car ces dernières pourraient nécessiter des ajustements supplémentaires pour atteindre une charge optimale.

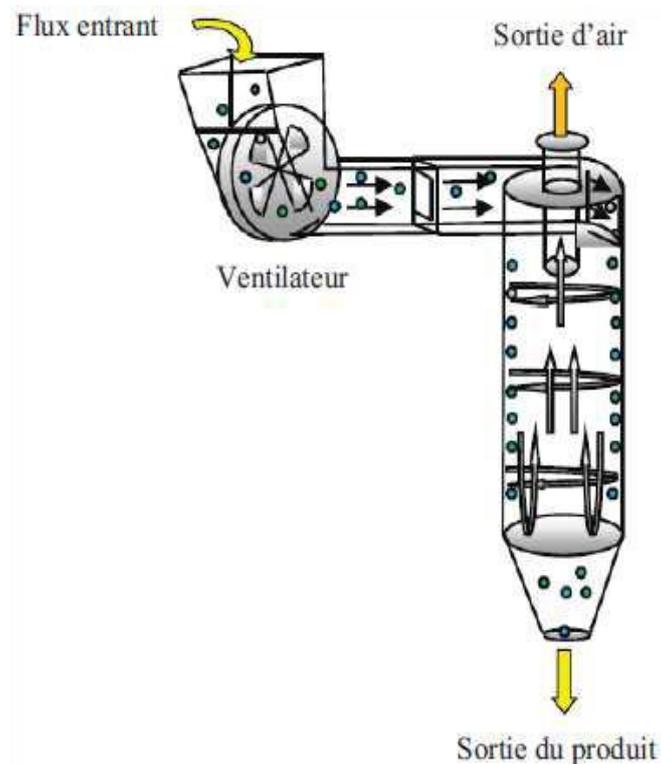


Figure I-14. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [123].

f) Dispositif de charge à lit fluidisé

Le dispositif de chargement triboélectrique par lit fluidisé (Figure I-15) est constitué d'un tube cylindrique vertical, fabriqué en matériau isolant, et équipé d'une plaque poreuse à sa base, sur laquelle repose le mélange de particules. Ce dispositif utilise une soufflante qui injecte de l'air à travers la plaque poreuse pour créer un lit fluidisé, où les particules sont mises en mouvement et maintenues en suspension [124]. Les particules fluidisées acquièrent des charges électriques de signes opposés grâce aux collisions entre elles [125-127]. Le dispositif est particulièrement efficace pour les particules fines, car l'air de fluidisation empêche leur agglomération et favorise le chargement par effet triboélectrique.

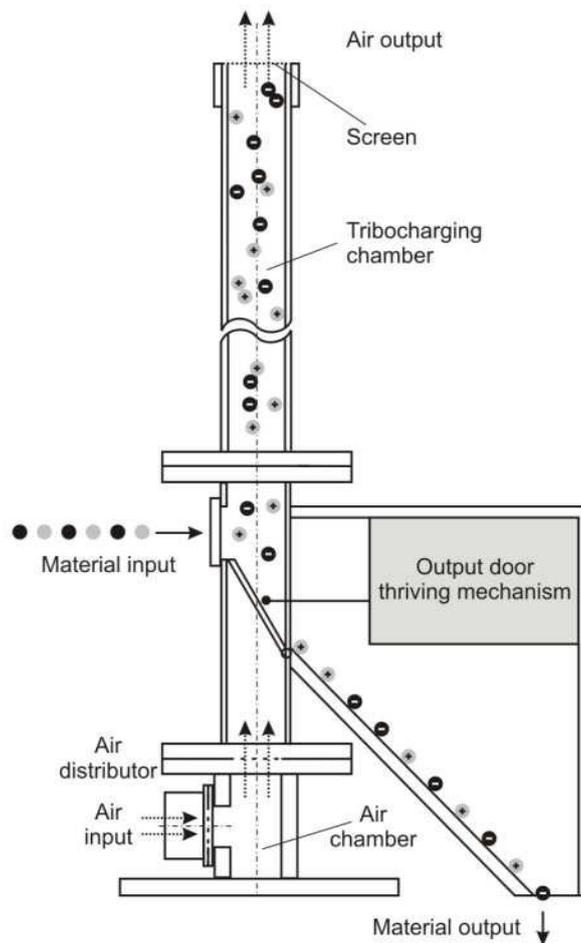


Figure I-15 : Dispositif à lit fluidisé [126].

Le fonctionnement du lit fluidisé est décrit en six phénomènes (Figure I-16) [128-131]. Chaque stade correspondant à une vitesse de fluidisation croissante. Ces régimes influencent directement le niveau de collision et de frottement entre les particules, ainsi que la qualité du chargement triboélectrique, rendant ce dispositif particulièrement polyvalent et efficace pour le chargement de matériaux granulaires.

Les six phénomènes sont :

Vibration : pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur la plaque poreuse sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.

Formation : le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques des fluides : ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation V_{mf} . Le lit montre une certaine expansion de la couche, on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules.

Bullage : à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage V_{mb} , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse de distribution de gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide en ébullition

Pistonage : en excès au-delà de V_{mb} , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.

Renardage : les particules s'accolent et créent des passages préférentiels pour le gaz.

Entrainement : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos V_t , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation.

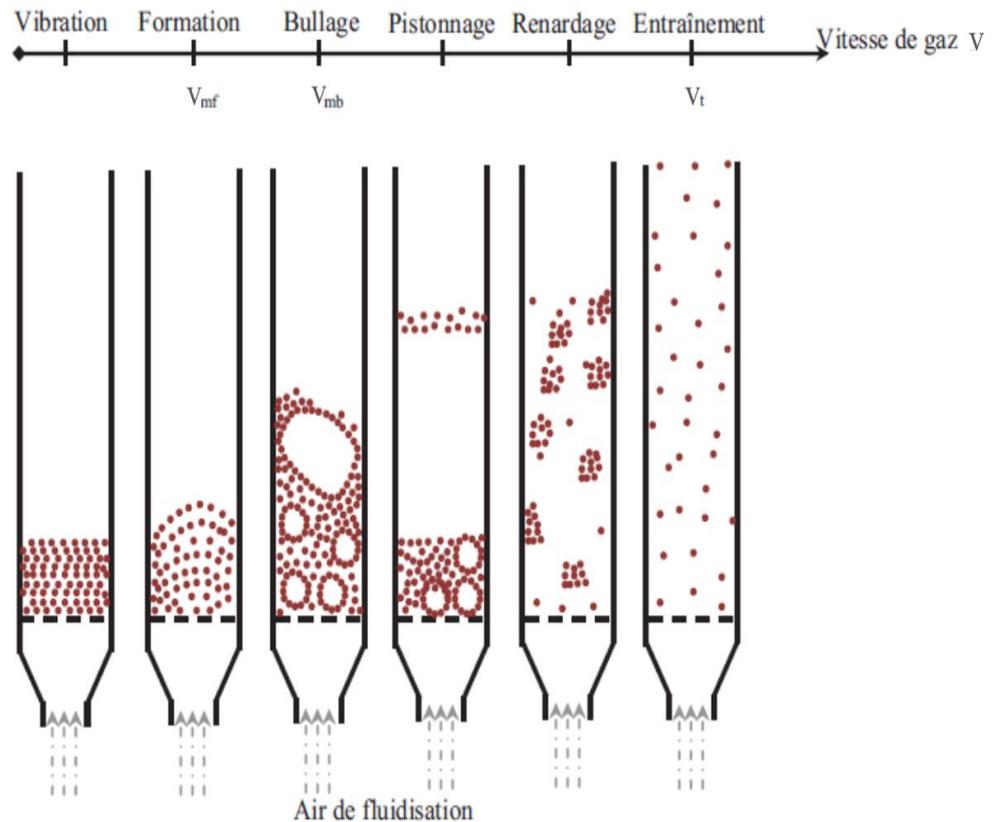


Figure I-16. Régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse du gaz [127].

Un article récent [122] décrit un dispositif de chargement triboélectrique combine deux techniques de chargement : un lit fluidisé et un système de chargement statique. Il se compose d'une chambre isolante de forme parallélépipédique, divisée en deux sections. Dans la première section, les particules sont mises en mouvement dans un lit fluidisé grâce à une injection d'air ascendant. Cette étape génère une charge par les collisions entre particules, facilitée par le mouvement de fluidisation.

Une fois les particules chargées dans le lit fluidisé, elles sont transférées vers la seconde section de la chambre, où elles glissent le long de parois inclinées, permettant un chargement supplémentaire par frottement. Cette configuration en cascade renforce l'efficacité du chargement en multipliant les paramètres de contrôle, tels que la vitesse d'injection d'air dans le lit fluidisé et l'angle des parois dans la section statique [132].

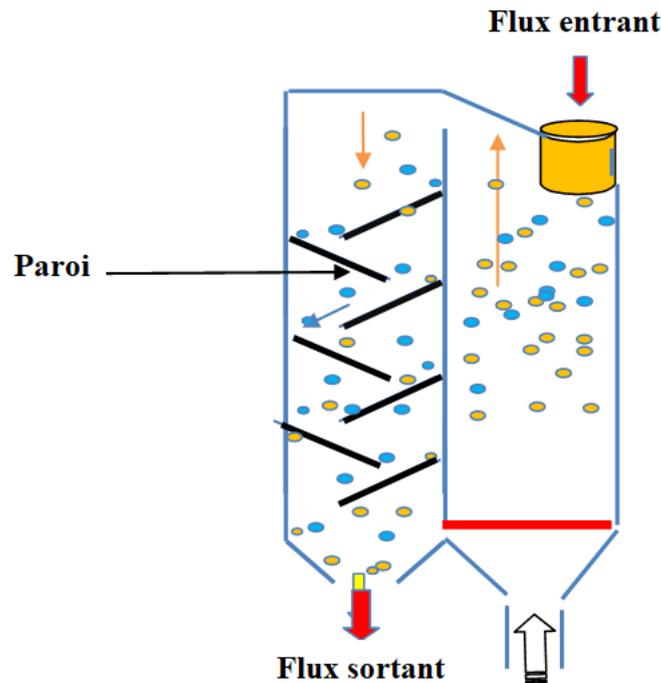


Figure I-17 : Représentation schématique d'un dispositif composé d'un lit fluidisé et d'un chargeur statique [122].

I.4. Forces aérodynamiques et électrostatiques

Les forces aérodynamiques et électrostatiques jouent des rôles distincts mais complémentaires dans le contrôle et la manipulation des particules, notamment dans les dispositifs de séparation triboélectrique et de chargement de particules.

Trois types de forces s'exercent sur les matériaux granulaires :

- A. Les forces de la pesanteur
- B. Les forces de London-Van der Waals
- C. Les forces électrostatiques

a) Forces de la pesanteur

Le poids d'un corps de masse m s'exprime par :

$$P = mg \quad (I.1)$$

Avec : $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Aux forces de la pesanteur s'opposent des forces inter partuculaires. Elles sont différentes pour des particules chargées d'électricité statique ou électriquement neutres.

b) Forces de london –Van Der Waals

Il s'agit de forces attractives (Figure I-18). Si on considère deux atomes distants de r , la force d'interaction F [N] entre moments dipolaires instantanés s'écrit :

$$F = - \frac{\alpha^2 4 hc}{r^7 3 \lambda_i} \tag{I.2}$$

Où α est la polarisabilité de l'atome et $\frac{hc}{\lambda_i}$ son énergie d'ionisation.

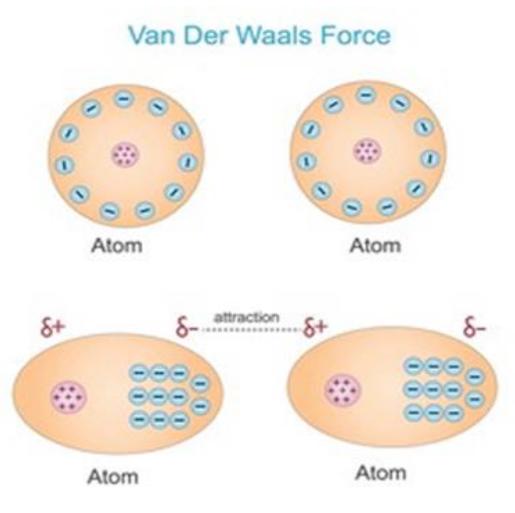


Figure I-18. La force attractive de London-Van der.

La Figure I-19 montre la force d'interaction entre deux sphères matérielles : c'est la somme de toutes les forces d'interaction de London-Van der Waals relatives aux paires constituées d'un atome dans chaque sphère.

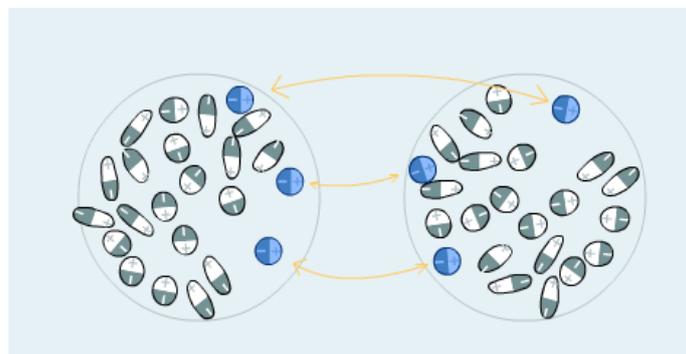


Figure I-19. Force attractive de London-Van der Waals entre deux sphères.

Le calcul réalisé par Hamaker [133] pour 2 sphères identiques de rayon R séparés de r (distance centre à centre) et baignant dans le vide conduit à :

$$F = - \frac{A}{6(r - 2R)} \left(\frac{2R^2}{r^2 - 4R^2} + \frac{2R^2}{r^2} + \ln \frac{r^2 - 4R^2}{r^2} \right) \quad (I.3)$$

Où A est la constante de Hamaker.

Les forces de Van der Waals ne sont significatives (pour le processus d'agrégation) que si la distance inter-particulaire ($r - 2R$) est inférieure à 100 nm ; l'équation donnée par Hamaker est donc suffisante.

c) Forces de Coulomb

Charles-Augustin Coulomb découvre expérimentalement l'expression de la force électrique que s'exercent deux charges électriques immobiles disposées sur des sphères. Coulomb réalise que le module de la force électrique dépend des paramètres suivants :

- La force électrique est proportionnelle au produit des deux charges q_1 et q_2 en attraction ou en répulsion.
- La force électrique est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges $1/r^2$.
- La force électrique est proportionnelle à une constante k afin d'évaluer la force électrique en newton.

Voici l'expression scalaire de la loi de Coulomb en électrostatique [134] :

$$F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (I.4)$$

Où :

F_e : Force électrique en newton (N).

q_1 : première charge qui applique la force électrique sur la deuxième charge en coulomb (C).

q_2 : deuxième Charge qui applique la force électrique sur la première charge en coulomb (C).

r : distance entre les deux charges ponctuelles en mètre (m).

k : Constante de la loi de Coulomb, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ et ϵ_0 : permittivité du vide.

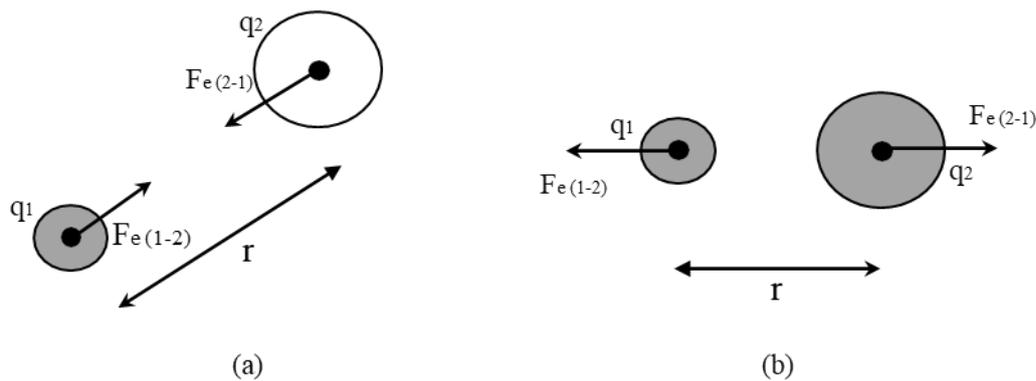


Figure I-20. Force de coulomb entre deux sphères chargées

(a) : attraction, charges de signes contraires ($q_1 q_2 < 0$)

(b) : répulsion, charges de même signe ($q_1 q_2 > 0$)

d) Forces aérodynamiques

Afin de bien étudier les mouvements des particules dans les procédés de chargement triboélectrique, une bonne connaissance des forces aérodynamiques agissant sur ces particules s'impose.

Le mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique a lieu sous l'action de la force suivante :

$$F_i = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad (I.5)$$

Où :

F_i : la force d'inertie

F_{el} : la force exercée par un champ électrique uniforme d'intensité E_0 sur une particule chargée, de charge Q , située à une distance x de l'électrode.

F_a : la force aérodynamique et F_g la force gravitationnelle.

La force d'inertie F_i s'exprime par la relation :

$$F_i = W(\rho_s - K_\rho) \frac{dv}{dt} \quad (I.6)$$

Où :

v : La vitesse de particule

K_p : Coefficient de forme (pour les particules sphériques $K=0,5$)

W : Le volume d'une particule ayant la densité ρ_s

ρ_s : Densité de l'air.

La force aérodynamique s'écrit :

$$F_a = \frac{C_d \pi R^2 \rho v_r^2}{2} \quad (I.7)$$

C_d : étant en fonction du nombre de Reynolds : $Re = \frac{V.L}{\nu_i}$

V : vitesse du fluide [m/s] ;

L : dimension du fluide [m] ;

ν_i : viscosité du fluide [m^2/s] ;

v_r : vitesse relative d'une particule dans l'air [m/s].

La force de frottement avec l'air est dépendante de la vitesse, cette dépendance peut être très compliquée. Seuls des cas simples peuvent être traités analytiquement.

I.5. Séparation électrostatique des matériaux granulaires et pulvérulents

La séparation électrostatique est une méthode de tri efficace pour séparer les matériaux conducteurs et isolants, et elle trouve des applications variées dans plusieurs industries [135]. Elle est utilisée dans le recyclage des déchets électriques et électroniques (DEEE), notamment pour extraire le cuivre des câbles et séparer les composants métalliques et plastiques.

Les séparateurs tribo-électrostatiques permettent un tri entièrement automatisé d'un grand nombre de matériaux dont les plastiques. Plusieurs dispositifs seront présentés en vue de comprendre le principe de la séparation électrostatique des matériaux granulaires. Toutes ces installations comportent une partie de chargement triboélectrique et une partie de séparation dans un champ électrique intense [136]. Ce procédé présente l'avantage d'une faible consommation d'énergie, d'une adaptabilité élevée et de coûts d'exploitation réduits [137]. La variété des installations conçues pour la séparation de mélanges granulaires peut être perçue en examinant les nombreux travaux techniques et scientifiques publiés durant ces dernières décennies par plusieurs laboratoires [138], [139 -143].

a) Séparateur électrostatique à chute libre

Le séparateur électrostatique à chute libre est largement utilisé dans le tri et la purification des minerais de tailles sous-millimétriques. Actuellement, le processus est appliqué avec succès dans le tri des plastiques granulaires issus des déchets d'équipements électriques et

électroniques [93, 94] [144, 145]. Dans cette installation, le mélange granulaire est chargé par un des différents dispositifs de chargement triboélectrique. Il tombe librement dans un champ électrique intense généré par deux électrodes planes liées à la haute tension (Figure I-21). Les forces électrostatiques agissent sur les particules chargées qui sont alors déviées dans leur chute, étant attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge [146-150].

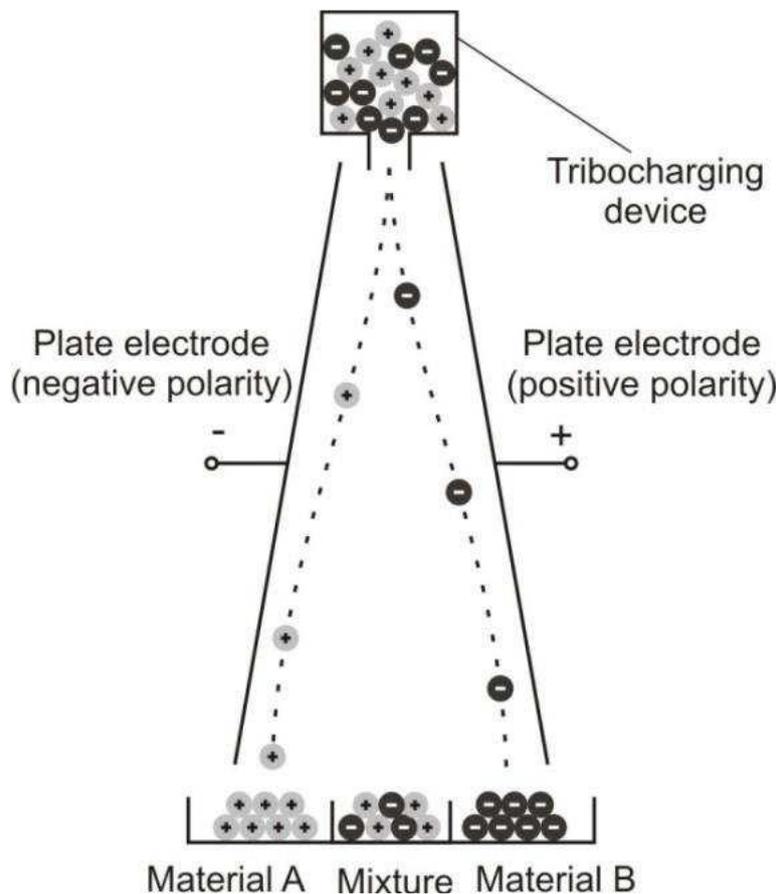


Figure I-21. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à chute libre alimenté par un tribochargeur.

b) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales

Plusieurs études ont été faites sur cette gamme de séparateurs électrostatiques [128], dont la caractéristique essentielle est la simultanéité des deux opérations : la charge triboélectrique des particules par collisions dans un lit fluidisé et la séparation électrostatique de celles-ci dans un champ électrique intense généré par des électrodes connectées aux alimentations de haute tension continue de polarités opposées.

Un des avantages de ce procédé réside dans le fait que les particules moins chargées ne quittent pas la zone active du séparateur jusqu'à ce qu'elles acquièrent une charge suffisante pour permettre aux forces électriques de les conduire à l'électrode de polarité opposée.

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales (Figure I-22) est conçu pour le traitement des mélanges de matériaux isolants fins. Le dispositif se compose de deux électrodes verticales à plaques à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique isolante en parois transparentes pour permettre l'observation du mouvement des granules, à l'intérieur du lit fluidisé contenant les matériaux micronisés à séparer. La fluidisation est réalisée par injection d'air en utilisant un souffleur d'air à vitesse variable. Les électrodes sont reliées à deux alimentations haute tension continues de polarités opposées afin de créer un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules et assurer la séparation entre les composants du mélange [72].

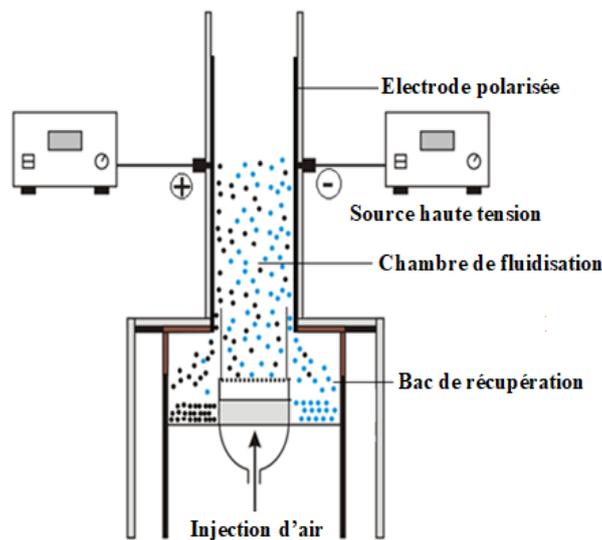


Figure I-22. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales [72].

c) *Séparateurs tribo-aéro-électrostatiques à bandes transporteuses*

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses breveté par Calin et Dascalescu [151] a la particularité que ses électrodes sont deux convoyeurs à bande métallique reliés à deux sources d'alimentation de haute tension de polarités opposées (Figure I-23). Les granules tribochargés dans le lit fluidisé sont attirés par les convoyeurs et plaqués par les forces électriques à la surface des bandes métalliques qui les transportent vers les bacs de collecte. Le

débit d'alimentation du séparateur est ajusté à une valeur qui est égale à la somme de la masse des produits collectés par unité de temps.

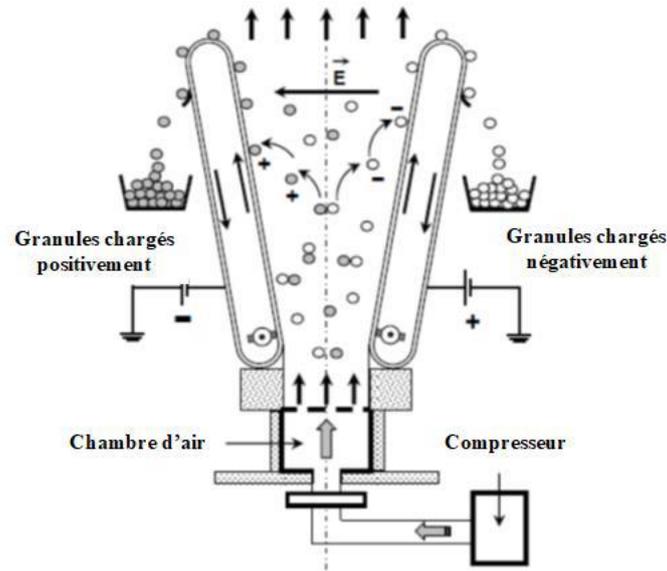


Figure I-23. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses [72].

d) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes cylindriques tournantes

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes (Figure I-24), conçu au laboratoire IRECOM en Algérie, est un dispositif avancé pour la séparation des matériaux pulvérulents. La structure se compose d'une chambre de fluidisation, qui est aussi la chambre de séparation, faite en PMMA transparent permettant d'observer la séparation des particules. Le mélange à séparer est fluidisé grâce à une turbine réglable de 1,1 kW. Les électrodes cylindriques, d'un diamètre de 160 mm et d'une longueur de 300 mm, sont placées de part et d'autre de la chambre, distantes de 8 cm l'une de l'autre, et créent un champ électrique en étant connectées à des sources de haute tension de polarités opposées.

Le champ électrique généré entre ces électrodes attire les particules en fonction de leur charge acquise par triboélectricité, facilitant ainsi leur séparation. Les électrodes sont entraînées par des moteurs à courant continu à vitesse variable, permettant d'ajuster la vitesse pour améliorer la précision du tri en fonction des caractéristiques du mélange à séparer. Les particules séparées sont recueillies dans des bacs collecteurs placés de chaque côté de la chambre de séparation. [152-155].

Ce type de séparateur est plus adapté que celui à convoyeurs en termes de durée de transport des particules chargées vers le collecteur, car la distance que doit parcourir une particule attachée à un des convoyeurs pour être récupérée dans le bac collecteur correspondant est plus importante que dans le cas des tambours. Ceci affecte négativement les charges de particules qui peuvent être perdues avant de pouvoir être collectées, car elles vont se détacher du convoyeur et ainsi retomber dans le lit fluidisé. Ce phénomène impacte donc l'efficacité des séparateurs tribo-aéro-électrostatiques à convoyeurs.

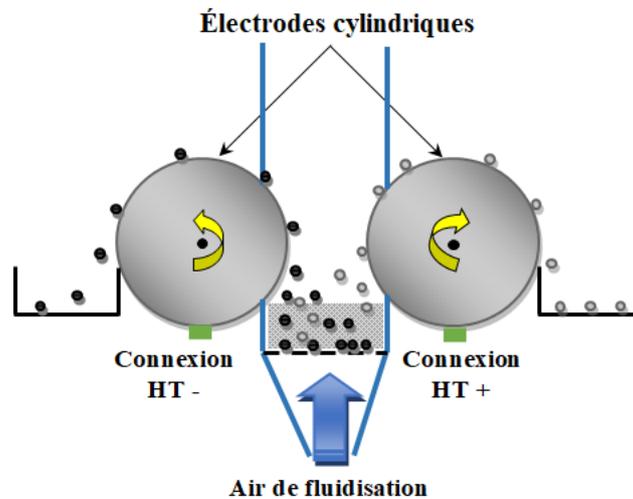


Figure I-24. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à cylindres tournants [155].

e) *Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants*

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants est conçu pour la séparation de mélanges de particules fines (Figure I-25), notamment les matériaux plastiques. Son fonctionnement repose sur un chargement triboélectrique des particules à l'intérieur d'un lit fluidisé dans une chambre de séparation dont les parois sont en PMMA transparent. L'air est injecté par une soufflante équipée d'un variateur de vitesse pour assurer la fluidisation homogène des particules. Ce dispositif comprend deux disques tournants en acier inoxydable, qui sont immergés dans le lit fluidisé et reliés à des sources de haute tension de polarités opposées, générant un champ électrique destiné à attirer et séparer les particules en fonction de leur charge.

Les disques métalliques, mis en rotation par des moteurs électriques contrôlés, attirent les particules chargées de signe opposé grâce au champ électrique généré entre eux. Au fur et à

mesure de la rotation, les particules adhèrent aux disques et sont acheminées vers des racleurs qui retirent les particules accumulées sur leurs surfaces. Les particules ainsi récupérées sont dirigées vers des bacs collecteurs situés à l'extérieur de la chambre de séparation, permettant une collecte propre et organisée des composants séparés [156, 158].

Ce séparateur est particulièrement efficace pour les mélanges de fines particules, en raison de la combinaison de la fluidisation et de l'attraction électrostatique qui optimise la séparation. Comparé aux autres types de séparateurs, le modèle à disques tournants assure une séparation efficace tout en permettant un nettoyage continu des disques via les racleurs, limitant ainsi les interruptions du processus de séparation et maximisant l'efficacité du dispositif pour des applications industrielles.

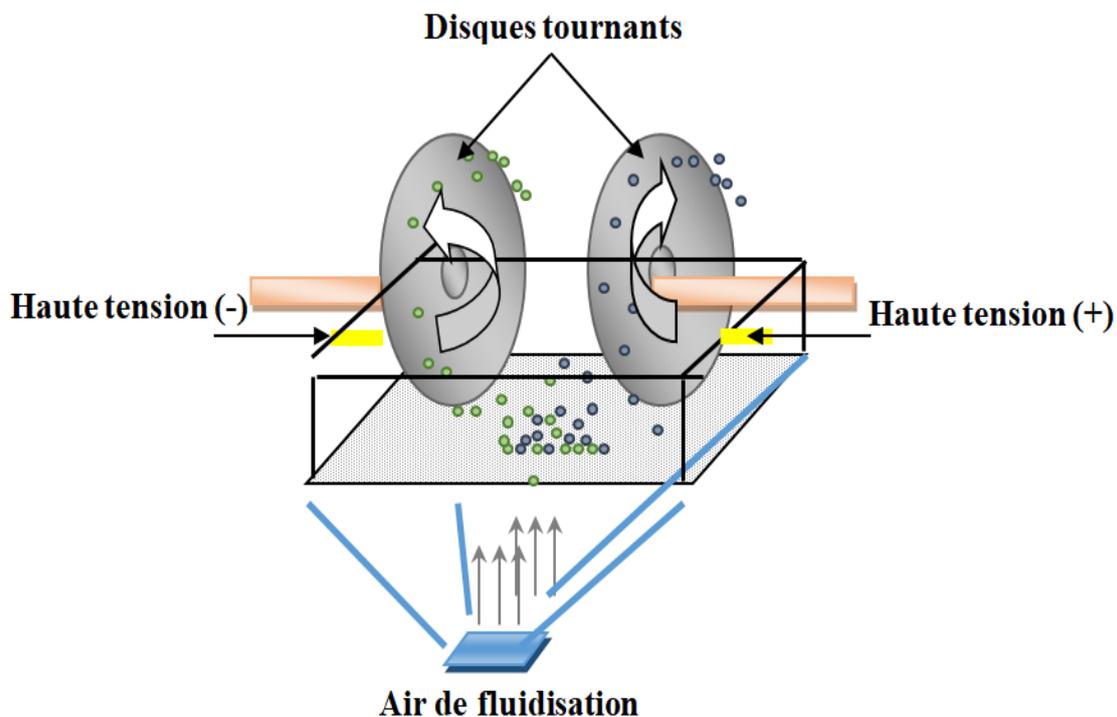


Figure I-25. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants [156].

f) Séparateur tribo-électrostatique à tapis roulant

Le séparateur triboélectrostatique à tapis roulant, également appelé TBS (Tribocharged Belt Separator) [159], est un dispositif utilisé pour séparer les particules chargées en fonction de leur polarité. Son fonctionnement repose sur un dispositif de chargement statique qui triboélectrise les particules, conférant ainsi des charges électriques opposées selon les

caractéristiques du matériau. Une fois chargées, les particules tombent sur un tapis roulant qui les transporte progressivement vers une zone de séparation [160, 161].

Dans cette zone de séparation, une électrode haute tension crée un champ électrique entre elle et le tapis relié à la terre. Ce champ électrique génère des forces de Coulomb qui attirent les particules d'une polarité et repoussent celles de polarité opposée. Le tapis roulant permet ainsi aux particules d'atteindre cette zone avec des charges bien réparties, ce qui favorise leur déviation en fonction de leur polarité respective sous l'effet des forces électrostatiques.

La séparation par tapis roulant est prisée pour sa simplicité d'installation et sa capacité à traiter un grand volume de particules, optimisant ainsi les processus industriels de séparation triboélectrostatique.

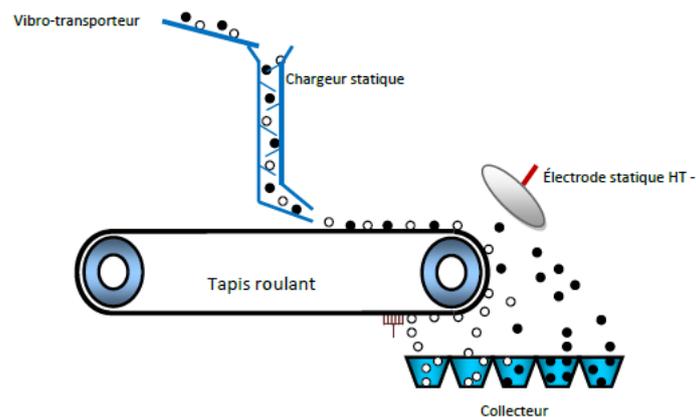


Figure I-26. Représentation schématique d'un séparateur TBS [159].

g) *Séparateur électrostatique à électrode-convoyeur multifonctions*

Le séparateur électrostatique à convoyeur (Figure I.27) est un dispositif de tri qui utilise des forces électrostatiques pour séparer des particules granulaires ou micronisées. Il a été conçu par l'Institut PPRIME, à Angoulême, en France [162-164].

Ce système se compose de deux parties principales : une première partie pour le chargement des particules, où divers mécanismes comme l'effet triboélectrique, la décharge couronne, ou l'induction électrostatique sont utilisés pour charger les particules selon leur nature (isolant ou conducteur) [165-172]. La deuxième partie est formée d'un tapis roulant à bande métallique, une goulotte oscillante (1) pour introduire le mélange granulaire en monocouche dans le tapis (2) et le transporter vers l'électrode de forme elliptique ou cylindrique tournante

(6) reliée à une source d'alimentation haute tension continue de polarité réversible (11) et un système de collecte des particules (7, 8, 9). Cette électrode attire les particules d'une polarité et repousse les particules de polarité opposée, grâce aux forces électriques de Coulomb, permettant ainsi la séparation [173, 174].

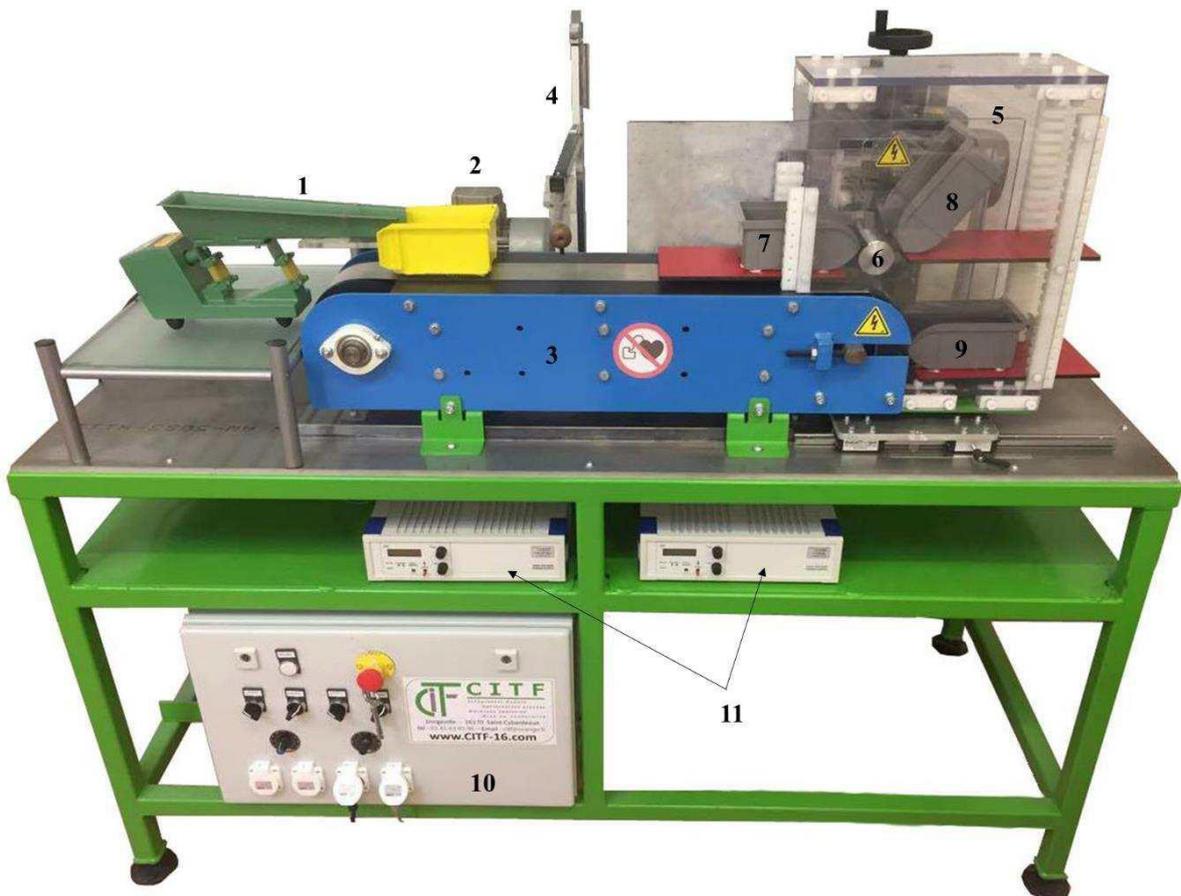


Figure I-27. Séparateur électrostatique à électrode-convoyeur multifonctions [173, 174] ; 1 : Goulotte oscillante ; 2 : Moteur électrique entrainant le convoyeur métallique ; 3 : Convoyeur métallique ; 4 : Electrode couronne ; 5 : Moteur électrique entrainant l'électrode cylindrique ; 6 : Electrode cylindrique tournante ; 7 : Boite 1 ; 8 : Boite 2 ; 9 : Boite 3, 10 : Armoire électrique ; 11 : Alimentations en haute tension continue.

h) Séparateur électrostatique à tambour

Le séparateur électrostatique à tambour (figure I-28), est un dispositif largement utilisé dans l'industrie pour la séparation de particules conductrices et isolantes [175-182]. Le champ électrique est créé entre deux électrodes, (2) et (3), où les électrodes sont connectées à un générateur de haute tension continue et l'électrode cylindrique tournante (4) reliée à la terre. La goulotte oscillante (1) dépose le mélange granulaire qui doit être séparé à la surface de

l'électrode cylindrique (4). Ce type de séparateur utilise simultanément deux mécanismes de charge : la décharge couronne et l'induction électrostatique. La décharge couronne charge les particules isolantes, tandis que l'induction électrostatique agit uniquement sur les particules conductrices. Les particules isolantes, chargées par l'électrode couronne (2), adhèrent à la surface du tambour (4) sous l'effet de la force d'image électrique, ce qui facilite leur séparation du reste du mélange. Les conducteurs, en revanche, ils se chargent négativement sous l'influence du flux ionique engendré par l'électrode couronne (2). Cependant, ces charges se dissipent rapidement au contact de l'électrode cylindrique tournante (4) reliée à la terre. Le champ électrique produit par l'électrode statique (3) charge les particules métalliques par induction électrostatique, ce qui les attire vers l'électrode de collecte. Certaines machines utilisent une électrode de neutralisation (5) pour faciliter le détachement des particules isolantes restantes, suivie d'une brosse (6) pour retirer les particules qui demeurent collées, optimisant ainsi la séparation finale.

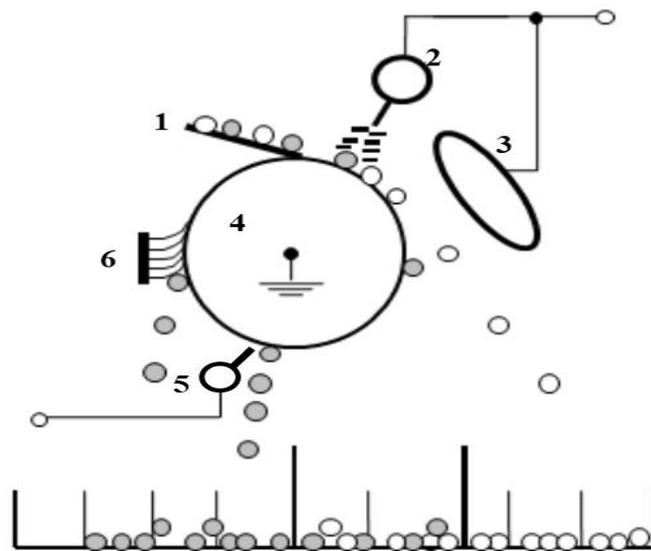


Figure I-28 : Séparateur électrostatique à tambour. (1) Goulotte oscillante ; (2) Electrode couronne ; (3) Electrode statique ; (4) Electrode cylindrique tournante ; (5) Electrode couronne de neutralisation ; (6) Balais [183].

I.6. Installations industrielles

Aujourd'hui, de nombreuses entreprises dans le monde fabriquent, utilisent et commercialisent des installations de séparation électrostatique pour des applications variées, notamment dans le secteur du recyclage, du traitement des déchets et de l'industrie minière. Ces équipements, qui exploitent différents principes de charge électrostatique (couronne, induction et triboélectrique), permettent de séparer efficacement des matériaux de différentes conductivités et d'optimiser le tri des matériaux recyclables ou des ressources naturelles.

Ces installations électrostatiques sont de plus en plus prisées pour leur efficacité et leur capacité à traiter une grande variété de matériaux pulvérulents et granulaires, allant des plastiques aux métaux. Des sociétés leaders dans ce domaine, comme HAMOS, Outotec (anciennement CARPCO), Prodecologia, MBA polymers, ou encore Eriez, investissent continuellement dans la recherche et le développement pour proposer des systèmes plus performants et adaptés aux besoins industriels. Ces avancées technologiques contribuent également à répondre aux préoccupations environnementales croissantes en améliorant les processus de recyclage et en facilitant le traitement durable des matériaux.

a) **MBA POLYMERS**

Cette société américaine de plasturgie a développé des procédés de séparation électrostatique très efficaces (Figure I-29). Elle a déposé plusieurs brevets, notamment le 6452126, auprès du National Patent Office des États-Unis, introduisant l'utilisation d'un matériau médiateur dans la séparation.

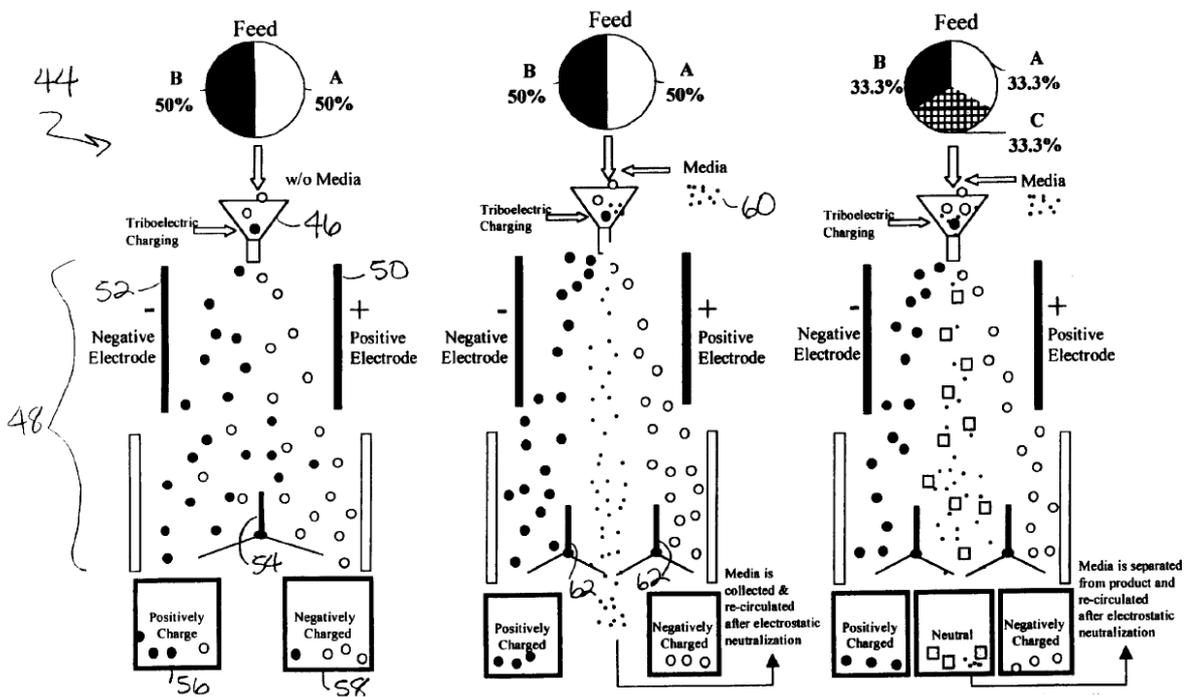


Figure I-29. Ajout d'un média dans un mélange traité par un séparateur électrostatique à chute libre [72]. (a) Séparation d'un mélange binaire, sans média ; (b) Séparation d'un mélange binaire avec média ; (c) Séparation idéal d'un mélange ternaire avec média.

Le séparateur comprend une partie chargement, dans laquelle les particules sont mises en contact les unes avec les autres pour induire un transfert de charge. Les particules sont ensuite distribuées dans la zone de séparation électrostatique qui comprend des électrodes positives et négatives.

Dans ce type de séparateur, le mélange granulaire à séparer chute librement dans un champ électrique généré par deux électrodes liées à la haute tension. Les forces électrostatiques qui agissent sur les granules chargés les conduisent vers l'électrode de polarité opposée où ils sont collectés dans des bacs. De plus, ce séparateur est caractérisé par la possibilité d'ajouter un média dans le mélange au moment de son passage dans le dispositif de charge. Cela permet d'augmenter la quantité de charge acquise par les particules et facilite donc la séparation.

b) CARPCO (GROUPE OUTOKUMPU)

CARPCO, une société américaine, est effectivement un acteur notable dans le domaine des séparateurs triboélectriques. Faisant partie du groupe finlandais Outokumpu, elle est reconnue pour ses innovations et son expertise en séparation triboélectrique, une technologie qu'elle a longuement développée dans le secteur minier. CARPCO se distingue sur le marché du recyclage et du traitement des déchets, où elle propose des équipements performants, en concurrence directe avec des sociétés comme HAMOS.

La société américaine CARPCO est aussi connue dans le domaine surtout par son séparateur en « V » (Figure I-30) qui se base sur l'introduction des mélanges granulaires isolants dans un champ électrique intense généré par deux électrodes cylindriques tournantes de polarités inverses. L'une attire les particules chargées positivement et la seconde celles chargées négativement. Il est également capable de séparer deux ou plusieurs matériaux. Le nouveau design de cette installation est facilement adaptable aux besoins des applications, notamment à la séparation des minerais et des plastiques dont la taille varie de 1 mm à 1 cm. Le séparateur utilise un champ électrostatique de 120 kV/m, produit par deux sources variables de haute tension, 0-60 kV [184].

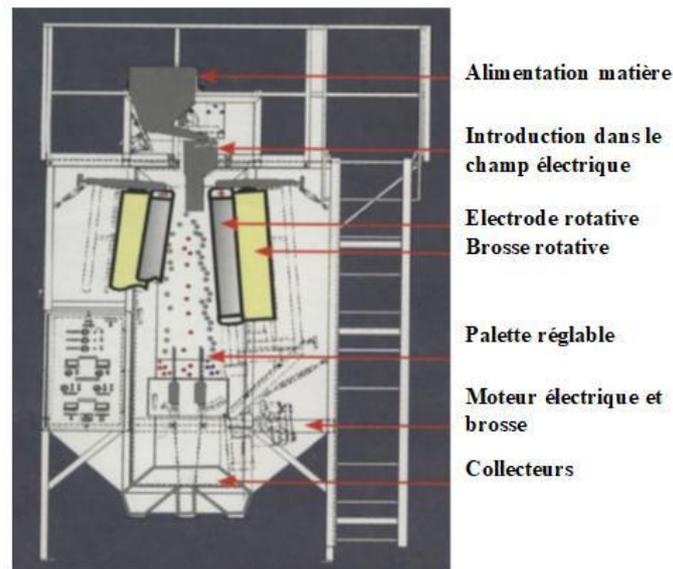


Figure I-30. Séparateur tribo électrostatique à chute libre Carpco.

c) *HAMOS*

Les séparateurs KMS de Hamos (Figure I-31 a) sont capables de faire le tri des sables en utilisant les différences de conductivité des substances minérales à séparer, telles que l'ilménite, le rutile ou le zircon. Le mélange est déposé sur un tambour relié à la terre par l'intermédiaire d'une unité de dosage sur des rouleaux de séparation, ce qui leur permet d'acquérir des charges électro-statiquement. Les minéraux conducteurs perdent leur charge rapidement lors de leur contact avec le tambour mis à la terre, et sont collectés dans d'un compartiment du collecteur comme étant le produit A, tandis que les minéraux non conducteurs perdent leur charge plus lentement, et restent collés à la surface du tambour, à partir duquel ils sont récupérés dans un autre compartiment du collecteur comme étant le produit B.

Le séparateur EMS de Hamos (Figure I-31 b) a été conçu pour le tri d'un mélange minéral constitué de particules de quartz et de feldspath, qui doit être dépoussiéré et conditionné avant la séparation électrostatique, le conditionnement ne nécessite pas l'ajout de produits chimiques ou liquides. Le mélange minéral est chargé par des effets triboélectriques dans une unité de chargement spécialement conçue. Son passage dans un champ électrique, entraîne la séparation. Il est possible de séparer toutes sortes de mélanges plastiques différents, sans grand effort à travers des modifications mineures à l'unité de chargement et en modifiant la position de la plaque de séparation.

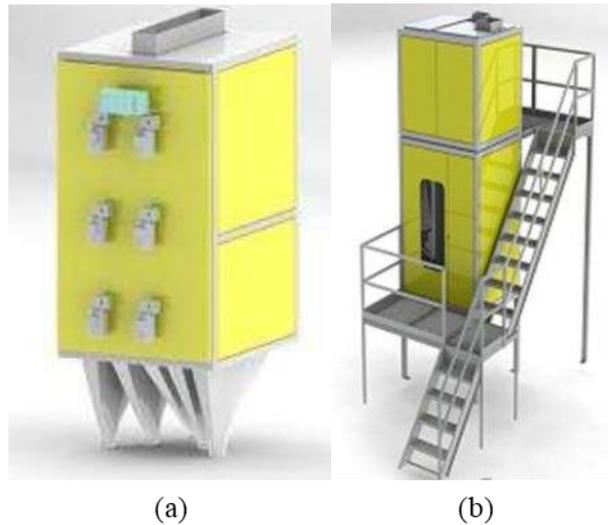


Figure I-31 : Séparateurs électrostatiques de *Hamos* pour le traitement des minéraux [185] ;
 (a) : Séparateur électrostatique *KMS*, (b) : Séparateur électrostatique *EMS*.

d) *PRODECOLOGIA*

L'installation de séparation triboélectrostatique type EBS de la société Prodecologia (Rivne, Ukraine), illustrée sur la figure I-32 est composée d'un tribochargeur à cylindre tournant et d'un séparateur électrostatique à tambour [186].

Les particules sont introduites à l'intérieur du dispositif de charge : un cylindre creux et légèrement incliné par rapport au plan horizontal. La rotation du cylindre brasse les particules et provoque de multiples contacts entre elles. Les particules chargées tombent dans la goulotte oscillante qui les dispose en monocouche sur la surface de l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre. Les particules sont alors soumises à un champ électrique créé entre cette électrode et une seconde électrode reliée à une source de haute tension qui peut être de polarité positive ou négative. Dans ce champ électrique, les particules chargées se dirigent vers les électrodes de polarités opposées. L'humidité relative de l'air ambiant ne doit pas dépasser 40% et le taux d'humidité des produits à séparer ne doit pas dépasser 0,5%.



Figure I-32. Séparateur tribo-électrostatique PRODECOLOGIA [186].

I.7. Conclusions

Les installations de séparation électrostatique permettent de trier des mélanges de matériaux granulaires et pulvérulents grâce à des mécanismes de charge électrique. Ces installations, utilisant des techniques comme l'effet couronne, l'induction électrostatique et la charge triboélectrique, ont prouvé leur efficacité dans des applications spécifiques, notamment pour la séparation de matériaux isolants ou de mélanges conducteurs et non-conducteurs. La charge triboélectrique, qui repose sur l'échange de charges entre deux matériaux mis en contact, est particulièrement efficace pour les mélanges isolants. Cependant, la diversité des formes, tailles et humidité des particules complique leur application à grande échelle, notamment dans les conditions industrielles.

Cette thèse vise à concevoir de nouveaux dispositifs multifonctions et des installations à lit fluidisé pour améliorer la charge triboélectrique des particules. En tenant compte des variables influençant la charge des matériaux (comme l'humidité), ces dispositifs devraient permettre de surmonter les défis de la séparation électrostatique de particules granulaires. L'objectif final est de développer des installations performantes et adaptées au recyclage de déchets, en particulier pour les équipements électriques et électroniques, offrant ainsi une solution efficace pour le tri des matériaux plastiques et autres composants recyclables.



Emir Abdelkader
Founder of the Algerian state
(1808-1883)

"If someone comes to me seeking to know the path to truth, I will guide them without difficulty towards the truth. I will do this not to make them adopt my ideas, but to show the truth before their eyes."

Chapitre II

Chargement Triboélectrique des matériaux isolants

II.1. Introduction

La triboélectrification ou triboélectricité c'est un phénomène de surface complexe qui se produit notamment entre les polymères, elle dépend essentiellement du transfert des charge électriques entre deux surfaces. Les granules se chargent par collisions et frottements entre eux ou avec les parois du dispositif de charge.

Le phénomène de charge triboélectrique est utilisé dans de nombreux procédés industriels, en particulier dans le traitement de matériaux plastiques granulaires en vue de leur séparation électrostatique. L'obtention d'une bonne charge électrique dépend de plusieurs facteurs, notamment le type de polymère et de ses propriétés physiques, le type de paroi du dispositif de charge comme nous le montrerons dans ce chapitre, la durée du chargement triboélectrique dans le dispositif de chargement et les conditions climatiques.

Dans le but d'améliorer l'efficacité des processus de charge triboélectrique et de séparation électrostatique, un dispositif de charge à lit fluidisé triboélectrique multicylindre a été fabriqué dans le laboratoire de LSTE dans l'Université du Mascara, et a été étudié l'effet des parois sur la charge massique des granules et sur la séparation électrostatique.

Le but de ce chapitre est triple :

- Évaluer le chargement triboélectrique des granules de PVC et ABS par le dispositif de charge à lit fluidisé triboélectrique multicylindre.
- Étudier l'effet des parois de dispositif de charge à lit fluidisé sur la charge massique et sur la séparation électrostatique.
- Choisir la paroi la plus efficace pour le chargement triboélectrique des granules de PVC et ABS et pour la séparation électrostatique.

II.2. Mise en œuvre expérimentale

II.2.1. Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé

Le dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé pour matériaux isolants granulaires est illustré dans la Figure II-1. Il est constitué d'une chambre cylindrique interchangeable de 8 cm de diamètre et de 50 cm de longueur. Cinq cylindres, fabriqués à partir de différents matériaux (PVC, PET, PP, PEHD et aluminium), sont utilisés pour tester l'effet de la nature des parois sur le processus de chargement triboélectrique.

Les particules granulaires sont introduites par la partie supérieure de la chambre. L'air de fluidisation, nécessaire à la mise en suspension des particules, est fourni par une soufflante à débit variable (Figure II-2). Un diffuseur d'air, sous la forme d'une fine plaque perforée installée à la base de la chambre, permet une distribution uniforme de l'air tout en empêchant la chute des particules.

La partie supérieure de la chambre est munie d'un filtre, destiné à retenir les particules à l'intérieur du dispositif. Le brassage dynamique induit par le lit fluidisé favorise les collisions inter particulaires ainsi qu'entre les particules et les parois, entraînant l'acquisition de charges électriques de signes opposés par effet triboélectrique.



Figure II-1. Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé.



Figure II-2. Souffleur et aspirateur de poussière MS-C005I.

II.2.2. Dispositif de séparation électrostatique

Les expériences de séparation électrostatique sont effectuées à l'aide d'un séparateur électrostatique à chute libre (Figure II-3). Le mélange granulaire à séparer est d'abord chargée par le dispositif du chargement triboélectrique a lit fluidise. Ensuite, les particules chargées tombent librement dans le champ électrique généré entre les deux électrodes à plaque (longueur : 1000 mm largeur : 200 mm) du séparateur électrostatique à chute libre. Les particules positivement et négativement chargées sont respectivement attirées par les électrodes de polarités négative (-15 kV) et positive (+15kV).

La distance entre les bords supérieurs des électrodes est de 150 mm pour obtenir un champ électrique maximal dans cette zone d'entrée du séparateur. Les électrodes sont inclinées selon un angle de 15° par rapport à la verticale, pour empêcher les particules d'entrer en collision avec les plaques du séparateur à chute libre.

Les particules chargées négativement sont collectées dans les bacs situés à gauche, tandis que les particules chargées positivement sont recueillies dans les bacs placés à droite. Les particules faiblement ou insuffisamment chargées, ne réagissant pas de manière significative au champ électrique, s'accumulent quant à elles dans les bacs centraux.



Figure II-3. Séparateur à chute libre. 1 : Alimentation HT (-) ; 2 : Alimentation HT (+) ;
3 : Entonnoir ; 4 : Electrode positive (+) ; 5 : Electrode Négative (-) ; 6 :
Compartiment des particules chargées négativement ; 7 : Compartiment des
particules non chargées ; 8 : Compartiment des particules chargées positivement

II.2.3. Mesure de la température et de l'humidité relative

La température et l'humidité relative sont des facteurs très importants dans les processus de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique. En effet, ces deux phénomènes sont fortement influencés par les conditions ambiantes.

Ainsi, il est indispensable de mesurer et de contrôler l'humidité ainsi que la température avant de commencer toute expérience de chargement triboélectrique, afin de garantir la reproductibilité des résultats.

Pour ce faire, un thermomètre-hygromètre électronique numérique, modèle HTC-1, est utilisé, comme illustré à la Figure II-4.



Figure II-4. Thermo hygromètre numérique HTC-1.

II.2.4. Mesure de la charge électrique

La cage de Faraday (Figure II-5) est utilisée pour mesurer la charge électrique des granules chargés ainsi que pour déterminer leur polarité, à l'aide d'un électromètre numérique.

Elle est constituée de deux enceintes conductrices concentriques, séparées par un matériau isolant. L'enceinte extérieure est reliée à la terre afin d'éliminer les interférences électromagnétiques et d'évacuer les charges parasites. L'enceinte intérieure, dans laquelle les

particules sont introduites, est isolée électriquement et reliée à un électromètre permettant la détection et la mesure de la charge accumulée.

L'appareil utilisé dans le cadre de ces expériences est un électromètre numérique de précision, modèle NanoCoulomb Meter 284 de la marque MONROE ELECTRIC (Figure II-6).

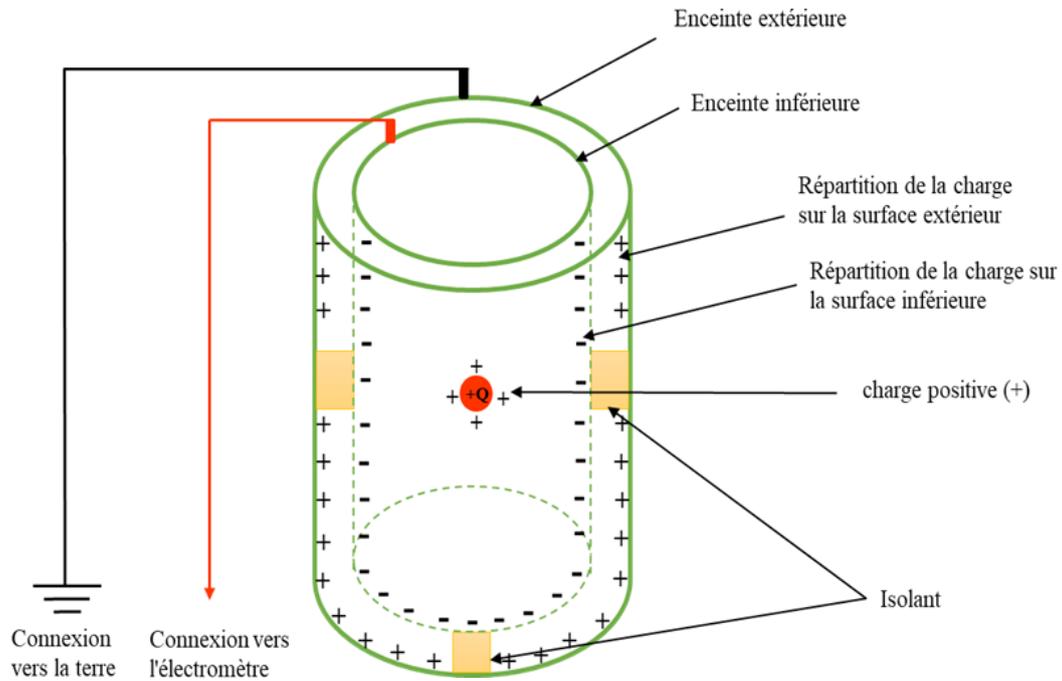


Figure II-5. Représentation schématique de la cage de Faraday.



Figure II-6. NanoCoulomb METER, modèle 284.



Figure II-7. Configuration de la cage de Faraday et du NanoColumb Meter.

II.2.5. Mesure de masse granulaire

Il est nécessaire de mesurer les masses granulaires de chaque échantillon avant et après chaque expérience pour calculer la récupération et la pureté. Nous avons utilisé une balance électronique ELECTRONIC SCALE (Figure II-8) d'une résolution de 0.01g et portée 1000g.

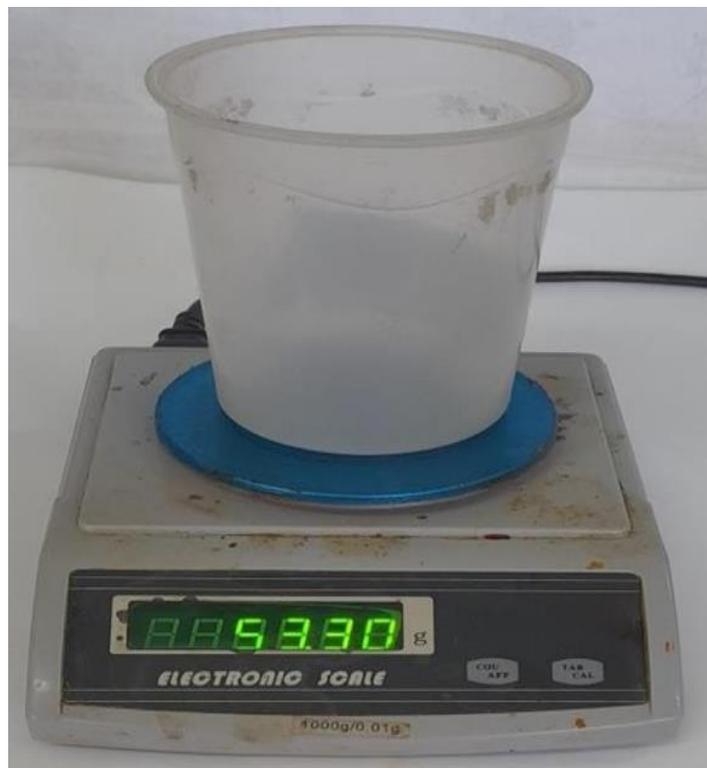


Figure II-8. Balance électronique.

II.3. Chargement des matériaux granulaires

II.3.1. Description des matériaux

Les matériaux granulaires étudiés dans ce chapitre sont le polychlorure de vinyle (PVC) et l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), issus du traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Le Tableau II.1 présente les principales caractéristiques physiques des granules de PVC et d'ABS.

Des essais ont été réalisés sur des échantillons de 60 g, constitués à parts égales de particules d'ABS et de PVC (50 % – 50 % en masse). Les granulés utilisés ont des tailles comprises entre 2,36 mm et 3,35 mm, comme illustré à la Figure II-9.

a) Polychlorure de vinyle (PVC)

Le PVC est un thermoplastique qui aujourd'hui est la matière plastique qui couvre le domaine d'application le plus vaste, de l'automobile aux emballages, des tuyaux pour le bâtiment à l'industrie du vêtement, il se présente sous des formes très différentes. La raison majeure de cette universalité d'usage du PVC réside dans les performances de ses propriétés physicochimiques, et donc son aptitude à répondre à des exigences très diverses.

b) Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)

L'ABS est l'un des plastiques les plus utilisés dans l'industrie, appartenant à la famille des thermoplastiques ou plastiques thermiques. Grâce à une base d'élastomères dérivée du polybutadiène, il présente une plus grande souplesse et une excellente résistance aux chocs.

L'ABS est constitué de trois principaux monomères :

Acrylonitrile : qui lui confère une résistance chimique et thermique.

Butadiène : qui améliore sa résistance aux chocs.

Styrène : qui apporte rigidité et un fini lisse.

L'ABS est largement utilisé dans la fabrication de nombreux produits tels que les boîtiers d'appareils électroniques, les jouets (comme les briques LEGO), les pièces automobiles et est également un matériau courant dans l'impression 3D.

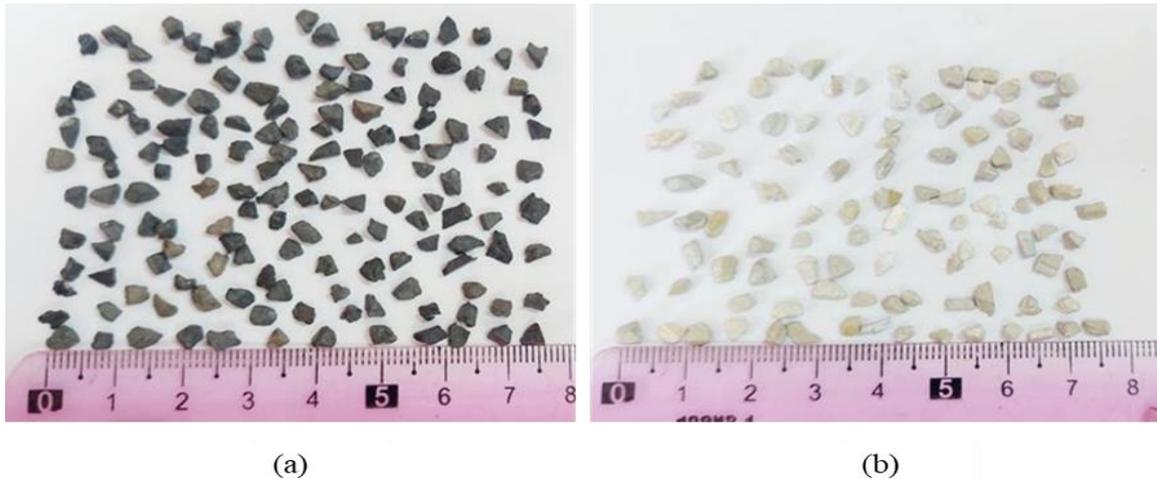


Figure II-9. Matériaux granulaires utilisés : Polychlorure de vinyle PVC (a), Acrylonitrile butadiène styrène ABS (b).

Tableau II-1. Propriétés physiques de polychlorure de vinyle PVC et d'Acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS).

Propriétés	PVC (Polychlorure de vinyle)	ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrene)
Densité	1,30 - 1,45 g/cm ³	1,04 - 1,07 g/cm ³
Température de fusion	100 - 260 °C (selon formulation)	220 - 260 °C
Module d'élasticité	2000 - 4000 MPa	1500 - 2400 MPa
Allongement à la rupture	20 - 40 %	10 - 50 %
Résistance à la traction	40 - 60 MPa	40 - 48 MPa
Résistance aux chocs (Izod, 23°C)	3 - 5 kJ/m ²	15 - 40 kJ/m ²
Rigidité	Très rigide	Moins rigide que le PVC
Absorption d'eau	Faible (0,04 - 0,4 %)	Modérée (0,2 - 1,2 %)
Stabilité thermique	Dégradé au-delà de 140 °C	Stable jusqu'à 90 - 100 °C
Résistance chimique	Bonne résistance aux acides, bases et produits chimiques	Bonne résistance chimique, mais moins que le PVC
Transparence	Peut être transparent ou opaque	Opaque

II.4. Procédure expérimentale

Dans ce chapitre, nous avons étudié les facteurs influençant la charge électrique des granules plastiques, ainsi que ceux affectant la séparation électrostatique de ces mêmes granules.

Les conditions ambiantes étaient stables dans cette étude : humidité relative (HR) comprise entre 51 % et 55 %, et température variant de 16 °C à 16,8 °C. Cette procédure de chargement a été réalisée dans des conditions constantes : un temps de 3 min a été pris, et le débit d'air de 6 m/s a été déterminé à base des essais préliminaires.

Premièrement, nous avons étudié la position des particules de PVC et d'ABS dans la série triboélectrique, en utilisant 30 g de PVC et 30 g d'ABS, dont les tailles se situaient entre 2,36 mm et 3,35 mm. Ensuite, nous avons introduit individuellement chaque type de granulés plastiques dans le système de chargement électrique, représenté par un dispositif à lit fluidisé multi-cylindres, pendant 3 min, permettant aux particules d'entrer en contact avec les parois du dispositif et entre elles.

Deuxièmement, nous avons préparé des échantillons d'une masse totale de 60 g (50 % PVC et 50 % ABS), soit 30 g de chaque type de granulés plastiques, avec des tailles compris entre 2,36 mm et 3,35 mm. Le mélange de granulés plastiques a ensuite été introduit dans le système de chargement électrique, représenté par un dispositif à lit fluidisé multi-cylindres, pendant 3 min. Durant ce temps, les particules entrent en contact avec les parois du PVC ainsi qu'entre les granulés d'ABS et d'ABS, PVC et PVC, et entre le PVC et l'ABS. Après cela, le mélange a été séparé dans un séparateur à chute libre, où la différence de potentiel entre les deux électrodes était de 30 kV pour toutes les expériences de cette étude. Les particules chargées négativement ont été collectées dans un bac proche de l'électrode positive, tandis que les particules chargées positivement ont été collectées dans un bac proche de l'électrode négative. À l'aide d'une cage de Faraday et d'un électromètre numérique, nous avons mesuré la charge électrique acquise par toutes les particules collectées. De plus, une balance électronique nous a permis de déterminer la masse des granulés collectés. Grâce aux valeurs obtenues, nous avons pu calculer la charge massique, la récupération et la pureté.

Après chaque opération, nous avons remplacé les parois du dispositif à lit fluidisé par celles en PEHD, PP, PET et AL, puis répété l'expérience.

Troisièmement, après avoir identifié la paroi la plus efficace pour le chargement électrique des granulés plastiques de PVC et d'ABS, nous avons étudié l'effet du temps de chargement sur la charge électrique des granulés plastiques à 1 min, 3 min, 5 min, 7 min et 9 min. Nous avons maintenu les mêmes conditions ambiantes, ainsi que la masse, la taille des granulés plastiques et le débit d'air constants dans toutes les expériences de cette étude.

Une fois le temps de chargement optimal déterminé, nous avons étudié l'effet de la tension appliquée sur la séparation électrostatique, en testant différentes valeurs : 30 kV, 25 kV, 20 kV, 15 kV, 10 kV et 5 kV.

II.5. Résultats et discussion

II.5.1. Effet des parois du dispositif de chargement électrique sur la charge massique du PVC et de l'ABS

a) *Effet des parois sur le chargement triboélectrique individuel des particules*

Après avoir effectué le chargement individuel des granulés plastiques de PVC et d'ABS à l'aide des différentes parois du dispositif de chargement, les résultats obtenus sont présentés dans la Figure II-10.

La Figure II-10 présente la charge massique acquise par les granulés plastiques de PVC et d'ABS en fonction des différentes parois du dispositif de chargement.

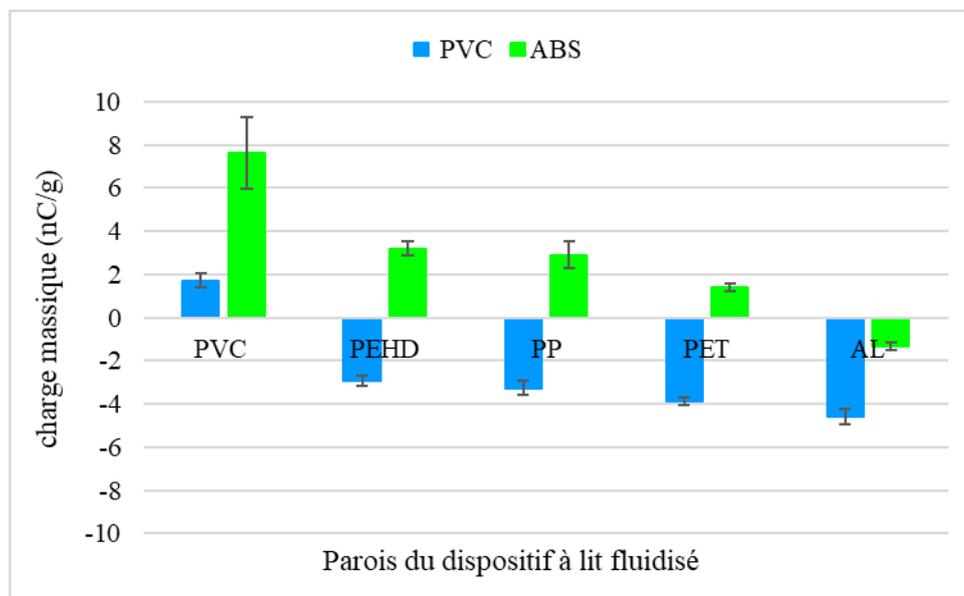


Figure II-10. Diagramme représentant l'influence des différentes parois sur la charge massique du PVC et de l'ABS.

Les résultats des expériences de chargement électrique présentés dans le Tableau II-2 montrent que les particules de PVC acquièrent une charge massique négative de $-4,58$ nC/g au contact de l'aluminium (AL) et de $-2,95$ nC/g au contact du PEHD. Elles acquièrent en revanche une charge positive de $1,72$ nC/g au contact du PVC. Quant aux particules d'ABS, elles acquièrent une charge électrique positive de $7,61$ nC/g au contact du PVC et de $1,38$ nC/g au contact du PET, et une charge électrique négative de $-1,34$ nC/g au contact de l'aluminium (AL).

Tableau II-2. Influence des parois sur la charge massique du PVC et de l'ABS.

Les parois du dispositif	PVC	PEHD	PP	PET	AL
Charge massique de PVC (nC/g)	1,72	-2,95	-3,26	-3,89	-4,58
Charge massique de ABS (nC/g)	7,61	3,2	2,9	1,38	-1,34

Cela peut s'expliquer par le fait que les particules de PVC acquièrent davantage d'électrons au contact de l'aluminium (AL), en acquièrent moins au contact du PEHD et perdent des électrons au contact du PVC. Quant aux particules d'ABS, elles perdent beaucoup d'électrons au contact du PVC, en perdent moins au contact du PET, et acquièrent des électrons au contact de l'aluminium (AL).

On en déduit que la série triboélectrique obtenue au laboratoire LSTE de l'Université Mustapha Stambouli de Mascara est la suivante :

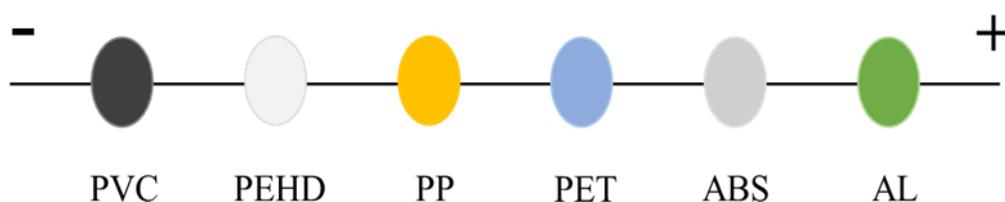


Figure II-11. Série du Tribo-électrique.

b) Effet des parois sur le chargement triboélectrique du mélange PVC/ABS

Les résultats présentés dans la Figure II-12 montrent la charge massique acquise par les granulés plastiques de PVC et d'ABS avec les différentes parois du dispositif de chargement. Le niveau de charge massique acquis par les particules de PVC et d'ABS dépend du type de paroi utilisé dans le dispositif de chargement à lit fluidisé.

Des charges massiques presque homogènes ont été obtenues pour chaque type de particule de PVC et d'ABS, avec de meilleurs résultats lors de l'utilisation de la paroi en PP dans le dispositif de chargement à lit fluidisé. En revanche, avec les autres types de parois, aucune charge massique homogène n'a été obtenue pour le PVC et l'ABS.

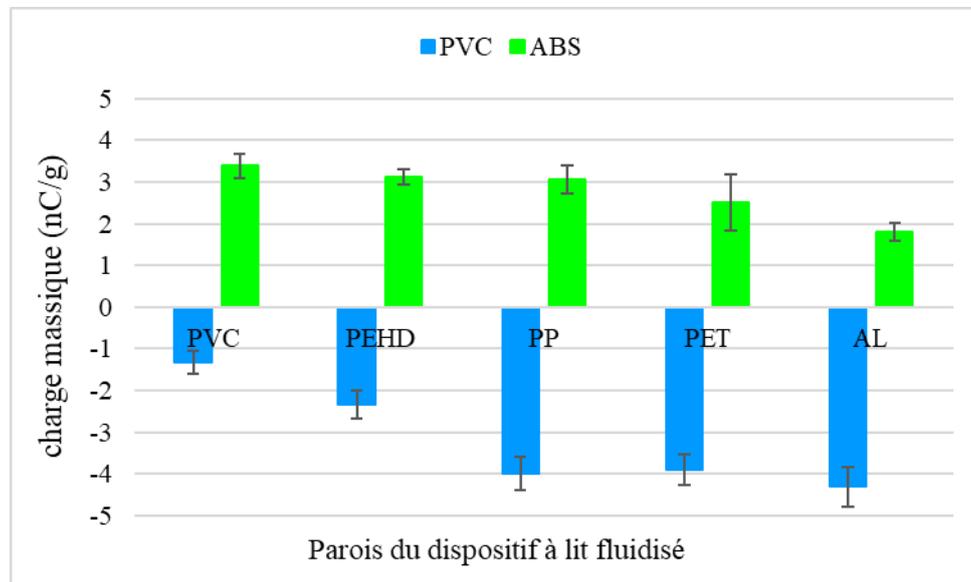


Figure II -12. Diagramme représentant l'influence des différentes parois sur la charge massique du PVC et de l'ABS.

D'après les résultats présentés dans le Tableau II-3, une charge massique de $-3,99$ nC/g pour le PVC et de $3,06$ nC/g pour l'ABS a été obtenue en utilisant la paroi en PP. Lors de l'utilisation de la paroi en PVC, qui se situe à l'extrémité négative de la série triboélectrique, une charge massique de $-1,33$ nC/g pour le PVC et de $3,39$ nC/g pour l'ABS a été obtenue. Avec la paroi en aluminium (AL), située à l'extrémité positive de la série triboélectrique, les charges massiques obtenues sont de $-4,3$ nC/g pour le PVC et de $1,81$ nC/g pour l'ABS.

Ces résultats peuvent s'expliquer par les caractéristiques physiques des matériaux plastiques ainsi que par leur position respective dans la série triboélectrique.

De bons résultats sont obtenus avec la paroi en PP, car le matériau PP se situe entre le PVC et l'ABS dans la série triboélectrique, favorisant ainsi un meilleur équilibre de chargement.

Tableau II-3. Influence des parois sur la charge massique du PVC et de l'ABS.

Les parois du dispositif	PVC	PEHD	PP	PET	AL
Charge massique de PVC (nC/g)	-1,33	-2,33	-3,99	-3,91	-4,3
Charge massique de ABS (nC/g)	3,39	3,11	3,06	2,5	1,81

II.5.2. Effet des parois du dispositif de chargement électrique sur la séparation électrostatique

Les résultats de séparation électrostatique présentés dans les Figures II-13 et II-14 montrent la récupération et la pureté des particules de PVC et d'ABS après le chargement électrique réalisé à l'aide du dispositif à lit fluidisé multi-cylindres, utilisant des parois en PVC, PEHD, PP, PET et AL. D'après les résultats présentés dans les Tableaux II-4 et II-3, une différence est observée entre les taux de récupération et de pureté selon le type de paroi. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec la paroi en PP : 82,78 % de PVC et 75,31 % d'ABS ont été récupérés, avec une pureté de 93,67 % pour le PVC et de 96,14 % pour l'ABS.

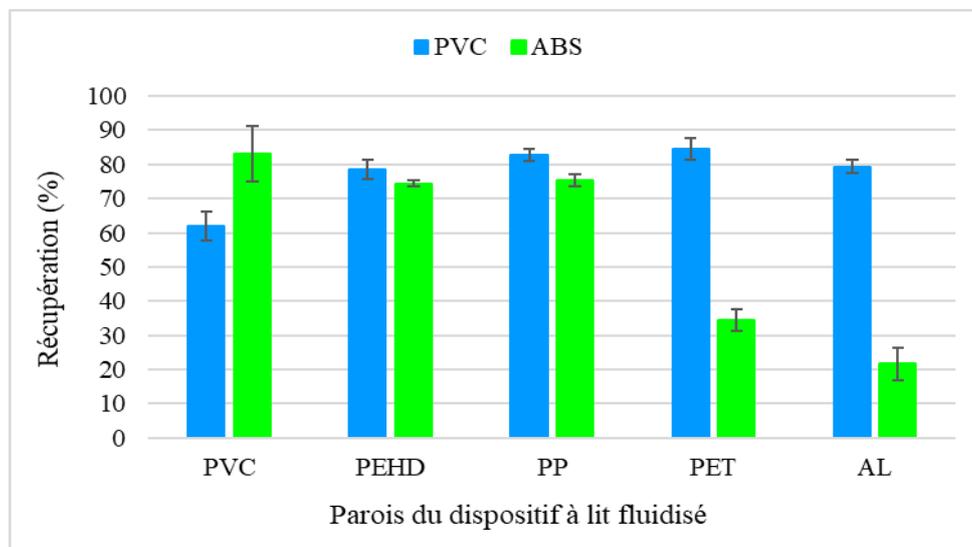


Figure II-13. Diagramme représentant la récupération du PVC et de l'ABS en fonction de l'effet des parois.

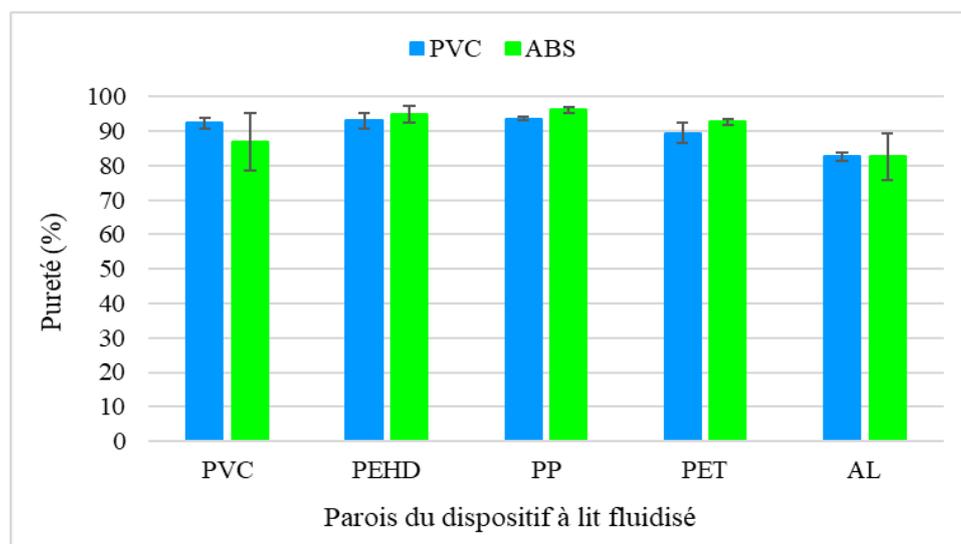


Figure II-14. Diagramme représentant la pureté du PVC et de l'ABS en fonction de l'effet des parois.

Lors de l'utilisation de la paroi en PVC, située à l'extrémité négative de la série triboélectrique, qui est l'un des matériaux attirant le plus d'électrons, 61,94 % du PVC et 83,21 % de l'ABS ont été récupérés, avec une pureté de 92,34 % pour le PVC et de 86,93 % pour l'ABS. En revanche, avec la paroi en aluminium (AL), située à l'extrémité positive de la série triboélectrique, attirant moins d'électrons, 79,28 % du PVC et 21,7 % de l'ABS ont été récupérés, avec une pureté de 82,63 % pour le PVC et de 82,22 % pour l'ABS.

Cela peut s'expliquer par l'importance de la charge électrique acquise par les particules de PVC et d'ABS lors du chargement, ce qui influence directement les résultats de séparation électrostatique.

Tableau II-4. Récupération du PVC et de l'ABS en fonction de l'effet des parois.

Les parois	PVC	PEHD	PP	PET	AL
Récupération de PVC (%)	61,94	78,47	82,78	84,57	79,28
Récupération de ABS (%)	83,21	74,41	75,31	34,42	21,7

Tableau II-5. Pureté du PVC et de l'ABS en fonction de l'effet des parois.

Les parois	PVC	PEHD	PP	PET	AL
Pureté de PVC (%)	92,34	93,08	93,67	89,5	82,63
Pureté de ABS (%)	86,93	95,05	96,14	92,65	82,22

II.5.3. Effet du temps de chargement sur la charge électrique des granulés

Le temps de chargement est un facteur très important pour le chargement électrique des granulés plastiques de PVC et d'ABS. Après avoir obtenu les meilleurs résultats avec la paroi en PP, cette paroi a été maintenue, et l'effet du temps de chargement sur la charge électrique des granulés plastiques a été étudié pour des durées de 1 min, 3 min, 5 min, 7 min et 9 min. Les résultats présentés dans la Figure II-15 et le Tableau II-6 montrent que les granulés plastiques de PVC et d'ABS acquièrent une charge massique importante de -3,99 nC/g pour le PVC et de 3,06 nC/g pour l'ABS lorsque le temps de chargement est de 3 min.

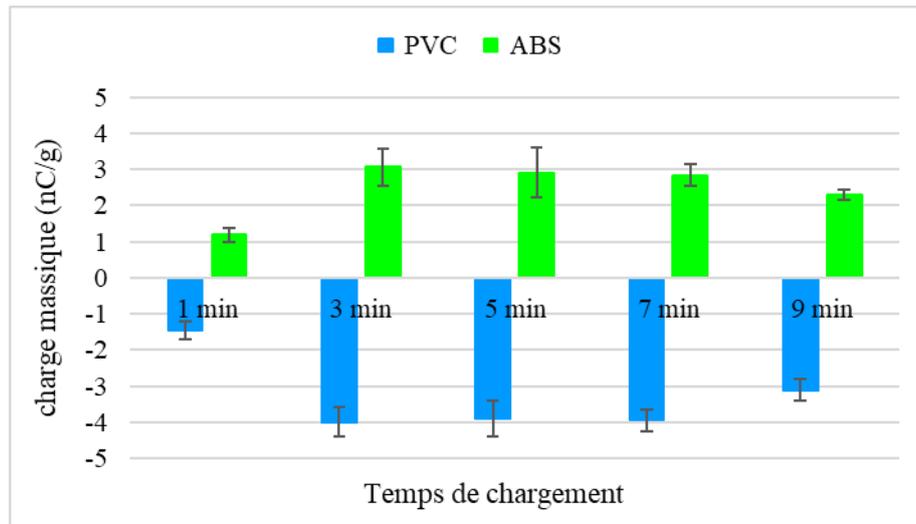


Figure II-15. Diagramme représentant la charge massique du PVC et de l'ABS en fonction de l'effet du temps de chargement.

Nous avons observé qu'à mesure que le temps de chargement électrique augmentait, passant de 1 min à 3 min, la charge massique des granulés plastiques augmentait également. Cependant, à partir de la 3^e min jusqu'à la 7^e min, nous avons constaté une saturation de la charge massique acquise par les granulés de PVC et d'ABS. Après la 7^e min, la charge massique des granulés a commencé à diminuer.

Tableau II-6. Charge massique du PVC et de l'ABS en fonction de l'effet de temps.

Le temps	1 min	3 min	5 min	7 min	9 min
Charge massique de PVC (nC/g)	-1,47	-3,99	-3,9	-3,95	-3,11
Charge massique de ABS (nC/g)	1,19	3,06	2,91	2,84	2,3

II.5.4. Effet de la tension appliquée sur la séparation électrostatique

Dans la série d'expériences réalisée avec les particules de PVC et de l'ABS, la tension appliquée varie de 5 kV à 30 kV.

Les résultats de séparation électrostatique, présentés dans les Figures II-16 et II-17, montrent la récupération et la pureté des particules de PVC et d'ABS lors de l'application de différentes tensions.

Les meilleurs résultats ont été obtenus avec une tension de 30 kV, où l'augmentation de la tension appliquée entraîne une hausse du taux de récupération et de la pureté.

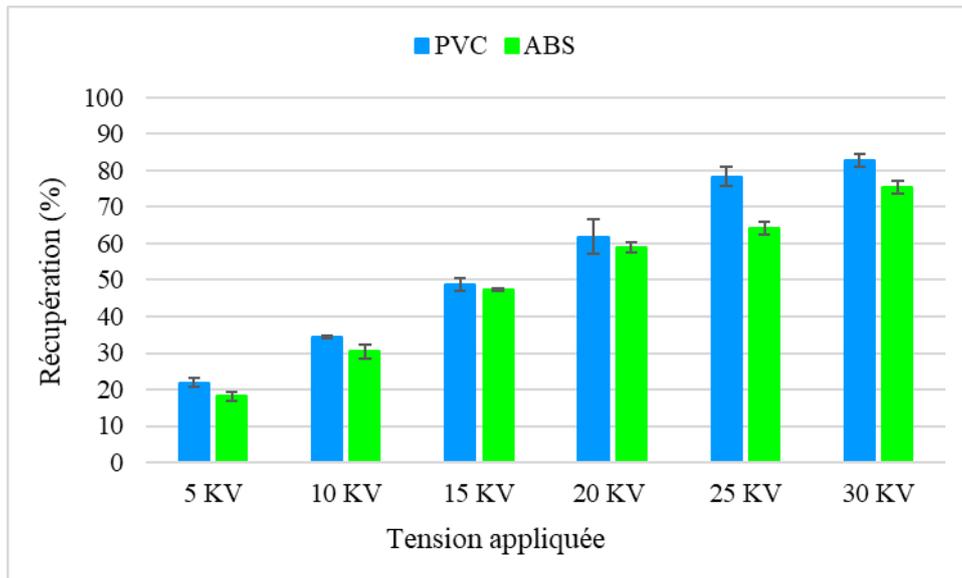


Figure I-16. Diagramme représentant la récupération du PVC et de l'ABS en fonction de l'effet de la tension appliquée.

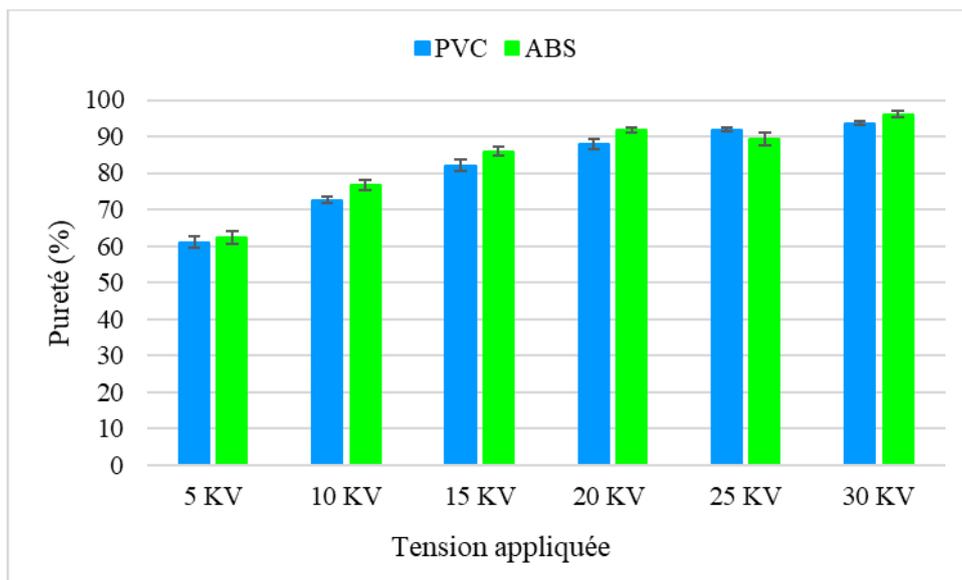


Figure II-17. Diagramme représentant la pureté du PVC et de l'ABS en fonction de l'effet de la tension appliquée.

D'après les résultats présentés dans les Tableaux II-7 et II-8, lorsqu'une tension de 30 kV est appliquée, 82,78 % du PVC et 75,31 % de l'ABS sont récupérés, avec des puretés respectives de 93,67 % et 96,14 %. En revanche, lorsque la tension appliquée est réduite à 5 kV, la récupération du PVC et de l'ABS est de 21,9 % et 18,15 %, avec des puretés de 61,01 % et 62,39 %, respectivement. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la tension appliquée entre les électrodes du séparateur à chute libre influence directement le champ électrique E , et

nous savons que la force électrique exercée sur une particule dans un champ électrique est donnée par la relation $F = q.E$, où q est la charge de la particule.

Ainsi, toute variation de la tension entraîne une variation de la force électrique, qui est responsable de la séparation des particules de PVC et d'ABS.

Tableau II-7. Récupération du PVC et de l'ABS en fonction de l'effet de la tension appliquée.

Tension	5 KV	10 KV	15KV	20 KV	25 KV	30 KV
Récupération de PVC (%)	21,9	34,32	48,92	61,87	78,31	82,78
Récupération de ABS (%)	18,15	30,45	47,42	58,96	64,28	75,31

Tableau II-8. Pureté du PVC et de l'ABS en fonction de l'effet la tension appliquée.

Tension	5 KV	10 KV	15KV	20 KV	25 KV	30 KV
Pureté de PVC (%)	61,01	72,59	82,02	88,03	91,88	93,67
Pureté de ABS (%)	62,39	76,61	85,92	91,77	89,4	96,14

II.6. Conclusion

Le dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé multi-cylindres s'est avéré particulièrement efficace pour le traitement des matériaux plastiques granulaires de taille millimétrique. Les expériences ont démontré que la charge électrique acquise par les granulés de PVC et d'ABS est directement liée à l'échange d'énergie lors des collisions avec les parois du dispositif de chargement et entre les particules elles-mêmes. Il a également été prouvé que le choix du matériau des parois du dispositif et la durée du chargement sont des facteurs clés pour obtenir les meilleurs résultats.

Les meilleures performances de chargement triboélectrique des granulés plastiques de PVC et d'ABS ont été obtenues en utilisant des parois en polypropylène (PP) avec un temps de chargement de 3 minutes. De plus, les meilleurs résultats en termes de séparation électrique, de récupération et de pureté ont également été obtenus en utilisant des parois en PP et une tension appliquée de 30 kV.



Ibn Rushd (Averroès)

(1126-1196)

"Ignorance leads to fear, fear leads to hatred, hatred leads to violence; this is the equation."

Chapitre III

Séparation électrostatique des flocons de polymère

III.1. Introduction

Ce chapitre présente une étude expérimentale de la séparation tribo-électrostatique de flocons de polyéthylène (PE) et de polypropylène (PP) provenant du traitement des déchets d'emballages chez GRANUPLAST, Jassans-Riottier, France.

L'objectif du travail actuel est de créer une configuration modifiée du séparateur à chute libre pour éviter l'effet de collision des particules avec les électrodes et pour obtenir de meilleurs résultats de séparation électrostatique de mélanges granulaires plastiques. Le séparateur modifié devrait également être capable de séparer les flocons de plastique avec une grande efficacité. Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'Institut PPRIME de Poitiers à l'IUT d'Angoulême et laboratoire LSTE de l'université de Mascara. Les résultats sont comparés à ceux obtenus par le séparateur standard. La modélisation des trajectoires des particules a également été utilisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics pour expliquer l'efficacité de la nouvelle configuration du séparateur par rapport à la configuration standard.

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du programme France 2030 « Investissements d'Avenir » (LABEX INTERACTIFS, référence ANR-11-LABX-0017-01). Une partie de ces travaux a été financée par l'Union Européenne dans le cadre du FEDER – ELECTRINOV.

III.2. Matériels et méthodes

III.2.1. Description des matériaux

Les matériaux plastiques étudiés dans ce chapitre sont de flocons de polyéthylène (PE) et de polypropylène (PP), issus du traitement des déchets d'emballages de la Société GRANUPLAST, Jassans-Riottier, France (Figure III-1). Le mélange de plastiques à traiter était composé de 2/3 de flocons de PE et 1/3 de PP (taille typique 4 mm à 10 mm).

a) Polypropylène (PP)

Le polypropylène ou PP est un polymère thermoplastique qui fait partie de la famille des polyoléfinés et est fabriqué à partir de la polymérisation du propylène., au même titre que le polyéthylène. Il est largement utilisé dans divers domaines industriels et connu pour sa légèreté, sa résistance à la corrosion, sa tenue et sa résistance à de nombreuses substances chimiques, ce qui en fait un matériau polyvalent utilisé dans la fabrication de films, de fibres, de contenants, de composants automobiles et très utilisé dans le domaine des emballages et dans de nombreux autres.

b) Polyéthylène (PE)

Le polyéthylène (PE) est un polymère thermoplastique largement utilisé dans l'industrie. Il est produit par la polymérisation de l'éthylène, un monomère dérivé du pétrole brut ou du gaz naturel. Le polyéthylène se caractérise par sa légèreté, sa résistance à l'humidité, sa flexibilité et sa résistance aux produits chimiques. Il existe plusieurs types de polyéthylène, notamment le polyéthylène basse densité (PEBD), le polyéthylène haute densité (PEHD) et le polyéthylène linéaire basse densité (PELBD), chacun ayant des propriétés spécifiques adaptées à différentes applications industrielles et commerciales, telles que les emballages, les tuyaux, les films, et les conteneurs.

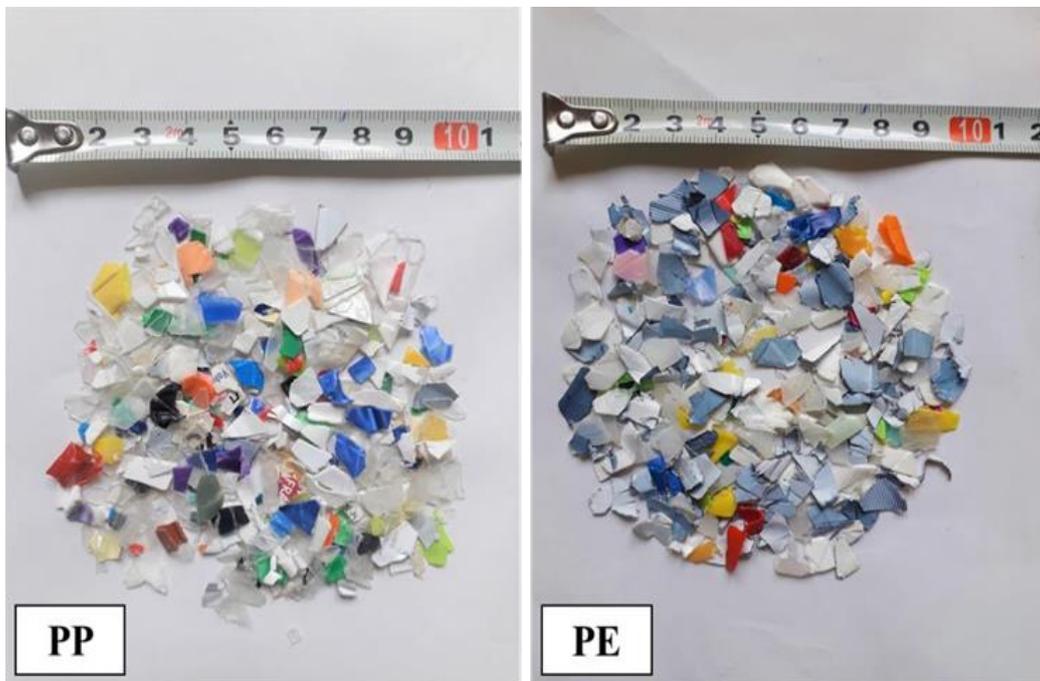


Figure III-1. Aspect des flocons de PP et PE utilisés dans les tests de séparation.

Tableau III-1. Propriétés physiques des flocons de (PE) et de (PP)

Propriétés	PE (Polyéthylène)	PP (Polypropylène)
Densité	0,91 - 0,96 g/cm ³	0,90 - 0,91 g/cm ³
Température de fusion	105 - 135 °C	160 - 170 °C
Module d'élasticité	200 - 1000 MPa (selon le type)	1300 - 1800 MPa
Allongement à la rupture	90 - 900 % (selon le type)	200 - 600 %
Résistance à la traction	10 - 40 MPa	30 - 40 MPa
Résistance aux chocs (Izod, 23°C)	100 - 150 J/m	20 - 30 J/m
Rigidité	Moins rigide (surtout LDPE)	Plus rigide que PE
Absorption d'eau	Très faible (< 0,01 %)	Très faible (< 0,02 %)
Stabilité thermique	Stable jusqu'à 80 °C (LDPE) à 110 °C (HDPE)	Stable jusqu'à 100 °C
Résistance chimique	Très bonne, notamment aux acides et bases	Bonne, surtout contre les acides
Transparence	Variable : opaque (HDPE), translucide (LDPE)	Semi-transparent à opaque

III.2.2. Séparateur électrostatique

Des représentations schématiques des configurations standard et modifiées du séparateur triboélectrique à chute libre sont présentées dans la Figure III-2. Les électrodes de type plaque séparatrice (500 mm × 1300 mm) sont connectées à deux alimentations différentes à haute tension (HT) variable (positive et polarité négative ± 45 kV max). Dans le cas de la configuration modifiée du séparateur, la distance entre les plaques était de 150 mm en haut tandis que la distance finale en bas est de 380 mm. Pour éviter les collisions des particules avec les plaques, des expériences préliminaires ont été réalisées et un angle d'inclinaison de 10 degrés par rapport à la verticale a été adopté pour l'électrode négative, tandis que l'électrode positive restait verticale et l'entonnoir placé à côté de l'électrode vertical. Les produits séparés ont été récupérés dans un collecteur composé de deux boîtes, respectivement pour les particules chargées positivement et négativement.

Pour le séparateur standard non modifié, la distance entre les électrodes en haut est de 150 mm, tandis que la distance finale en bas est de 650 mm. Un angle d'inclinaison de 10 degrés est adopté pour les deux électrodes du séparateur standard non modifié. Le produit séparé est collecté dans un collecteur à trois bacs. Les flocons chargés négativement sont collectés dans les boîtes à côté de l'électrode positive, et les flocons chargés positivement sont collectés dans les boîtes à côté de l'électrode négative. Les flocons insuffisamment chargés s'accumulent dans les caissons centraux.

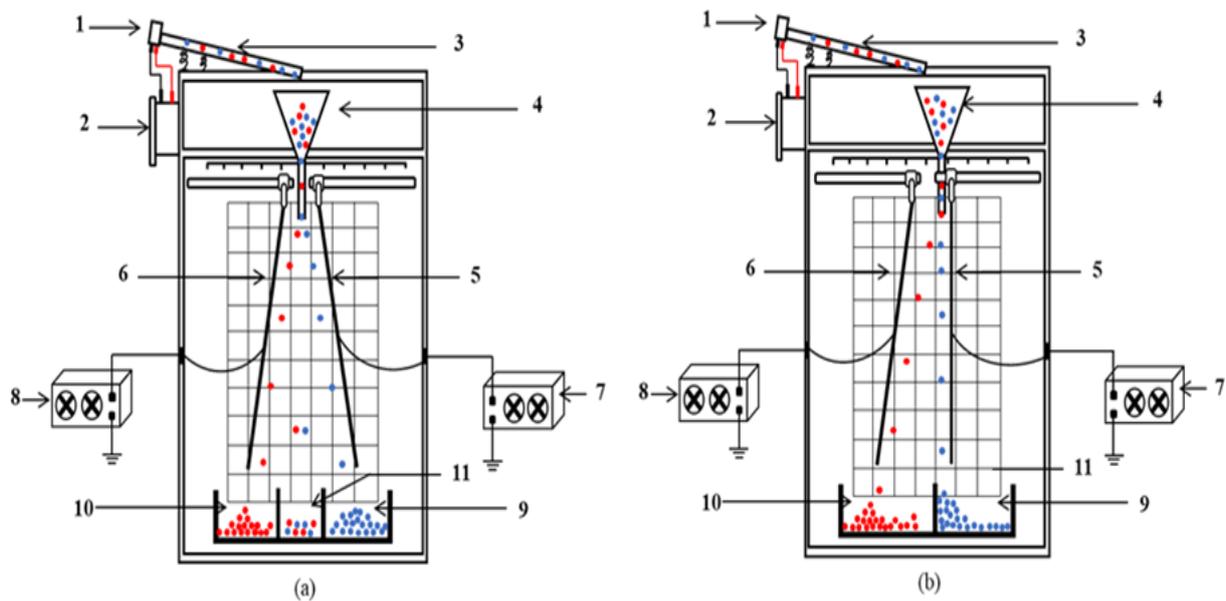


Figure III-2. Représentation schématique de (a) le séparateur à chute libre standard et (b) le séparateur à chute libre modifié. 1 - Dispositif vibrant électromagnétique ; 2 - Alimentation électrique ; 3 - Alimentation vibrant ; 4 - Entonnoir ; 5 - Électrode positive 6 - Électrode négative ; 7 - Alimentation HT positive ; 8 - Alimentation HT négative ; 9 - Bac de collecte pour les particules chargées négativement ; 10 - Bac de collecte pour les particules chargées positivement ; 11 - Bac de collecte pour un produit intermédiaire (particules faiblement chargées).

III.2.3. Dispositif du chargement triboélectrique

Le dispositif à lit fluidisé, représenté sur la Figure III-3 a été conçu par l'équipe de l'électrostatique appliquée à l'Institut Pprime, Univ de Poitiers-France-, est en PMMA, aux dimensions (180 mm × 180 mm × 300 mm).



Figure III-3. Dispositif de chargement électrique à lit fluidisé.

III.2.4. Diviseur d'échantillons Retsch Riffelteiler type 6.5

Après la séparation de flocons de polyéthylène (PE) et de polypropylène (PP), ont été passés le contenu de chaque boîte plusieurs fois dans un diviseur d'échantillons (Retsch Riffelteiler type 6.5), jusqu'à obtenir une fraction représentative d'une dizaine de flocons pour faciliter l'analyse de flocons de polyéthylène (PE) et de polypropylène (PP) par le spectromètre infrarouge.

Le Retsch Riffelteiler type 6.5 est un appareil utilisé dans les laboratoires pour la division et la réduction homogène de l'échantillon en portions plus petites. Ce type d'appareil est essentiel pour garantir que des échantillons représentatifs et équivalents soient utilisés pour des analyses ultérieures.



Figure III-4. Diviseur d'échantillons Retsch Riffelteiler type 6.5.

III.2.5. Dispositif d'analyse IRAffinity-1S

Les flocons de polyéthylène (PE) et de polypropylène (PP) étant multicolores, il est nécessaire d'analyser les résultats de la séparation électrostatique des flocons de PE et de PP par spectromètre infrarouge IRAffinity-1S pour connaître le type de polymères et pour calculer la pureté.

IRAffinity-1S est un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) produit par Shimadzu, une entreprise de renommée mondiale dans le domaine des instruments analytiques et des équipements de mesure. Ce type d'instrument est utilisé pour analyser la composition chimique et les propriétés des matériaux en mesurant leur absorption de la lumière infrarouge. Permettant l'analyse de divers matériaux, allant des polymères aux produits pharmaceutiques et chimiques. Grâce à celui-ci, il est plus facile d'effectuer le traitement et l'analyse des données.



Figure III-5. Dispositif d'analyse IRAffinity-1S.

III.2.6. Électromètre numérique Keithley

Un électromètre numérique de marque Keithley, modèle 6514, ont été utilisés durant tous les expériences, Pour déterminer la charge électrique de flocons de polyéthylène (PE) et de polypropylène (PP). Cet appareil est largement utilisé dans les laboratoires de recherche, les industries électroniques et d'autres applications nécessitant des mesures très sensibles.

séparateur standard illustré à la Figure III-2 (a). En outre, l'effet de la tension de l'électrode du séparateur sur la séparation électrostatique dans la nouvelle configuration du séparateur à chute libre a été étudié.

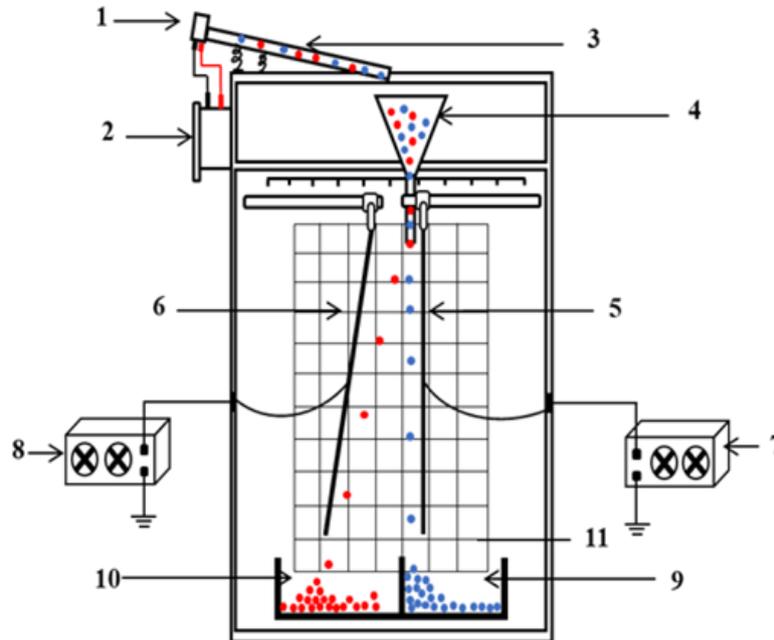


Figure III-7. Représentation schématique du séparateur à chute libre modifié.

III.3.1. Analyse des paillettes par spectrométrie IR (IRAffinity 1S Shimadzu)

L'analyse des paillettes de polyéthylène (PE) et de polypropylène (PP) par spectrométrie infrarouge (IR), en utilisant un appareil comme l'IRAffinity 1S de Shimadzu, suit généralement les étapes suivantes et permet d'identifier des composés chimiques en fonction des bandes d'absorption IR.

Étapes typiques de l'analyse par spectrométrie IR :

Préparation des échantillons :

Les paillettes de PE et PP placées directement sur l'appareil. Mise en place de l'échantillon :

L'échantillon est placé sur le support de mesure du spectromètre IR. Dans le cas de l'IRAffinity 1S, une cellule de transmission ou un ATR (Attenuated Total Reflectance) est souvent utilisé pour simplifier la mesure des échantillons solides.

Acquisition du spectre :

L'appareil projette de la lumière infrarouge à travers l'échantillon et enregistre l'absorption à différentes longueurs d'onde. Le spectre IR est produit sous forme de graphique représentant l'absorbance (ou transmittance) en fonction de la longueur d'onde (ou du nombre d'ondes, généralement en cm^{-1}).

Interprétation du spectre :

Le spectre IR de l'échantillon de PE et PP sera comparé aux spectres de référence pour identifier les bandes caractéristiques du polyéthylène et de polypropylène.

Dans les Figures III-8 et 9, les spectres IR des flocons de PE et PP sont représentés.

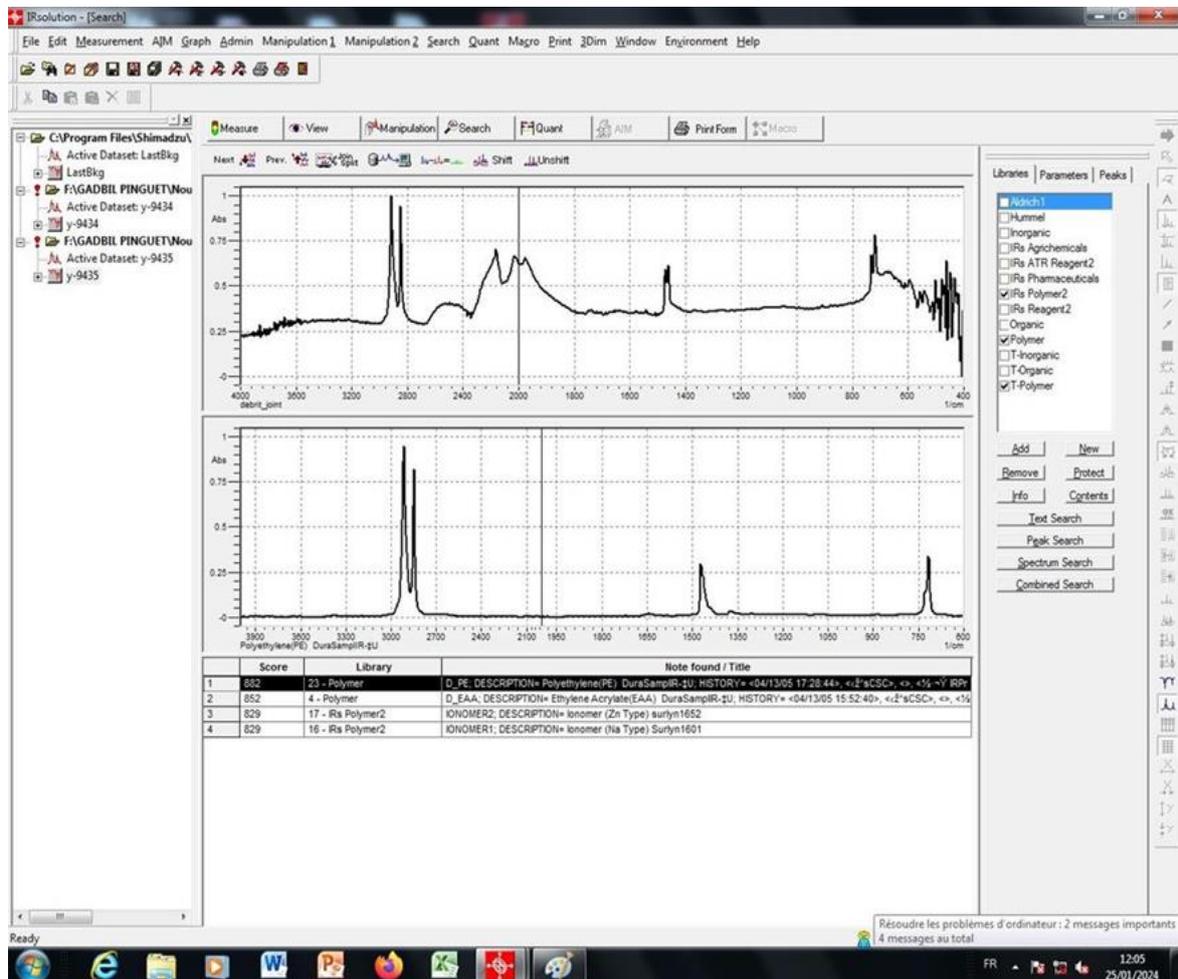


Figure III-8. Spectre IR d'une paillette de PE.

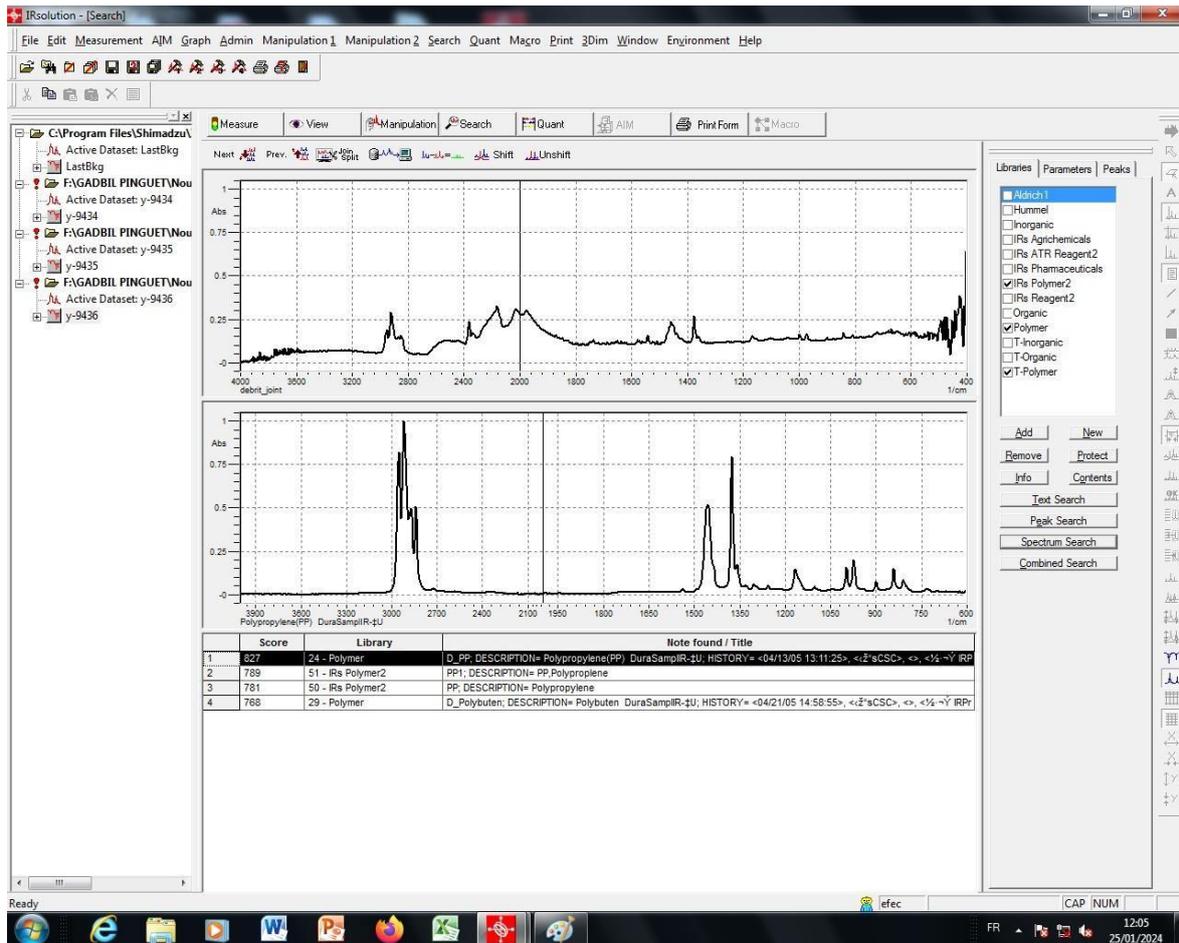


Figure III-9. Spectre IR d’une paillette de PP.

La pureté d'un produit a été calculée comme suit :

$$Pur(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \times 100 \tag{III. 1}$$

Où m_{ic} est la quantité de produit i qui est collectée dans le compartiment qui lui est réservé et m_{tc} est la masse totale (les deux produits) collectée dans le même compartiment.

La récupération représente le rapport de m_{ic} à la masse totale m_{it} du produit i introduit dans le séparateur :

$$Rec(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \times 100 \tag{III. 2}$$

III.3.2. Simulation numérique des trajectoires des particules

La simulation des trajectoires des particules a été réalisée pour 27 particules PP et 27 particules PE à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics (Tableau III-2). Celui-ci a été choisi afin de prendre en compte trois paramètres pour chaque type de particule. Les paramètres étaient la masse des particules, la charge électrique des particules et l'angle d'inclinaison des particules lors de leur lancement dans le séparateur. La masse des flocons simples de polyéthylène et de polypropylène a été mesurée avec une balance de haute précision et s'est avérée varier entre 0,01 g et 0,05 g, avec une moyenne d'environ 0,03 g. Un Coulomb-mètre et une balance ont été utilisés pour mesurer la charge/masse des flocons, comme indiqué au § 1.1. Ainsi, il a été possible de calculer la charge électrique d'un seul flocon de PE ou de PP en multipliant la charge/masse de PE (-5,85 nC/g) ou de PP (8,65 nC/g) par la masse moyenne d'un seul flocon de PE ou de PP. PE ou PP, respectivement. Puisque le compteur Coulomb ne peut pas mesurer la charge d'un seul flocon, les valeurs maximales et minimales des charges ont été calculées en multipliant la valeur moyenne par un facteur de 1,5 et 0,5, respectivement.

Ces paramètres ont ensuite été utilisés dans les simulations numériques pour analyser et prédire les trajectoires des particules dans le séparateur. Les résultats de ces simulations aident à comprendre le comportement des particules sous l'influence de champs électrostatiques et à optimiser le processus de séparation.

Tableau III-2. Caractéristiques des 27 particules de PP et des 27 particules de PE utilisées pour la simulation des trajectoires.

PP particles			PE particles		
Mass	Electric charge	Inclination angle	Mass	Electric charge	Inclination angle
m _{PPMax} (0.05 g)	q _{PPMax} = + 0.520 nC	α _{PPMax} = +5°	m _{PEMax} (0.05 g)	q _{PEMax} = - 0.260 nC	α _{PEMax} = +5°
		α _{PPAvg} = 0°			α _{PEAvg} = 0°
		α _{PPMin} = - 5°			α _{PEMin} = - 5°
q _{PPAvg} = + 0.346 nC	α _{PPMax} = +5°	α _{PPAvg} = 0°	q _{PEAvg} = - 0.175 nC	α _{PEMax} = +5°	α _{PEAvg} = 0°
		α _{PPMin} = - 5°			α _{PEMin} = - 5°
		α _{PPMin} = + 0.173 nC			α _{PEMax} = +5°
m _{PPMin} (0.01 g)	q _{PPMax} = + 0.520 nC	α _{PPMax} = +5°	m _{PEMin} (0.01 g)	q _{PEMax} = - 0.260 nC	α _{PEMax} = +5°
		α _{PPAvg} = 0°			α _{PEAvg} = 0°
		α _{PPMin} = - 5°			α _{PEMin} = - 5°
q _{PPAvg} = + 0.346 nC	α _{PPMax} = +5°	α _{PPAvg} = 0°	q _{PEAvg} = - 0.175 nC	α _{PEMax} = +5°	α _{PEAvg} = 0°
		α _{PPMin} = - 5°			α _{PEMin} = - 5°
		α _{PPMin} = + 0.173 nC			α _{PEMax} = +5°
m _{PPMax} (0.05 g)	q _{PPMax} = + 0.520 nC	α _{PPMax} = +5°	m _{PEMax} (0.05 g)	q _{PEMax} = - 0.260 nC	α _{PEMax} = +5°
		α _{PPAvg} = 0°			α _{PEAvg} = 0°
		α _{PPMin} = - 5°			α _{PEMin} = - 5°
q _{PPAvg} = + 0.346 nC	α _{PPMax} = +5°	α _{PPAvg} = 0°	q _{PEAvg} = - 0.175 nC	α _{PEMax} = +5°	α _{PEAvg} = 0°
		α _{PPMin} = - 5°			α _{PEMin} = - 5°
		α _{PPMin} = + 0.173 nC			α _{PEMax} = +5°
m _{PPMin} (0.01 g)	q _{PPMax} = + 0.520 nC	α _{PPMax} = +5°	m _{PEMin} (0.01 g)	q _{PEMax} = - 0.260 nC	α _{PEMax} = +5°
		α _{PPAvg} = 0°			α _{PEAvg} = 0°
		α _{PPMin} = - 5°			α _{PEMin} = - 5°
q _{PPAvg} = + 0.346 nC	α _{PPMax} = +5°	α _{PPAvg} = 0°	q _{PEAvg} = - 0.175 nC	α _{PEMax} = +5°	α _{PEAvg} = 0°
		α _{PPMin} = - 5°			α _{PEMin} = - 5°
		α _{PPMin} = + 0.173 nC			α _{PEMax} = +5°
m _{PPMax} (0.05 g)	q _{PPMax} = + 0.520 nC	α _{PPMax} = +5°	m _{PEMax} (0.05 g)	q _{PEMax} = - 0.260 nC	α _{PEMax} = +5°
		α _{PPAvg} = 0°			α _{PEAvg} = 0°
		α _{PPMin} = - 5°			α _{PEMin} = - 5°
q _{PPAvg} = + 0.346 nC	α _{PPMax} = +5°	α _{PPAvg} = 0°	q _{PEAvg} = - 0.175 nC	α _{PEMax} = +5°	α _{PEAvg} = 0°
		α _{PPMin} = - 5°			α _{PEMin} = - 5°
		α _{PPMin} = + 0.173 nC			α _{PEMax} = +5°
m _{PPMin} (0.01 g)	q _{PPMax} = + 0.520 nC	α _{PPMax} = +5°	m _{PEMin} (0.01 g)	q _{PEMax} = - 0.260 nC	α _{PEMax} = +5°
		α _{PPAvg} = 0°			α _{PEAvg} = 0°
		α _{PPMin} = - 5°			α _{PEMin} = - 5°
q _{PPAvg} = + 0.346 nC	α _{PPMax} = +5°	α _{PPAvg} = 0°	q _{PEAvg} = - 0.175 nC	α _{PEMax} = +5°	α _{PEAvg} = 0°
		α _{PPMin} = - 5°			α _{PEMin} = - 5°
		α _{PPMin} = + 0.173 nC			α _{PEMax} = +5°

$$m\vec{a} = \vec{F}_G + \vec{F}_E + \vec{F}_A \quad (\text{III. 3})$$

Les amplitudes des forces en (III. 3) sont données par les éléments suivants :

$$F_G = mg \quad (\text{III. 4})$$

$$F_E = qE \quad (\text{III. 5})$$

$$F_A = \frac{1}{2} C_D \rho_A S v^2 \quad (\text{III. 6})$$

$$E = -grad(V) \quad (III.7)$$

Où g est l'accélération de la gravité, q est la charge des particules, E est l'intensité du champ électrique, V est la tension appliquée, C_D est le coefficient de traînée, ρ_A est la densité de l'air, S est la surface projetée des particules dans la direction du mouvement et v est la vitesse des particules.

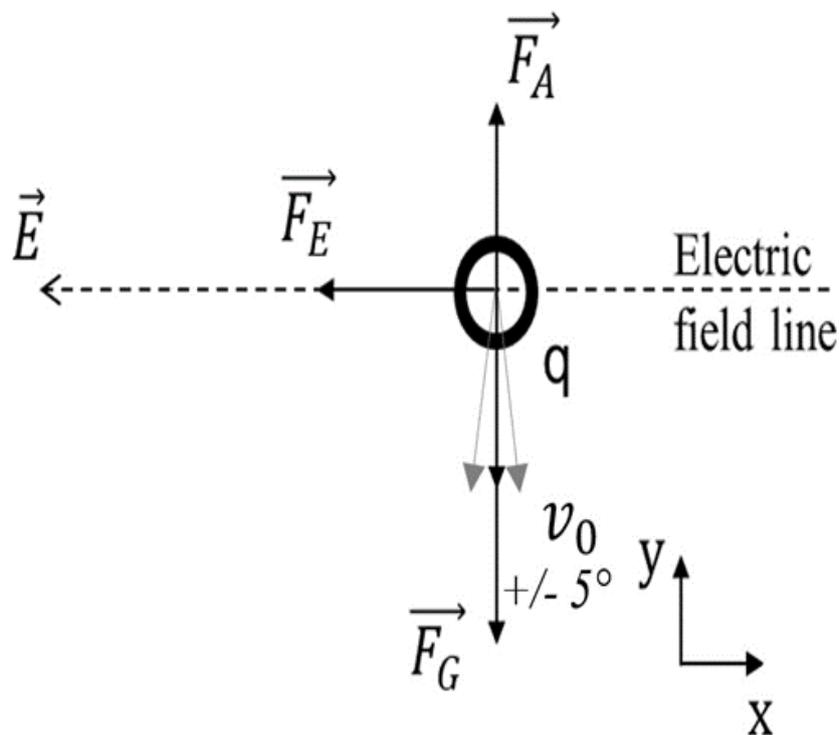


Figure III-10. Forces agissant sur une particule chargée dans un séparateur électrostatique en chute libre.

Les paramètres d'entrée étaient les suivants : la tension ($V = \pm 45$ kV), la gravité ($g = 9,81$ m/s^2), le coefficient de traînée ($C_D = 0,8$), la densité de l'air ($\rho_A = 1,22$ kg/m^3) et la vitesse initiale ($v_0 = 2,7$ m/s). Lors du calcul de la force de frottement F_A , il s'est avéré que son ampleur ($F_A = 0,78 \cdot 10^{-5} v^2$ [N] à $1,95 \cdot 10^{-5} v^2$ [N]) est très faible et peut être négligée dans la simulation.

III.4. Résultats et discussion

III.4.1. Effet du temps sur la charge électrique des particules

Le niveau de charge électrique acquise par les paillettes de plastique PP et PE dépend du temps t passé dans le dispositif de tribocharge. Les rapports charge/masse les plus élevés ont été obtenus pour $t = 4$ min (Figure III-11).

La charge électrique positive acquise par les flocons de PP (8,65 nC/g) était supérieure, en valeurs absolues, à celle négative acquise par les flocons de PE (-5,85 nC/g). Cela peut s'expliquer par le fait que la probabilité de collision d'un flocon de PP avec des flocons de PE était supérieure à celle d'un flocon de PE avec des flocons de PP, car le pourcentage de PE dans le mélange était deux fois supérieur à celui du PP.

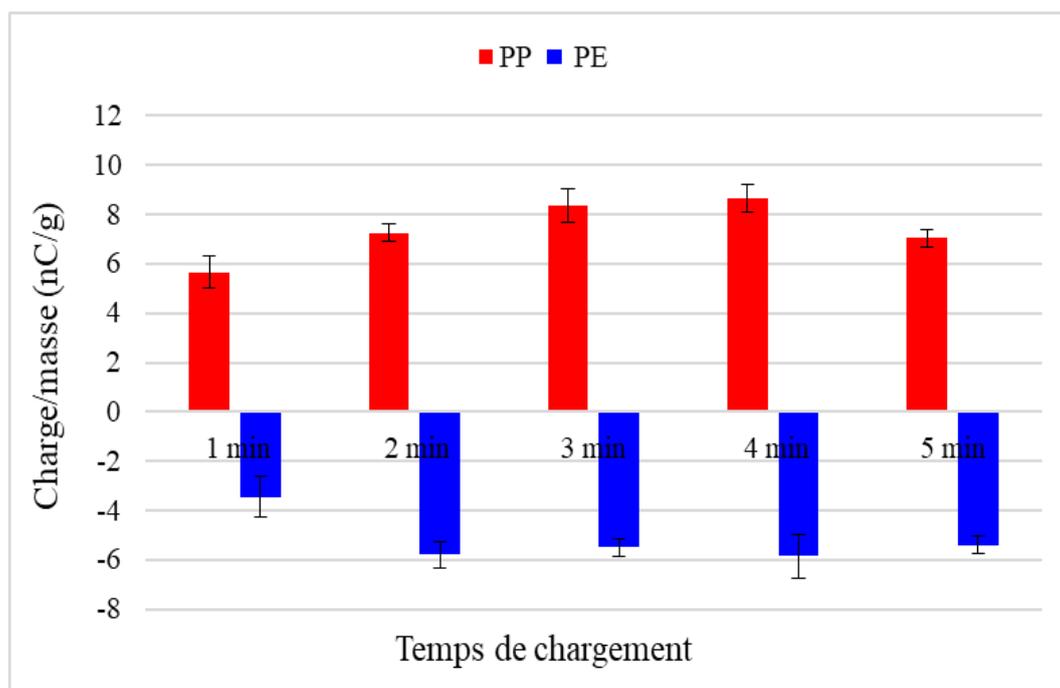


Figure III-11. Rapport charge/masse des flocons de PP et de PE à différentes durées de tribochargement.

Tableau III-3. Charge massique du PP et du PE en fonction du temps.

Le temps	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
Charge massique de PP (nC/g)	5,65	7,25	8,35	8,65	7,05
Charge massique de PE (nC/g)	-3,45	-5,8	-5,5	-5,85	-5,4

III.4.2. Étude comparative des résultats

Les résultats des expériences de séparation électrostatique, représentés dans la Figure III-12, montrent la différence de récupération et de pureté entre les séparateurs modifiés et standard. Dans le séparateur modifié, le mélange à séparer a été introduit plus près de l'électrode verticale positive (+), à une distance de $d = 1$ cm. Dans cette nouvelle configuration, sur une

masse totale de 100 g de mélange de flocons, 98,2 % de PE et 96,7 % de PP ont été récupérés, avec une pureté de 99,1 % et 98 % respectivement.

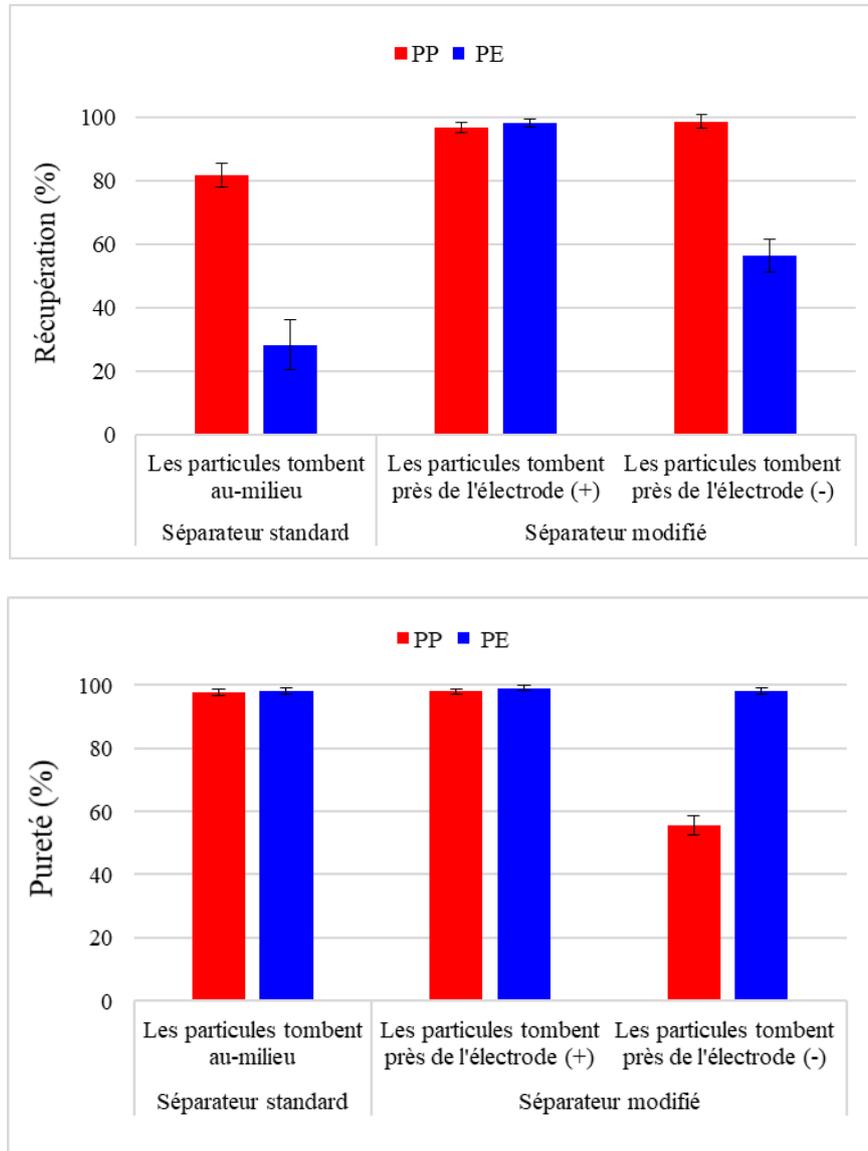


Figure III-12. Récupération et pureté des produits séparés en PP et PE.

Les flocons de PE, qui portent des niveaux de charge négative relativement faibles, sont légèrement attirés par cette électrode. Depuis les forces électriques, agir sur elles n'est pas trop fort ; les collisions entre ces flocons et l'électrode ne les détournent que légèrement de la direction verticale. Ainsi, pratiquement tous les flocons de PE seront récupérés dans la boîte située du côté de l'électrode (+). Les paillettes de PP, qui portent des niveaux de charge positive

relativement élevés, seront fortement déviées par les forces du champ électrique, et la quasi-totalité d'entre elles seront récupérées dans le caisson situé du côté de l'électrode (-).

Lorsqu'on change la polarité des électrodes dans le séparateur modifié, sur un mélange de paillettes de 100 g, on récupère 56,3% de PE et 98,6% de PP, avec une pureté de 98,1% et 55,5% respectivement.

Dans cette configuration, le mélange à séparer est introduit à proximité de l'électrode verticale (-). Les flocons de PP tombent librement lorsqu'ils sont proches de l'électrode, donc presque tous les flocons de PP seront récupérés dans la boîte située sur le côté de l'électrode (-). Les paillettes de PE portant des niveaux de charge négative relativement faibles sont légèrement déviées par le champ électrique et collectées avec les paillettes de PP dans le caisson situé du côté de l'électrode (-).

Dans le séparateur standard, le mélange à séparer est introduit au milieu de l'espacement des électrodes du haut du séparateur. Dans ce cas, sur les 100 g du mélange initial, seulement 28,4 % de PE et 81,7 % de PP ont été récupérés, avec des puretés de 98,2 % et 97,6 %, respectivement. Le reste a été collecté dans la boîte de produits intermédiaires, principalement composé de flocons de PP et de PE pas suffisamment chargés pour être déviés vers l'électrode (+) ou l'électrode (-).

III.4.3. Résultats de la simulation

III.4.3.1. Résultats de la simulation du potentiel électrique et du champ électrique

En utilisant le logiciel Comsol Multiphysics, nous avons réalisé une simulation afin d'analyser la distribution du potentiel électrique et du champ électrique dans un séparateur à chute libre standard ainsi que dans un séparateur à chute libre modifié, afin de comparer les différences entre les deux.

Les Figures III-13 et III-14 illustrent respectivement la distribution du potentiel électrique et les lignes équipotentiels.

La Figure III-15 montre la distribution du champ électrique, on remarque que l'intensité du champ électrique dans le séparateur modifié est supérieure à l'intensité du champ électrique dans le séparateur standard.

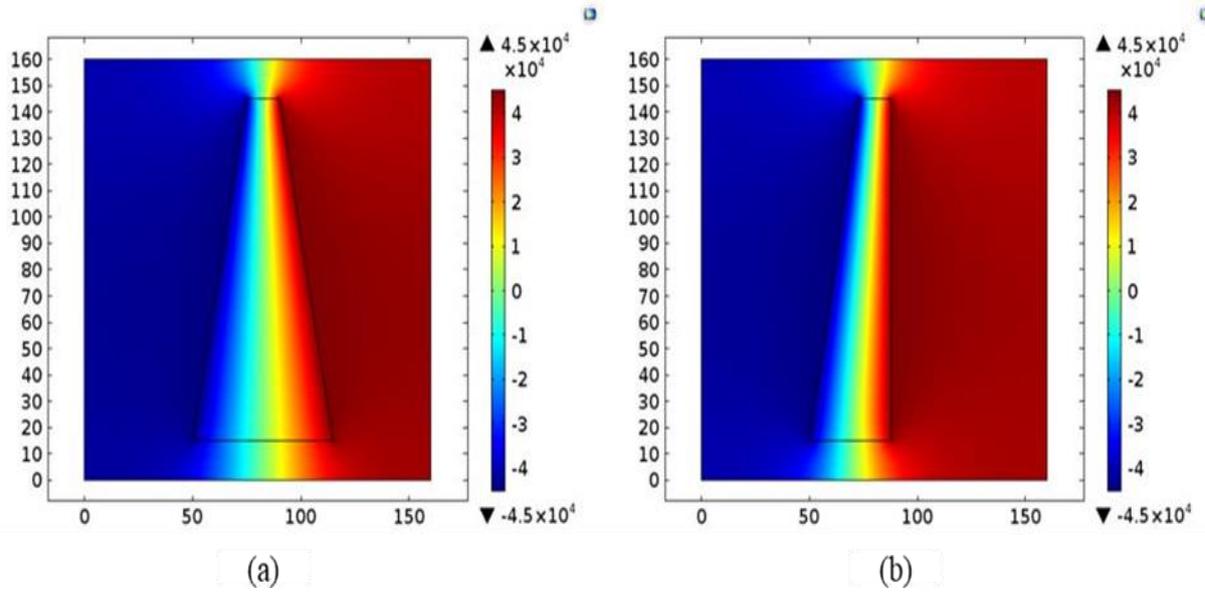


Figure III-13. Distribution du potentiel électrique dans un séparateur à chute libre standard (a) et dans un séparateur à chute libre modifié (b).

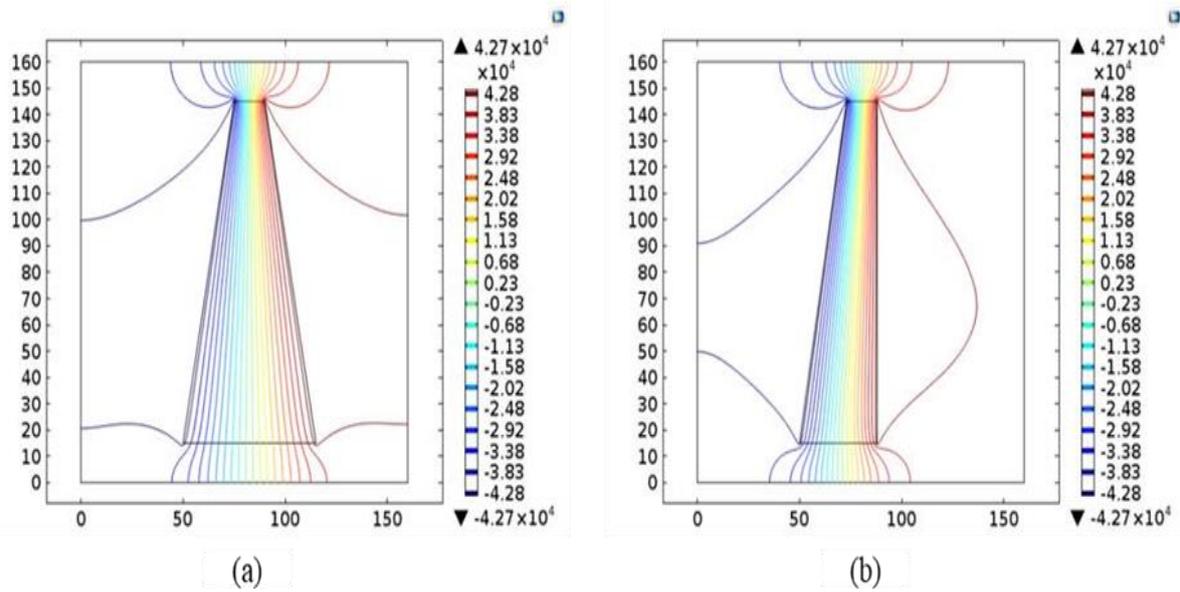


Figure III-14. Distribution des lignes équipotentielles dans un séparateur à chute libre standard (a) et dans un séparateur à chute libre modifié (b).

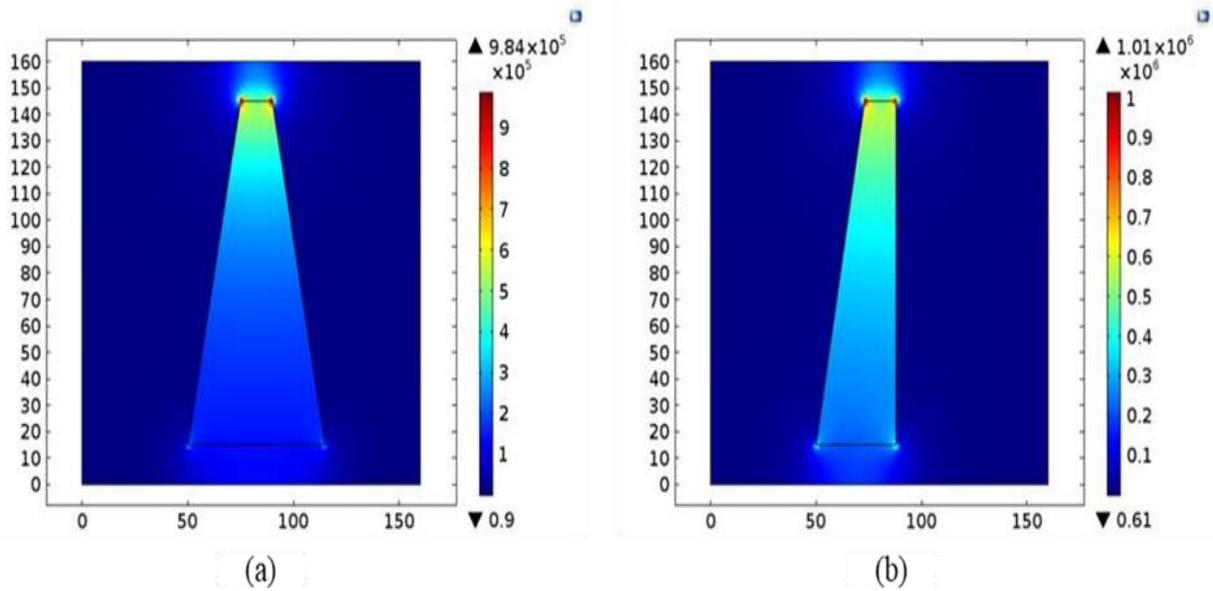


Figure III-15. Distribution du champ électrique dans un séparateur à chute libre standard (a) et dans un séparateur à chute libre modifié (b).

III.4.3.2. Résultats de la simulation des trajectoires des particules

Afin d'expliquer l'efficacité du séparateur modifié, les trajectoires des particules ont été simulées dans les mêmes configurations que celles utilisées dans les expériences. La Figure III-16 montre la simulation des trajectoires pour le séparateur standard et le nouveau séparateur modifié. Les vingt-sept (27) particules utilisées dans la simulation correspondaient au maximum, au minimum et à la moyenne de la charge des particules, de la masse des particules et de l'angle d'inclinaison, comme expliqué dans la section Matériel et méthode.

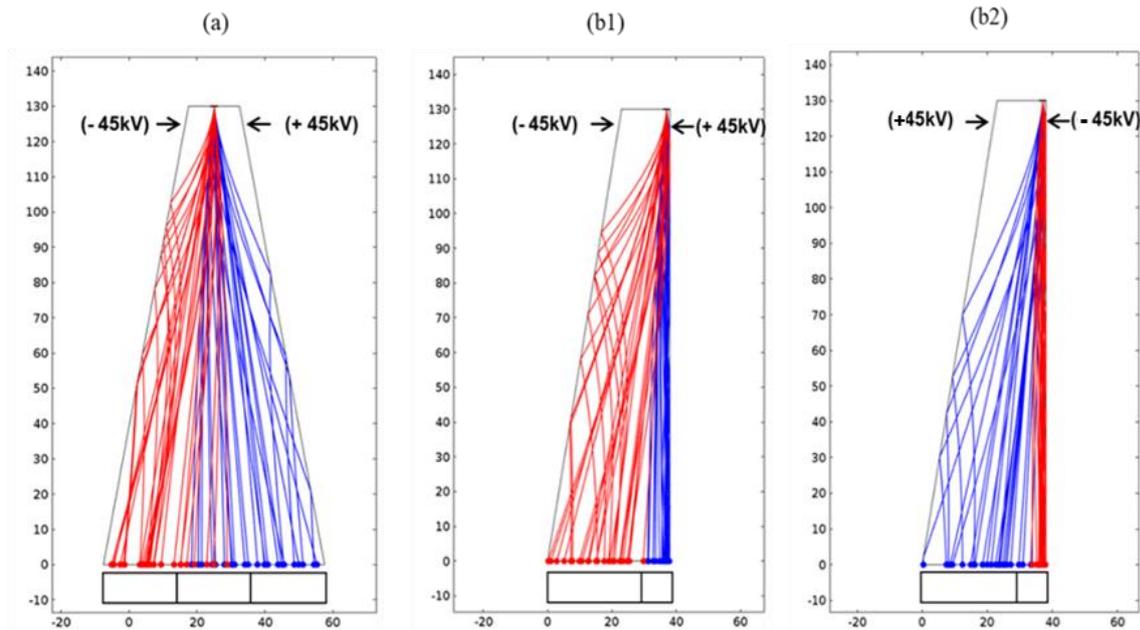


Figure III-16. Résultats de la simulation des trajectoires des particules.

- (a) Trajectoires des particules de PP et PE dans le séparateur à chute libre standard ; (b1) Trajectoires des particules de PP et PE dans le séparateur à chute libre modifié (positif) ; (b2) Trajectoires des particules de PP et PE dans le séparateur à chute libre modifié (négatif).

Les résultats montrent qu'il existe un bon accord entre les résultats expérimentaux et de simulation. En effet, le séparateur modifié à électrode verticale liée à la polarité positive (+) est le meilleur. On constate que les paillettes de PE, qui portent un faible niveau de charge négative, sont légèrement déviées par l'électrode verticale et tombent librement de manière verticale dans le caisson qui leur est dédié, tandis que les paillettes de PP, qui portent un haut niveau de charge négative. De charge positive, sont fortement déviés et pratiquement tous seront récupérés dans le caisson situé du côté de l'électrode (-). La récupération dans ce cas est de 100% pour le PE et 89% pour le PP ce qui correspond très bien aux expérimentations (98,2% de PE et 96,7% de PP).

Lorsque la polarité est inversée pour le séparateur modifié, les paillettes de PP tombent à côté de l'électrode verticale dans le caisson qui lui est dédié. Cependant, les flocons de PE s'écartent légèrement en raison de leur faible niveau de charge. Ceci a conduit à une récupération de 67% de PE et 100% de PP ce qui est également en bon accord avec les expérimentations (56,3% de PE et 98,6% de PP).

Dans le cas du séparateur standard, les particules tombent du milieu de l'espace des électrodes en haut du séparateur. Les résultats montrent que la particule est déviée et une récupération de 44 % de PE et 77 % de PP a été obtenue ce qui correspond très bien aux expériences (28,43 % de PE et 81,75 % de PP).

De la simulation de la trajectoire, on peut noter que l'utilisation d'une électrode verticale dans le séparateur modifié entraîne un léger rebond des particules sur l'électrode. Les particules ne sont pas dispersées dans le séparateur et tombent de manière concentrée dans la petite boîte qui leur est dédiée. Ce point est très intéressant, car il permet de récupérer les particules proches de l'électrode verticale avec une grande pureté. Ce n'est pas le cas du séparateur standard, où les particules sont déviées par le champ électrostatique du séparateur mais elles sont dispersées lors de leur chute. Ce fait explique qu'il existe toujours une troisième case réservée aux particules peu chargées qui tombent dans la zone centrale du séparateur standard. Ce n'est pas le cas du séparateur modifié puisque les particules qui tombent à proximité de l'électrode verticale ne sont pas dispersées.

III.4.4. Effet de la tension

Les résultats des expériences de séparation électrostatique (Figure III-17) démontrent l'impact de la haute tension appliquée sur la séparation électrostatique dans la configuration d'électrode modifiée. Cet effet s'observe en introduisant le mélange à séparer plus près de l'électrode verticale (+).

Les résultats indiquent que la séparation atteint une efficacité maximale à environ 50 kV (+/- 25KV). Plus précisément, en appliquant une tension totale de 50 kV à un mélange de paillettes de 100 g, 95,7 % de PE et 97,1 % de PP ont été récupérés avec des puretés de 97 % et 98,4 %, respectivement. Cela démontre que le séparateur modifié peut fonctionner efficacement avec une basse tension de seulement 50 kV, par rapport au séparateur standard, qui nécessite 90 kV (+/- 45KV).

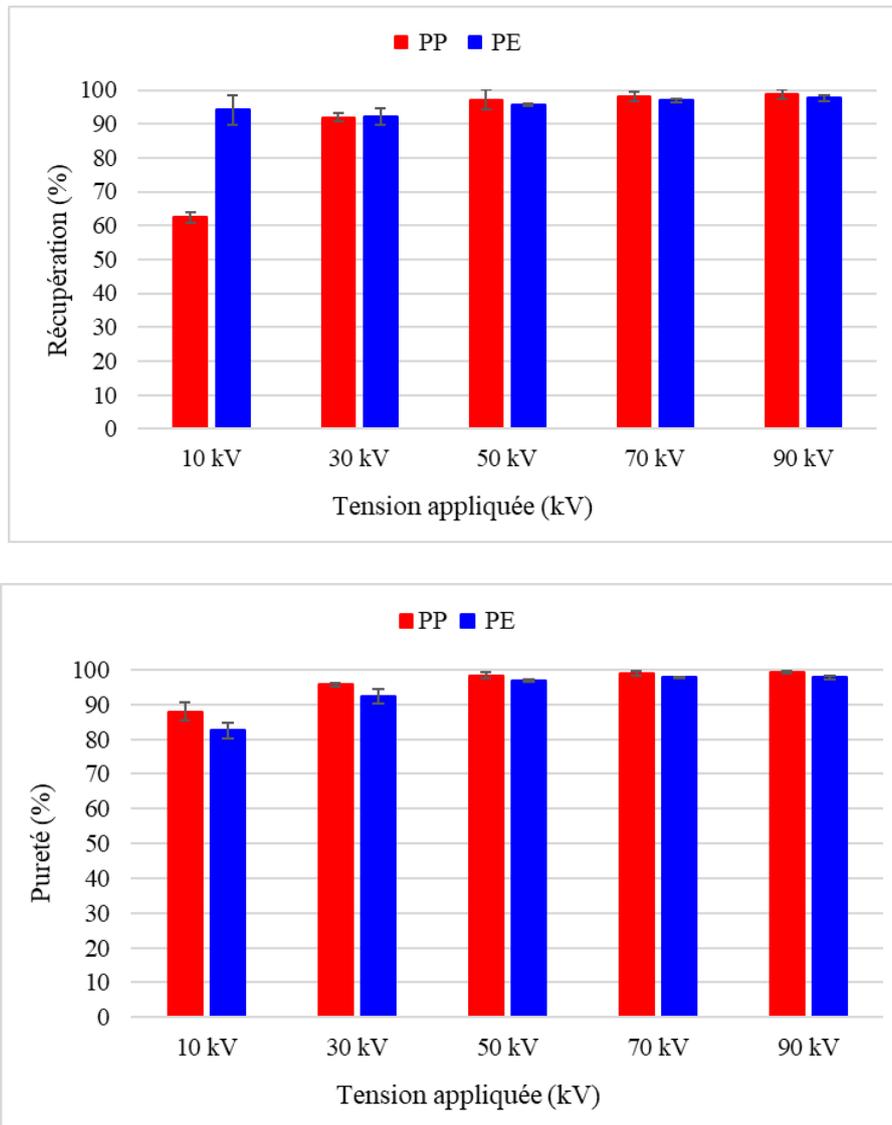


Figure III-17. Influence de la tension sur la séparation électrostatique dans la nouvelle configuration du séparateur à chute libre

III.5. Conclusions

La configuration modifiée du séparateur à chute libre est plus efficace que la configuration standard pour séparer les flocons de PE et PP provenant des déchets d'emballage.

Deux modifications majeures de la configuration standard des séparateurs tribo-électrostatiques à chute libre peuvent être bénéfiques dans le cas de mélanges binaires déséquilibrés similaires de flocons isolants : (1) amener le matériau plus près de l'électrode dont la polarité est opposée à celle du constituant prédominant du mélange ; (2) ajuster l'inclinaison de l'autre électrode par rapport à la verticale, pour réduire le nombre de flocons bien chargés du constituant minoritaire qui entrent en collision avec elle.

Les simulations de trajectoires de particules ont montré que dans cette nouvelle configuration du séparateur en chute libre, les particules qui tombent à côté des électrodes verticales sont très concentrées, conduisant à une pureté de séparation améliorée. Les trajectoires des particules ne sont pas dispersées comme dans le séparateur standard et aucune caisse de produit intermédiaire n'est nécessaire dans ce cas. De plus, le mélange peut être séparé avec la plus faible énergie possible et avec de bons résultats en appliquant une basse tension de seulement 50 kV.

La nouvelle configuration du séparateur à chute libre est déjà opérationnelle chez GRANUPLAST, Jassans-Riottier, France, où le nouveau système est utilisé pour séparer les flocons de plastique. Les prochaines étapes de cette recherche consistent à utiliser le séparateur modifié pour effectuer des séparations de particules de plastique de différents types et compositions.



Charles-Augustin Coulomb

(1736-1806)

« On graduating from school, a studious young man who would withstand the tedium and monotony of his duties has no choice but to lose himself in some branch of science or literature completely irrelevant to his assignment ».

Chapitre IV

Séparation électrostatique de mélanges de polymères granulaires

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente une étude expérimentale sur la séparation électrostatique de granulés de polyéthylène haute densité (PEHD) et de polypropylène (PP) issus de déchets d'équipements électriques et électroniques. Le mélange traité contient environ 50 % de PEHD et 50 % de PP. Les granulés ont été chargés par effet triboélectrique dans un dispositif à lit fluidisé puis introduits dans deux types de séparateurs à chute libre : Le premier est un séparateur standard et le second est un séparateur à chute libre innovant à électrodes courtes. Les conditions atmosphériques pendant le processus étaient de 23,7 °C à 27,2 °C pour la température et de 44,5 % à 50,1 % pour l'humidité relative. Les résultats ont montré que le séparateur électrostatique à chute libre innovant est plus efficace que le précédent. Ainsi, à partir de 50 g de granulés mélangés, on a récupéré 93,46 % de PEHD et 94,5 % de PP avec des puretés respectives de 98,01 % et 98,75 %. Une modélisation de la trajectoire des particules de PP et de PEHD a été réalisée pour comprendre le comportement des particules chargées dans les deux séparateurs. Des travaux sont en cours pour la mise en œuvre industrielle de cette technologie de triple séparation électrostatique.

IV.2. Matériels et méthodes

IV.2.1. Description des matériaux

Dans ce chapitre, les matériaux plastiques étudiés sont des particules de polyéthylène haute densité (PEHD) et de polypropylène (PP), provenant du recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (Figure IV-1). Le mélange de plastiques à traiter se compose à parts égales de 50 % de PEHD et 50 % de PP, avec des particules dont la taille est comprise entre 2 mm et 4 mm.

a) *Polyéthylène haute densité (PEHD)*

Le polyéthylène haute densité (PEHD), ou HDPE (High-Density Polyethylene) en anglais, est un type de plastique thermoplastique fabriqué à partir de monomères d'éthylène. Il se distingue par une densité plus élevée que d'autres types de polyéthylène, généralement comprise entre 0,93 et 0,97 g/cm³.

Le PEHD se caractérise par sa résistance chimique, sa rigidité, sa solidité et sa faible flexibilité par rapport au polyéthylène basse densité (PEBD). Il est largement utilisé pour la fabrication de produits robustes comme les bouteilles de lait, les tuyaux, les réservoirs d'eau, les conteneurs de stockage, les films industriels, et les jouets. Sa durabilité, sa résistance aux

chocs, et son imperméabilité en font un matériau privilégié pour de nombreuses applications industrielles et domestiques. Il est également recyclable, ce qui en fait un choix relativement écologique dans le domaine des plastiques.

b) Polypropylène (PP)

Le polypropylène ou PP est un polymère thermoplastique qui fait partie de la famille des polyoléfines et est fabriqué à partir de la polymérisation du propylène., au même titre que le polyéthylène. Il est largement utilisé dans divers domaines industriels et connu pour sa légèreté, sa résistance à la corrosion, sa tenue et sa résistance à de nombreuses substances chimiques, ce qui en fait un matériau polyvalent utilisé dans la fabrication de films, de fibres, de contenants, de composants automobiles et très utilisé dans le domaine des emballages et dans de nombreux autres.

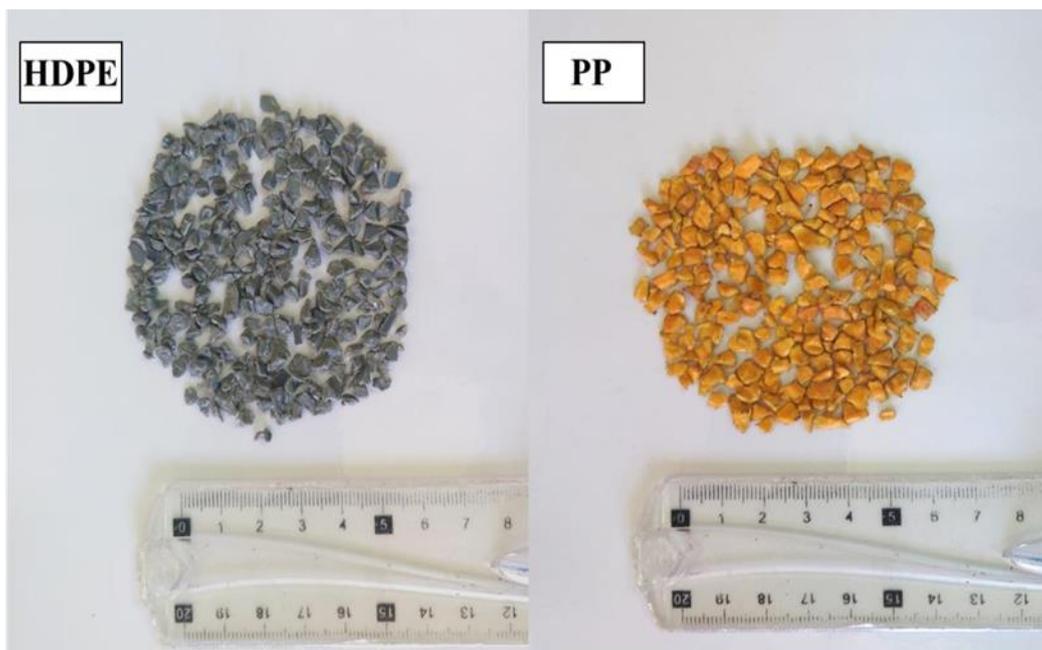


Figure IV-1. Particules de PEHD et PP utilisés dans les tests de séparation.

Tableau IV- 1. Propriétés physiques des particules de (PEHD) et (PP).

Propriétés	PEHD (Polyéthylène Haute Densité)	PP (Polypropylène)
Densité	0,94 - 0,97 g/cm ³	0,90 - 0,91 g/cm ³
Température de fusion	120 - 135 °C	160 - 170 °C
Module d'élasticité	800 - 1600 MPa	1300 - 1800 MPa
Allongement à la rupture	500 - 1000 %	200 - 600 %
Résistance à la traction	20 - 35 MPa	30 - 40 MPa
Résistance aux chocs (Izod, 23°C)	60 - 150 J/m	20 - 30 J/m
Rigidité	Plus rigide que le PP	Moins rigide que le PEHD
Absorption d'eau	Très faible (< 0,01 %)	Très faible (< 0,02 %)
Stabilité thermique	Stable jusqu'à 110 °C	Stable jusqu'à 100 °C
Résistance chimique	Bonne, particulièrement aux acides et bases	Bonne, surtout contre les acides
Transparence	Opaque	Semi-transparent à opaque

IV.2.2. Dispositif de séparation électrostatique

Les représentations schématiques de la Figure IV-2 montrent la configuration standard du séparateur à chute libre ainsi qu'une configuration innovante du séparateur à chute libre équipée d'électrodes courtes. Les dimensions des électrodes à plaque du séparateur standard sont de 200 mm × 1000 mm, tandis que les dimensions des électrodes du séparateur innovant sont de 200 mm × 200 mm.

Les électrodes à plaque du séparateur standard et innovant sont connectées à différentes sources d'alimentation haute tension (HT) avec des polarités positives et négatives (± 30 kV maximum). La distance entre les électrodes en haut et en bas pour les deux configurations est de 150 mm. Le produit séparé est collecté dans un collecteur à triple boîte. Les particules chargées négativement sont collectées dans la boîte adjacente à l'électrode positive, et les particules chargées positivement sont collectées dans la boîte adjacente à l'électrode négative. Les particules insuffisamment chargées s'accumulent dans la boîte centrale.

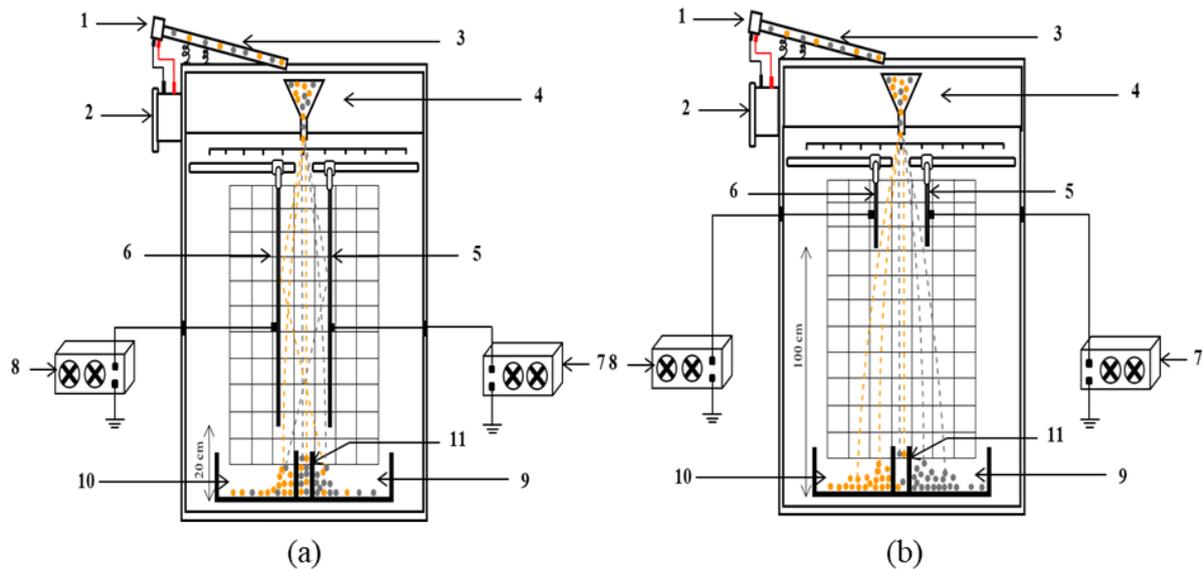


Figure IV-2. Représentation schématique de (a) le séparateur à chute libre standard et (b) le séparateur à chute libre innovant. 1 - Dispositif vibrant électromagnétique ; 2 - Alimentation électrique ; 3 - Alimentation vibrant ; 4 - Entonnoir ; 5 - Électrode positive ; 6 - Électrode négative ; 7 - Alimentation HT positive ; 8 - Alimentation HT négative ; 9 - Bac de collecte pour les particules chargées négativement ; 10 - Bac de collecte pour les particules chargées positivement ; 11 - Bac de collecte pour un produit intermédiaire (particules faiblement chargées).

IV.2.3. Dispositif de chargement triboélectrique a lit fluidise

Le dispositif à lit fluidisé, illustré à la Figure IV-3, a été conçu par l'équipe d'électrostatique appliquée du laboratoire LSTE de l'Université de Mascara en Algérie. Il se compose d'une chambre cylindrique en polypropylène (PP) de 50 cm de long et 8 cm de diamètre.

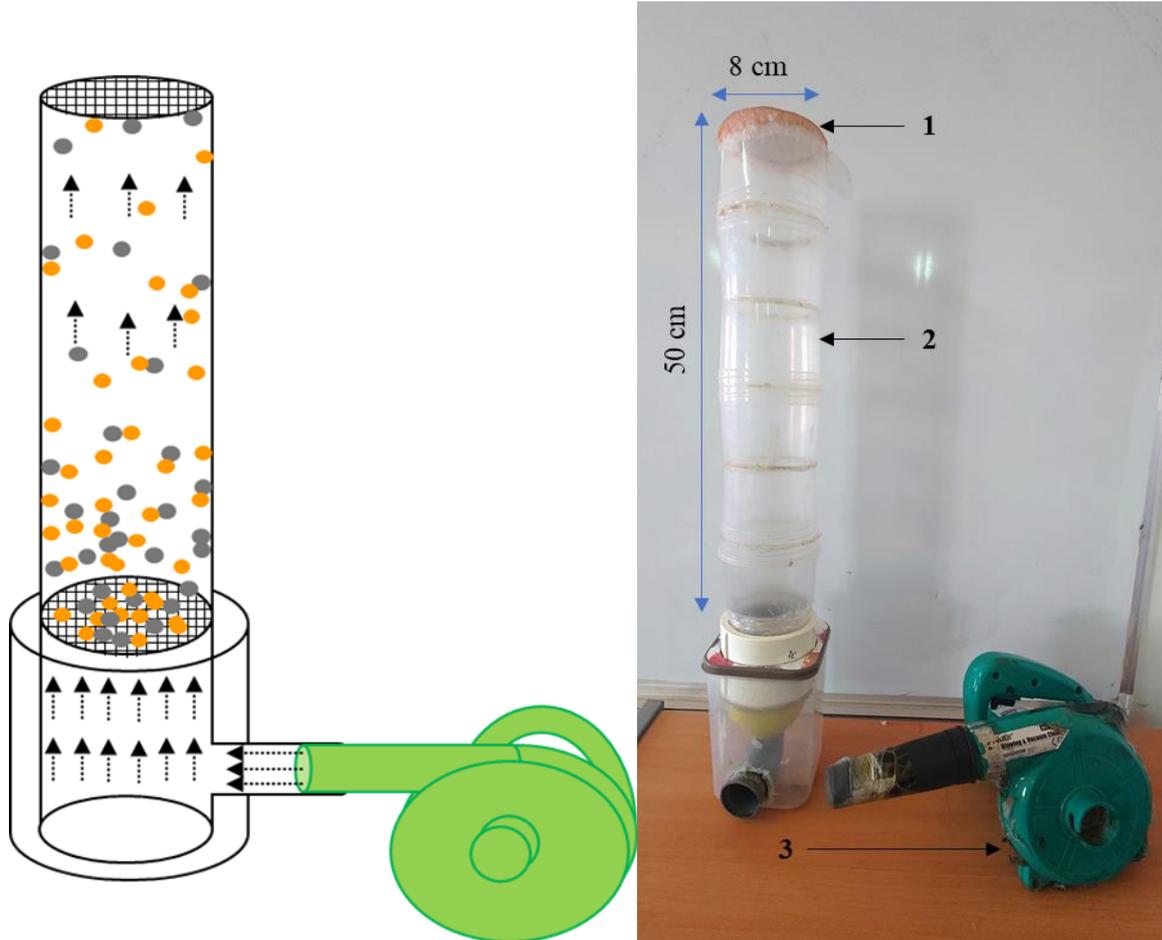


Figure IV- 3. Dispositif de chargement électrique à lit fluidisé.

1 - Filtre ; 2 - chambre cylindrique en polypropylène (PP)

; 3 - souffleur d'air (Proskit MS-C005I).

IV.3. Procédure expérimentale

Dans ce chapitre, nous avons séparé les particules de polyéthylène haute densité (PEHD) et de polypropylène (PP), sont effectuées à l'aide du séparateur électrostatique innovant composé d'électrodes courtes et nous avons comparé les résultats à ceux obtenus en utilisant le séparateur standard.

L'étude expérimentale a été menée sur des échantillons d'une masse totale de 50 g, dans des conditions stables de température ambiante et d'humidité relative ($T = 23,7\text{ °C} - 27,2\text{ °C}$; $HR = 44,5\% - 50,1\%$).

Le mélange granulé était constitué de 50 % de PEHD et 50 % de PP, avec une taille typique des particules variant entre 2 mm et 4 mm. Le mélange en est chargé électriquement par un

dispositif à lit fluidisé, représenté sur la Figure IV-3. Ce dispositif permet de charger le mélange pendant différentes durées, comprises entre 1 et 5 minutes, à l'aide d'un souffleur d'air (Proskit MS-C005I) fournissant un débit constant de 2,3 m³/min. Les granulés de PEHD et de PP acquièrent des charges de polarité opposée : les particules de PP se chargent positivement (+) tandis que celles de PEHD se chargent négativement (-), en raison des collisions dominantes entre les particules.

Après chaque séparation, la charge électrique et la masse des particules collectées dans les deux boîtes ont été mesurées à l'aide d'une cage de Faraday relié à un électromètre (NanoCoulomb METER, modèle 284) et à une balance numérique (précision = 0,01 g), respectivement. Nous avons étudié aussi l'effet du temps de chargement sur la charge électrique acquise par les particules, ainsi que son influence sur la séparation électrostatique dans le séparateur standard et le séparateur innovant. Une fois le temps de chargement optimal identifié, nous avons comparé l'efficacité de la séparation électrostatique entre les deux dispositifs. L'effet de la tension appliquée sur la performance de la séparation électrostatique dans le séparateur innovant a également été étudié.

De plus, une simulation du trajet des particules a été réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics, afin de mieux comprendre et expliquer le comportement des particules dans le séparateur innovant par rapport au séparateur standard, et d'évaluer les différences de résultats entre les deux configurations.

IV.3.1. Simulation numérique des trajectoires des particules

La simulation des trajectoires des particules a été réalisée pour 27 particules de PP et 27 particules de PEHD à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. Ce nombre a été choisi pour tenir compte de trois paramètres pour chaque type de particule : la masse de la particule, la charge électrique de la particule et l'angle d'inclinaison de la particule lorsqu'elle est lancée dans le séparateur. Pour chaque paramètre, la valeur maximale, la valeur minimale et la valeur moyenne ont été prises en compte. Par conséquent, 27 combinaisons de paramètres de particules ont été obtenues, comme indiqué dans le Tableau IV-2.

Tableau IV- 2. Caractéristiques des 27 particules de PP et des 27 particules de PEHD utilisées pour la simulation de trajectoire.

PP particles			PEHD particles		
Mass	Electric charge	Inclination angle	Mass	Electric charge	Inclination angle
m _{PPMax} (0.03 g)	q _{PPMax} = + 1.802 nC	α _{PPMax} = +5° α _{PPAvg} = 0° α _{PPMin} = - 5°	m _{PEHDMax} (0.03 g)	q _{PEHDMax} = - 2.139 nC	α _{PEMax} = +5° α _{PEAvg} = 0° α _{PEMin} = - 5°
	q _{PPAvg} = + 1.201 nC	α _{PPMax} = +5° α _{PPAvg} = 0° α _{PPMin} = - 5°		q _{PEHDAvg} = - 1.426 nC	α _{PEMax} = +5° α _{PEAvg} = 0° α _{PEMin} = - 5°
	q _{PPMin} = + 0.600 nC	α _{PPMax} = +5° α _{PPAvg} = 0° α _{PPMin} = - 5°		q _{PEHDMIN} = - 0.713 nC	α _{PEMax} = +5° α _{PEAvg} = 0° α _{PEMin} = - 5°
m _{PPAvg} (0.02 g)	q _{PPMax} = + 1.199 nC	α _{PPMax} = +5° α _{PPAvg} = 0° α _{PPMin} = - 5°	m _{PEHDAvg} (0.02 g)	q _{PEHDMax} = - 1.426 nC	α _{PEMax} = +5° α _{PEAvg} = 0° α _{PEMin} = - 5°
	q _{PPAvg} = + 0.799 nC	α _{PPMax} = +5° α _{PPAvg} = 0° α _{PPMin} = - 5°		q _{PEHDAvg} = - 0.950 nC	α _{PEMax} = +5° α _{PEAvg} = 0° α _{PEMin} = - 5°
	q _{PPMin} = + 0.399 nC	α _{PPMax} = +5° α _{PPAvg} = 0° α _{PPMin} = - 5°		q _{PEHDMIN} = - 0.475 nC	α _{PEMax} = +5° α _{PEAvg} = 0° α _{PEMin} = - 5°
m _{PPMin} (0.01 g)	q _{PPMax} = + 0.599 nC	α _{PPMax} = +5° α _{PPAvg} = 0° α _{PPMin} = - 5°	m _{PEHDMIN} (0.01 g)	q _{PEHDMax} = - 0.710 nC	α _{PEMax} = +5° α _{PEAvg} = 0° α _{PEMin} = - 5°
	q _{PPAvg} = + 0.399 nC	α _{PPMax} = +5° α _{PPAvg} = 0° α _{PPMin} = - 5°		q _{PEHDAvg} = - 0.475 nC	α _{PEMax} = +5° α _{PEAvg} = 0° α _{PEMin} = - 5°
	q _{PPMin} = + 0.199 nC	α _{PPMax} = +5° α _{PPAvg} = 0° α _{PPMin} = - 5°		q _{PEHDMIN} = - 0.237 nC	α _{PEMax} = +5° α _{PEAvg} = 0° α _{PEMin} = - 5°

Le mouvement d'une particule chargée dans le champ électrostatique E du séparateur en chute libre s'effectue sous l'action de la force gravitationnelle F_G , de la force du champ électrique F_E et de la force de frottement de l'air (force traînée) F_A , selon la théorie de Newton.

Equation:

$$m\vec{a} = \vec{F}_G + \vec{F}_E + \vec{F}_A \quad (\text{IV. 1})$$

Les amplitudes des forces en (IV.1) sont données par les éléments suivants :

$$F_G = mg \quad (IV.2)$$

$$F_E = qE \quad (IV.3)$$

$$F_A = \frac{1}{2} C_D \rho_A S v^2 \quad (IV.4)$$

$$E = -grad(V) \quad (IV.5)$$

Où g est l'accélération de la gravité, q est la charge des particules, E est l'intensité du champ électrique, V est la tension appliquée, C_D est le coefficient de traînée, ρ_A est la densité de l'air, S est la surface projetée des particules dans la direction du mouvement et v est la vitesse des particules.

Ainsi, une particule chargée positive se déplace dans la direction du champ E , tandis qu'une particule chargée négativement se déplace en sens opposé. La trajectoire exacte dépend de la configuration du champ et des conditions initiales de la particule, telles que sa vitesse initiale et sa position.

Les paramètres d'entrée étaient les suivants : la tension ($V = \pm 30$ kV), la gravité ($g = 9,81$ m/s²), le coefficient de traînée ($C_D = 1.05$), la densité de l'air ($\rho_A = 1,22$ kg/m³) et la vitesse initiale ($v_0 = 1,1$ m/s). Lors du calcul de la force de frottement F_A , il s'est avéré que son ampleur ($F_A = 0.25 \cdot 10^{-5} v^2$ [N] to $1.02 \cdot 10^{-5} v^2$ [N]) est très faible et peut être négligée dans la simulation.

IV.4. Résultats et discussion

IV.4.1. Effet de la durée de triboélectrisation

L'effet de la durée de triboélectrisation fait référence à l'impact de la période pendant laquelle les particules sont soumises à une charge triboélectrique. La triboélectrisation implique le transfert de charge électrique entre des matériaux par contact frictionnel. La durée de ce processus est cruciale car elle détermine la mesure dans laquelle les particules acquièrent des charges électriques. Une durée optimale de triboélectrisation garantit que les particules atteignent leur charge potentielle maximale, améliorant ainsi l'efficacité de processus tels que la séparation électrostatique. Différents matériaux peuvent nécessiter des durées de triboélectrisation différentes pour atteindre leur niveau de charge idéal, en fonction de leurs propriétés physiques et chimiques uniques.

Les ratios charge/masse les plus élevés ont été obtenus pour les particules de PEHD (-7,62 nC/g) lorsque le temps de charge était $t = 1$ min, tandis que les ratios charge/masse les plus élevés ont été obtenus pour les particules de PP (6,41 nC/g) lorsque le temps de charge était $t = 5$ min (Figure IV-4), (Tableau IV-3). Cela peut s'expliquer par le fait que les particules de PEHD ont atteint la saturation lorsque la durée de charge était d'une minute, atteignant ainsi la charge électrique maximale. Après ce point, la charge électrique acquise diminue à mesure que la durée de charge augmente. En revanche, l'effet opposé a été observé pour les particules de PP: plus la durée de charge était longue, plus la charge électrique acquise était grande. Cela est probablement dû à l'augmentation de la probabilité de collision des particules de PP avec la paroi de l'appareil de charge, qui est fabriquée en matériau PP.

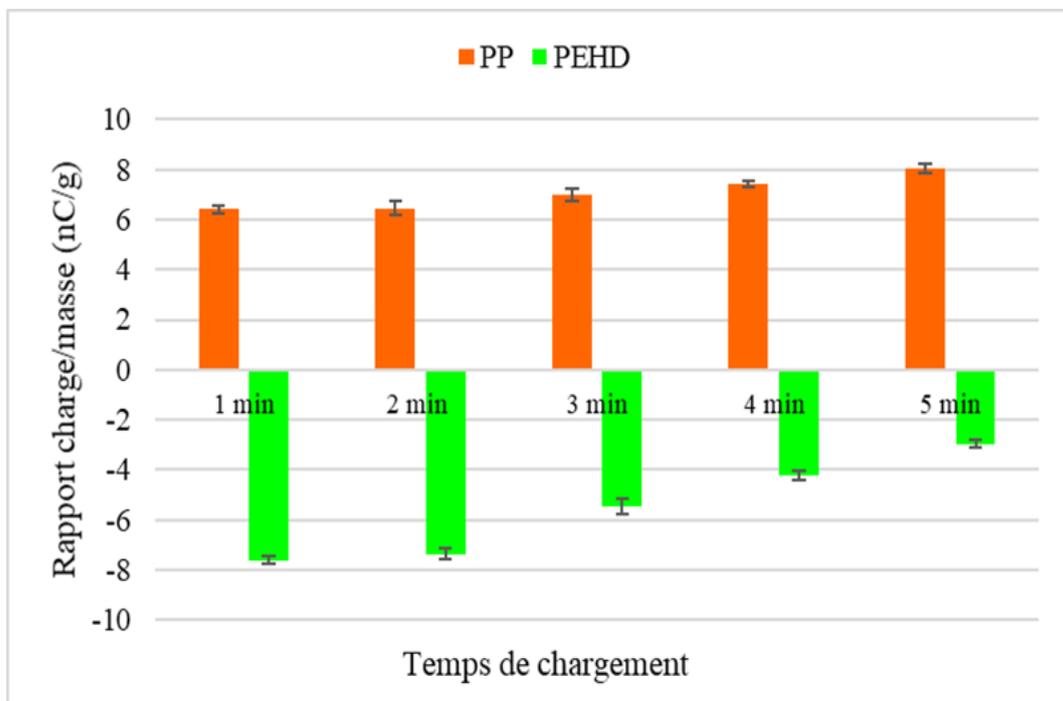


Figure IV- 4. Rapport charge/masse des particules de PP et de PEHD à différentes durées de triboélectrisation.

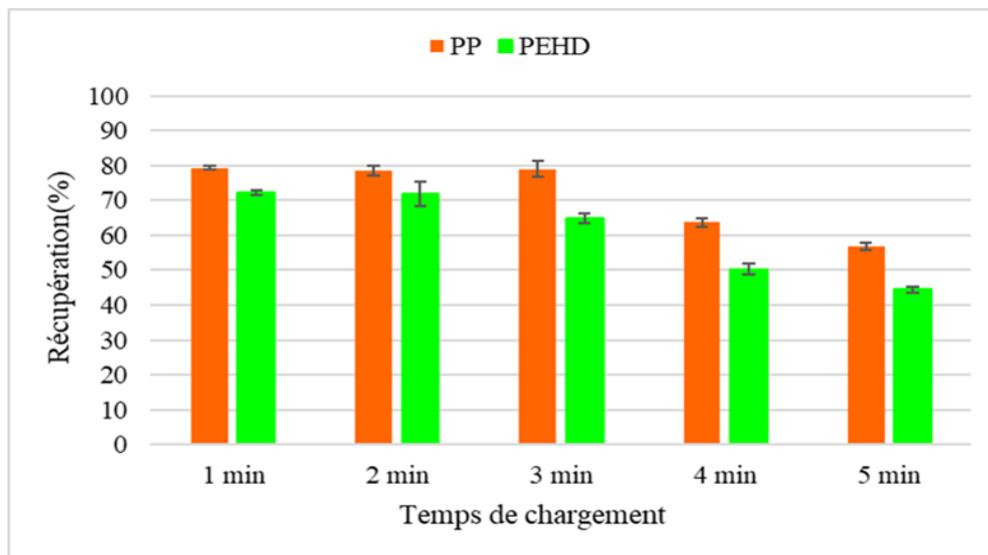
Tableau IV- 3. Charge massique du PP et de PEHD avec l'effet de temps.

Le temps	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
Charge massique de PVC (nC/g)	6,41	6,45	6,98	7,43	8,03
Charge massique de PEHD (nC/g)	-7,62	-7,36	-5,47	-4,24	-2,97

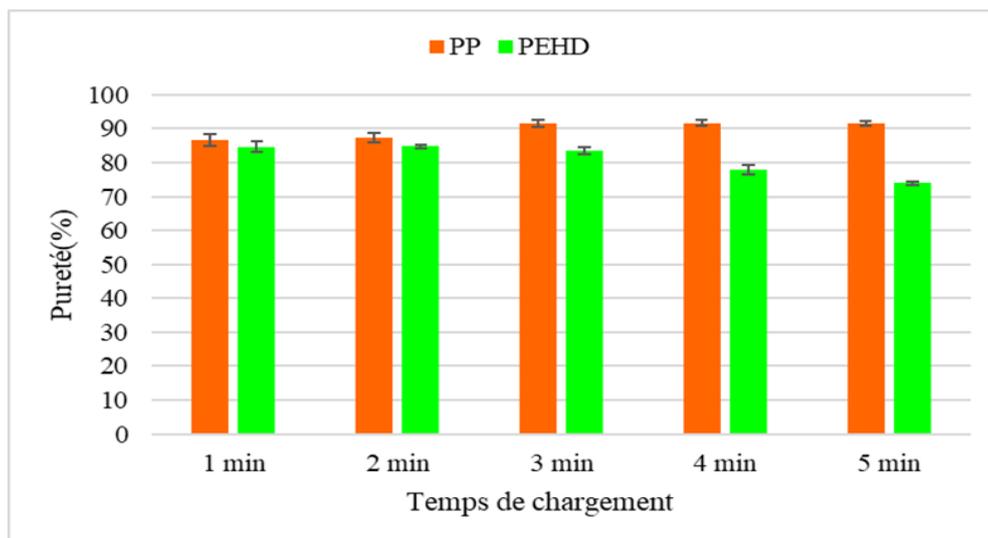
IV.4.2. Effet de la durée de triboélectrisation sur la séparation électrostatique

a) Séparateur standard

Les résultats des expériences de séparation électrostatique pour les particules de PP et de PEHD, présentés dans la Figure IV-5, démontrent l'effet de la durée de charge triboélectrique sur l'efficacité de la séparation électrostatique dans le séparateur standard. Les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque la durée de charge triboélectrique était d'une minute, avec un taux de récupération de 79,29 % pour le PP et de 72,14 % pour le PEHD, et une pureté de 86,65 % et 84,74 % respectivement.



(a)



(b)

Figure IV- 5. Taux de récupération (a) et pureté (b) des produits séparés de PP et de PEHD dans le séparateur standard.

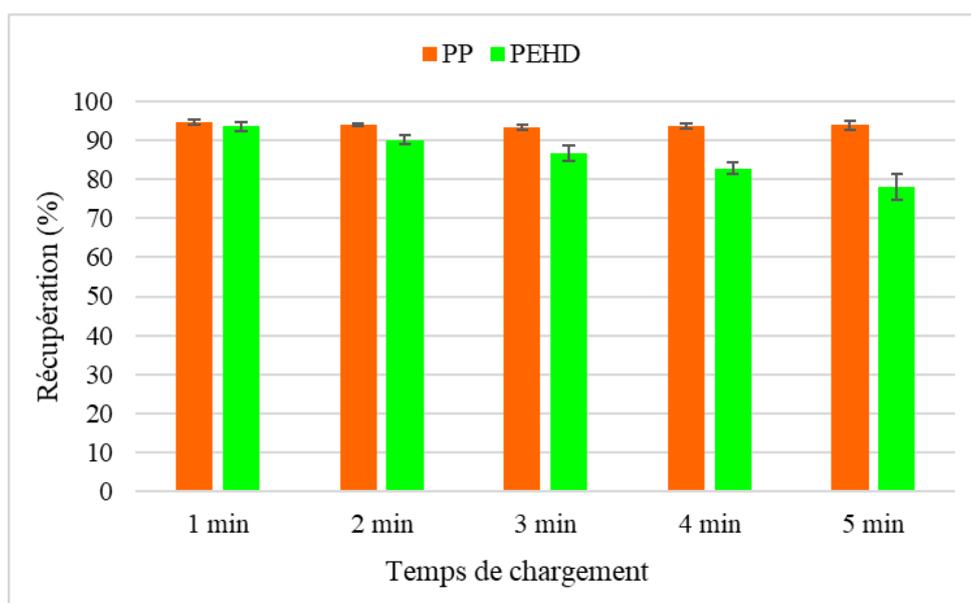
Les résultats présentés dans la Figure IV-5 peuvent être interprétés comme suit :

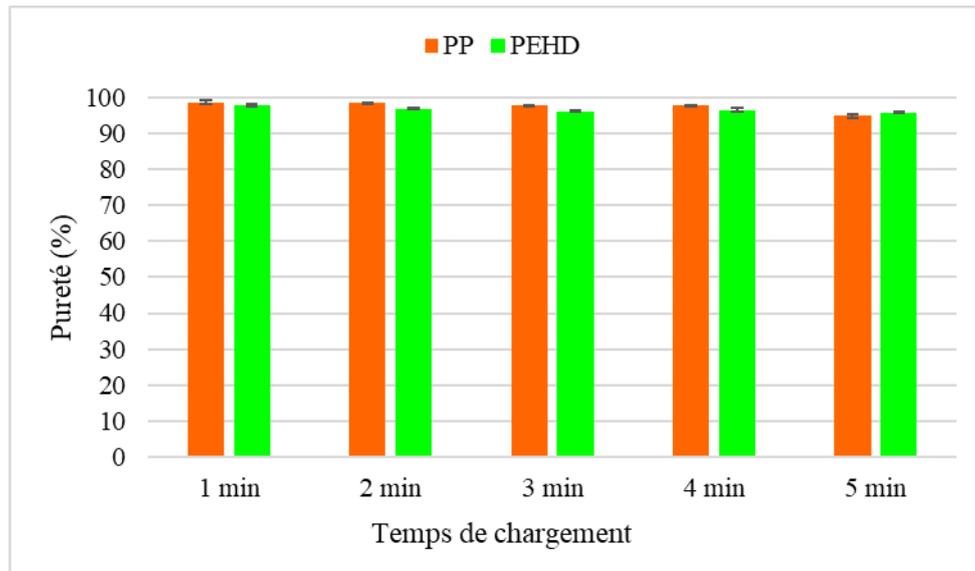
Au cours de la première et de la deuxième minute, les résultats de séparation électrostatique étaient relativement similaires. Cependant, de la troisième à la cinquième minute, on observe qu'à mesure que la durée de triboélectrisation augmente, le taux de récupération des particules de PEHD diminue. Cela est dû à la réduction de la charge électrique acquise par les particules de PEHD, les empêchant d'être suffisamment attirées par l'électrode positive, ce qui provoque leur chute dans le compartiment des particules mélangées.

D'autre part, le taux de récupération des particules de PP diminue également à mesure que la durée de triboélectrisation augmente. Cela s'explique par l'augmentation de la charge électrique acquise par les particules de PP, les amenant à entrer en collision avec l'électrode négative, ce qui provoque leur déviation et leur chute dans le compartiment des particules mélangées ou celui réservé aux particules de PEHD. Cela explique la diminution de la pureté des particules de PEHD.

b) Séparateur innovant

Les résultats des expériences de séparation électrostatique pour les particules de PP et de PEHD, présentés dans la Figure IV-6, démontrent l'effet de la durée de triboélectrisation sur l'efficacité de la séparation électrostatique dans le séparateur innovant. Les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque la durée de triboélectrisation était d'une minute, avec un taux de récupération de 94,5 % pour le PP et de 93,46 % pour le PEHD, et une pureté de 98,75 % et 98,01 % respectivement.





(b)

Figure IV- 6. Taux de récupération (a) et pureté (b) des produits séparés de PP et de PEHD dans le séparateur innovant

Cela peut s'expliquer par le fait que les particules de PP et de PEHD n'entrent pas en collision avec les électrodes en raison de leur petite taille, car elles sont déviées et tombent dans leur propre compartiment. Après la troisième minute, on observe que le taux de récupération des particules de PEHD diminue en raison de la baisse de la charge électrique acquise par les particules de PEHD, ce qui les fait tomber librement dans le compartiment des particules mélangées.

IV.4.3. Résultats de l'étude comparative

Les résultats des expériences de séparation électrostatique, présentés dans la Figure IV-7, montrent la différence de récupération et de pureté entre le séparateur innovant et standard. Cette étude a été réalisée sur une masse de 50 g d'un mélange granulaire, où le mélange a été chargé pendant 1-minute et le séparateur ont été alimentés à (± 30 kV max).

Le pourcentage de récupération était de 94,5 % pour le PP et de 93,46 % pour le PEHD, avec une pureté de 98,75 % et 98,01 % respectivement pour le séparateur innovant, tandis que 79,29 % de PP et 72,14 % de PEHD ont été récupérés, avec une pureté de 86,65 % et 84,74 % respectivement pour le séparateur standard.

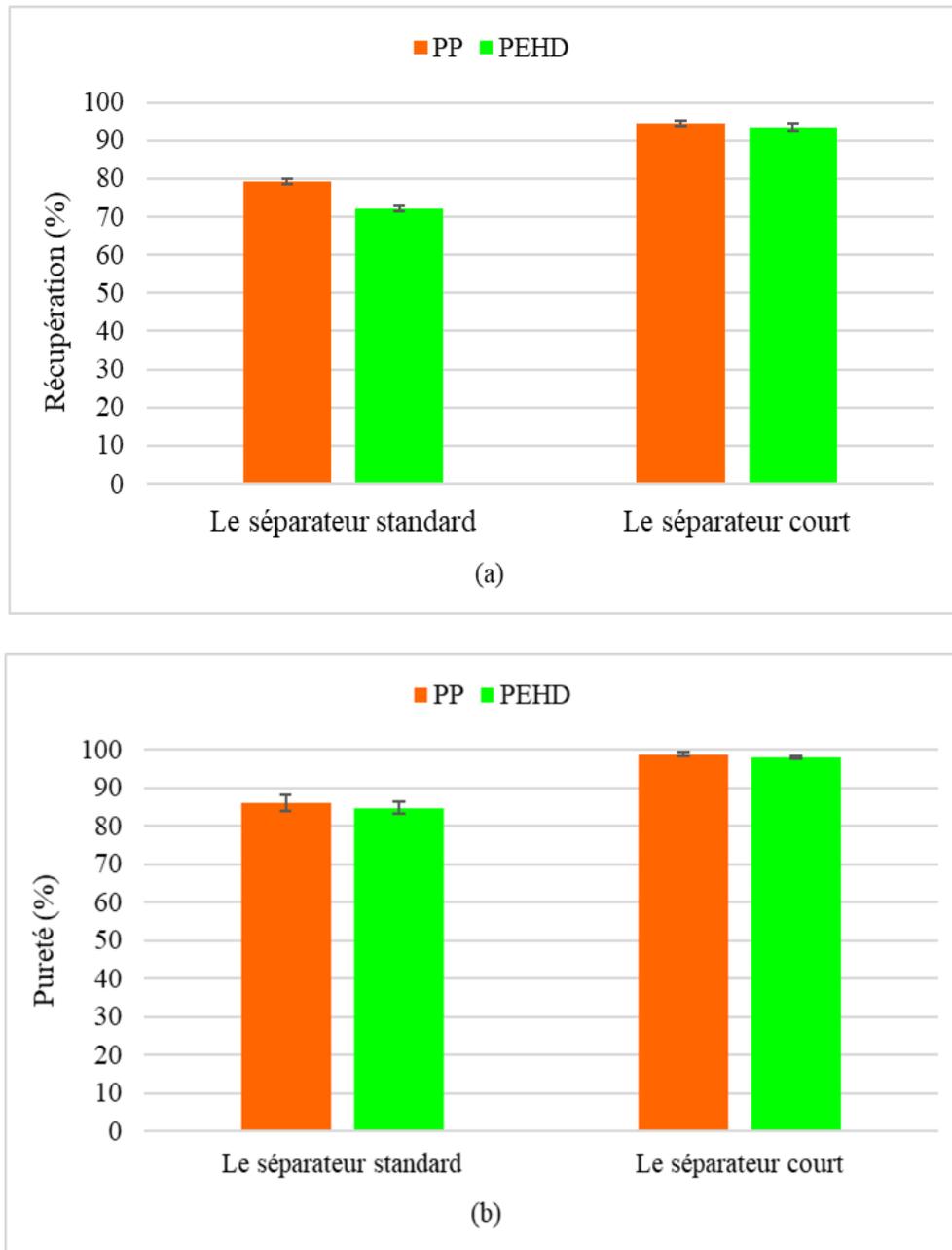


Figure IV- 7. Taux de récupération (a) et pureté (b) des produits séparés de PP et de PEHD dans le séparateur standard et dans le séparateur innovant.

Les meilleurs résultats ont été obtenus car le séparateur innovant empêche les collisions entre les particules chargées et les électrodes, tandis que le séparateur standard a enregistré de nombreuses collisions entre les particules chargées et les électrodes, ce qui a affecté l'efficacité de la séparation.

IV.4.4. Résultats de la simulation

IV.4.4.1. Résultats de la simulation du potentiel électrique et du champ électrique

En utilisant le logiciel Comsol Multiphysics, nous avons effectué une simulation pour analyser la distribution du potentiel électrique et du champ électrique dans un séparateur à chute libre standard et dans le séparateur à chute libre innovant, afin de comparer leurs différences.

Les Figures IV-8 et 9 présentent respectivement la distribution du potentiel électrique et les lignes équipotentielles.

La Figure IV-10 illustre la distribution du champ électrique dans le séparateur à chute libre standard et dans le séparateur à chute libre innovant.

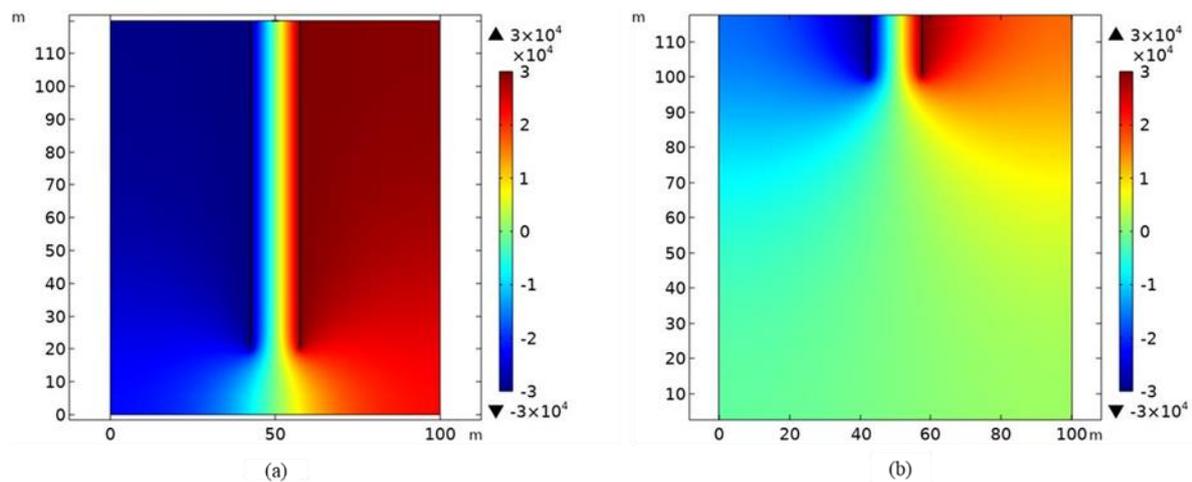


Figure IV- 8. Distribution du potentiel électrique dans un séparateur à chute libre standard (a) et dans un séparateur à chute libre modifié (b).

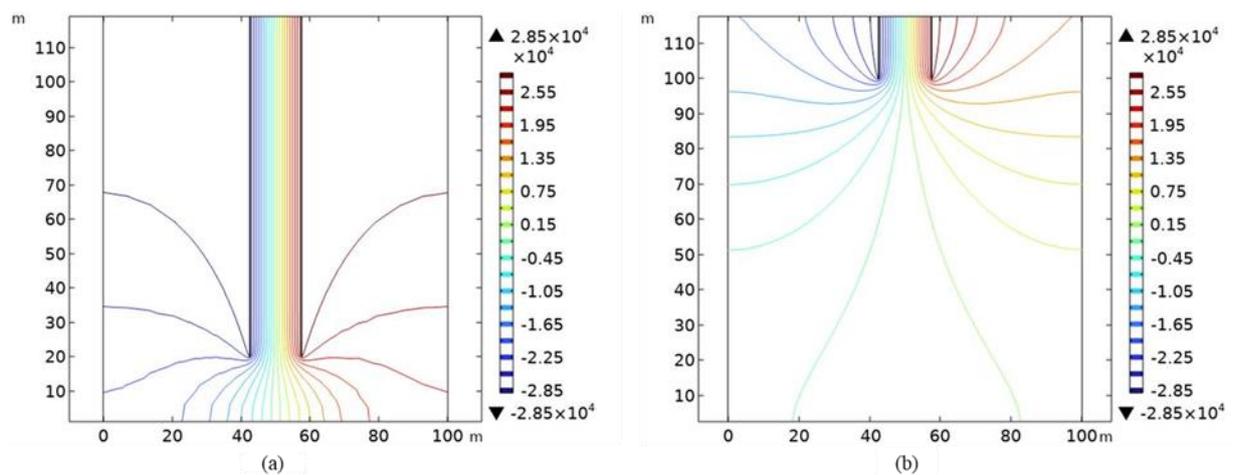


Figure IV- 9. Distribution des lignes équipotentielles dans un séparateur à chute libre standard (a) et dans un séparateur à chute libre modifié (b).

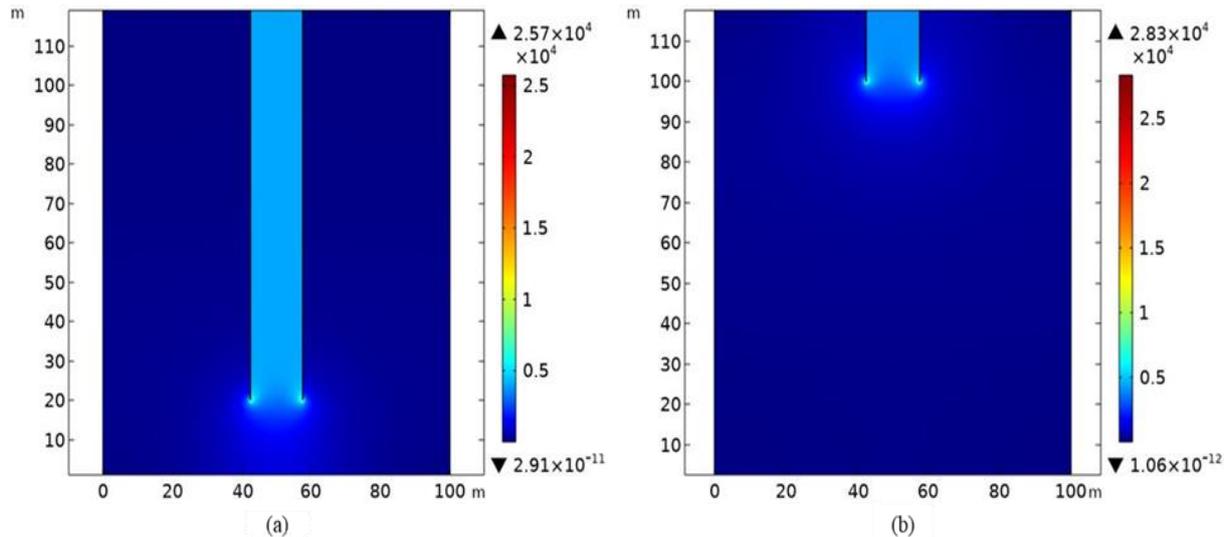


Figure IV- 10. Distribution du champ électrique dans un séparateur à chute libre standard (a) et dans un séparateur à chute libre modifié (b).

IV.4.4.2. Résultats de la simulation des trajectoires des particules

Pour démontrer l'efficacité du séparateur innovant, les trajectoires des particules ont été simulées selon les mêmes configurations que celles utilisées lors des expériences. La Figure IV-11 illustre les simulations de trajectoires pour le séparateur standard et le séparateur innovant. La simulation a impliqué vingt-sept (27) particules, représentant les valeurs maximales, minimales et moyennes de la charge des particules, de la masse des particules et de l'angle d'inclinaison, comme expliqué dans la section Matériaux et Méthodes.

Les résultats de la simulation de séparation électrostatique, présentés dans la Figure IV-12, mettent en évidence les différences de récupération et de pureté entre le séparateur nouveau et standard. Le pourcentage de récupération était de 88,88 % de PP et 88,88 % de PEHD, et la pureté était de 100 % et 100 % respectivement pour le séparateur innovant tandis que 33,33 % de PP et 33,33 % de PEHD ont été récupérés, et la pureté était de 100 % et 100 % respectivement pour le séparateur standard.

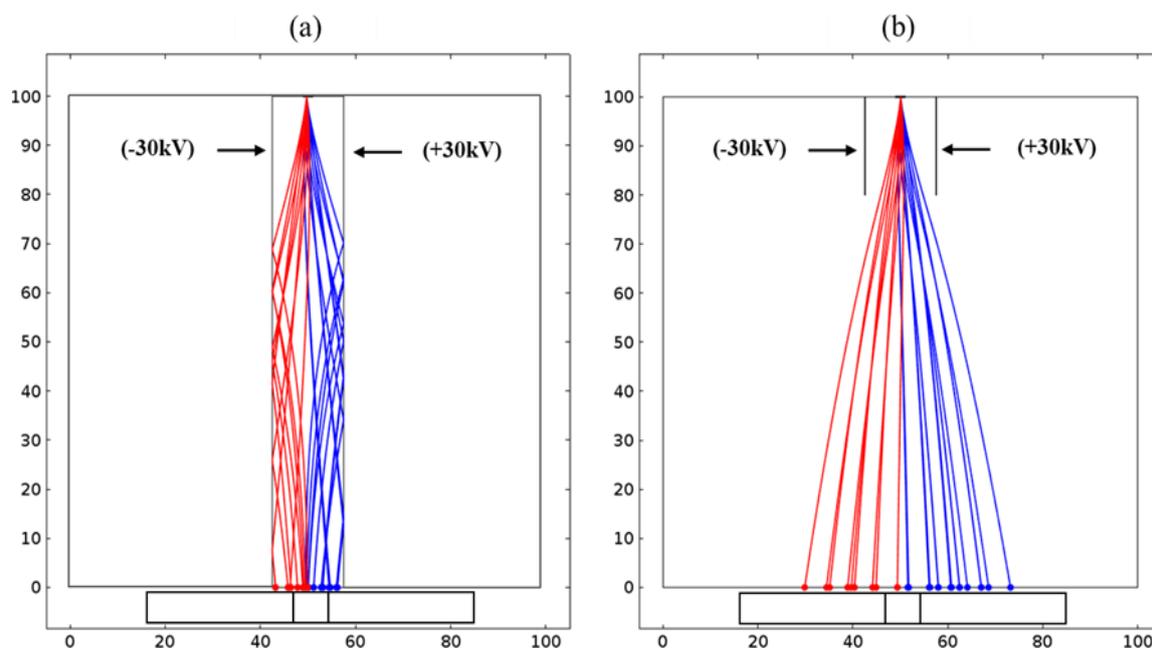
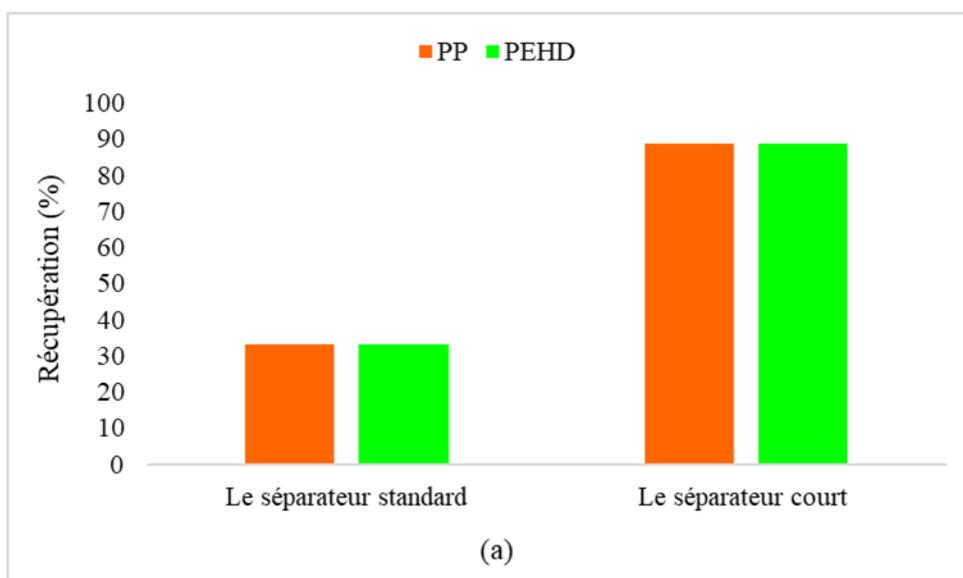


Figure IV- 11. Résultats de la simulation des trajectoires des particules. (a) Trajectoires des particules de PP et de PEHD dans le séparateur à chute libre standard ; (b) Trajectoires des particules de PP et de PEHD dans le séparateur à chute libre innovant.



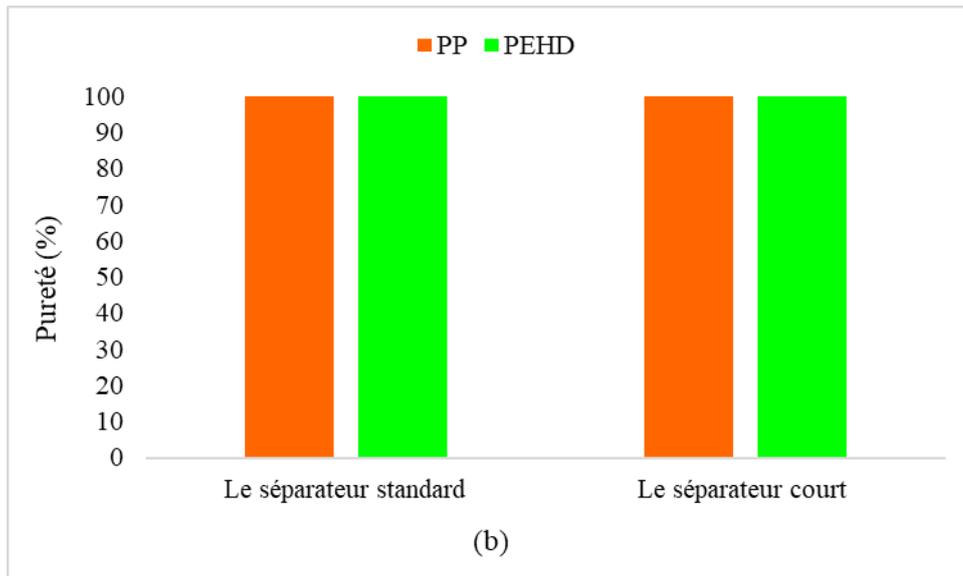


Figure IV-12. Récupération (a) et pureté (b) du produit séparé PP et PEHD dans le séparateur standard et dans le séparateur innovant.

Les résultats de la simulation ont démontré la supériorité du séparateur innovant par rapport au séparateur standard, s'alignant étroitement avec les résultats expérimentaux. Dans le séparateur innovant, caractérisé par des électrodes courtes, aucune collision n'est survenue entre les électrodes et les particules chargées, permettant ainsi aux particules de tomber librement et à chaque type d'atteindre son compartiment désigné.

En revanche, dans le séparateur standard avec des électrodes longues, de nombreuses collisions se sont produites entre les électrodes et les particules chargées, entraînant une déviation des particules et les faisant tomber dans des compartiments incorrects. Ces résultats soulignent clairement l'efficacité du séparateur innovant dans le guidage des particules avec une plus grande précision par rapport au séparateur standard.

IV.4.5. Effet de la tension

Les résultats des expériences de séparation électrostatique (Figure IV-13) montrent l'effet de la haute tension appliquée lors de la séparation électrostatique dans le séparateur innovant. Dans toutes les expériences, le mélange a été chargé pendant une minute dans les mêmes conditions atmosphériques. Les résultats indiquent qu'à mesure que la tension appliquée diminue, l'efficacité de la séparation électrostatique diminue également. Cela est dû à la réduction de la force électrique responsable de la déviation des particules chargées, les laissant tomber au centre sous l'effet de la gravité. Les meilleurs résultats ont été obtenus à une tension

de 60 kV (+/- 30 kV). À partir de 50 grammes de granulés mélangés, 93,46 % de PEHD et 94,5 % de PP ont été récupérés, avec une pureté respective de 98,01 % et 98,75 %.

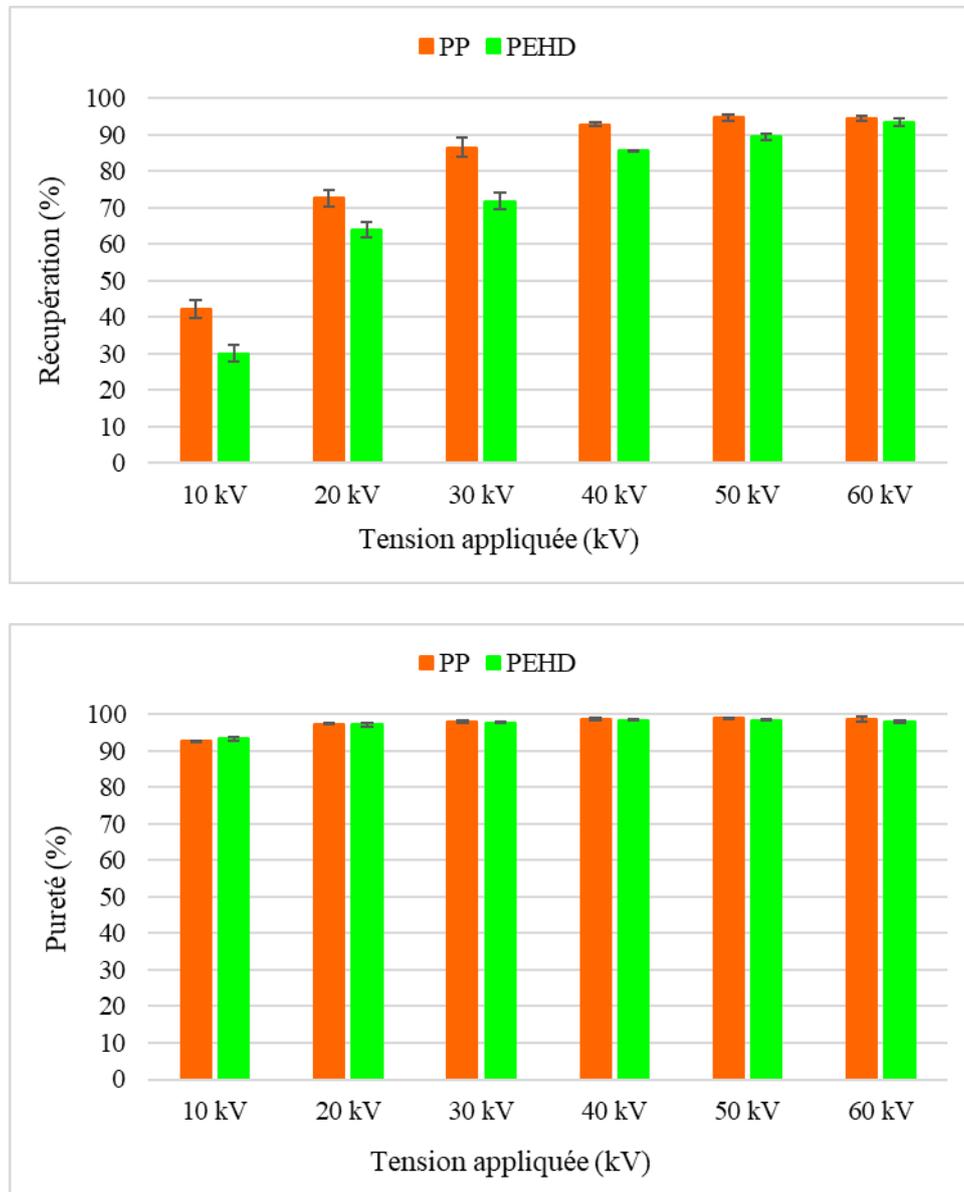


Figure IV- 13. Effet de la haute tension appliquée sur la séparation électrostatique dans le séparateur à chute libre innovant. (a) Taux de récupération ; (b) Taux de pureté.

IV.5. Conclusions

Cette étude démontre l'efficacité d'un séparateur électrostatique à chute libre innovant pour améliorer la séparation des granules de polyéthylène haute densité (PEHD) et de polypropylène (PP) des déchets d'équipements électriques et électroniques. En utilisant des électrodes courtes dans le séparateur innovant, la collision entre les particules et les électrodes a été minimisée, ce qui a conduit à des taux de récupération et des puretés plus élevés par rapport à un séparateur standard. Plus précisément. Ces résultats ont été étayés à la fois par des résultats expérimentaux et des simulations de trajectoires de particules, soulignant le potentiel d'application industrielle de cette technologie de séparation avancée.

CONCLUSION GENERALE

Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) regroupent une grande diversité de matériaux plastiques, dont le recyclage et la valorisation nécessitent le développement de technologies de séparation électrostatique innovantes. Les études montrent que l'optimisation des dispositifs, tels que les séparateurs à chute libre modifiés ou les systèmes de chargement triboélectrique à lit fluidisé, permet d'améliorer significativement les performances de récupération et de pureté des matériaux séparés. Ces avancées reposent sur des innovations techniques, telles que l'ajustement des configurations d'électrodes, le choix des matériaux de parois des dispositifs, et le contrôle des variables influençant la charge des particules.

Les études présentées montrent des avancées significatives dans le domaine de la séparation électrostatique des matériaux plastiques granulaires. Tout d'abord, le dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé multi-cylindres s'est révélé efficace pour charger électriquement des granulaires de PVC et ABS, avec des résultats optimaux obtenus en utilisant une paroi de PP et un temps de chargement de 3 minutes. La pureté et la récupération maximales ont été atteintes sous une tension de 30 kV.

Ensuite, la modification du séparateur à chute libre pour le traitement des flocons de PE et PP a permis d'améliorer considérablement la pureté de la séparation. Les ajustements, tels que le rapprochement des matériaux de l'électrode opposée et l'inclinaison des électrodes, ont conduit à des résultats plus concentrés et efficaces que la configuration standard, tout en réduisant l'énergie requise.

Enfin, une version améliorée du séparateur électrostatique à chute libre a démontré une grande efficacité pour la séparation des granulés de PEHD et PP, minimisant les collisions avec les électrodes grâce à l'utilisation d'électrodes courtes. Les résultats expérimentaux et les simulations ont confirmé les bénéfices de cette approche, ouvrant la voie à son application industrielle, notamment dans le traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques. Ces avancées témoignent du potentiel de ces technologies pour améliorer le recyclage des plastiques.

Cependant, certains défis persistent, notamment liés à la diversité des particules en termes de taille, forme et humidité, rendant leur application à grande échelle plus complexe. Pour répondre à ces enjeux, des dispositifs multifonctions et adaptés aux conditions industrielles sont

Conclusion générale

en développement, visant à améliorer le tri des déchets, en particulier ceux issus des équipements électriques et électroniques, tout en contribuant à une gestion plus durable des ressources.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. F. Oliveira Neto, L. A. Candido, A. B. de Freitas Dourado, S. M. Santos, and L. Florencio, “Waste of electrical and electronic equipment management from the perspective of a circular economy: A review,” *Waste Management & Research*, vol. 41, no. 4, pp. 760–780, 2023.
- [2] C. Jia, P. Das, I. Kim, Y. J. Yoon, C. Y. Tay, and J. M. Lee, “Applications, treatments, and reuse of plastics from electrical and electronic equipment,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 102, pp. 84–99, 2022.
- [3] T. Huth-Fehre, R. Feldhoff, T. Kantimm, L. Quick, F. Winter, K. Cammann, *et al.*, “NIR-Remote sensing and artificial neural networks for rapid identification of post-consumer plastics,” *Journal of Molecular Structure*, vol. 348, pp. 143–146, 1995.
- [4] D. M. Scott, “A two-colour near-infrared sensor for sorting recycled plastic waste,” *Measurement Science and Technology*, vol. 6, no. 2, p. 156, 1995.
- [5] A. Sobhy, “Recent trends in mineral processing based on density and particle size—A review,” *International Journal of Materials Technology and Innovation*, vol. 2, no. 2, pp. 13–30, 2022.
- [6] P. Bode, T. D. H. McGrath, and J. J. Eksteen, “Characterising the effect of different modes of particle breakage on coarse gangue rejection for an orogenic gold ore,” *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, vol. 129, no. 1, pp. 35–48, 2020.
- [7] M. R. Gent, M. Menendez, J. Toraño, D. Isidro, and S. Torno, “Cylinder cyclone (LARCOCODEMS) density media separation of plastic wastes,” *Waste Management*, vol. 29, no. 6, pp. 1819–1827, 2009.
- [8] G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki, and T. Fujita, “Separation performance of PVC and PP plastic mixture using air table,” *Physical Separation in Science and Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 71–86, 2003.
- [9] F. Burat, A. Güney, and M. O. Kangal, “Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method,” *Waste Management*, vol. 29, no. 6, pp. 1807–1813, 2009.
- [10] H. Shent, R. J. Pugh, and E. Forssberg, “A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 25, no. 2, pp. 85–109, 1999.
- [11] N. Charpentier, *Recyclage de déchets électroniques : tri et réutilisation*. Thèse de doctorat, spécialité Matériaux, Université Paris-Saclay, France, 2024. [En ligne]. Disponible: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-04511374>
- [12] R. Taurino, P. Pozzi, and T. Zanasi, “Facile characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) for mechanical recycling,” *Waste Management*, vol. 30, no. 12, pp. 2601–2607, 2010.
- [13] Les déchets plastiques, 6 avr. 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/economie/les-dechets-ressources/article/les-dechets-plastiques>. [Consulté le: 28-sept-2024].
- [14] L. Dascalescu, T. Zeghloul, et A. Iuga, « Electrostatic separation of metals and plastics from waste electrical and electronic equipment », dans *WEEE Recycling*, Elsevier, 2016, pp. 75–106.
- [15] I. I. Inculet, G. S. P. Castle, et J. D. Brown, « Electrostatic separation of plastics for recycling », *Particulate Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 91–100, 1998.
- [16] S. Nicoara, L. Calin, A. Iuga, et N. Serban, « Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose », *Environment and Progress*, vol. 6, pp. 341–346, 2006.
- [17] G. S. P. Castle, « Contact charging between insulators », *Journal of Electrostatics*, vol. 40, pp. 13–20, 1997.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [18] A. Bouargoub, M. A. Aminallah, S. Ouarzine, M. F. Bekkara, et Y. Benmimou, « Comparative experimental study of triboelectric charge of two types of polymer granules by different walls fluidized bed system for the electrostatic separation », in *Proc. 12th National Conference on High Voltage (CNHT 2022)*, Djilali Liabès University, Sidi Bel-Abbès, Algeria, Oct. 4–6, 2022.
- [19] U. Lesprit, *Étude expérimentale du chargement triboélectrique d'une bille de verre en interaction avec des matériaux polymères*, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2020.
- [20] J. S. Chang, A. J. Kelly, et J. M. Crowley, *Handbook of Electrostatic Processes*, CRC Press, 1995.
- [21] Y. Higashiyama et K. Asano, « Recent progress in electrostatic separation technology », *Particulate Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 77–90, 1998.
- [22] H. G. Zhu, H. Q. Tang, Y. Q. Cheng, Z. G. Li, et L. T. Tong, « Electrostatic separation technology for obtaining plant protein concentrates: A review », *Trends in Food Science & Technology*, vol. 113, pp. 66–76, 2021.
- [23] D. K. Yanar et B. A. Kwetkus, « Electrostatic separation of polymer powders », *Journal of Electrostatics*, vol. 35, no. 2–3, pp. 257–266, 1995.
- [24] M. F. Boukhoulda, M. Miloudi, K. Medles, M. Rezoug, A. Tilmatine, et L. Dascalescu, « Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 6, pp. 2375–2381, 2013.
- [25] K. Enders, A. S. Tagg, et M. Labrenz, « Evaluation of electrostatic separation of microplastics from mineral-rich environmental samples », *Frontiers in Environmental Science*, vol. 8, p. 112, 2020.
- [26] I. E. Achouri, T. Zegloul, K. Medles, G. Richard, et L. Dascalescu, « Tribo-electrostatic separation of two or more plastics contained in granular mixtures originating from WEEE », dans *Proc. 2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 2021, pp. 1–6.
- [27] A. Iuga, S. Vlad, M. Mihailescu, et L. Dascalescu, « A laboratory plate/screen-type electrostatic separator for granular mixtures: Design, engineering, and application », *Particulate Science and Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 275–283, 2004.
- [28] A. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, R. Morar, R. Beleca, S. Das, et L. Dascalescu, « Removal of metallic particles from acrylonitrile butadiene styrene wastes using electrostatic separation methods », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 1, pp. 322–330, 2010.
- [29] L. Brands, P. M. Beier, et I. Stahl, « Electrostatic separation », dans *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2000.
- [30] H. R. Manouchehri, K. H. Rao, et E. Forssberg, « Review of electrical separation methods: Part 2: Practical considerations », *Minerals & Metallurgical Processing*, vol. 17, no. 3, pp. 139–166, 2000.
- [31] L. Dascalescu, A. Urs, L. M. Dumitran, et A. Samuila, « Charging of one or several cylindrical particles by monopolar ions in electric fields », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 2, pp. 362–367, 2003.
- [32] A. Urs, A. Samuila, A. Mihalciou, et L. Dascalescu, « Charging and discharging of insulating particles on the surface of a grounded electrode », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 2, pp. 437–441, 2004.
- [33] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, M. Huzau, et L. Dascalescu, « Characterization of dual corona-electrostatic electrodes for electrostatic processes applications », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 3, pp. 692–698, 2008.
- [34] D. F. Colas, A. Ferret, D. Z. Pai, D. A. Lacoste, and C. O. Laux, "Ionic wind generation by a wire-cylinder-plate corona discharge in air at atmospheric pressure," *Journal of Applied Physics*, vol. 108, no. 10, 2010.
- [35] S. Vlad, A. Iuga, and L. Dascalescu, "Modelling of conducting particle behaviour in plate-type electrostatic separators," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 33, no. 2, p. 127, 2000.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [36] L. Dascalescu, C. Dragan, M. Bilici, R. Beleca, Y. Hemery, and X. Rouau, "Electrostatic basis for separation of wheat bran tissues," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 2, pp. 659–665, 2010.
- [37] L. H. Lee, "Dual mechanism for metal-polymer contact electrification," *Journal of Electrostatics*, vol. 32, no. 1, pp. 1–29, 1994.
- [38] L. Dascalescu, M. Bilici, C. Dragan, A. Samuila, Y. Ramdani, and A. Tilmatine, "Robust design and capability evaluation of a tribo-aerodynamic charging process for fine particles," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 3, pp. 1086–1092, 2011.
- [39] D. K. Davies, "Charge generation on dielectric surfaces," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 2, no. 11, p. 1533, 1969.
- [40] W. D. Greason and I. I. Inculet, "Insulator work function determination from contact charging with metals," in *Conf. Rec. 1975 IEEE-IAS Annual Meeting*, 1975, pp. 428–435.
- [41] G. S. P. Castle, "Contact charging between insulators," *Journal of Electrostatics*, vol. 40, pp. 13–20, 1997.
- [42] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, and L. Dascalescu, "Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device," *Journal of Electrostatics*, vol. 63, no. 6–10, pp. 937–942, 2005.
- [43] 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 Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 4, pp. 1558–1563, 2010.
- [44] G. Buda, A. Samuila, S. Atroune, M. Bilici, and L. Dascalescu, "Set point identification of a tribocharging process for mixed granular solids," *Journal of Electrostatics*, vol. 71, no. 3, pp. 407–412, 2013.
- [45] L. H. Lee, "Dual mechanism for metal-polymer contact electrification," *Journal of Electrostatics*, vol. 32, no. 1, pp. 1–29, 1994.
- [46] S. Nicoara, L. Calin, A. Iuga, and N. Serban, "Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose," *Environment and Progress*, vol. 6, pp. 341–346, 2006.
- [47] E. G. Kelly and D. J. Spottiswood, "The theory of electrostatic separations: A review Part I. Fundamentals," *Minerals Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 33–46, 1989.
- [48] J. Wei and M. J. Realff, "Design and optimization of free-fall electrostatic separators for plastics recycling," *AIChE Journal*, vol. 49, no. 12, pp. 3138–3149, 2003.
- [49] V. Gente, F. La Marca, F. Lucci, and P. Massacci, "Electrical separation of plastics coming from special waste," *Waste Management*, vol. 23, no. 10, pp. 951–958, 2003.
- [50] R. D. Pascoe and B. O'Connell, "Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation," *Minerals Engineering*, vol. 16, no. 11, pp. 1205–1212, 2003.
- [51] C. H. Park, H. S. Jeon, B. G. Cho, and J. K. Park, "Triboelectrostatic separation of covering plastics in chopped waste electric wire," *Polymer Engineering & Science*, vol. 47, no. 12, pp. 1975–1982, 2007.
- [52] A. F. Diaz and R. M. Felix-Navarro, "A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties," *Journal of Electrostatics*, vol. 62, no. 4, pp. 277–290, 2004.
- [53] C. H. Park, J. K. Park, H. S. Jeon, and B. C. Chun, "Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger," *Journal of Electrostatics*, vol. 66, no. 11–12, pp. 578–583, 2008.
- [54] F. Sanford, "On the Specific Inductive Capacity of Metals," *Physical Review*, vol. 12, no. 2, p. 130, 1918.
- [55] G. Sutra, "La triboélectricité," *Journal de Physique et le Radium*, vol. 11, no. 8–9, pp. S1–S6, 1950.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [56] H. F. Richards, "The contact electricity of solid dielectrics," *Physical Review*, vol. 22, no. 2, p. 122, 1923.
- [57] P. E. Shaw, "Experiments on tribo-electricity. I.—The tribo-electric series," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, vol. 94, no. 656, pp. 16–33, 1917.
- [58] B. W. Lee and D. E. Orr, *The Triboelectric Series*, Alphaslab Inc., 2019.
- [59] F. Galembeck, T. A. Burgo, L. B. Balestrin, R. F. Gouveia, C. A. Silva, and A. Galembeck, "Friction, tribochemistry and triboelectricity: recent progress and perspectives," *RSC Advances*, vol. 4, no. 109, pp. 64280–64298, 2014.
- [60] L. S. McCarty, A. Winkleman, and G. M. Whitesides, "Ionic electrets: electrostatic charging of surfaces by transferring mobile ions upon contact," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 129, no. 13, pp. 4075–4088, 2007.
- [61] C. Liu and A. J. Bard, "Electrostatic electrochemistry at insulators," *Nature Materials*, vol. 7, no. 6, pp. 505–509, 2008.
- [62] D. J. Lacks and R. M. Sankaran, "Contact electrification of insulating materials," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 44, no. 45, p. 453001, 2011.
- [63] J. Lowell and W. S. Truscott, "Triboelectrification of identical insulators. II. Theory and further experiments," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 19, no. 7, p. 1281, 1986.
- [64] J. Guardiola, V. Rojo, and G. Ramos, "Influence of particle size, fluidization velocity and relative humidity on fluidized bed electrostatics," *Journal of Electrostatics*, vol. 37, no. 1–2, pp. 1–20, 1996.
- [65] S. W. Thomas III, S. J. Vella, G. K. Kaufman, and G. M. Whitesides, "Patterns of electrostatic charge and discharge in contact electrification," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47, no. 35, pp. 6654–6656, 2008.
- [66] L. S. McCarty and G. M. Whitesides, "Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: contact electrification of ionic electrets," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47, no. 12, pp. 2188–2207, 2008.
- [67] A. F. Diaz and J. Guay, "Contact charging of organic materials: Ion vs. electron transfer," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 37, no. 2, pp. 249–260, 1993.
- [68] A. F. Diaz and D. Fenzel-Alexander, "An ion transfer model for contact charging," *Langmuir*, vol. 9, no. 4, pp. 1009–1015, 1993.
- [69] L. H. Lee, "Dual mechanism for metal-polymer contact electrification," *Journal of Electrostatics*, vol. 32, no. 1, pp. 1–29, 1994.
- [70] M. D. Hogue, C. R. Buhler, C. I. Calle, T. Matsuyama, W. Luo, and E. E. Groop, "Insulator–insulator contact charging and its relationship to atmospheric pressure," *Journal of Electrostatics*, vol. 61, no. 3–4, pp. 259–268, 2004.
- [71] Z. Gu, W. Wei, J. Su, and C. W. Yu, "The role of water content in triboelectric charging of wind-blown sand," *Scientific Reports*, vol. 3, no. 1, pp. 1–6, 2013.
- [72] I. E. Achouri, Chargement triboélectrique et séparation électrostatique des mélanges de matériaux plastiques granulaires provenant des déchets industriels. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2022. [En ligne]. Disponible: <https://theses.hal.science/tel-04016609>
- [73] B. Baytekin, H. T. Baytekin, and B. A. Grzybowski, "What really drives chemical reactions on contact charged surfaces," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 134, no. 17, pp. 7223–7226, 2012.
- [74] H. T. Baytekin, B. Baytekin, J. T. Incorvati, and B. A. Grzybowski, "Material transfer and polarity reversal in contact charging," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 51, no. 20, pp. 4843–4847, 2012.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [75] L. B. da Silveira Balestrin, D. Del Duque, D. S. da Silva, and F. Galembeck, “Triboelectricity in insulating polymers: evidence for a mechanochemical mechanism,” *Faraday Discussions*, vol. 170, pp. 369–383, 2014.
- [76] W. R. Salaneck, A. Paton, and D. T. Clark, “Double mass transfer during polymer-polymer contacts,” *Journal of Applied Physics*, vol. 47, no. 1, pp. 144–147, 1976.
- [77] R. K. Pandey, H. Kakehashi, H. Nakanishi, and S. Soh, “Correlating material transfer and charge transfer in contact electrification,” *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 122, no. 28, pp. 16154–16160, 2018.
- [78] E. Nemeth, V. Albrecht, and G. Schubert, “Polymer tribo-electric charging: Dependence on thermodynamic surface properties and relative humidity,” *Journal of Electrostatics*, vol. 3, p. 16, 2003.
- [79] M. Ando and J. Sukumaran, “Effect on friction for different parameters in roll–slip of polyamide–steel nonconformal contacts,” *Tribology Transactions*, vol. 55, no. 1, pp. 109–116, 2012.
- [80] A. C. Rose-Innes and K. P. Homewood, “An accumulation of contact charge on insulators repeatedly touched by metals,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 15, no. 2, p. 2283, 1982.
- [81] J. W. Kwek *et al.*, “High speed imaging with electrostatic charge monitoring to track powder deagglomeration upon impact,” *Journal of Aerosol Science*, vol. 65, pp. 77–87, 2013.
- [82] S. Karner, E. M. Littringer, and N. A. Urbanetz, “Triboelectrics: The influence of particle surface roughness and shape on charge acquisition during aerosolization and the DPI performance,” *Powder Technology*, vol. 262, pp. 22–29, 2014.
- [83] S. Naik, R. Mukherjee, and B. Chaudhuri, “Triboelectrification: A review of experimental and mechanistic modeling approaches with a special focus on pharmaceutical powders,” *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 510, no. 1, pp. 375–385, 2016.
- [84] M. B. Neagoe, Y. E. Prawatya, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, “Influence of surface roughness on the tribo-electric process for a sliding contact between polymeric plate materials,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 174, no. 1, p. 012003, IOP Publishing, 2017. doi: 10.1088/1757-899X/174/1/012003.
- [85] A. E. Wang *et al.*, “Dependence of triboelectric charging behavior on material microstructure,” *Physical Review Materials*, vol. 1, no. 3, p. 035605, 2017.
- [86] Y. G. Chung and D. J. Lacks, “Atomic mobility in strained glassy polymers: The role of fold catastrophes on the potential energy surface,” *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. 50, no. 24, pp. 1733–1739, 2012.
- [87] V. L. Popov, *Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-10803-7.
- [88] N. K. K. Myshkin, M. I. I. Petrokovets, and A. V. V. Kovalev, “Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer,” *Tribology International*, vol. 38, pp. 910–921, 2005. doi: 10.1016/j.triboint.2005.07.016.
- [89] K. P. Homewood and A. C. Rose-Innes, “The Effect of Contact Time on the Electrification of Polymer by Metals,” *Inst. Phys. Conf. Ser.*, no. 48, 1979.
- [90] K. Shooter and D. Tabor, “The frictional properties of plastics,” *Proc. R. Soc.*, vol. 65, p. 661, 1952.
- [91] W. D. Greason, “Investigation of a test methodology for triboelectrification,” *Journal of Electrostatics*, vol. 49, no. 3–4, pp. 245–256, 2000.
- [92] S. Naik *et al.*, “A combined experimental and numerical approach to explore tribocharging of pharmaceutical excipients in a hopper chute assembly,” *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 491, no. 1–2, pp. 58–68, 2015.
- [93] T. Nomura, T. Satoh, and H. Masuda, “The environment humidity effect on the tribo-charge of powder,” *Powder Technology*, vol. 135, pp. 43–49, 2003.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [94] L. Xie, N. Bao, Y. Jiang, and J. Zhou, "Effect of humidity on contact electrification due to collision between spherical particles," *AIP Advances*, vol. 6, no. 3, p. 035117, 2016.
- [95] S. Nieh and T. Nguyen, "Effects of humidity, conveying velocity, and particle size on electrostatic charges of glass beads in a gaseous suspension flow," *Journal of Electrostatics*, vol. 21, no. 1, pp. 99–114, 1988.
- [96] M. Lungu, "Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect," *Minerals Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 69–75, 2004.
- [97] G. Rowley and L. A. Mackin, "The effect of moisture sorption on electrostatic charging of selected pharmaceutical excipient powders," *Powder Technology*, vol. 135, pp. 50–58, 2003.
- [98] M. P. Grosvenor and J. N. Staniforth, "The influence of water on electrostatic charge retention and dissipation in pharmaceutical compacts for powder coating," *Pharmaceutical Research*, vol. 13, no. 11, pp. 1725–1729, 1996.
- [99] J. S. Wang and R. S. Porter, "On the viscosity-temperature behavior of polymer melts," *Rheologica Acta*, vol. 34, pp. 496–503, 1995.
- [100] M. Saeki and A. Masumoto, "Electrostatic Separation of Chopped Waste Electric Cables," *Journal of Environment and Engineering*, vol. 2, pp. 227–236, 2007.
- [101] A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S. E. Bendimerad, M. Miloudi, and K. Medles, "Experimental investigation of electrostatic separators of plastic particles using different charging devices," *Separation Science and Technology*, vol. 49, no. 3, pp. 464–468, 2014.
- [102] M. E. M. Zelmat, M. Rizouga, A. Tilmatine, K. Medles, M. Miloudi, and L. Dascalescu, "Experimental comparative study of different tribocharging devices for triboelectric separation of insulating particles," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1113–1118, 2013.
- [103] I. I. Inculet, G. S. P. Castle, and J. D. Brown, "Electrostatic separation of plastics for recycling," *Particulate Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 91–100, 1998.
- [104] I. I. Inculet, G. S. P. Castle, and J. D. Brown, "Tribo-electrification system for electrostatic separation of plastics," in *Proc. 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 2, pp. 1397–1399, Oct. 1994.
- [105] I. E. Achouri, T. Zeghloul, K. Medles, G. Richard, and L. Dascalescu, "Factors influencing the triboelectric charging of granular plastics in a rotating-cylinder-type tribocharger," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 724, no. 1, p. 012048, 2020.
- [106] G. Wu, J. Li, and Z. Xu, "Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review," *Waste Management*, vol. 33, no. 3, pp. 585–597, 2013.
- [107] 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 Transactions on Industry Applications*, vol. 46, pp. 1558–1563, 2010.
- [108] G. Buda, A. Samuila, S. Atroune, M. Bilici, and L. Dascalescu, "Set point identification of a tribocharging process for mixed granular solids," *Journal of Electrostatics*, vol. 71, pp. 407–412, 2013.
- [109] L. Dascalescu, A. Urs, S. Bente, M. Huzau, and A. Samuila, "Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices," *Journal of Electrostatics*, vol. 63, pp. 705–710, 2005.
- [110] Y. Higashiyama, Y. Ujiie, and K. Asano, "Triboelectrification of plastic particles on vibrating feeder laminated with a plastic film," *Journal of Electrostatics*, vol. 42, pp. 63–68, 1997.
- [111] L. Dascalescu, A. Urs, S. Bente, M. Huzau, and A. Samuila, "Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices," *Journal of Electrostatics*, vol. 63, no. 6–10, pp. 705–710, 2005.
- [112] J. Li, G. Wu, and Z. Xu, "Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation," *Waste Management*, vol. 35, pp. 36–41, 2015.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [113] M. Blajan, R. Belega, A. Iuga, and L. Dascalescu, "Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 4, pp. 1558–1563, 2010.
- [114] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, and L. Dascalescu, "Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials," *Journal of Electrostatics*, vol. 69, no. 6, pp. 631–637, 2011.
- [115] M. Saeki and A. Masumoto, "Electrostatic separation of chopped waste electric cables," *Journal of Environment and Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 227–236, 2007.
- [116] A. M. Benhafssa, T. Zeghloul, S. Messal, L. Dascalescu, and K. Medles, "Factors that influence the efficiency of a propeller-type tribocharging device for granular plastics," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 2, pp. 1446–1451, 2016.
- [117] S. Masuda, M. Toraguchi, T. Takahashi, and K. Haga, "Electrostatic beneficiation of coal using a cyclone-tribocharger," *IEEE Transactions on Industry Applications*, no. 5, pp. 789–793, 1983.
- [118] M. E. M. Zelmat, A. Tilmatine, M. Rizouga, R. Gouri, K. Medles, and L. Dascalescu, "Experimental analysis of a cyclone tribocharging device for free-fall triboelectric separation of plastic particles," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 5, pp. 1584–1589, 2013.
- [119] M. E. M. Zelmat, 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 Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 4228–4232, 2014.
- [120] A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S. Bendimerad, M. Miloudi, and K. Medles, "Experimental investigation of electrostatic separators of plastic particles using different charging devices," *Separation Science and Technology*, vol. 49, no. 3, pp. 464–468, 2014.
- [121] M. M. Zelmat, A. T. Rizouga, K. Medles, and L. Dascalescu, "Experimental comparative study of different tribocharging devices for triboelectric separation of insulating particles," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 1113–1118, 2013.
- [122] J. Li, G. Wu, and Z. Xu, "Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation," *Waste Management*, vol. 35, pp. 36–41, 2014.
- [123] Y. Higashiyama and K. Asano, "Recent progress in electrostatic separation technology," *Particulate Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 77–90, 1998.
- [124] A. Bouargoub, T. Zeghloul, Y. Benmimoun, M. F. Bekkara, N. Perbet, and L. Dascalescu, "Modified electrode configuration of the free-fall tribo-electrostatic separator for the recovery of polyethylene and polypropylene flakes from shredded packaging waste," *Particulate Science and Technology*, vol. 42, no. 8, pp. 1354–1360, 2024.
- [125] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, and A. Samuila, "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 5, pp. 1476–1483, 2011.
- [126] L. Calin, A. Mihalcioiu, A. Iuga, and L. Dascalescu, "Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification," *Particulate Science and Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 205–211, 2007.
- [127] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, and L. Dascalescu, "Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device," *Journal of Electrostatics*, vol. 63, no. 6–10, pp. 937–942, 2005.
- [128] S. Messal, *Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire*, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2016.
- [129] S. L. Escalante, G. Touchard, and G. Dominguez, "Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes," in *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2002, pp. 694–697.
- [130] D. Geldart, "Types of gas fluidization," *Powder Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 285–292, 1973.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [131] M. Rezoug, R. Ouiddir, W. Aksa, K. Medles, M. Bilici, and L. Dascalescu, "Tribo-aero-electrostatic separator for ternary mixtures of granular plastics," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 2, pp. 1161–1167, 2014.
- [132] S. Kazmierczak, P. Anglaret, and J. Filippi, *Technologie Génie Chimique*, Centre régional de documentation pédagogique, Tome 3, 1989.
- [133] H. C. Hamaker, "The London-van der Waals attraction between spherical particles," *Physica*, vol. 4, p. 1058, 1937.
- [134] M. Séguin, J. Descheneau, and B. Tardif, *Ondes et physique moderne, Physique XXI*, Tome C, 2010.
- [135] N. Singh, D. Hui, R. Singh, I. P. S. Ahuja, L. Feo, and F. Fraternali, "Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications," *Composites Part B: Engineering*, vol. 115, pp. 409–422, 2017.
- [136] L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, and L. Dascalescu, "Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 4, pp. 1045–1051, 2008.
- [137] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, and A. Samuila, "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, pp. 1476–1483, 2011.
- [138] L. Dascalescu, T. Zeghloul, and A. Iuga, "Electrostatic separation of metals and plastics from waste electrical and electronic equipment," in *WEEE Recycling*, Elsevier, 2016, pp. 75–106.
- [139] C. B. Gill, "Electrostatic Separation," in *Materials Beneficiation*, Springer, New York, NY, 1991, pp. 141–147.
- [140] J. Li and L. Dascalescu, "Newly-patented technical solutions for improving the tribo-electrostatic separation of mixed granular solids," *Recent Patents on Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 104–115, 2012.
- [141] C. Liu and Q. Wang, "Study on Electrostatic Preparation High-Ash Coal from China Using Roll-Type Electrostatic Separator and the Combustion Characteristics of the Cleaned Coal," *Processes*, vol. 9, no. 7, p. 1139, 2021.
- [142] H. Reriballah, W. Aksa, S. Touhami, K. Medles, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, "Experimental analysis of the operation of a free-fall separator equipped with four rotating cylinders," in *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2019, pp. 1–5.
- [143] A. Benabderrahmane, K. Medles, T. Zeghloul, P. Renoux, L. Dascalescu, and A. Parenty, "Triboelectric Charging and Electrostatic Separation of Granular Polymers Containing Brominated Flame Retardants," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 1, pp. 915–922, 2020.
- [144] J. A. Wiles, M. Fialkowski, M. R. Radowski, G. M. Whitesides, and B. A. Grzybowski, "Effects of surface modification and moisture on the rates of charge transfer between metals and organic materials," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 108, no. 52, pp. 20296–20302, 2004.
- [145] E. M. Ramer and H. R. Richards, "Correlation of the electrical resistivities of fabrics with their ability to develop and to hold electrostatic charges," *Textile Research Journal*, vol. 38, no. 1, pp. 28–35, 1968.
- [146] R. K. Dwari and K. H. Rao, "Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator," *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 119–127, 2009.
- [147] H. S. Jeon, C. H. Park, B. G. Cho, and J. K. Park, "Separation of PVC and rubber from covering plastics in communication cable scrap by tribo-charging," *Separation Science and Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 190–202, 2009.
- [148] Y. Matsushita, N. Mori, and T. Sometani, "Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 127, no. 3, pp. 33–40, 1999.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [149] S. Bendimerad, A. Tilmatine, M. Ziane, and L. Dascalescu, "Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator," *International Journal of Environmental Studies*, vol. 66, no. 5, pp. 529–538, 2009.
- [150] C. Barron, J. Abecassis, M. Chaurand, V. Lullien-Pellerin, F. Mabile, X. Rouau, et M. F. Samson, "Accès à des molécules d'intérêt par fractionnement par voie sèche," *Innovations Agronomiques*, vol. 19, pp. 51–62, 2012.
- [151] L. F. Calin and L. Dascalescu, "U.S. Patent No. 8,541,709," U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC, 2013.
- [152] B. M. Fodil, M. Karim, M. Mohamed, T. Amar, B. Abdelber, and L. Dascalescu, "Effect of ambient humidity on the outcome of electrostatic separation process for mixed granular polymers," in *2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2013, pp. 1–5.
- [153] S. Trigwell, N. Grable, C. U. Yurteri, R. Sharma, and M. K. Mazumder, "Effects of surface properties on the tribocharging characteristics of polymer powder as applied to industrial processes," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, pp. 79–86, 2003.
- [154] M. F. Boukhoulda, M. Miloudi, K. Medles, M. Rezoug, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, "Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 2375–2381, 2013.
- [155] A. M. Benhafssa, K. Medles, M. F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, and L. Dascalescu, "Study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 5, pp. 4166–4172, 2015.
- [156] I. E. Achouri, T. Zeghloul, G. Richard, K. Medles, H. Nouri, and L. Dascalescu, "Factors that influence the performance of a two-rotating disks-type tribo-aero-electrostatic separator for micronized WEEE," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 1, pp. 802–811, 2018.
- [157] A. Tilmatine, A. Benabboun, Y. Brahmi, A. Bendaoud, M. Miloudi, and L. Dascalescu, "Experimental investigation of a new triboelectrostatic separation process for mixed fine granular plastics," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 4245–4250, 2014.
- [158] Y. Brahmi, A. Tilmatine, R. Ouiddir, A. Bendaoud, K. Medles, and L. Dascalescu, "Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for micronized plastics," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 5, pp. 4145–4150, 2015.
- [159] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahmi, and L. Dascalescu, "Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials," *Journal of Electrostatics*, vol. 69, pp. 631–637, 2011.
- [160] E. Lévy, *Dictionnaire de Physique*, Paris, 1988, p. 601.
- [161] Y. Matsushita, N. Mori, and T. Sometani, "Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary drum blades," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 127, pp. 33–40, 1999.
- [162] S. Messal, T. Zeghloul, A. Mekhalef Benhafssa, and L. Dascalescu, "Sorting of finely-grinded granular mixtures using a belt-type corona-electrostatic separator," in *Conf. Rec. IEEE/IAS Annual Meeting*, Dallas, Oct. 18–22, 2015.
- [163] L. Dascalescu, C. Dragan, M. Bilici, R. Belega, Y. Hemery, and X. Rouau, "Electrostatic bases for separation of wheat bran tissues," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, pp. 659–665, 2010.
- [164] S. Messal, A. Mekhalef Benhafssa, C. Mayer-Laigle, X. Rouau, and L. Dascalescu, "Electrostatic Separation of Finely Divided Plant Materials," in *10th Conference of the French Electrostatic Society (SFE)*, Poitiers, France, Aug. 29–31, 2016.
- [165] F. S. Ali, I. I. Inculet, and A. Tedoldi, "Charging of polymer powder inside a metallic fluidized bed," *Journal of Electrostatics*, vol. 45, no. 3, pp. 199–211, 1999.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [166] J. Wei and M. J. Realf, "Design and optimization of drum-type electrostatic separators for plastics recycling," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 44, no. 10, pp. 3503–3509, 2005.
- [167] G. Richard, A. Salama, K. Medles, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, "Comparative study of three high-voltage electrode configurations for the electrostatic separation of aluminum, copper and PVC from granular WEEE," *Journal of Electrostatics*, vol. 88, pp. 29–34, 2017.
- [168] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, M. F. Boukhoulida, M. Bilici, and L. Dascalescu, "Two stage electrostatic separator for the recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment," *Journal of Electrostatics*, vol. 71, no. 4, pp. 681–688, 2013.
- [169] A. Samuila, L. Dascalescu, L. Calin, M. Bilici, and A. Catinean, "Recent researches in electrostatic separation technologies for the recycling of waste electric and electronic equipment," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2218, no. 1, p. 030001, Mar. 2020.
- [170] F. Hamerski, A. Krummenauer, A. M. Bernardes, and H. M. Veit, "Improved settings of a corona-electrostatic separator for copper concentration from waste printed circuit boards," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, no. 1, p. 102896, 2019.
- [171] A. Salama, G. Richard, K. Medles, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, "Distinct recovery of copper and aluminum from waste electric wires using a roll-type electrostatic separator," *Waste Management*, vol. 76, pp. 207–216, 2018.
- [172] L. Dascalescu, S. Das, and U. Kumar, "Numerical simulation of conductive particle behaviour at the surface of a plate electrode affected by a DC corona field," *Journal of Electrostatics*, vol. 67, no. 2–3, pp. 167–172, 2009.
- [173] A. Reguig, A. Bendaoud, P. Dordizadeh, A. R. Salama, S. Messal, and L. Dascalescu, "Experimental study of a modified dual-type high-voltage electrode for electrostatic separation applications," *Journal of Electrostatics*, vol. 88, pp. 232–235, 2017.
- [174] 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," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 646, no. 1, p. 012030, Sep. 2015.
- [175] A. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, R. Morar, R. Belaca, S. Das, and L. Dascalescu, "Removal of metallic particles from acrylonitrile butadiene styrene wastes using electrostatic separation methods," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, pp. 322–329, 2011.
- [176] L. Dascalescu, "Numerical analysis of the electric field of roll-type electrostatic separators," *Journal of Electrostatics*, vol. 29, no. 3, pp. 255–267, 1993.
- [177] A. Tilmatine, S. Bendimerad, F. Boukhoulida, K. Medles, and L. Dascalescu, "Electrostatic separators of particles. Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures," *Waste Management*, vol. 29, pp. 228–232, 2009.
- [178] A. Samuila, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, and L. Dascalescu, "Electrostatic technologies for materials recovery in high-intensity electric fields," 2006.
- [179] T. Butunoi, G. Gagi, A. Samuila, V. Neamtu, R. Morar, L. Dascalescu, and A. Iuga, "Electric and electronic equipment of a research-oriented electrostatic separator," in *12th International Conference OPTIM 2010*, Brasov, Romania, May 20–22, 2010.
- [180] A. Iuga, L. Dascalescu, R. Morar, I. Csorvassy, and V. Neamtu, "Corona-electrostatic separators for recovery of waste non-ferrous metals," *Journal of Electrostatics*, vol. 23, pp. 235–243, 1989.
- [181] L. Dascalescu, A. Mizuno, R. Tobazeon, A. Iuga, R. Morar, M. Mihailescu, and A. Samuila, "Charges and forces on conductive particles in roll-type corona-electrostatic separators," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, pp. 947–956, 1995.
- [182] L. Dascalescu, R. Tobazeon, and P. Atten, "Behaviour of conductive particles in corona-dominated electric fields," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 28, pp. 1611–1618, 1995.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [183] A. Tilmatine, K. Medles, S. E. Bendimerad, F. Boukholda, and L. Dascalescu, "Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures," *Waste Management*, vol. 29, no. 1, pp. 228–232, 2009.
- [184] I. C. Dragan, *Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéro-électrostatique de matériaux plastiques granulaires*, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Poitiers, France, 2010.
- [185] Hamos GmbH, "Brochure," [En ligne]. Disponible sur : <http://www.hamos.com/infocenter/brochure.html#hamos/22>. [Consulté le: 20-mai-2024].
- [186] PRODECOLOGIA, "Electrostatic separators type EBS-T (triboelectric)," [En ligne]. Disponible sur : <https://www.directindustry.fr/prod/prodecologia-smf/product-165205-1879107.html>. [Consulté le : 06-juin-2024].

Publications et communications

Publications

A. Bouargoub, T. Zeghloul, Y. Benmimoun, M. F. Bekkara, N. Perbet, L. Dascalescu. (2024). Modified electrode configuration of the free-fall tribo-electrostatic separator for the recovery of polyethylene and polypropylene flakes from shredded packaging waste. *Particulate Science and Technology*, 1–7.

T. A. Houari, M. Zelmat, **A. Bouargoub**, R. Ouiddir, A. Tilmatine. (2022). Experimental analysis of micronized plastic particle movement on electrodynamic screens. *International Journal of Environmental Studies*, vol. 79, no 1, p. 72-87.

Publication en cours

A. Bouargoub, M.F. Bekkara, Y. Benmimoun, T. Zeghloul, L. Dascalescu. An innovative configuration of the Free-fall Separator featuring short electrodes for the recovery of high-density polyethylene and polypropylene from WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment). Manuscript Number: **ELSTAT-D-24-00188**

Communications avec actes

A. Bouargoub, T. Zeghloul, Y. Benmimoun, M. F. Bekkara, N. Perbet, L. Dascalescu, « Electrostatic separation of PE et PP flakes from packaging waste » The International conference on Electrostatics 2023, 4-7 September 2023, Brunel University–London–UK.

M.F. Bekkara, **A. Bouargoub**, A. Chelih, D. Azzeddine, H. Azzeddine, Y. Benmimoun, «Analyzing particles trajectories in a free-fall electrostatic separator », The 1st International Conference on Advances in Electronics, Control and Computer Technologies (ICAECCT-23), October 25th-26th, 2023, Mascara, Algeria.

A. Bouargoub, M.F. Bekkara, D. Azzeddine, M.A. Aminallah and Y. Benmimoun, « Plastic particles trajectories modeling in a free-fall electrostatic separator », The International Conference On Applied Science And Engineering (ICASE-22), December 14th-15th, 2022, Oran, Algeria.

A. Bouargoub, M.A. Aminallah, S. Ouarzine, M.F. Bekkara and Y. Benmimou, « Comparative experimental study of triboelectric charge of two types of polymer granules by different walls fluidized bed system for the electrostatic separation», The 12th National Conference on High Voltage, CNHT 2022, Djilali Liabès University – Sidi Bel-Abbès – Algeria, October 4-6, 2022.

A. Bouargoub, M.F. Bekkara, Y. Benmimoun, M.A. Aminallah, S. Ouarzine, H.M. Lakhdar, « Contribution à l'amélioration du chargement triboélectrique des déchets en plastique en vue de leurs tri électrostatique », The 1st National Conference On Science & Technology, Mustapha Stambouli University–Mascara– Algeria, June 27th-28th, 2022.

Résumé

La séparation électrostatique est une technique utilisée pour trier des particules ou matériaux chargés ou polarisés en fonction de leurs propriétés électriques. Elle repose sur des techniques comme l'effet triboélectrique, où des matériaux sont chargés par frottement, puis séparés dans un champ électrique. Grâce à sa faible consommation énergétique et à ses coûts d'exploitation et d'entretien réduits, cette technologie se révèle être une solution économiquement viable pour le recyclage des plastiques et des DEEE. Cette thèse a pour objectif de développer des solutions techniques viables aux défis liés à la séparation électrostatique des matériaux plastiques granulaires, dans le cadre du recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques. Le dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé multicylindre s'est avéré très efficace pour traiter des matériaux plastiques granulaires millimétriques. Où dépend son efficacité de plusieurs facteurs, comme les propriétés du polymère, les caractéristiques des parois du dispositif de charge, la durée du chargement, et les conditions climatiques. Il a également été prouvé que les dispositifs de séparation électrostatique, tels que le dispositif à chute libre modifié et le dispositif à chute libre innovant, améliorent l'efficacité et la pureté de la séparation. Ces dispositifs ont montré des résultats supérieurs dans la récupération et la pureté des plastiques (PE, PP, PVC, ABS). La modélisation des trajectoires des particules à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics a également démontré l'efficacité de la nouvelle configuration modifiée du séparateur à chute libre ainsi que l'efficacité du séparateur à chute libre innovant. Ces avancées visent une industrialisation adaptée aux enjeux du recyclage.

Abstract

Electrostatic separation is a technique used to sort charged or polarized particles or materials based on their electrical properties. It relies on techniques such as the triboelectric effect, where materials are charged by friction and then separated in an electric field. Due to its low energy consumption and reduced operating and maintenance costs, this technology has proven to be an economically viable solution for the recycling of plastics and WEEE. This thesis aims to develop viable technical solutions to the challenges related to the electrostatic separation of granular plastic materials, in the context of the recycling of waste electrical and electronic equipment. The multi-cylinder fluidized bed triboelectric loading device has proven to be very efficient in processing millimeter-sized granular plastic materials. Where its efficiency depends on several factors, such as the properties of the polymer, the characteristics of the walls of the charging device, the duration of charging, and the climatic conditions. Electrostatic separation devices, such as the modified free-fall device and the innovative free-fall device, have also been proven to improve separation efficiency and purity. These devices have shown superior results in the recovery and purity of plastics (PE, PP, PVC, ABS). Modeling of particle trajectories using COMSOL Multiphysics software has also demonstrated the effectiveness of the new modified free-fall separator configuration as well as the effectiveness of the innovative free-fall separator. These advances aim at industrialization adapted to the challenges of recycling.

ملخص

الفصل الكهروستاتيكي هو تقنية تستخدم لفرز الجزيئات أو المواد المشحونة أو المستقطبة بناءً على خصائصها الكهربائية. وهي تعتمد على تقنيات مثل التأثير الكهربائي الاحتكاكي، حيث يتم شحن المواد عن طريق الاحتكاك ثم فصلها في مجال كهربائي. وبفضل استهلاكها المنخفض للطاقة وانخفاض تكاليف التشغيل والصيانة، أثبتت هذه التكنولوجيا أنها حل مجدي اقتصاديًا لإعادة تدوير المواد البلاستيكية ومخلفات المعدات الكهربائية والإلكترونية. تهدف هذه الأطروحة إلى تطوير حلول تقنية قابلة للتطبيق للتحديات المرتبطة بالفصل الكهروستاتيكي للمواد البلاستيكية الحبيبية، في سياق إعادة تدوير نفايات المعدات الكهربائية والإلكترونية. لقد أثبت جهاز التحميل الكهربائي الاحتكاكي ذو القاعدة المميعة متعدد الأسطوانات أنه فعال للغاية في معالجة المواد البلاستيكية الحبيبية بحجم ملليمتر. حيث تعتمد فعاليته على عدة عوامل، مثل خصائص البوليمر، وخصائص جدران جهاز الشحن، ومدة الشحن، والظروف المناخية. أجهزة الفصل الكهروستاتيكية، مثل جهاز السقوط الحر المعدل وجهاز السقوط الحر المبتكر، أثبتت أيضًا قدرتها على تحسين كفاءة الفصل والنقاء. وقد أظهرت هذه الأجهزة نتائج متفوقة في استعادة ونقاء المواد البلاستيكية. أظهرت نمذجة مسارات الجسيمات باستخدام برنامج كومسول أيضًا فعالية تكوين فاصل السقوط الحر المعدل الجديد بالإضافة إلى فعالية فاصل السقوط الحر المبتكر. وتهدف هذه التطورات إلى تصنيع يتكيف مع تحديات إعادة التدوير.