



**HAL**  
open science

# Chargement triboélectrique et séparation électrostatique des mélanges de matériaux plastiques granulaires provenant des déchets industriels

Imed Eddine Achouri

► **To cite this version:**

Imed Eddine Achouri. Chargement triboélectrique et séparation électrostatique des mélanges de matériaux plastiques granulaires provenant des déchets industriels. Energie électrique. Université de Poitiers, 2022. Français. NNT : 2022POIT2255 . tel-04016609

**HAL Id: tel-04016609**

**<https://theses.hal.science/tel-04016609>**

Submitted on 6 Mar 2023

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

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

# THESE

Pour l'obtention du Grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS

(Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées)

(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)

École Doctorale : Science et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique et  
Aéronautique

Secteur de Recherche : Génie électrique

Présentée par :

**Imed Eddine ACHOURI**

\*\*\*\*\*

## INSTALLATIONS DE SEPARATION TRIBO-ELECTROSTATIQUE DE MELANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES PROVENANT DES DECHETS D'EQUIPEMENTS ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES

\*\*\*\*\*

Directeur de Thèse : **Lucien DASCALESCU**

Co-encadreur de thèse : **Thami ZEGHLOUL**

\*\*\*\*\*

Soutenue le 14 février 2022

devant la Commission d'Examen

\*\*\*\*\*

### JURY

<b>Khashayar SALEH</b>	Professeur, Université de Technologie de Compiègne	Rapporteur
<b>Amar TILMATINE</b>	Professeur, Université de Sidi-Bel-Abbès, Algérie	Rapporteur
<b>Farida TOMASELLA</b>	Directrice R&D, Environment Recycling	Examinatrice
<b>Eric MOREAU</b>	Professeur, Université de Poitiers	Examineur
<b>Lucien DASCALESCU</b>	Professeur, Université de Poitiers	Examineur
<b>Thami ZEGHLOUL</b>	Maître de Conférences, Université de Poitiers	Examineur

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier, en tout premier lieu, M. **François LALUT**, Président Directeur Général de la société CITF, et Monsieur **Karl JOULIN**, Directeur de l'Institut PPRIME, de m'avoir accueilli dans leurs établissements respectifs et pour leur confiance.

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

- Pr. **Khashayar SALEH**
- Pr. **Amar TILMATINE**
- Dr. **Farida TOMASELLA**
- Pr. **Eric MOREAU**

Je suis profondément reconnaissant à mes directeurs de thèse, Pr. **Lucien DASCALESCU** et Dr. **Thami ZEGHLOUL**, 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 suis redevable aussi au Dr. **Gontran RICHARD**, qui a dirigé mon travail au sein de la société CITF. Il a consacré beaucoup de temps et d'énergie pour l'avancement de ma thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance et mon très grand respect. Je tiens également à remercier M. **Karim MEDLES**, professeur invité à l'IUT d'Angoulême, et M. **Cédric LUBAT**, Directeur Technique du département Performance Economique de l'entreprise CITF. Je vous remercie d'avoir cru en mes capacités ; je garderai dans mon cœur votre générosité, votre compréhension et votre professionnalisme. Je remercie très chaleureusement les membres de l'équipe Triboélectrostatique de l'Institut PPRIME à l'IUT d'Angoulême, qui m'ont beaucoup aidé et encouragé : Omar TILMATINE, Sofiane BENDILMI, Ahlem BENABDERRAHMANE et Mohamad MAAMMAR. Je voudrais aussi remercier tous mes collègues de l'entreprise CITF, avec qui j'ai partagé des bons moments.

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 mon épouse, mes frères et sœurs, pour leurs encouragements et leur amour.

# Table des matières

Introduction .....	1
I. CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART .....	5
I.1. Chargement triboélectrique des matériaux granulaires isolants .....	5
I.1.1. Mécanismes physiques .....	8
I.1.2. Effet de l'état de surface sur le chargement triboélectrique .....	11
I.1.3. Influence des conditions ambiantes .....	13
I.2. Dispositifs de chargement triboélectrique des matériaux granulaires isolants .....	14
I.2.1. Dispositifs mécaniques .....	15
I.2.2. Dispositifs aérauliques .....	19
I.3. Installations de séparation en champ électrique .....	24
I.3.1. Séparateurs électrostatiques.....	24
I.3.2. Séparateurs tribo-aéro-électrostatiques.....	27
I.3.3. Installations industrielles .....	31
I.4. Conclusions .....	37
II. CHAPITRE II : INSTALLATIONS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES .....	38
II.1. Matériaux .....	38
II.1.1. Matériaux « modèles » .....	38
II.1.2. Matériaux issus des DEEE .....	41
II.2. Dispositifs expérimentaux utilisés.....	42
II.2.1. Chargeur triboélectrique à cylindre tournant.....	42
II.2.2. Chargeur triboélectrique à lit fluidisé.....	43
II.2.3. Séparateur électrostatique à cylindre tournant (Prodecologia).....	44
II.3. Conception et réalisation de nouveaux dispositifs expérimentaux.....	45
II.3.1. Chargeur triboélectrique multicylindre .....	45
II.3.2. Séparateur électrostatique à table vibrante .....	46
II.3.3. Prototype de séparateur électrostatique industriel PRD .....	47
II.4. Techniques de mesure et procédures expérimentales.....	49
II.4.1. Mesure simultanée des charges et des masses des produits .....	49
II.4.2. Système d'acquisition et traitement des données .....	50
II.4.3. Méthode d'analyse de la pureté et de la récupération des produits séparés .....	51
II.4.4. Technique spectrométrique d'analyse des polymères .....	52
II.4.5. Techniques de neutralisation des charges de surface .....	52
II.4.6. Technique de contrôle d'humidité et de température .....	53
II.4.7. Méthode des plans d'expériences.....	54
II.5. Conclusions .....	57



III. PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES.....	58
III.1. Étude et optimisation du chargeur triboélectrique à cylindre tournant.....	58
III.1.1. Procédure expérimentale .....	58
III.1.2. Modélisation et optimisation du processus de chargement .....	60
III.1.3. Séries triboélectriques obtenus avec des cylindres en PVC et en PEHD .....	63
III.2. Test d'endurance du chargeur triboélectrique à cylindre tournant .....	65
III.2.1. Procédure expérimentale .....	65
III.2.2. Étude des facteurs influents.....	66
III.3. Étude et optimisation du chargeur triboélectrique à multicylindre tournant .....	74
III.3.1. Procédure expérimentale .....	74
III.3.2. Étude des facteurs influents : angle d'inclinaison et vitesse de rotation de l'ensemble des 6 cylindres .....	75
III.3.3. Modélisation et optimisation du processus de charge .....	77
III.3.4. Séries triboélectriques obtenues avec des cylindres en PVC, en ABS et en PC .....	79
III.3.5. Comparaison entre les chargeurs triboélectriques à monocylindre et multicylindre tournants .....	80
III.4. Étude des mécanismes de chargement triboélectrique des polymères granulaires (particule-particule / particules-paroi) dans un chargeur triboélectrique multicylindre tournant .....	82
III.4.1. Procédure expérimentale .....	82
III.4.2. Mécanismes de chargement triboélectrique de polymères dans des cylindres en PVC, ABS et PC .....	83
III.5. Conclusions .....	85
IV. PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES.....	87
IV.1. Séparation triboélectrostatique de mélanges de deux ou trois plastiques granulaires .....	88
IV.1.1. Procédure expérimentale .....	88
IV.1.2. Séparation triboélectrostatique des mélanges binaires .....	90
IV.1.3. Séparation triboélectrostatique des mélanges de plusieurs plastiques.....	93
IV.2. Étude de l'effet de l'humidité et de la température sur la séparation triboélectrostatique des mélanges des plastiques granulaires.....	98
IV.2.1. Procédure expérimentale .....	98
IV.2.2. Effets de l'humidité sur le chargement triboélectrique .....	99
IV.2.3. Effets de l'humidité sur la séparation électrostatique.....	100
IV.3. Étude du séparateur électrostatique à table vibrante .....	102
IV.3.1. Procédure expérimentale .....	102
IV.3.2. Étude des facteurs influents : longueur du plateau, configuration des électrodes, amplitude des vibrations, durée de chargement .....	104
IV.3.3. Séparation électrostatique des mélanges ABS / PS et PP / PE.....	113

IV.4. Étude expérimentale et optimisation du fonctionnement d'un séparateur électrostatique industriel.....	114
IV.4.1. Procédure expérimentale .....	114
IV.4.2. Optimisation de la tension appliquée aux électrodes et la distance inter- électrodes ..	115
IV.4.3. Optimisation des vitesses de rotation du dispositif de charge et des électrodes.....	119
IV.4.4. Application de la séparation électrostatique aux déchets réels.....	122
IV.5. Conclusions .....	124
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....	126
TABLE DES FIGURES.....	129
TABLE DES TABLEAUX .....	134
LISTE DES PUBLICATIONS.....	135
REFERENCES.....	137

## Introduction

Chaque année, les déchets de plastiques augmentent ; 53,6 millions de tonnes de déchets électroniques ont été générés dans le monde en 2019, soit une augmentation de 21% en seulement cinq ans. De plus, seulement 17,4% des déchets ont été collectés et recyclés selon le Global E-waste Monitor 2020 de l'ONU et l'ADEME [1, 2].

Cette situation est essentiellement due aux limites des technologies actuelles de recyclage des plastiques [3]. Après la collecte, les plastiques subissent le plus souvent un tri manuel, suite auquel ils sont soit directement traités sur le site de l'entreprise de recyclage qui les a réceptionnés, soit acheminés vers des centres de traitement spécialisés [4]. Les familles de matières étant nombreuses, les traitements subis sont très variables selon les types de produits [5]. Cependant le broyage (réduction des produits en granules) est une phase incontournable du processus de recyclage des différents déchets plastiques [6]. La séparation des granules de déchets plastiques fait appel aux propriétés physiques des matériaux telles que la densité, la mouillabilité, etc. Une grande diversité des méthodes est actuellement employée : le criblage, qui est une opération de classement dimensionnel, intervenant souvent en aval d'opérations de fragmentation ; les classifications hydrauliques et pneumatiques (incluant les procédés de concentration gravimétrique), basées sur les phénomènes régis par les lois du mouvement des solides dans les liquides ou les gaz [7] ; la séparation par fluide supercritique, dérivée des procédés de concentration gravimétrique ; la flottation-moussage, mettant en jeu un fluide et un ou plusieurs additifs ayant pour rôle de modifier le comportement de surface des solides vis à vis du fluide [8] ; le tri électrostatique, basé sur les phénomènes de répulsion / attraction de particules chargées entre elles [9] ; la dissolution sélective des polymères dans des solvants spécifiques ; le tri par détection optique ou thermique. Chacune de ces techniques peut être utilisée séparément, mais dans la plupart des applications industrielles, des combinaisons de plusieurs de ces techniques ont souvent été déployées afin d'optimiser la séparation des matières plastiques recherchées [10-12].

La séparation électrostatique est le terme générique pour une classe importante de technologies de traitement de matériaux, largement utilisée pour le tri sélectif des constituants de mélanges granulaires par des forces électriques qui agissent sur les particules chargées ou polarisées [13]. Dans la plupart des cas, les champs électriques de l'ordre de  $10^6 \text{ V.m}^{-1}$  sont nécessaires. C'est pourquoi le développement des technologies et des équipements de séparation électrostatique a toujours été synchrone avec les progrès de l'ingénierie de la haute

tension. La gamme d'applications, se traduisant par des centaines de brevets, s'étend du traitement des minerais [14-16] et du conditionnement des semences [17-19], jusqu'au recyclage des métaux et plastiques provenant de déchets industriels [20-22].

L'essor de l'application de la séparation électrostatique au recyclage des matériaux contenus dans les déchets industriels [23, 24] est dû au fait qu'il s'agit d'une technologie non-polluante, caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et de maintenance. En s'appuyant sur les compétences de l'Institut PPRIME, la société CITF a construit le prototype (CP100) d'une installation de séparation des mélanges de granules métalliques et isolants, de tailles millimétriques, provenant des déchets granulaires de câbles électriques [25, 26].

Beaucoup de travaux ont été réalisés dans le domaine de la séparation triboélectrique par l'équipe Triboélectrostatique de l'Institut PPRIME, sur le site de l'IUT d'Angoulême et de bons résultats ont été obtenus dans le cas de mélanges granulaires de tailles millimétriques. Le processus de séparation des mélanges de matériaux pulvérulents (particules de tailles micrométriques) est moins efficace, à cause de la prépondérance de la force aérodynamique qui rend difficile le contrôle des trajectoires des particules et empêche la récupération de produits de haute qualité [27, 28].

Dans le cadre du partenariat entre l'Institut PPRIME et l'entreprise CITF basée à St Cybardeaux en Charente, qui est, depuis 2009, spécialisée dans la conception et la fabrication de machines spéciales, un séparateur industriel, CP100, a été développé ; il est capable de traiter de façon autonome 100 kg de déchets de câbles électriques par heure (Figure I-33). A la sortie de la machine, du cuivre « pur » et du PVC « pur » sont récupérés dans deux bacs distincts. Ce séparateur électrostatique est le résultat le plus significatif du transfert de technologie réalisé dans le cadre de ce partenariat.

Un premier doctorant Gontran RICHARD a travaillé sur ce sujet de 2015 à 2018, à la fois au sein de l'équipe de recherche et dans l'entreprise, dans le cadre d'une thèse CIFRE. Ses travaux ont conduit à la conception, à la fabrication et à la mise au point de la machine industrielle CP100. Le docteur est aujourd'hui employé en CDI dans le département Recherche & Développement de la société CITF.

Le soutien du FEDER et de l'ANRT a permis de continuer le partenariat entre l'équipe de recherche et la société CITF, avec cette thèse de doctorat CIFRE qui a débuté en février 2019.

L'objectif de cette thèse a été de trouver des solutions techniques viables aux problèmes de séparation électrostatique des matériaux plastiques granulaires de tailles millimétriques, pour des applications au recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques. Cette étude servira ensuite la société CITF pour perfectionner le prototype de séparateur électrostatique industriel, afin de pouvoir proposer à ses clients des installations capables d'assurer le traitement d'une gamme élargie de mélanges de plastiques granulaires recyclables, avec des rendements de séparation élevés et une meilleure efficacité énergétique.

Trois nouvelles installations ont été conçues et réalisées durant cette thèse. Elles contribuent à la compréhension des phénomènes physiques rencontrés lors de la séparation triboélectrique des mélanges de plastique. La première installation, un dispositif de chargement triboélectrique multicylindre, est utilisée pour charger les particules granulaires de plastiques de tailles millimétriques. La seconde installation, un séparateur électrostatique de type table vibrante (TVE), sert au tri des mélanges de plastiques. La troisième installation, le séparateur électrostatique industriel PRD à deux électrodes cylindriques tournantes, conçu et fabriqué par la société CITF, permet aussi le tri des mélanges de plastiques, les particules étant chargées par effet triboélectrique dans un dispositif à cylindre tournant.

Cette thèse se répartit en quatre chapitres. Le premier présentera l'état de l'art dans le domaine étudié, notamment les connaissances actuelles sur les mécanismes de transfert de charge par effet triboélectrique, les dispositifs de chargement triboélectrique décrits dans la littérature, ainsi que les informations disponibles sur la construction et les principes de fonctionnement de certains équipements de séparation triboélectrostatique.

Dans le deuxième chapitre, les différents matériaux qui ont fait l'objet de l'étude seront présentés, ainsi que les installations qui ont été développées et utilisées : des chargeurs triboélectriques et des séparateurs électrostatiques, de laboratoire ou industriels. Seront également décrites les méthodes expérimentales et les techniques de mesures employées, ainsi que la méthodologie des plans d'expériences et la procédure d'acquisition des données.

Le troisième chapitre présentera les recherches qui ont été réalisées pour évaluer et optimiser les deux dispositifs de charge triboélectrique à cylindre ou à multicylindre tournants construits par la société CITF, en vue de leur exploitation industrielle pour la séparation électrostatique de mélanges de plastiques granulaires issus de déchets d'équipements

électriques et électroniques. Les études ont porté notamment sur les mécanismes et les facteurs influents du processus de chargement triboélectrique des plastiques granulaires.

Le quatrième chapitre sera consacré à l'étude des effets des matériaux des parois du dispositif de charge triboélectrique et de l'humidité ambiante sur l'efficacité du processus de séparation des mélanges plastiques. Il décrira également les travaux réalisés pour modéliser et optimiser le fonctionnement de nouvelles machines industrielles (PRD et TVE) pour la séparation électrostatique des mélanges de plastiques granulaires.

Enfin, une conclusion générale mettra en valeur les apports de cette thèse et présentera les perspectives de notre travail.

## I. ETAT DE L'ART

La séparation des mélanges de plastiques provenant des déchets d'équipements électriques et électroniques est un des domaines de recherche de plus en plus actif. Plusieurs procédés et dispositifs de séparation électrostatique [29, 30], ont été développés pour récupérer les déchets de plastiques [31-33]. Tous ces procédés sont basés sur l'utilisation de l'effet triboélectrique pour charger les granules plastiques afin de les séparer dans un champ électrique intense [34]. La triboélectricité est un phénomène impliquant le transfert de charge entre deux corps en contact [35, 36].

Les différents mécanismes physiques de chargement triboélectrique des particules plastiques en vue de leur séparation sont présentés dans le sous-chapitre I-1. Le sous-chapitre I-2 décrit les principaux dispositifs de chargement triboélectrique connus et les regroupe selon leur mode de fonctionnement. Enfin, le paragraphe I-3 contient une synthèse des informations essentielles sur les divers types d'installations de séparation en champ électrique, appliquées au recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques.

### I.1. Chargement triboélectrique des matériaux granulaires isolants

Le principe de base de la séparation électrostatique des mélanges de matériaux isolants granulaires consiste à charger les divers constituants et à les soumettre ensuite à l'action d'un champ électrique intense [37-39]. Les charges acquises par les granules peut être générée par un ou plusieurs des trois mécanismes physiques suivants [40] : l'effet couronne, assurant la charge par « bombardement ionique » [41-44], l'induction électrostatique [45, 46] et l'effet triboélectrique [47, 48]. Ce dernier impliquant le transfert de charge entre deux corps en contact. Seul le troisième mécanisme est utilisable pour la séparation des mélanges des plastiques granulaires.

La **triboélectricité** (tribein un mot grec qui signifie frotter) désigne le phénomène électrostatique par lequel lorsque l'on met en contact deux matériaux de nature différente, un transfert de charges électriques se produit. Ce transfert de charges aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement. La polarité et la quantité de charge acquise dépendent de la nature chimique du matériau, de la taille des objets, de leur état de surface...

Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation et de nouveaux contacts auront pour effet de produire de nouveaux transferts de charges [49]. L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après mise en contact ou frottement entre deux matériaux. Sa définition s'étend

souvent au transfert de charges par contact, le frottement étant l'équivalent de contacts suivis de séparations s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse (Figure I-1). C'est le mécanisme physique le plus utilisé pour charger des matériaux granulaires ou micronisés, plastiques, en vue de leur séparation dans un champ électrique intense [50-52].

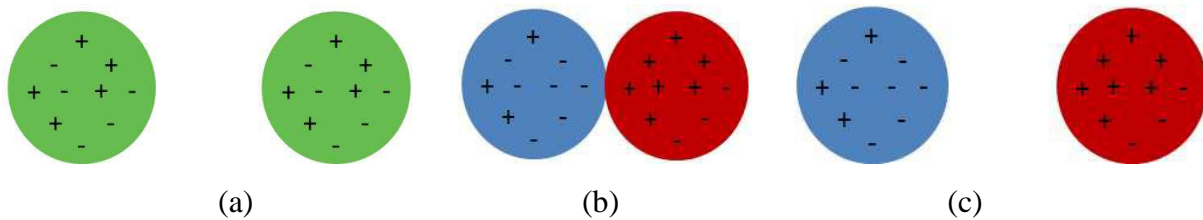


Figure I-1. Charge triboélectrique de deux particules en contact. (a) Particules électriquement neutres avant contact ; (b) Contact et transfert de charge ; (c) Rupture du contact, particules chargées.

Deux corps frottés l'un contre l'autre s'électrisent l'un positivement et l'autre négativement [53-55]. Le classement des différentes matières dans ce qu'on appelle **série triboélectrique** s'effectue par rapport à leur polarité et à leur niveau de charge. Plus les deux matériaux frottés sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée. Au milieu de la série seront placées les matières qui acquièrent des charges faibles. Certaines de ces séries ont été proposées de longue date [56-59] : Wilcke (1759) et Faraday (1840) ont proposé des séries similaires. Une autre série, établie par Shaw (1917), en plus d'être beaucoup plus étendue que les précédentes, donne une meilleure description des échantillons employés. Il n'existe pas de série triboélectrique universelle car les résultats sont influencés par les additifs, les impuretés présentes dans les matières et par les conditions expérimentales. En effet, une différence dans le frottement, peut affecter les résultats, il semble donc impossible de réaliser une liste avec un ordre fiable.

Les séries triboélectriques varient en tout cas d'un chercheur à l'autre et chacune reflète la culture matérielle de son moment historique. Un exemple d'une telle série est donné dans le (Tableau I-1).

Tableau I-1. Série triboélectrique obtenue par Bill Lee [60].

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 (MgF2)	+35	+N
Nylon, peau sèche	+30	+N
Huile pour machine	+29	+N
Nylatron (nylon rempli de MoS2)	+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 devinyle)	-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.1.1. Mécanismes physiques

La triboélectricité est un phénomène multifactoriel, difficilement définissable, impliquant un transfert de charge entre deux corps en contact. Plusieurs mécanismes physiques ont été proposés par des chercheurs scientifiques comme explications possibles de ce phénomène (Figure I-2) : les transferts d'électrons, d'ions ou de matière [61, 62].

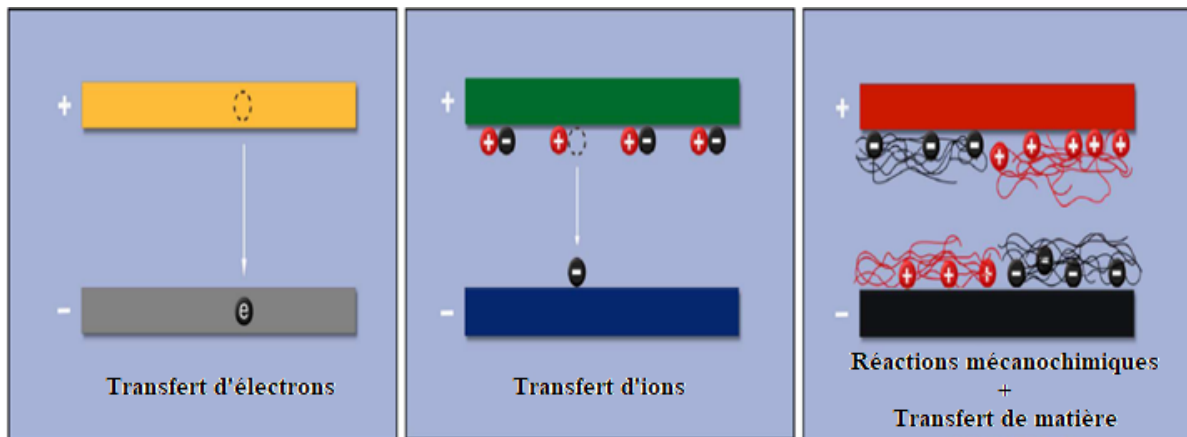


Figure I-2. Représentation de trois mécanismes de charge de surfaces isolantes [61, 62].

#### *Transfert d'électrons*

Une interprétation tout à fait différente a été donnée par le groupe Bard et Lacks au chargement du PTFE par contact avec le PMMA [63, 64]. Ces auteurs ont obtenu des preuves de la formation d'électrons sur la surface du PTFE, puisque le PTFE chargé déclenche certaines réactions attribuées à la présence d'électrons libres. De plus, Lowell et Truskott [65] ont considéré que le contact entre deux surfaces permet de libérer des électrons piégés dans des états de haute énergie (Figure I-3). Ce contact peut amener un état occupé de haute énergie sur une surface à proximité immédiate d'un état vacant de basse énergie sur une autre surface. Ceci permet à l'électron piégé à haute énergie d'être libéré de l'état de haute énergie à l'état vacant de basse énergie sur l'autre particule. Cette théorie est également cohérente avec la découverte que l'humidité réduit la charge électrique. L'humidité permet à une couche d'eau conductrice de se former sur la surface de l'isolant, à travers laquelle les électrons de haute énergie piégés peuvent s'échapper vers des états de plus basse énergie sur la même surface. La diminution résultante du nombre d'électrons piégés dans les états de haute énergie diminue la charge triboélectrique de frottement [66].

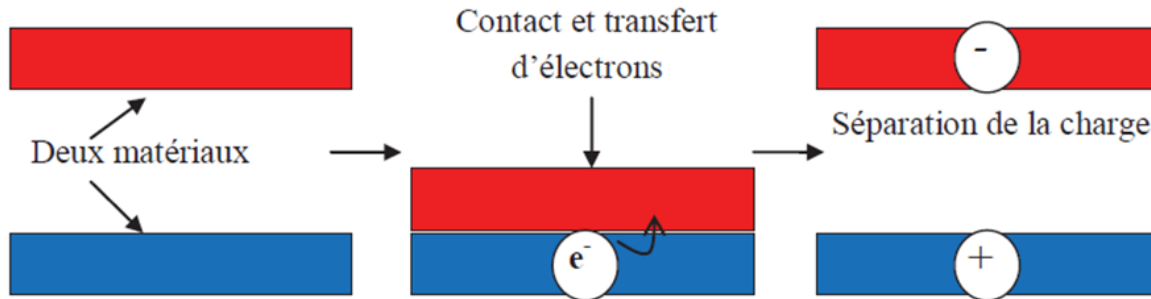


Figure I-3. Mécanisme de transfert de charge par un transfert d'électrons [68].

### *Transfert d'ions*

Des preuves en faveur d'un transfert d'ions ont été présentées par Whitesides et ses collègues en rapport avec la formation d'électrets [67, 68]. Ils ont utilisé une série d'électrets ioniques qui contiennent des ions mobiles, afin de suggérer que le transport d'ions est une explication possible pour la tribocharge des matériaux isolants. Ainsi, ils ont montré que le verre devient positif ou négatif suite au contact avec des sphères métalliques et qu'il acquiert une charge opposée à l'ion se déplaçant à sa surface. Le mécanisme de transfert d'ions (Figure I-4) proposé par Diaz [69, 70] est lié à la polarité et à l'amplitude de la charge, ainsi qu'à la structure et la concentration des espèces ioniques. Le modèle est basé sur celui proposé par Lee [47] pour l'équilibrage des charges entre deux surfaces ; il suppose que l'échange est proportionnel aux zones de contact relatives. Le modèle peut expliquer l'électrification des polymères contenant des additifs ioniques. Hogue et al. [71] ont considéré que les surfaces peuvent avoir des régions avec des sites plus ou moins disponibles pour une espèce ionique donnée, provoquant des déséquilibres de charge et donnant lieu à des différences de potentiel électrique. De plus, l'échange d'ions à la surface et la quantité de charge diminuent avec la diminution de la pression atmosphérique. Yu et al. [72] attribuent la charge triboélectrique des particules à la mobilité différente des ions des particules en contact, en considérant également l'effet des différences de température.

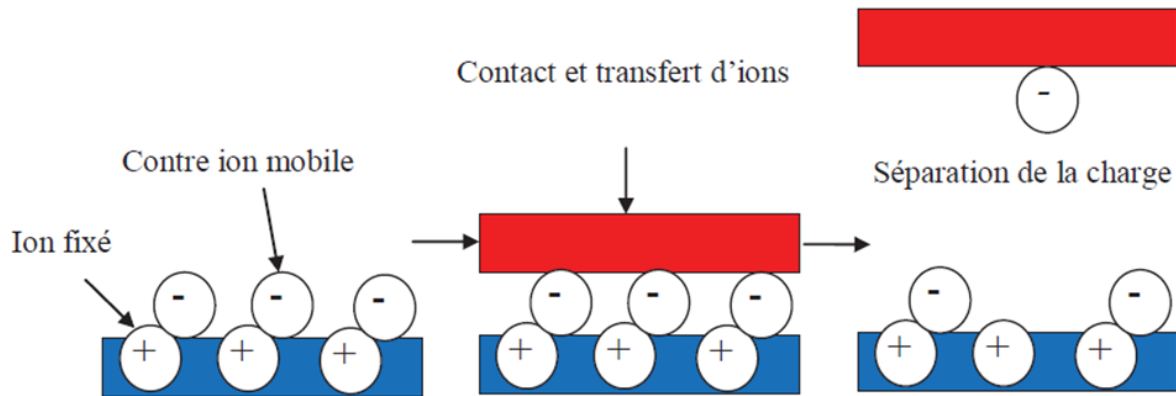


Figure I-4. Mécanisme de transfert de charge par un transfert d'ions [68].

### *Transfert de matière*

Un autre mécanisme possible qui a été relativement moins étudié est le transfert de matière. Lorsque deux surfaces solides entrent en contact, de petites quantités de matériaux sont transférées d'une surface à l'autre [73, 47] et ce transfert s'accompagne du déplacement de charge (Figure I-5). Ce mécanisme a été récemment discuté par divers groupes de recherche. [75, 76]. Une étude a rapporté que le transport de matériaux est responsable de l'inversion de la polarité des matériaux après une longue période de contact entre les matériaux. En général, ce transfert de matériau n'a pas été reconnu comme un mécanisme important dans l'électrification de contact des matériaux isolants.

Le transfert de matière associé au contact de surface et à l'usure a été envisagé par Clark et al. [77] qui ont observé un transfert de polymère au contact de films de PTFE et de PET. Ces deux matériaux sont bien séparés dans la série triboélectrique, et un grand transfert de matière accompagne un grand échange de charge.

Clark et al. ont attiré l'attention sur le fait que la charge est plus facile à détecter que la masse et ont déclaré : « Par conséquent, le transfert de masse ne peut pas être exclu en tant que mécanisme de transfert de charge électrique dans le phénomène de frottement. Au contraire, le transfert de masse doit être pris en compte par des modèles de charge triboélectrique, simplement en raison du degré élevé auquel il se produit. »

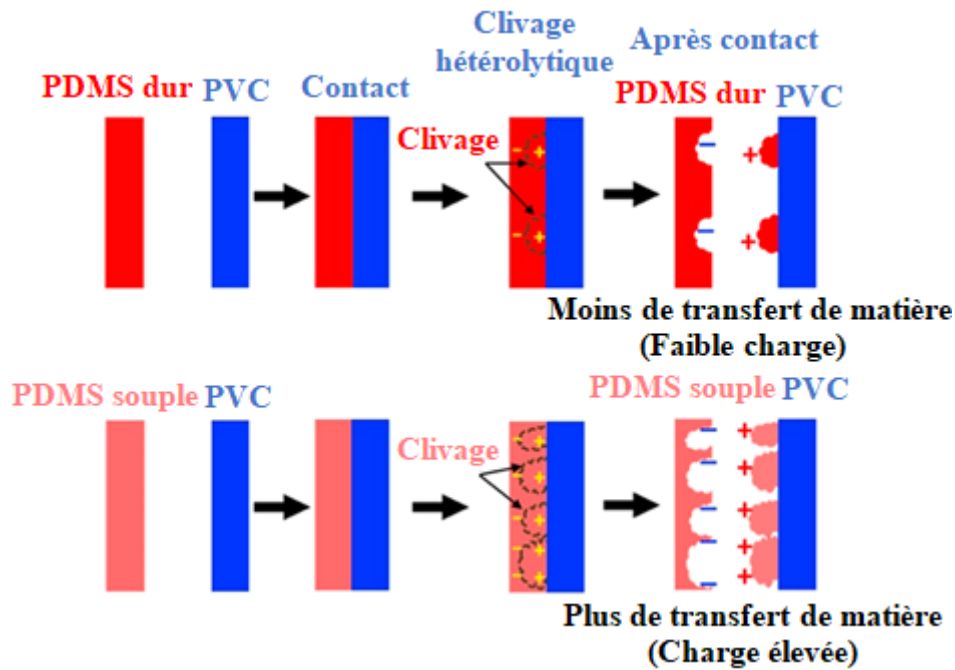


Figure I-5. Schéma illustrant le transfert de matière et le transfert de charge se produisant simultanément lors de l'électrification par contact de deux matériaux [78].

### I.1.2. Effet de l'état de surface sur le chargement triboélectrique

La surface de contact dépend de la forme des particules, car celle-ci a un effet sur la force de contact et sur le mouvement de la particule (glissement, roulement, rebond) (Figure I-6). Si le mouvement de la particule est modifié, la charge transférée le sera également.

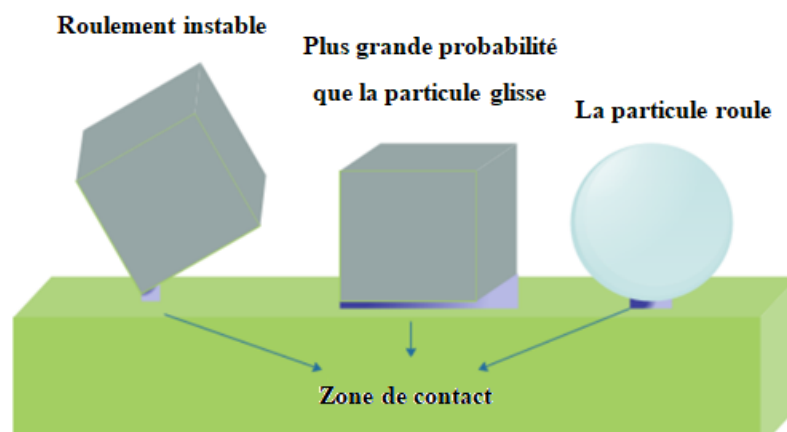


Figure I-6. La forme des particules prédispose le mouvement [79].

La force de frottement  $T$ , engendrée dans un contact glissant soumis à une charge normale  $F$  peut s'écrire dans un formalisme très général.

$$T = f(F, \text{Variables d'état}) \quad (\text{I-1})$$

Où les variables d'état caractérisent la nature de l'interface et les conditions de glissement, par exemple la rugosité ou encore l'épaisseur de l'interface. Coulomb tente, en 1785, de donner un sens physique au frottement entre deux solides. Dans un contact glissant de deux corps, le coefficient de frottement  $\mu$ , rapport entre les forces tangentielle et normale, a deux origines distinctes, mais complémentaires. D'une part, les interactions mécaniques entre les rugosités des surfaces en frottement provoquent leur liaison ou leur rupture. D'autre part, selon lui, il existe une cohésion moléculaire au niveau du contact. Cette hypothèse le conduit à définir la force de frottement de la façon suivante :

$$T = \mu F + b \quad (I-2)$$

$F$ : force normale d'appui,  $T$ : force tangentielle.

Dans cette équation, Coulomb considère que le terme  $b$  relié à la cohésion moléculaire du contact est négligeable devant le terme  $\mu F$  caractéristique des interactions mécaniques entre les surfaces en glissement. C'est pourquoi, il écrit plus simplement :

$$T = \mu F \quad (I-3)$$

Ainsi, la force de frottement devient directement proportionnelle à la charge statique normale appliquée au contact glissant. La relation (3) constitue la première définition du coefficient de frottement, dans laquelle apparaissent les notions de surface solide, de surface réelle de contact et d'adhérence, bien que cette dernière contribution ait été considérée par Coulomb comme des forces tangentielles irresponsables développées au contact [80].

L'aire réelle de contact entre deux solides dépend essentiellement du comportement mécanique de ceux-ci et de la topographie des surfaces antagonistes. Beaucoup de modèles supposent que la surface est recouverte d'aspérités hémisphériques, dont les hauteurs sont données par différentes lois statistiques. Greenwood & Williamson (1966) [81], ont, en particulier, montré que pour une distribution exponentielle de la hauteur des aspérités, l'aire réelle de contact reste constante, que les aspérités se déforment élastiquement ou plastiquement. Par contre, pour une distribution gaussienne de la hauteur des aspérités, l'aire de contact évolue proportionnellement à la charge et indépendamment de la taille des corps.

La modification de surface des particules est d'une grande importance pour les applications industrielles, car les surfaces affectent diverses propriétés telles que la charge triboélectrique, l'adhérence et le frottement.

Pour les matériaux polymères, la structure moléculaire affecte les caractéristiques de charge (Shinohara, et al. 1976 ; Lowell et Akande, 1988) [82, 83]. Ainsi, la charge de contact peut être contrôlée en modifiant la structure moléculaire des surfaces. L'irradiation aux rayons ultraviolets (Uyama et Ikada, 1990) [84] et le traitement au plasma (Kodama et al. 1993) [85-90] sont des méthodes utiles pour modifier les caractéristiques de charge des polymères.

### I.1.3. Influence des conditions ambiantes

Les conditions ambiantes telles que l'humidité relative et la température de l'air affectent la charge triboélectrique (Figure I-7 et Figure I-8). Greason (2000) [91] a mesuré la charge sur une sphère métallique, avec une cage de Faraday, après avoir été en contact avec un matériau isolant dans diverses conditions. Les relations entre la charge et l'humidité relative pour trois températures sont illustrées sur la figure I.7. À une température donnée, la charge diminue avec l'augmentation de l'humidité relative. Cela peut être dû à l'augmentation des fuites causées par la diminution de la résistance électrique à la surface. De plus, il est vrai que la charge diminue plus rapidement lorsque les particules chargées sont maintenues à une humidité relative élevée (Nomura et al., 2003) [92]. Les effets de la température sur la charge de la sphère sont illustrés sur la figure I.8. La charge a tendance à diminuer avec l'augmentation de la température. Cette tendance est remarquable lorsque l'humidité relative est faible [91].

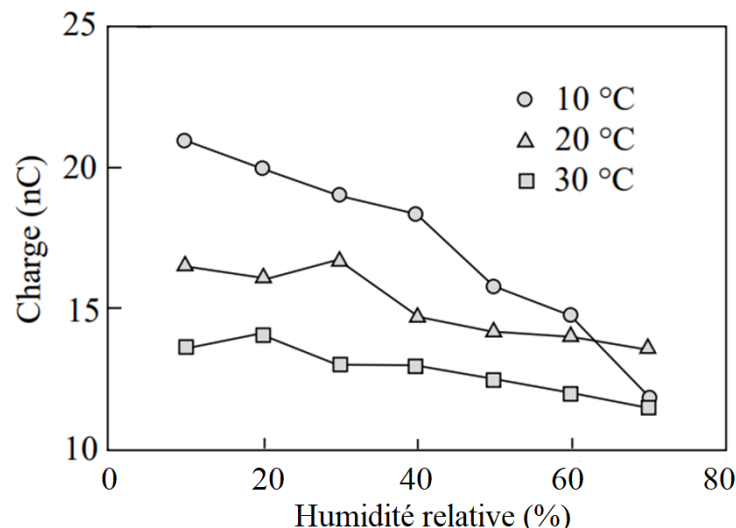


Figure I-7. Charge triboélectrique d'une sphère métallique de 12,7 mm de diamètre en fonction de l'humidité relative [91].

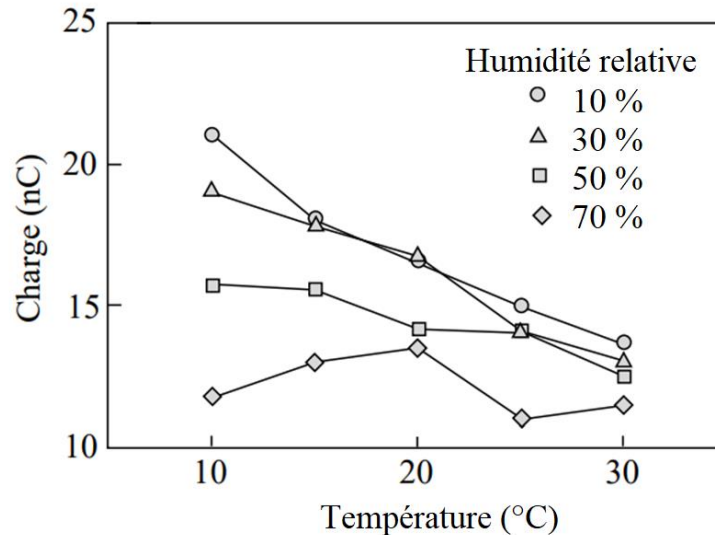


Figure I-8. Charge triboélectrique d'une sphère métallique de 12,7 mm de diamètre en fonction de la température [91].

De nombreux chercheurs ont suggéré que l'humidité adsorbée à la surface joue un rôle dans la triboélectrification [93] et que l'humidité ambiante est également particulièrement importante pour le chargement en surface [94].

McCarty et Whitesides [64] ont étudié le rôle de l'eau dans la triboélectrification et proposent un mécanisme basé sur la théorie de la double couche électrique pour expliquer le transfert de charge à différents niveaux d'humidité ambiante. Quel que soit le mécanisme de charge, il existe de nombreuses preuves suggérant que l'humidité relative de l'air ambiant affecte la triboélectrification.

Cependant, des études sont significativement en désaccord sur l'effet de l'humidité relative (HR) sur la triboélectrification [95-97] : certains résultats montrent que la triboélectrification augmente avec l'augmentation de la HR [63], d'autres montrent que la triboélectrification diminue avec l'augmentation de la HR [98, 91, 92]. En outre, les résultats des références [99, 86] montrent que la dépendance de la triboélectrification par rapport à l'humidité relative est liée aux propriétés des matériaux.

## I.2. Dispositifs de chargement triboélectrique des matériaux granulaires isolants

L'acquisition de charge par effet triboélectrique se produit au niveau surfacique entre deux corps. Cette charge importante est nécessaire pour le tri des granules dans un champ électrique intense. Plusieurs travaux ont été publiés sur les procédés de chargement triboélectrique utilisant des dispositifs mécaniques ou aérodynamiques.



### I.2.1. Dispositifs mécaniques

#### *Tribochargeur de type convoyeur à vis sans fin*

Le dispositif est composé d'une vis sans fin qui se trouve dans un cylindre creux en polyamide d'un rayon  $R = 10$  cm et d'une longueur de 90 cm. La rotation de la vis sans fin provoque la culbute des particules qui se chargent partiellement par contacts répétés entre elles-mêmes et avec la paroi interne du cylindre. Le rôle de ce dispositif est double : le chargement des particules et leur acheminement vers la zone de séparation (Figure I-9) [100].

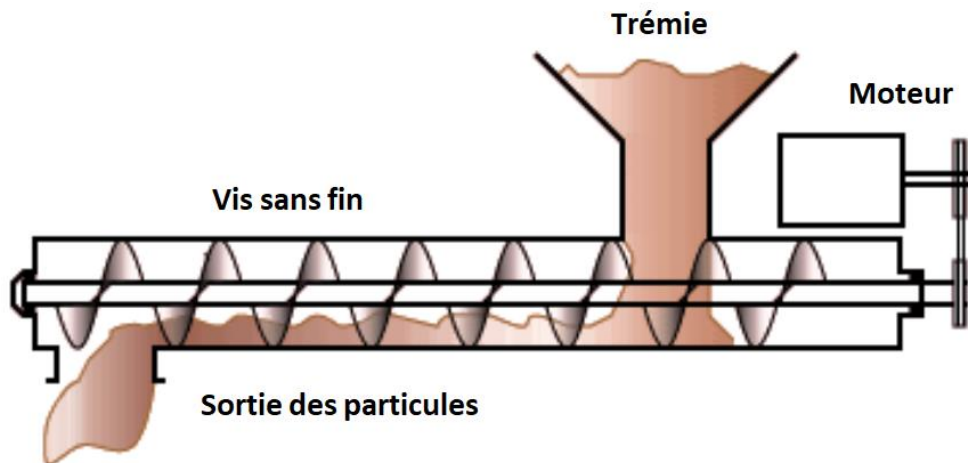


Figure I-9. Dispositif de chargement à vis sans fin [100].

#### *Tribochargeur à vibration*

Le dispositif de charge par vibrations [101, 102] consiste à placer un récipient, dans lequel sont déposées les particules, sur un plateau vibrant (Figure I-10). Les vibrations du plateau se transmettent aux particules par le biais du récipient et vont permettre d'acquérir une charge électrique par contact avec les parois de la boîte et entre elles-mêmes.

La charge des granules va dépendre de la matière du récipient, de l'amplitude et la fréquence des vibrations, du temps de chargement et de la quantité de particules déposées dans le récipient. Ce type de dispositif permet de charger triboélectriquement plus facilement des particules sous-millimétriques que millimétriques.



Figure I-10. Dispositif de charge triboélectrique vibrant de marque Retsch; (1) Dispositif vibrant ; (2) Récipient en acier inoxydable (Diam. : 160 mm) [103].

Une autre solution pour charger les particules est représentée par le dispositif à vibrations. Cette installation a été développée par Blajan et al [103] (Figure I-11). Le matériau à charger glisse dans des canaux en zig-zag mis en mouvement vibratoire [104, 105] sur les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique associé à un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent principalement avec les parois du dispositif. En changeant la vitesse du moteur, il est possible de modifier le mouvement oscillant du dispositif de charge.

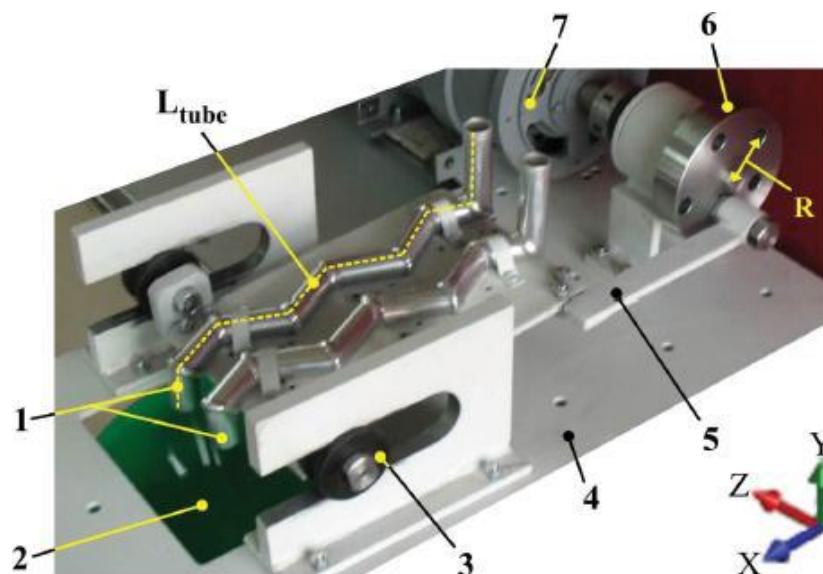


Figure I-11. Dispositif à vibrations ; 1 : tubes de charge ; 2 : sortie des particules chargées ; 3 : glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ;  $R$  : rayon de la manivelle ;  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  : directions du mouvement ;  $L_{tube}$  : longueur du tube.

### ***Tribochargeur à cylindre tournant***

Le tube tournant est utilisé comme tribochargeur pour séparer les déchets plastiques [106, 107]. Il est caractérisé par sa simplicité et sa faible consommation d'énergie. Un avantage de ce dispositif est que les particules de plastique peuvent être alimentées en régime continu dans le cylindre tournant.

Les dispositifs à cylindre tournant (Figure I-12), [108, 109], 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. Le mélange granulaire est mis en mouvement à l'intérieur du cylindre, qui tourne autour d'un axe horizontal légèrement incliné. Les particules passent à travers le tube par la force de la gravité. Afin de créer l'agitation du mélange granulaire, 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. L'accumulation de la charge par les particules est due à deux mécanismes : les collisions entre particules et entre les particules et la paroi du cylindre [110]. Cependant, la quantité de charge peut ne pas être suffisante pour tous les plastiques. L'efficacité du processus de chargement peut être améliorée en ajustant l'angle d'inclinaison ou en augmentant la longueur du tube pour augmenter le temps de séjour des particules dans le dispositif.

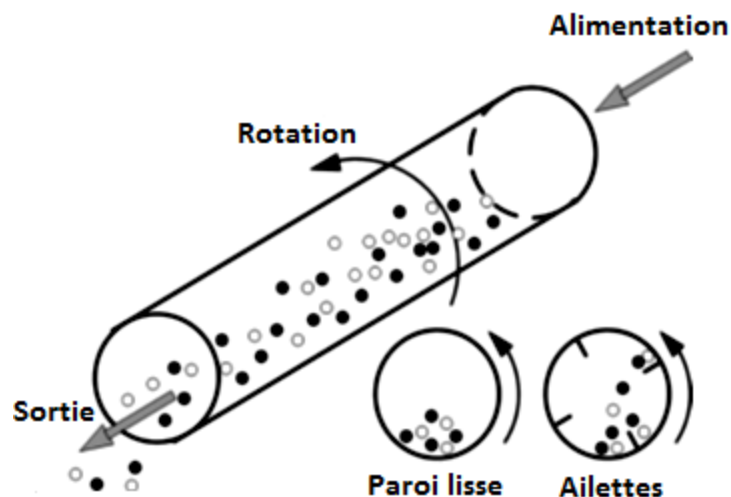


Figure I-12. Représentation schématique d'un dispositif de charge à cylindre tournant [108].

### ***Tribochargeur statique***

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique isolante (Figure I-13), constituée de parois inclinées détachables. Il peut se doter de plusieurs jeux de plaques de natures différentes, afin de pouvoir s'adapter au mélange que l'on souhaite séparer. Les

particules tombent en chute libre et glissent dans ce dispositif par gravité. Le chargement de ces particules s'effectue par frottement et par glissement avec les parois [111, 112]. Pour une utilisation avec des mélanges de particules fines, la gravité ne suffira pas forcément à les faire glisser le long des parois. Pour cela il faudra lier ce dispositif à un vibreur, afin d'empêcher l'agglomération des particules et la stagnation du flux de matière.

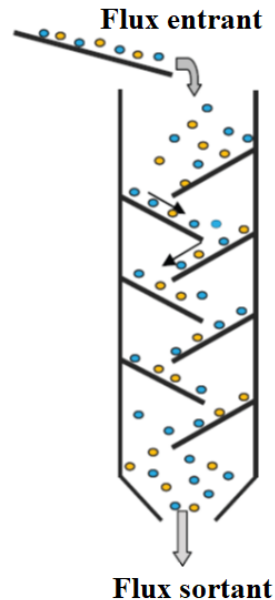


Figure I-13. Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [111].

### ***Chargement par broyeur***

Le broyeur à couteaux présenté dans la Figure I-14 fabriqué par l'entreprise CITF (Dorgeville, Saint Cybardeaux, France), est constitué d'une goulotte pour introduire des morceaux de déchets de plastiques et d'une chambre de coupe composée de deux contre lames fixes, de trois lames tournantes et d'une grille placée sous le système de lames. Le choix de la grille dépend de la taille de granulats souhaitée. Les déchets de plastique broyés sont ensuite collectés dans le bac de récupération qui se trouve sous la grille.

L'opération de broyage des déchets plastiques permet de réduire la taille des particules et d'augmenter l'efficacité du processus de charge triboélectrique et de séparation électrostatique [113, 114]. Les lames rotatives du broyeur découpent les morceaux de déchets. Par conséquent, un transfert de charge se produit grâce à des collisions répétées et des frottements entre les particules de plastiques.

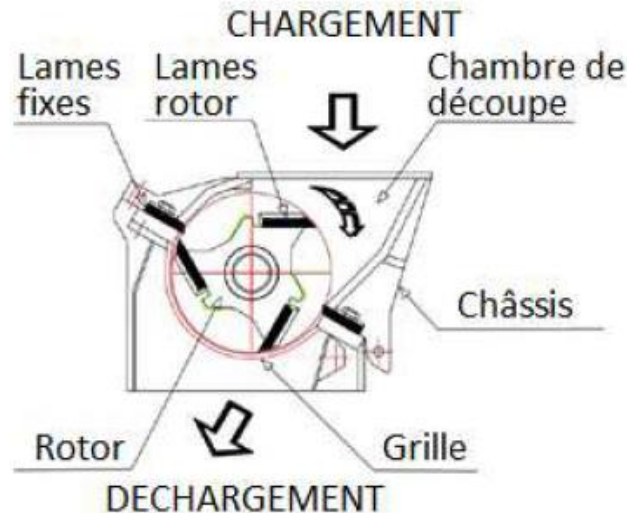


Figure I-14. Représentation schématique du granulateur [115].

### I.2.2. Dispositifs aérauliques

#### *Tribochargeur à hélices*

Les principaux éléments de cette installation sont (Figure I-15) : un tube cylindrique isolant, un moteur entraînant une hélice isolante et un support métallique [116, 117]. La rotation de l'hélice crée un courant d'air descendant donnant naissance à des turbulences aérodynamiques multipliant les collisions des particules granulaires à l'intérieur du cylindre. Les particules granulaires isolantes sont placées dans le dispositif de chargement triboélectrique, puis le moteur à courant continu est mis en marche pendant une durée déterminée et à une vitesse donnée. Les particules isolantes se mettent en mouvement et deux types de collisions se produisent : particules contre les parois du cylindre et particules entre elles. 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.

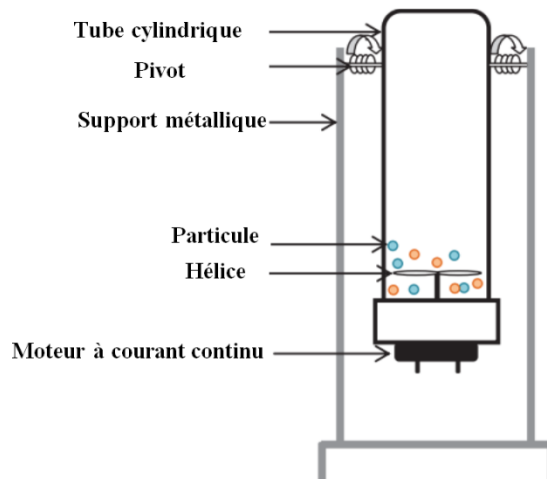


Figure I-15. Représentation schématique d'un dispositif de chargement à hélices [116].

La Figure I-16 représente un autre dispositif similaire équipé de plusieurs hélices tournantes dans un tube cylindrique. Le mélange de particules introduit dans le tube acquiert une charge triboélectrique lors de la mise en marche des hélices [118]. Ce dispositif est adapté pour un fonctionnement continu en introduisant les granules par sa partie supérieure, et en les récupérant chargés à la sortie inférieure.

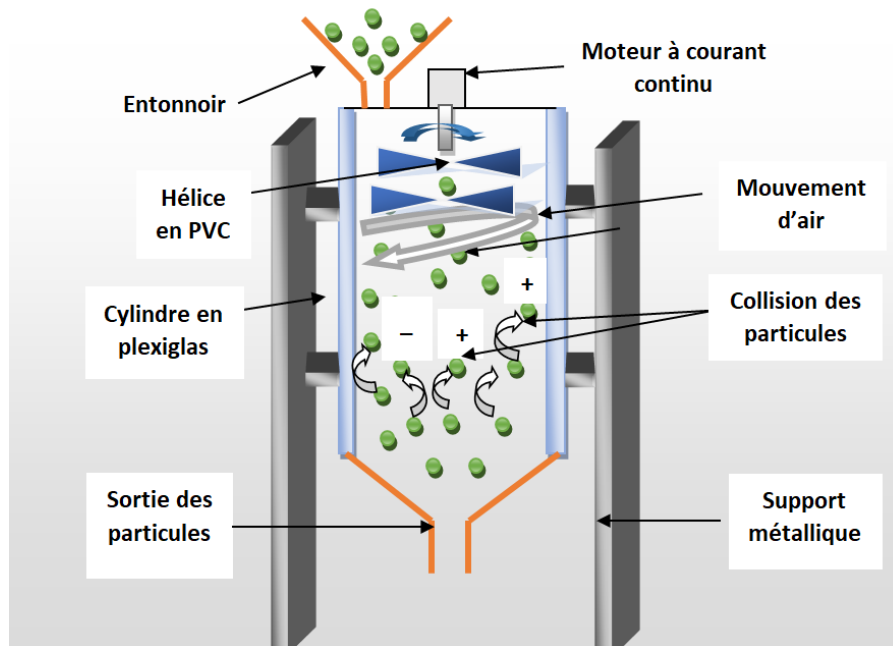


Figure I-16. Dispositif de charge tribo-électrique à plusieurs hélices et à fonctionnement continu [118].

### *Tribochargeur de type cyclone*

Le dispositif est constitué d'un cylindre isolant (Figure I-17), en position verticale. Les matériaux granulaires à charger sont introduits en direction radiale à la paroi intérieure du cylindre, par un ventilateur, dont la vitesse de rotation peut être contrôlée. Le frottement

continu entre les particules et la paroi génère la majorité de la charge acquise dans un dispositif de ce type [119-121].

Le dispositif permet de bien charger les particules de plastiques et conduit à de bonnes séparations triboélectrostatiques des mélanges de PVC/PET, PP/HDPE [106], PE/PVC [122] et ABS/PS/PP [123].

Le principe de fonctionnement de ce dispositif permet aussi une alimentation continue du produit dans un séparateur tribo-aéro-électrostatique et éventuellement son dépoussiérage.

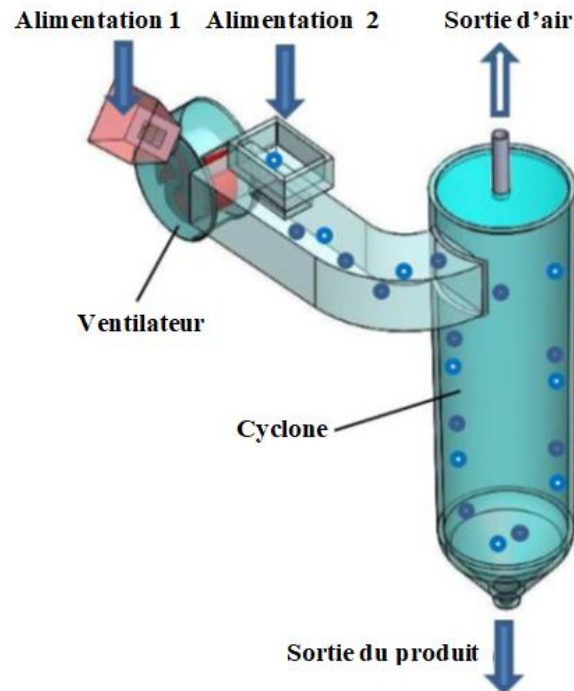


Figure I-17. Représentation schématique d'un dispositif de chargement de type cyclone [119].

### ***Tribochargeur à lit fluidisé***

Le dispositif est un tube cylindrique vertical, en matériau isolant (Figure I-18), délimité à son extrémité basse par une plaque poreuse, sur laquelle est déposé le mélange de particules. L'air est injecté à travers cette plaque poreuse à l'aide d'une soufflante, pour créer un lit fluidisé. Les particules fluidisées acquièrent des charges électriques de signes opposés grâce aux collisions entre elles [124-126]. Le dispositif est particulièrement efficace pour les particules fines, car l'air de fluidisation empêche leur agglomération et favorise le chargement par effet triboélectrique.

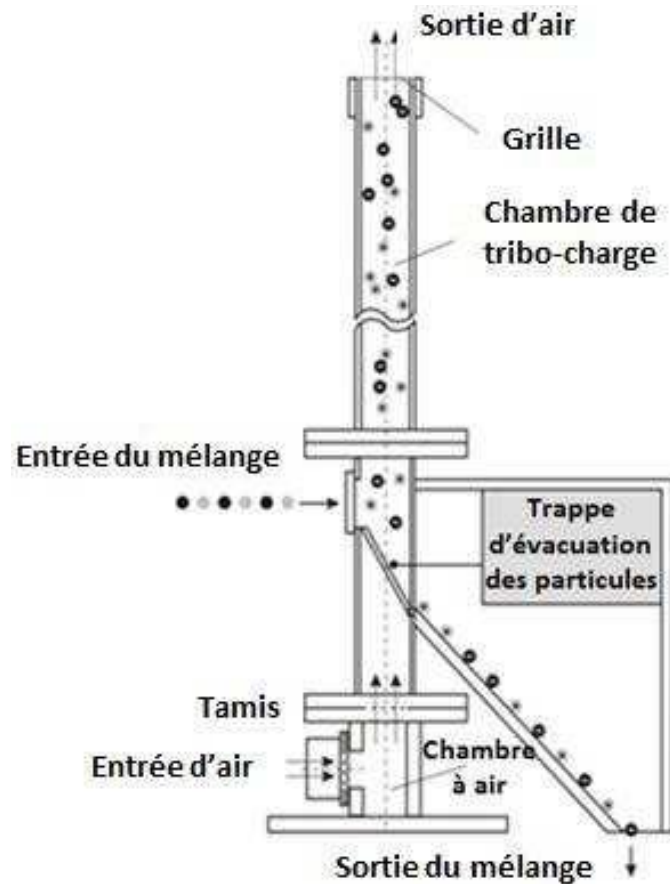


Figure I-18. Dispositif de chargement à lit fluidisé [126].

C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement triboélectrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six régimes (Figure I-19) [127-130]. considérons une couche de particules solides reposant sur une plaque poreuse horizontale à l'intérieur d'un cylindre vertical. Un gaz est injecté à travers la plaque dans le sens ascendant :

**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  $U_{mf}$ . Le lit montre une certaine expansion de la couche, on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules.

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



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

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

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

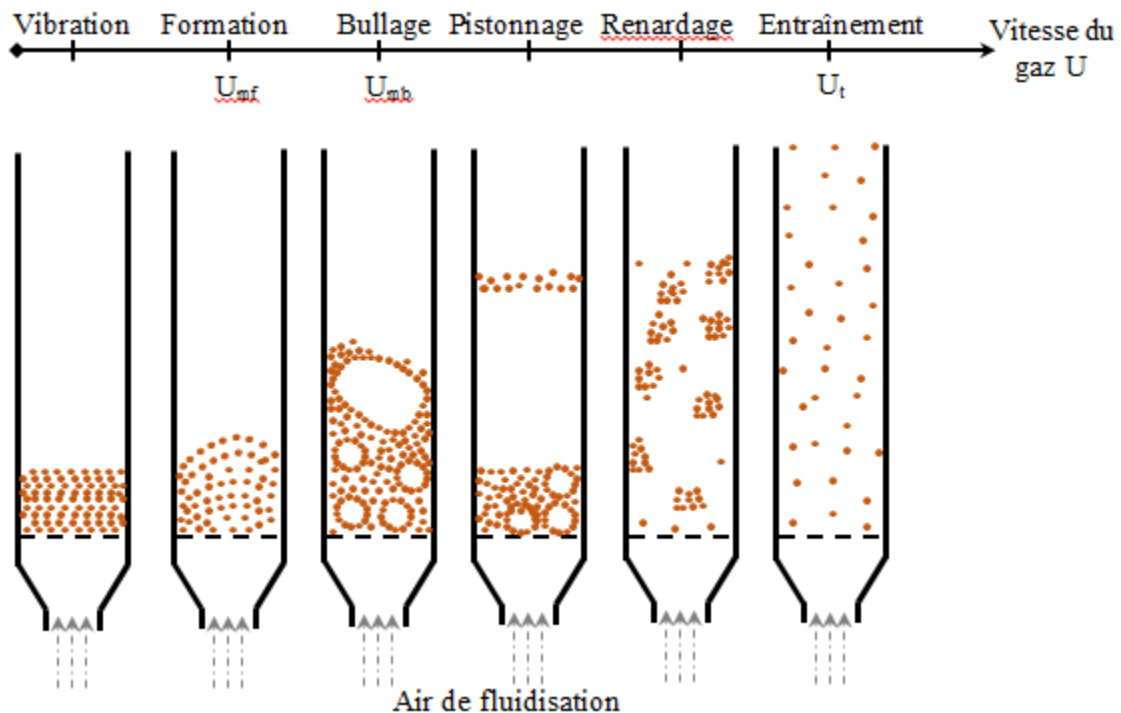


Figure I-19. Régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse du gaz [125].

### **Chargeur tribo-aéro-électrostatique**

C'est une combinaison de deux modes de chargement en cascade. Le dispositif est une chambre parallélépipédique isolante comprenant deux parties (Figure I-20) : après avoir été mises en agitation dans un lit fluidisé, les particules sont dirigées vers la deuxième partie du dispositif destiné au chargement statique par des parois inclinées. Il est ainsi possible de mieux contrôler la charge acquise, en multipliant les paramètres de chargement [131, 132].

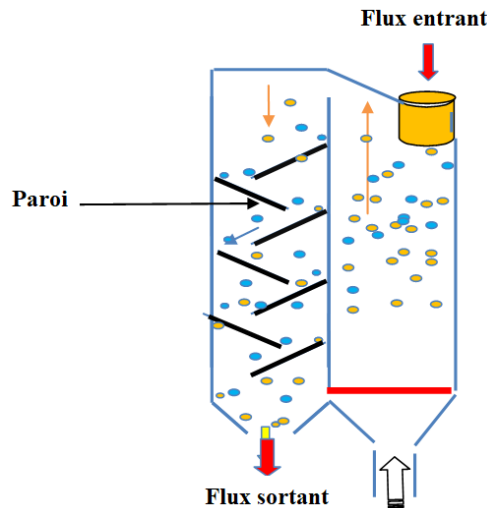


Figure I-20. Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique [131].

### I.3. Installations de séparation en champ électrique

La séparation électrostatique de matériaux conducteurs et isolants peut avoir de nombreuses applications [133, 134] : recyclage des déchets de câbles électriques et de DEEE, purification de produits agricoles, valorisation des métaux contenus dans les résidus miniers.

Les séparateurs triboélectrostatiques 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 [135].

À cause de leurs caractéristiques physiques spécifiques, la charge acquise ainsi que les trajectoires des particules sont différentes [132], [136].

L'avantage des séparateurs électrostatiques est sans conteste leur faible consommation d'énergie et leur grande adaptabilité ainsi que des coûts réduits d'exploitation et d'entretien.

#### I.3.1. Séparateurs électrostatiques

La séparation électrostatique est une technique qui fait appel aux forces qui s'exercent dans un champ électrique sur les constituants d'un mélange de granules préchargés par l'un des processus de triboélectrification cité précédemment, par induction électrostatique ou par une décharge couronne. Dans la plupart des cas, des champs électriques de l'ordre de  $10^6 \text{ V.m}^{-1}$  sont nécessaires. 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 [9], [137 -141].

### *Séparateur électrostatique multifonction à tapis roulant*

Il est constitué de deux parties (Figure I-21) : la première partie est pour le chargement des particules granulaires ou micronisées grâce à l'utilisation d'un ou plusieurs de trois mécanismes physiques différents : l'effet triboélectrique pour la séparation des mélanges isolant-isolant [142-144], la décharge couronne de polarité positive ou négative et l'induction électrostatique pour les mélanges isolant- conducteur [145-147] et conducteur-conducteur [148, 149].

La seconde 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 [150, 151].

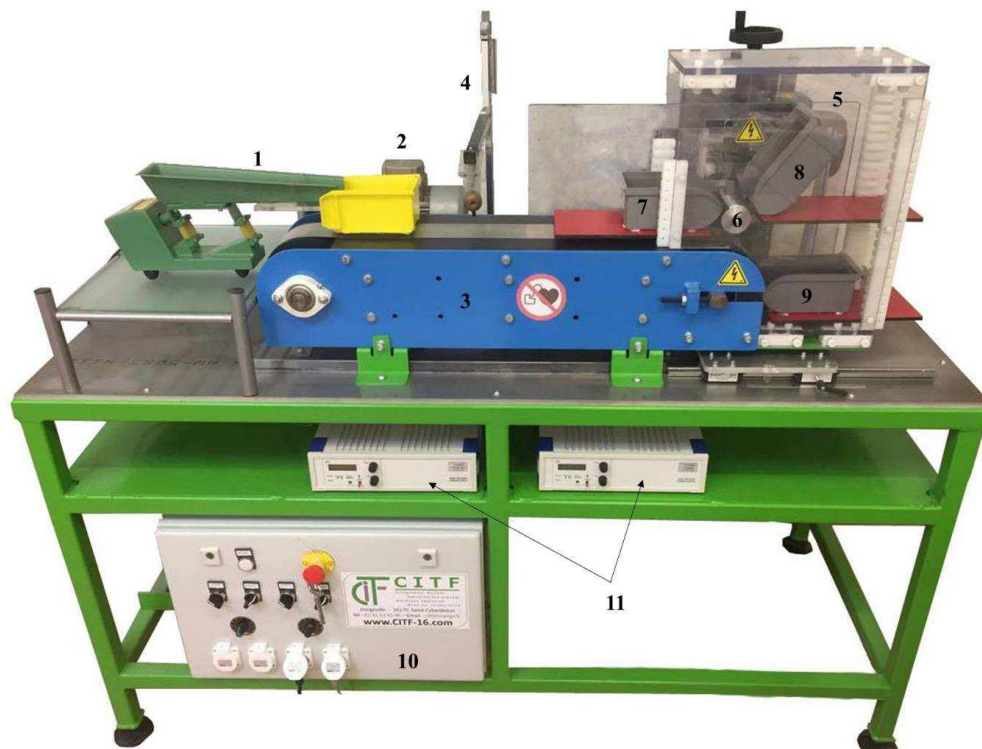


Figure I-21. Séparateur électrostatique à électrode-convoyeur multifonctions [150, 151] ; 1 : Goulotte oscillante ; 2 : Moteur électrique entrainant le convoyeur métallique ; 3 : Convoyeur métallique ; 4 : Electrode couronne ; 5 : Moteur électrique entrainant l'électrode cylindrique ; 6 : Electrode cylindrique tournante ; 7 : Boite 1 ; 8 : Boite 2 ; 9 : Boite 3, 10 : Armoire électrique ; 11 : Alimentations en haute tension continue.

### *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 [120]. Actuellement, le processus est appliqué avec succès dans le tri des plastiques granulaires issus des déchets d'équipements électriques et électroniques [92-95]. 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-22). 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 [152-156].

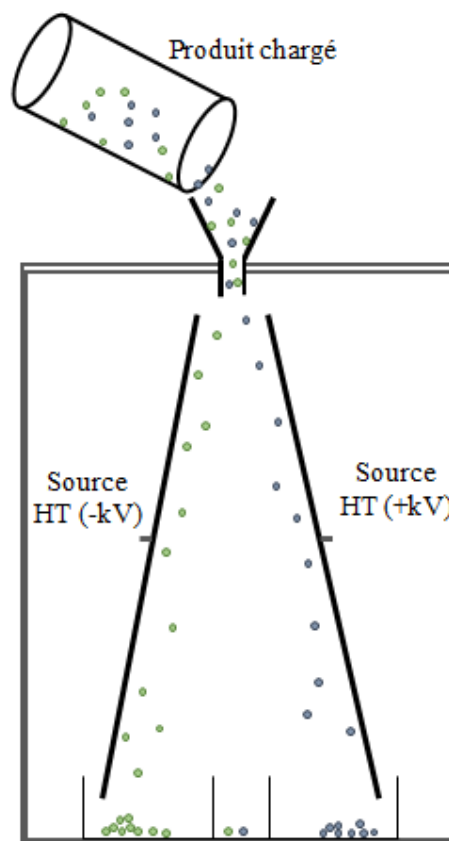


Figure I-22. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à chute libre alimenté par un tribochargeur à cylindre tournant.

### *Séparateur électrostatique à tambour*

Ce type de séparateur électrostatique (Figure I-23) est le modèle le plus utilisé dans l'industrie. Deux mécanismes de charge sont alors simultanément employés : la décharge couronne et l'induction électrostatique. Le premier affecte seulement les particules isolantes alors que l'induction électrostatique intervient uniquement dans le cas des particules conductrices [157, 158].

Les particules conductrice ou isolantes sont chargées dans le flux d'ions monopolaires générés par une électrode à faible rayon de courbure, appelée électrode corona, connectée à une source de haute tension (1). Les granules déposés en monocouche par le vibro-transporteur (2) sur le cylindre tournant (tambour) (3) acquièrent tous une charge électrique de même signe que la polarité de l'électrode couronne.

Les granules isolants adhèrent à la surface du tambour grâce à la force d'image électrique et tombent dans la partie gauche du collecteur tandis que les granules conducteurs évacuent rapidement leurs charges par le tambour relié à la terre. En arrivant dans la zone de champ électrostatique généré par l'électrode cylindrique statique de section transversale elliptique (4), ils acquièrent par induction électrostatique une charge de signe opposée que l'électrode reliée à la HT. Ils sont ensuite attirés par l'électrode (4) et récupérés dans la partie droite du collecteur. Certains séparateurs sont équipés d'une autre électrode corona, appelée électrode de neutralisation (5), pour réduire, voire éliminer, la charge  $Q$  des granules isolants et faciliter ainsi leur détachement du tambour. Les particules qui, malgré l'action de l'électrode de neutralisation, restent « collées » sont éliminées de la surface du tambour par une brosse (6).

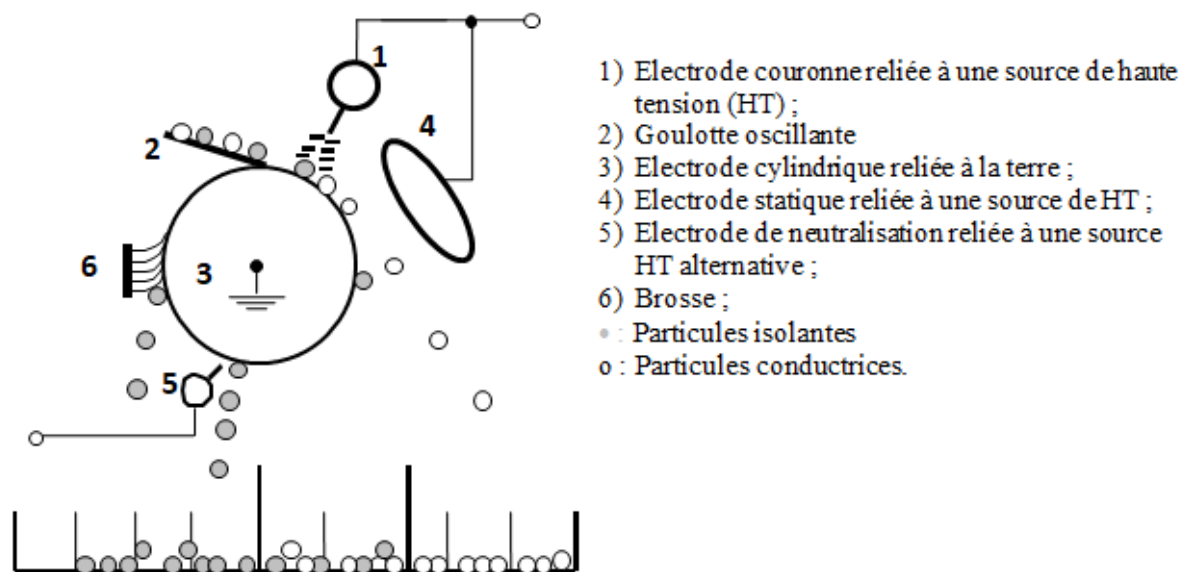


Figure I-23. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour [158].

### I.3.2. Séparateurs tribo-aéro-électrostatiques

Plusieurs études ont été faites sur cette gamme de séparateurs électrostatiques [125, 159, 160], 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 bandes transporteuses breveté par Calin et Dascalescu [160-162] 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-24). 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.

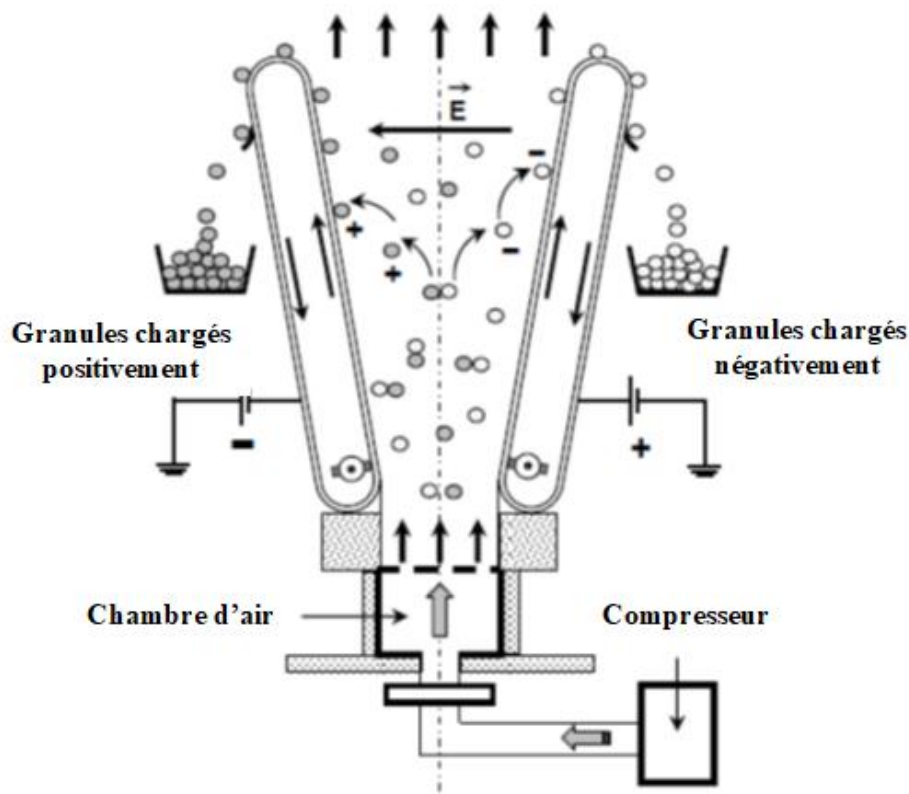


Figure I-24. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses [160].

**Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes cylindriques tournantes** à le même principe de fonctionnement que celui présenté ci-dessus, la différence entre les deux procédés réside dans la forme des électrodes utilisées. Le mélange à séparer est introduit dans la chambre de fluidisation qui sert aussi de chambre de séparation. Le champ électrique est

généralisé entre deux électrodes cylindriques tournantes. Elles sont alimentées à partir de deux alimentations de haute tension continue de polarités opposées, leur entraînement à vitesse variable étant réalisé par des moteurs à courant continu. Les produits séparés sont récupérés dans les deux bacs collecteurs placés de chaque côté de la chambre de séparation [163, 164].

Ce type de séparateur (Figure I-25) 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.

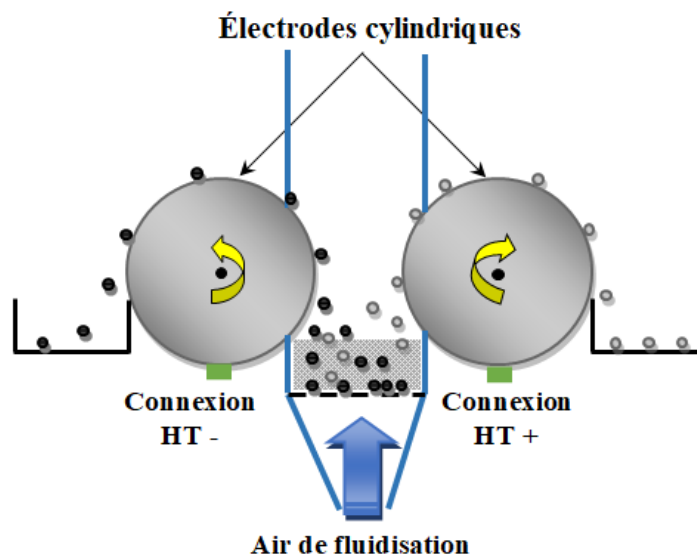


Figure I-25. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à cylindres tournants [164].

**Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants** est particulièrement adapté au traitement des mélanges de particules fines. Le chargement des particules se fait par effet triboélectrique dans un lit fluidisé généré dans une chambre de séparation, dont les parois sont en PMMA transparent. L'injection de l'air est assurée par une soufflante contrôlée par un variateur de vitesse. Le champ électrique est généré entre deux disques tournants en acier inoxydable, plongés dans le lit fluidisé et alimentés par deux sources de haute tension de polarités opposées. Ces électrodes sont entraînées en rotation par deux moteurs électriques dont la vitesse est contrôlée par un variateur électronique.



Les produits séparés sont récupérés dans deux boîtes collectrices placées à l'extérieur de la chambre de séparation (Figure I-26). La récupération des particules sur les électrodes est assurée par des racleurs qui viennent lécher les particules sur les surfaces des disques [165, 167].

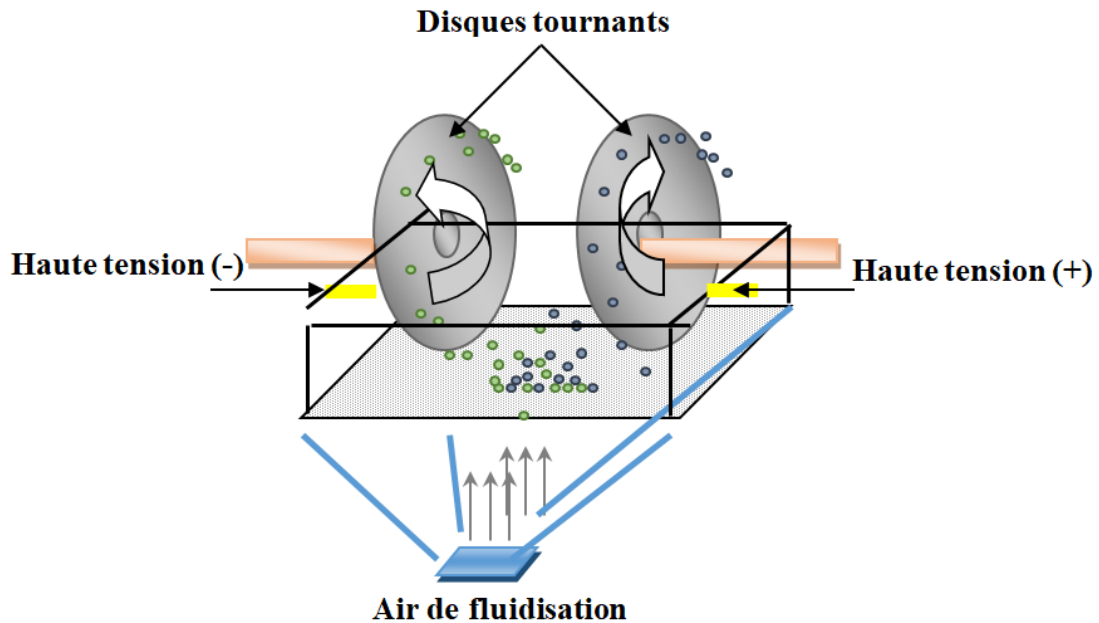


Figure I-26. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants [165].

### *Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales*

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales (Figure I-27) 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 [168].



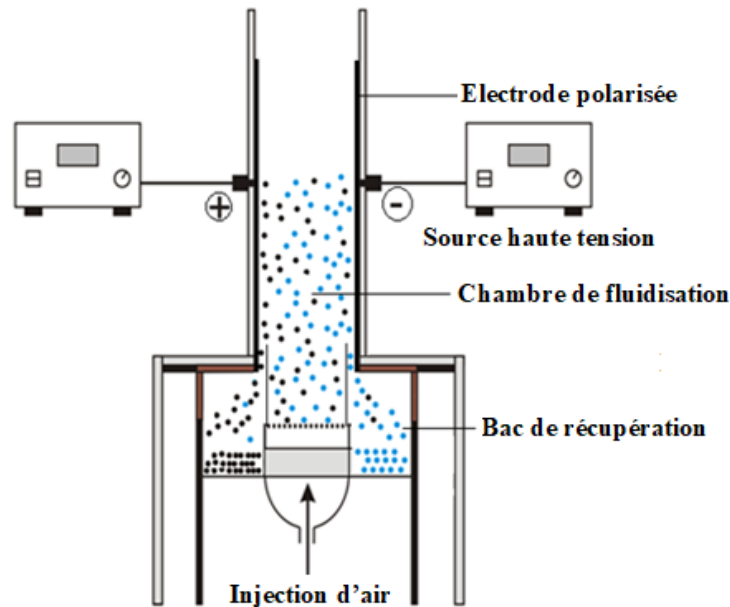


Figure I-27. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales [168].

### I.3.3. Installations industrielles

Le projet ELREC, qui a regroupé 9 acteurs européens (ERA Technology Ltd, Hamos GmbH, Ragn-Sells, Ragn Sells Foundation, Centro Technologico Gaiker, Electrostatic solutions Ltd, KTH Polymerteknologi, HLC Henley Burrowes, Komotini Paper Mill S.A et l'université de Southampton) dans le domaine des séparateurs électrostatiques, a duré 4 ans du 1er janvier 1997 jusqu'en février 2001. Ce projet a permis de développer plusieurs types de séparateurs électrostatiques dont le séparateur triboélectrique [169]. Actuellement, il y a beaucoup de sociétés qui fabriquent, utilisent et commercialisent des installations de séparation électrostatique dans le monde.

#### **HAMOS**

Leader sur le marché de la séparation triboélectrique appliquée au traitement des déchets, la société allemande Hamos GmbH a développé et commercialisé toute une gamme de séparateurs. Hamos EKS a été conçu pour un usage industriel 24 heures sur 24 à fortes charges (1 tonne/heure). Comme le montre le tableau I.2, les solutions proposées par HAMOS sont nombreuses en fonction de la capacité de traitement requise. De plus, ce dernier dispose du modèle EKS 1022-1 (Figure I-28) qui atteint un haut degré de pureté des produits séparés.

Le mélange de plastiques broyés est introduit par un convoyeur vibrant dans l'unité de charge triboélectrique. Son passage dans un champ électrique entraîne la séparation électrostatique. Les particules positives sont attirées par une électrode négative, tandis que les

particules négatives sont repoussées. Il est possible de séparer toutes sortes de mélanges plastiques différents à travers des modifications mineures de l'unité de chargement et en modifiant la position de la plaque de séparation (Figure I-29) [169, 170].

Tableau I-2. Les caractéristiques des différents modèles de machines proposés par HAMOS [170].

Modèles	Capacité (T/h)	Étages de séparation	Qualité	Dimension (L×I×H) (m)	Caractéristique générale
EKS 0531-0	0,2 - 0,3	1	Pureté normale	N/C	Faible capacité de traitement
EKS 1021-1	0,5 – 0,75	1	Pureté normale	2×1,5×1	Moyenne capacité de traitement
EKS 1022-1	1 - 1,5	1	Pureté normale	N/C	Forte capacité de traitement
EKS 1022-2	0,5 – 0,75	2	Haute pureté	2×3,9×2	Possible de faire travailler les deux étages soit en parallèle (grosse capacité de traitement) soit en série (pureté élevée)



Figure I-28. Séparateur d'HAMOS EKS [170].

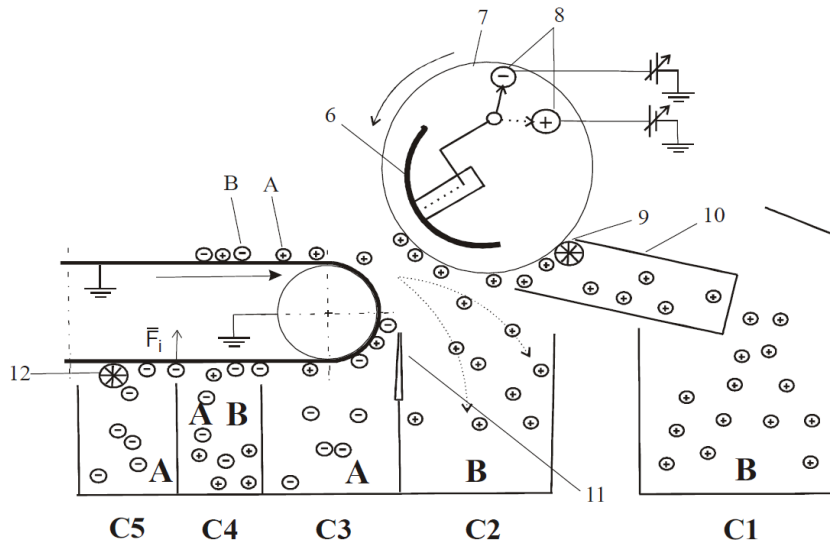


Figure I-29. Schéma de principe de la zone de séparation électrostatique de séparateur EKS-HAMOS : A, B – granules en plastique ; 6- électrode haute tension ; 7- cylindre métallique rotatif ; 8- contacts haute tension ; 9,12- brosses pour enlever le matériau ; 10- tube collecteur ; 11- palette déflecteur ; C1,..., C5- collecteurs.

### MBA POLYMERS

Cette société américaine de plasturgie a développé des procédés de séparation électrostatique très efficaces (Figure I-30). 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.

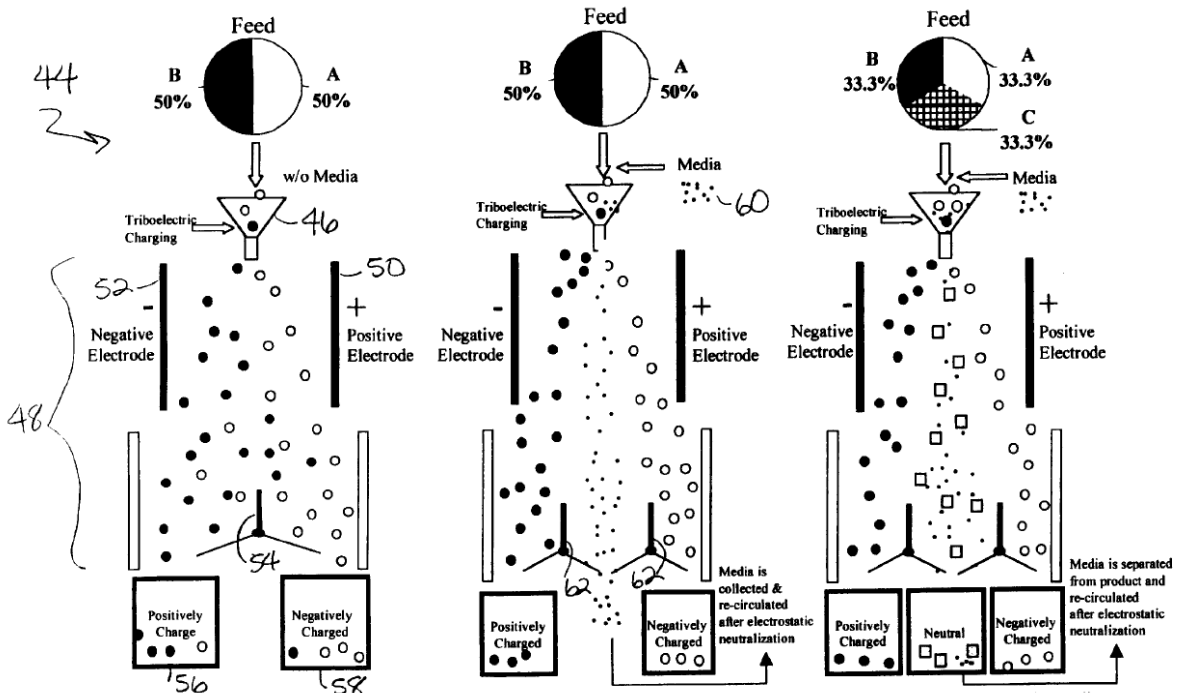


Figure I-30. Ajout d'un média dans un mélange traité par un séparateur électrostatique à chute libre [171]. (a) Séparation d'un mélange binaire, sans média ; (b) Séparation d'un mélange binaire avec média ; (c) Séparation idéal d'un mélange ternaire avec média.

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.

### **CARPCO (GROUPE OUTOKUMPU)**

Cette société, implantée aux Etats-Unis et appartenant au groupe finlandais Outokumpu est la plus récente sur le marché des séparateurs triboélectriques appliqués au traitement des déchets. Elle a une longue expérience de cette technologie dans le domaine minier et mène une politique très active en termes de recherche et développement. Elle propose des produits aussi performants que son concurrent direct HAMOS.

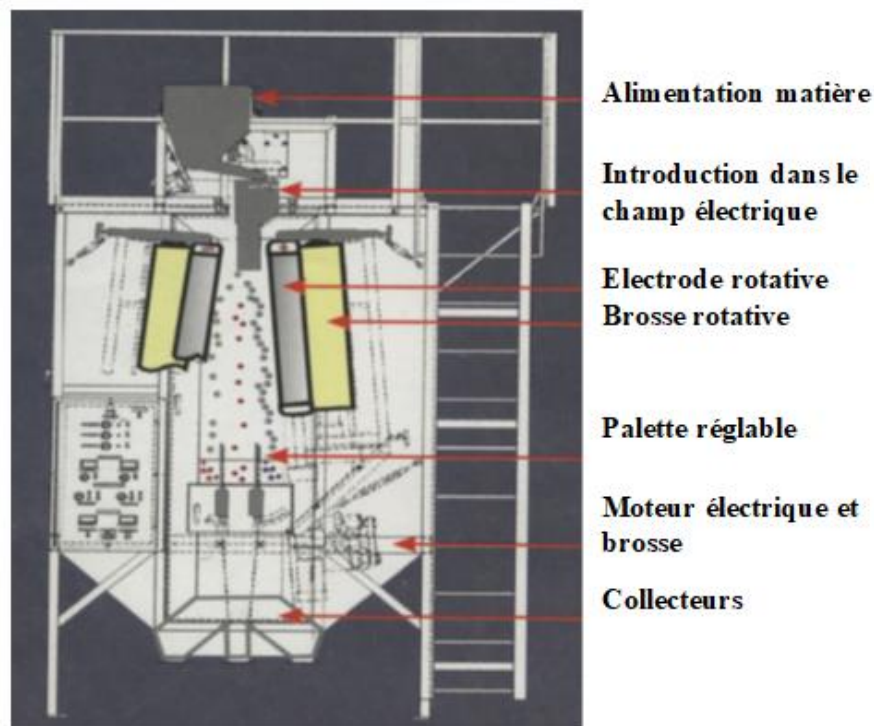


Figure I-31. Séparateur tribo électrostatique à chute libre Carpcos.

La société américaine CARPCO est aussi connue dans le domaine surtout par son séparateur en « V » (Figure I-31) 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 [172, 173].

### **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 [174].

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%.

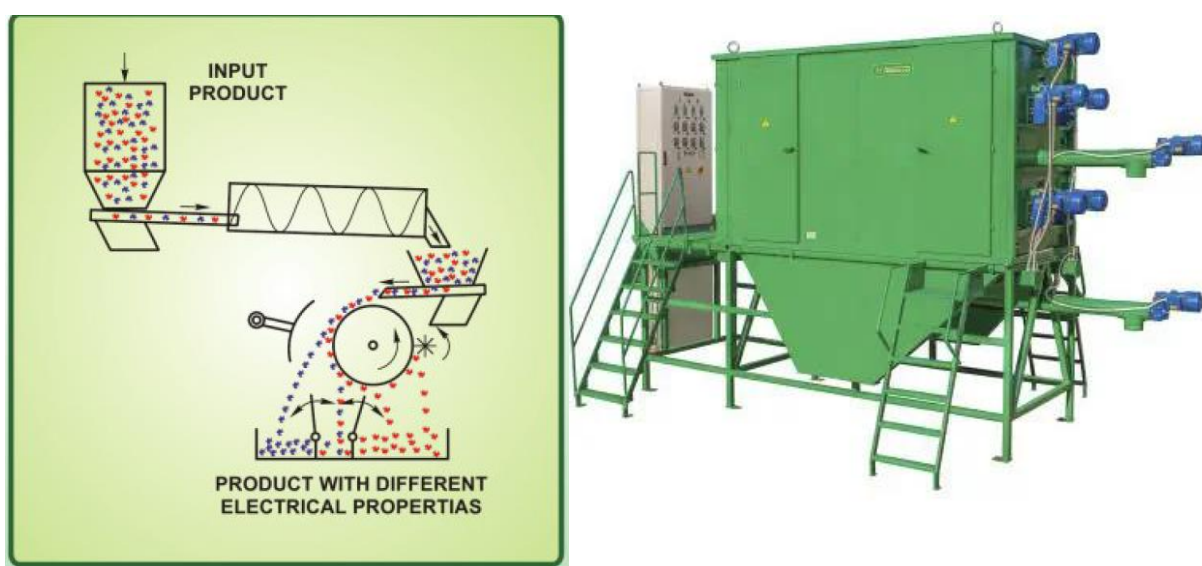


Figure I-32. Séparateur tribo-électrostatique PRODECOLOGIA [174].

**CITF**

L'installation de séparation électrostatique CP100 (Figure I-33), développée par CITF (Dorgeville, Charente, France) est destinée à la séparation de mélanges de matériaux isolants et conducteurs de tailles millimétriques provenant de déchets de câbles électriques [115].



Figure I-33. Séparateur électrostatique industriel de série CP100 ; 1 : châssis ; 2 : armoires électriques ; 3 : pré-broyeur ; 4 : convoyeur ; 5 : broyeur granulateur ; 6 : table vibrante ; 7 : électrodes ; 8 : convoyeur ; 9 : vis sans fin ; 10 : caisses palettes [115].

Le principe de fonctionnement du séparateur CP100 est le suivant : après mise sous tension et mise en route de la machine, le mélange (conducteur/plastique) est déposé directement dans le déchiqueteur (3) afin de découper et de réduire la taille du mélange à séparer. Le convoyeur (4) transporte le mélange vers le broyeur. À la suite du broyage, un autre convoyeur permet de conduire les granules vers une table vibrante pour les déposer en monocouche sur l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre, en vue de leur séparation dans un champ couronne- électrostatique.

Les granules séparés sont récupérés dans les bacs du collecteur. Le produit mixte de séparation tombe dans une vis sans fin qui redirige les particules jusqu'au broyeur pour retrouver ainsi le flux initial. Cela permet d'augmenter le rendement de l'installation.



#### **I.4. Conclusions**

Il existe plusieurs installations de chargements triboélectriques et de séparation dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières. Cependant, leur adaptation aux conditions industrielles n'est que peu approfondie en raison des difficultés liées à la diversité des formes et tailles des particules, notamment la présence de poussières.

Dans la séparation électrostatique, trois mécanismes physiques permettent la charge des particules : l'effet couronne, l'induction électrostatique et la charge triboélectrique.

L'effet triboélectrique est notamment utilisé pour la séparation des mélanges isolant–isolant. Il s'agit de l'apparition de charges électriques après mise en contact ou frottement entre deux matériaux de natures différentes. Plusieurs mécanismes physiques ont été suggérés comme explications potentielles de cet effet : les transferts d'électrons, d'ions ou de matière.

Plusieurs facteurs peuvent influencer la quantité et la polarité de la charge acquise par effet triboélectrique. La performance des dispositifs de chargement triboélectrique est influencée par l'humidité ambiante et par la quantité d'eau absorbée à la surface des granulés.

Ceci qui justifie pleinement l'orientation de cette thèse vers la conception et la réalisation de dispositifs permettant d'approfondir l'étude de ces facteurs et de trouver des solutions techniques viables aux problèmes de séparation électrostatique de matières plastiques granulaires de dimensions millimétriques, afin d'atteindre l'objectif final : développement d'installations de séparation électrostatique performantes, pour des applications au recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques.

### II. INSTALLATIONS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

La séparation électrostatique est une technique efficace de tri des constituants des mélanges granulaires en fonction de leur comportement dans un champ électrique intense. Dans le cas des mélanges de matériaux isolants, les constituants doivent être préalablement chargés par effet triboélectrique pour que la séparation électrostatique puisse se réaliser. L'étude de l'état de l'art exposé dans le chapitre précédent a révélé l'existence d'une multitude de dispositifs de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique utilisés dans l'industrie ou dans les laboratoires de recherche.

La faisabilité de la séparation triboélectrostatique des matériaux présentés dans le paragraphe II.1 a été étudiée en utilisant plusieurs installations expérimentales qui sont détaillées dans le paragraphe II.2. Il s'agit des chargeurs triboélectriques à cylindre tournant et à lit fluidisé, ainsi que du séparateur électrostatique à cylindre tournant de la société Prodecologia, Rivne, Ukraine, partenaire industriel de l'équipe de recherche.

Dans le but d'améliorer l'efficacité des processus de charge triboélectrique et de séparation électrostatique, de nouvelles installations ont été conçues par l'institut PPRIME, et réalisées par la société CITF. Ces installations décrites dans le paragraphe II.3 sont le chargeur triboélectrique multicylindre, le séparateur électrostatique à table vibrante (TVE) et le prototype de séparateur électrostatique industriel PRD.

Les différentes techniques de mesure utilisées ainsi que la méthode des plans d'expérience qui a permis la modélisation de certains des processus de charge ou de séparation électrostatique sont décrites dans le paragraphe II.4.

#### II.1. Matériaux

Les expériences de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique ont été réalisées sur plusieurs types de plastiques représentatifs des matériaux présents dans la composition des déchets d'équipements électriques et électroniques.

##### II.1.1. Matériaux « modèles »

Afin de faciliter l'étude des facteurs influents des processus de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique, une première série d'expériences a été réalisée avec les granules de polymères utilisés en plasturgie dont les caractéristiques chimiques et granulométriques sont bien maîtrisées (Figure II-1).



### ***Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)***

L'ABS (Acrylonitrile-butadiène-styrène) est solide, résilient et facile à mouler. Il est un terpolymère fabriqué en copolymérisant 3 monomères : l'acrylonitrile, le butadiène et le styrène. L'acrylonitrile (de 15% à 35%) donne la résistance thermique et chimique, le butadiène (de 5% à 30%) semblable à du caoutchouc donne la ductilité et la résistance mécanique, le styrène (de 40% à 60%) donne une surface brillante. Il est utilisé pour la fabrication des casques de sécurité, toits des caravanes ou camping-cars, panneaux d'instruments, équipement de communication, machines de bureau, habillage interne des réfrigérateurs, etc. [175].

### ***Chlorure de polyvinyle (PVC)***

Le PVC est un des polymères les moins chers et les plus polyvalents. Avec le polyéthylène, ils sont les polymères les plus largement utilisés. Dans sa forme pure comme thermoplastique, le tpPVC est rigide et pas très résistant aux chocs. Son prix bas en fait un plastique économique pour des applications où des conditions extrêmes de service ne sont pas rencontrées. L'incorporation de plastifiants donne du PVC flexible, elPVC, ayant des propriétés semblables au cuir ou au caoutchouc et est utilisé pour se substituer à ces deux matériaux. À l'opposé, le renfort avec des fibres de verre donne un matériau qui est suffisamment rigide, résistant et robuste pour être utilisé pour des toitures, des sols et des panneaux de construction. Le PVC rigide et le PVC flexible peuvent tous deux être moussés pour donner des panneaux structuraux légers pour usages domestiques et des pièces d'habillage pour l'habitacle d'automobiles. Le mélange avec d'autres polymères ouvre encore plus la gamme des propriétés : les disques vinyles étaient faits avec un copolymère de chlorure de vinyle et d'acétate de vinyle, les bouteilles soufflées et le film plastique sont faits avec un copolymère de chlorure de vinyle et d'acrylique [176].

### ***Polycarbonate (PC)***

Le PC est un des thermoplastiques « techniques », terme qui signifie que ces produits ont de meilleures propriétés mécaniques que les polymères bon marché de base. L'anneau benzénique et le groupe carbonate se combinent dans le PC pur pour lui donner ses caractéristiques uniques de transparence optique, de bonne résistance à l'impact et de rigidité même à températures relativement élevées. Ces propriétés font du PC un bon choix pour les applications comme les disques compacts, les casques de sécurité et le capot des appareils électriques. Pour accroître encore plus les propriétés du PC, il est possible de co-polymériser la molécule avec d'autres monomères (ce qui améliore son ininflammabilité, son indice de

réfraction et sa résistance au ramollissement) ou de renforcer le PC avec des fibres de verre (ce qui donne de meilleures propriétés mécaniques à températures élevées) [177].

### ***Polyéthylène (PE)***

Le polyéthylène est inerte et extrêmement résistant à l'eau, douce ou salée, aux aliments et à la plupart des solutions aqueuses. C'est la raison pour laquelle il est largement utilisé pour des articles ménagers, des récipients pour aliments ou des planches de découpe. Le polyéthylène est bon marché et particulièrement facile à mouler et à mettre en œuvre. Il accepte une grande gamme de coloris, peut être transparent, translucide ou opaque. Son toucher est plaisant, un petit peu cireux. Ce polymère peut être texturé ou métallisé mais il est difficile à mettre en peinture [178].

### ***Polypropylène (PP)***

Le polypropylène est une molécule très semblable au PE, avec un prix, des méthodes de mise en œuvre et des applications similaires. Comme le PE, il est produit en très grandes quantités (déjà plus de 30 millions de tonnes par an en 2000), avec un taux de croissance de presque 10% par an. Toujours comme le PE, la longueur de sa molécule et ses branchements latéraux peuvent être ajustés par une catalyse intelligente, donnant un contrôle précis de sa résistance à l'impact et des propriétés qui influencent son aptitude à être moulé ou étiré. Dans sa forme pure, le polypropylène est inflammable et se dégrade à la lumière solaire. Des ignifugeants peuvent ralentir sa combustion et des stabilisants lui donner une très bonne résistance tant aux rayonnements UV qu'à l'eau douce ou salée ainsi qu'à la plupart des solutions aqueuses [179].

### ***Polystyrène (PS)***

Le polystyrène se présente sous 3 formes : comme matériau simple, appelé polystyrène cristal (généralement identifié par le sigle GPPS pour son nom en anglais General Purpose PolyStyrene), mélangé à du polybutadiène, comme une variante à haute résistance à l'impact (généralement identifiée par le sigle HIPS pour son nom en anglais High Impact PolyStyrene) et, finalement, comme de la mousse de polystyrène. Ce polymère optiquement clair, bon marché et facilement moulable nous est familier comme le matériau standard des boîtiers de CD. Dans sa forme la plus simple, le PS est cassant. Ses propriétés mécaniques sont fortement améliorées en le mélangeant avec du polybutadiène mais au détriment de sa transparence optique. Le PS à haute résistance à l'impact (10% de polybutadiène) est beaucoup plus solide, même à basse température (c'est à dire jusqu'à  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). La plus importante application du PS est la mousse d'emballage [180].

**II.1.2. Matériaux issus des DEEE**

Pour l'étude du chargement triboélectrique des plastiques et de la séparation de mélanges isolant-isolant, des déchets d'équipements électriques et électroniques ont été déchiquetés par le biais d'un broyeur à couteaux. Les particules obtenues sont représentées sur la Figure II-1.

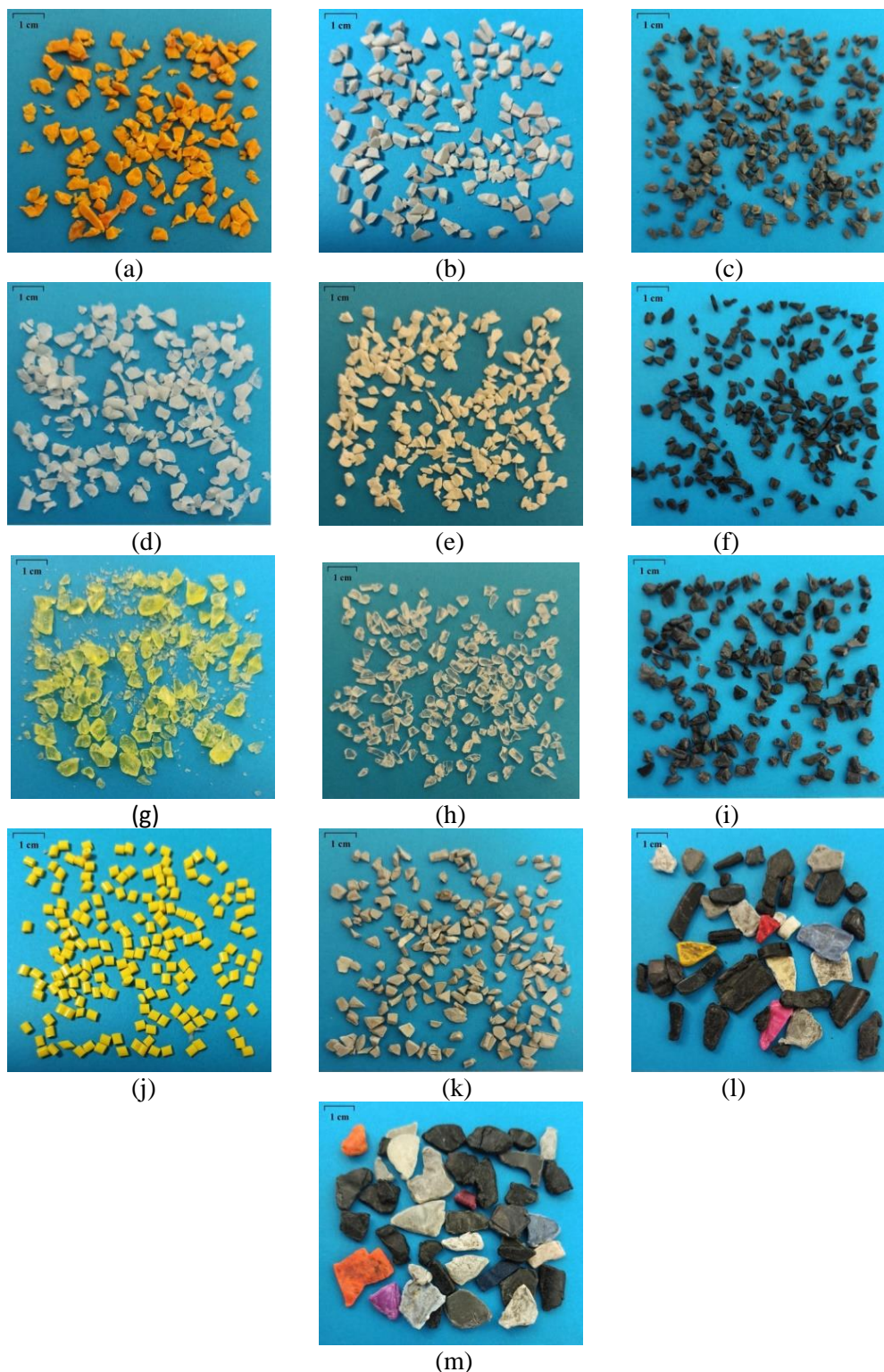


Figure II-1. Photographies des tailles et formes des matériaux granulaires étudiés : (a) PP orange, (b) PP gris, (c) PVC, (d) PE, (e) PC, (f) PS noir, (g) PS jaune, (h) PC Cristal, (i) HIPS, (j) ABS jaune, (k) ABS gris, (l) PS + ABS, (m) PP + PE.

## II : INSTALLATIONS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Les essais ont été menés sur plusieurs types de polymères : (a) Polypropylène orange (PP orange), (b) Polypropylène gris (PP gris), (c) Polychlorure de vinyle (PVC), (d) Polyéthylène (PE), (e) Polycarbonate (PC), (f) Polystyrène noir (PS noir), (g) Polystyrène jaune (PS jaune), (h) PC Cristal, (i) High-Impact Polystyrène (HIPS), (j) Acrylonitrile Butadiène Styène jaune (ABS jaune), (k) Acrylonitrile Butadiène Styène gris (ABS gris), (l) mélange de déchets réel composé de Polystyrène et d'Acrylonitrile Butadiène Styène (PS + ABS), (m) mélange de déchets réel composé de polypropylène et de polyéthylène (PP + PE).

Les particules de ces polymères se caractérisent par une dispersion de leurs formes et de leurs tailles (3 mm à 6 mm), ce qui est tout à fait représentatif du flux industriel. Dans ce cas, il n'est pas toujours possible de déterminer les composants des mélanges visuellement et donc une technique spectrophotométrique a été utilisée pour déterminer leur nature.

### II.2. Dispositifs expérimentaux utilisés

Afin de séparer les mélanges de plastiques (isolant–isolant) présentés dans le paragraphe précédent, deux opérations sont nécessaires : le chargement triboélectrique des particules et la séparation électrostatique dans un champ électrique intense. Les installations utilisées dans un premier temps pour la réalisation de ces deux opérations sont présentées dans les paragraphes suivants

#### II.2.1. Chargeur triboélectrique à cylindre tournant

Dans ce dispositif (Figure II-2) [115, 181, 182], les particules à charger par effet triboélectrique sont introduites dans un entonnoir (1). Une vanne (2) est utilisée pour réguler le flux de particules entrant dans le cylindre creux (3) qui permet leur chargement triboélectrique. Ce cylindre est entraîné en rotation par un moteur électrique (4) à vitesse variable jusqu'à 120 tr/min. Le cylindre creux est en PVC ou en PEHD et sa longueur est ajustable (200 mm, 400 mm et 600 mm). Trois ou six ailettes de 10 mm ou 15 mm de hauteur peuvent être fixées sur sa surface intérieure pour augmenter les impacts des particules et augmenter ainsi la charge acquise. Son angle d'inclinaison peut également être varié entre 0° (horizontale) et 45° (5). Le débit de matière sortant du tube est contrôlé par une trappe située à l'extrémité de celui-ci. Quand elle est fermée, les particules restent dans le dispositif. Cela permet d'augmenter le temps de résidence des particules dans le dispositif, ce qui peut être bénéfique pour le procédé de chargement triboélectrique. Une trémie de sortie (6) évite la projection des particules et permet leur récupération. De plus, une armoire électrique (7) est utilisée pour ajuster la vitesse de rotation du cylindre. En sortie de ce dispositif, les particules peuvent être récupérées dans une cage de Faraday posée sur une balance de précision, pour

mesurer leur charge massique, ou elles peuvent être directement introduites dans un séparateur électrostatique.

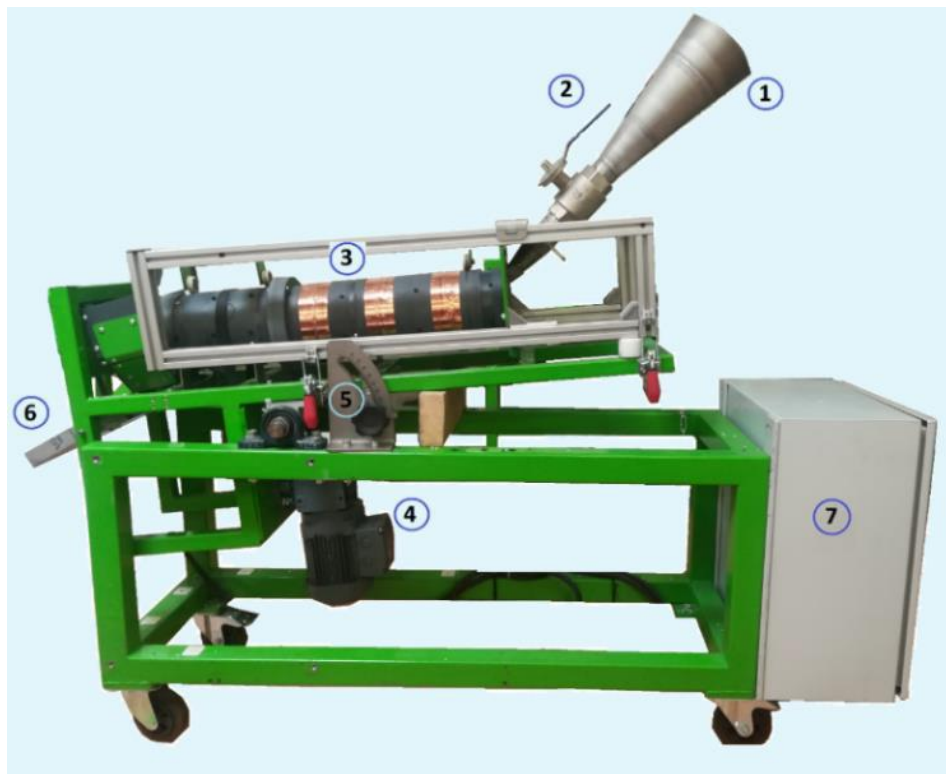


Figure II-2. Dispositif de chargement triboélectrique à cylindre tournant. (1) Entonnoir ; (2) Vanne ; (3) Cylindre creux ; (4) Moteur ; (5) Réglage de l'inclinaison ; (6) Trémie de sortie ; (7) Armoire électrique.

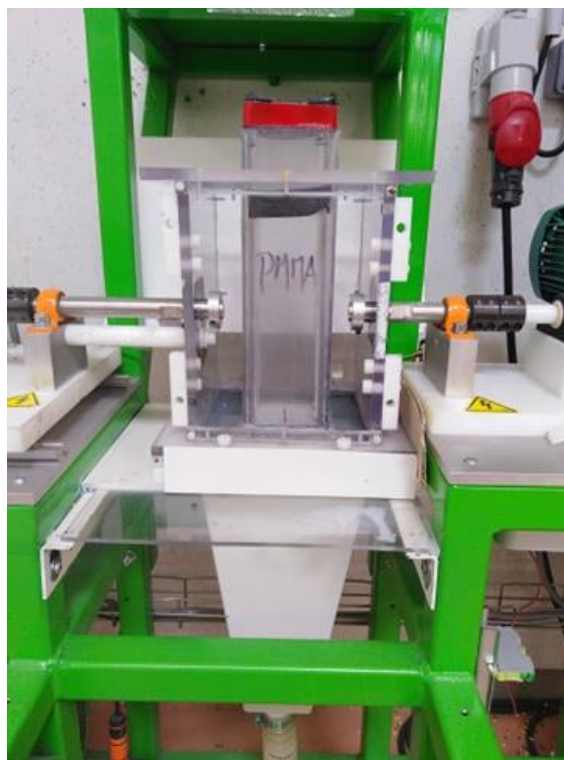
### II.2.2. Chargeur triboélectrique à lit fluidisé

Les effets triboélectriques dans le lit fluidisé sont dus à des collisions entre les particules elles-mêmes et entre les particules et les parois de la chambre du lit fluidisé. Il en résulte une triboélectrification des particules.

Le lit fluidisé est généré dans une chambre de dimensions  $85 \times 85 \times 280 \text{ mm}^3$  (Figure II-3a), dont les parois sont disponibles en PMMA, PP, PE, PS et PVC (Figure II-3b) [183].

L'injection de l'air est assurée par une soufflante de  $1,5 \text{ kW} / 4000 \text{ tr.min}^{-1}$  contrôlée par un variateur de vitesse imposant une rotation comprise entre  $1000 \text{ tr.min}^{-1}$  et  $4000 \text{ tr.min}^{-1}$ .

Le lit fluidisé a une hauteur de 300 mm à partir de la plaque poreuse ou de la grille qui distribue uniformément l'air via une structure en nid d'abeilles. Le haut de la chambre est équipé d'un filtre pour empêcher les particules de sortir.



(a)



(b)

Figure II-3. (a) Photographie du chargeur à lit fluidisé, (b) Parois en PVC, PMMA PP, PE et PS.

### II.2.3. Séparateur électrostatique à cylindre tournant (Prodecologia)

La séparation des plastiques chargés par les dispositifs de charge a été réalisée avec le séparateur électrostatique de laboratoire de la société ukrainienne Prodecologia, partenaire industriel de l'équipe Triboélectrostatique de l'Institut Pprime. Dans ce séparateur (Figure II-4) [184], les particules chargées tombent sur une table vibrante (1) qui répartit les particules uniformément et les dépose en monocouche à la surface d'une électrode cylindrique tournante reliée à la terre (2). Les particules traversent alors un champ électrique créé entre elle et une électrode elliptique (3).

Cette électrode est connectée à une source haute tension DC réversible de  $[0, \pm 35]$  kV. Les particules chargées de polarités opposées à la tension appliquée sont alors attirées par l'électrode alors que celles chargées de la même polarité sont repoussées.



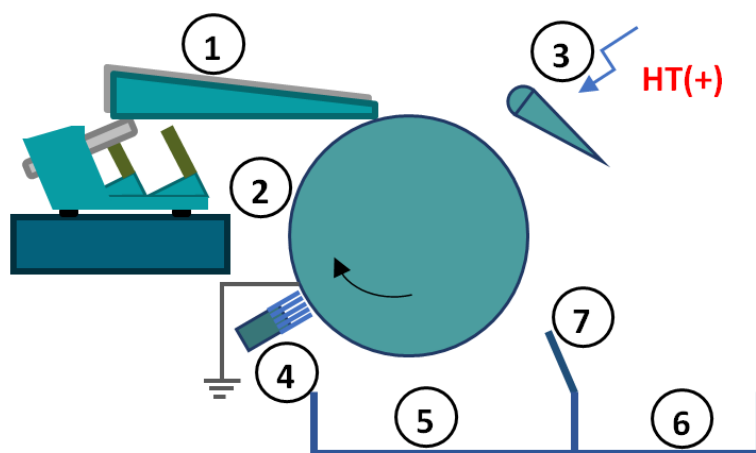


Figure II-4. Représentation schématique du séparateur électrostatique à tambour. (1) Table vibrante ; (2) Electrode cylindrique rotative reliée à la terre ; (3) Electrode connectée à une source haute tension réversible ; (4) Brosse ; (5) Collecteur gauche ; (6) Collecteur droite ; (7) Volet déflecteur.

### II.3. Conception et réalisation de nouveaux dispositifs expérimentaux

Afin d'explorer de nouvelles solutions de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique de mélanges de particules isolantes, plusieurs dispositifs de conception originale ont été construits et validés fonctionnellement dans le cadre de cette thèse. Il s'agit d'un chargeur triboélectrique multicylindre, conçu pour poursuivre les études de laboratoire, ainsi que d'un séparateur électrostatique de type table vibrante et du prototype d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant, pour des expériences en régime de pilote industriel.

#### II.3.1. Chargeur triboélectrique multicylindre

Le nouveau dispositif de tribocharge présenté sur la Figure II-5 se compose d'un cylindre en polyéthylène haute densité (PEHD) (diamètre  $D = 120$  mm et longueur  $L = 600$  mm) qui comprend six cylindres ( $L = 600$  mm et diamètre  $d = 33$  mm ; Figure II-6), en PVC (Polyvinyl Chloride), ABS (Acrylonitrile Butadiène Styène) ou PC (Polycarbonate). Cette solution présente l'avantage d'augmenter le nombre d'impacts particule/particule et particule/paroi par rapport au tribochargeur standard de type monocylindre composé d'un seul cylindre [110, 185].

Les particules à tribocharger sont introduites dans un entonnoir (1). Une vanne (2) est utilisée pour réguler le débit de particules à l'entrée de l'ensemble des six cylindres (Figure 2). Les granules traversent progressivement les six cylindres en proportions presque égales dans chacun d'eux. Le cylindre principal est entraîné par un moteur électrique (4) à vitesse de rotation variable jusqu'à  $120 \text{ tr.min}^{-1}$ . Son angle d'inclinaison peut également être modifié entre  $0^\circ$  (horizontale) et  $45^\circ$ .

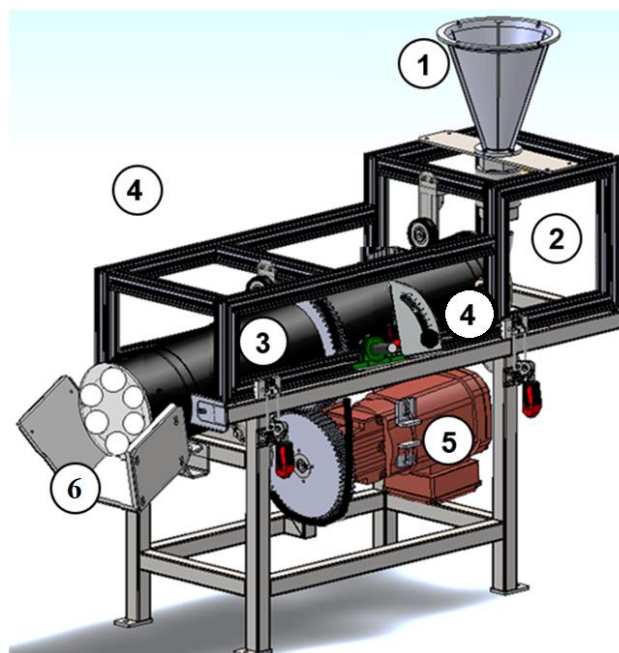


Figure II-5. Dispositif de charge rotatif de type multicylindre. (1) Entonnoir ; (2) Vanne ; (3) Assemblage de six cylindres creux ; (4) Système de réglage de l'inclinaison ; (5) Moteur ; (6) Trémie de sortie.



(a)



(b)

Figure II-6. Ensemble de six cylindres avec différents types de parois (PVC, ABS et PC) : (a) Représentation schématique, (b) Photographie.

### II.3.2. Séparateur électrostatique à table vibrante

Le tri des matériaux chargés par un dispositif de charge triboélectrique a été réalisé avec un nouveau séparateur électrostatique à table vibrante fabriqué par la société CITF. Dans ce séparateur (Figure II-7), les particules chargées tombent sur le plateau en plexiglas (1) de la table vibrante (2). Les vibrations de la table permettent la répartition des particules sur la totalité du plateau (1) et leur avancée. Les particules traversent alors un champ électrique créé entre deux électrodes planes (3). Ces deux électrodes sont connectées à deux sources continues de haute tension de polarités opposées et de tension maximale de  $\pm 50$  kV. La distance entre les deux électrodes peut également être modifiée entre 8 cm et 40 cm (4). Les



particules chargées de la même polarité qu'une des deux électrodes sont repoussées par celle-ci alors que celles chargées de polarité opposée sont attirées. Enfin, les particules séparées sont récupérées dans un collecteur (5) composé de 13 compartiments.

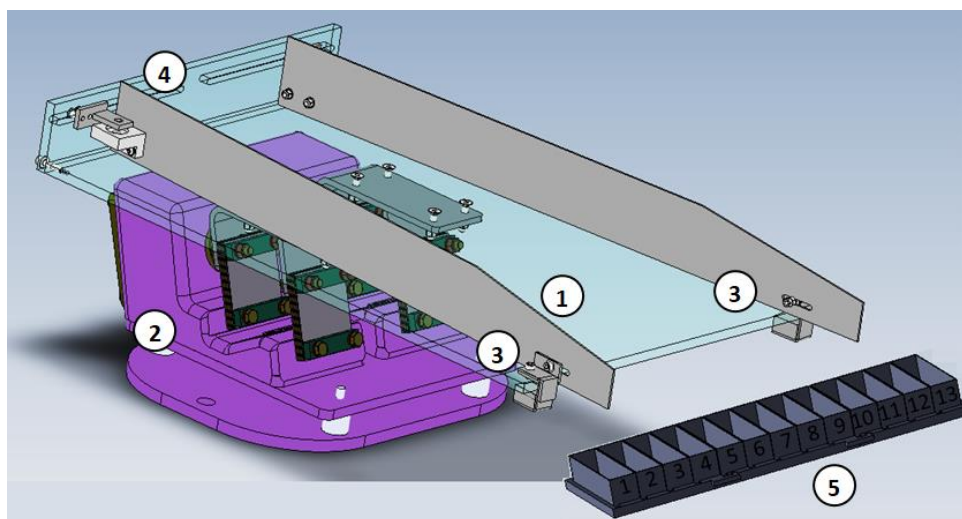


Figure II-7. Séparateur électrostatique à table vibrante (TVE). (1) Plateau en plexiglas ; (2) Embase vibrante ; (3) Electrodes plates reliée à des sources de haute tension continue ; (4) Système de réglage de la position des électrodes ; (5) Collecteur composé de 13 compartiments.

Le séparateur TVE permet le réglage de nombreux éléments. Ainsi, il est possible de régler l'amplitude de vibration de la table vibrante, la longueur du plateau et des électrodes, les tensions d'alimentations appliquées aux électrodes, les positions et les configurations des deux électrodes. Enfin, le collecteur peut être composé de trois à 13 compartiments selon la configuration de séparation utilisée.

Le séparateur TVE est caractérisée par une faible consommation d'énergie ainsi que des coûts réduits d'exploitation, d'investissement et de maintenance. Peu d'éléments sont nécessaires à son fonctionnement et la simplicité de sa construction représente une technologie économiquement viable pour le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques.

### II.3.3. Prototype de séparateur électrostatique industriel PRD

Le prototype de recherche et développement de séparateur électrostatique industriel (PRD) développé par CITEF, (Figure II-8) [115], utilisé pour les essais de séparation de mélanges isolant–isolant, est composé des éléments suivants :

- Un châssis,
- Une armoire électrique comprenant les différents éléments électriques et un écran tactile permettant un accès à l'ensemble des réglages du prototype,

## II : INSTALLATIONS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

- Un broyeur,
- Un dispositif de charge triboélectrique à cylindre tournant,
- Deux tables vibrantes permettant un passage cyclique des particules mixtes au sein du séparateur,
- Un système d'électrodes,
- Deux alimentations haute tension continue de polarités opposées,
- Une vis sans fin, pour transporter des particules mixtes vers un convoyeur à taquets, permettant de ramener les particules mixtes sur le chargeur pour un deuxième passage dans le séparateur,
- Deux caisses-palettes de récupération des produits ayant chacune une capacité de  $0,6 \text{ m}^3$ .

Dans ce séparateur, l'écran tactile permet la mise en route des différents éléments de l'installation et les réglages des différentes fonctionnalités.

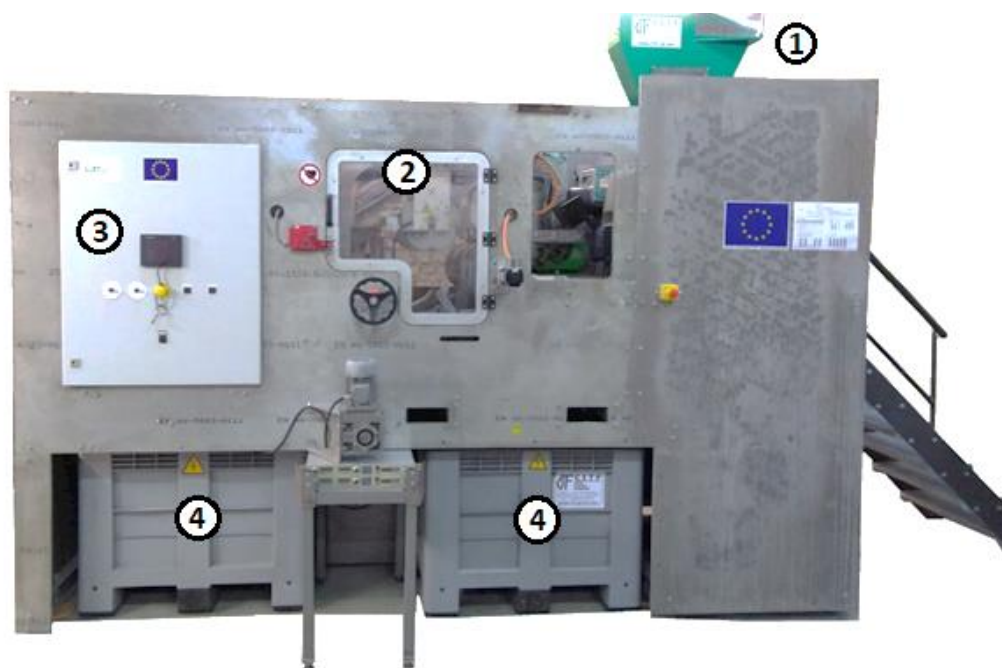


Figure II-8. Prototype de séparateur électrostatique industriel PRD. (1) Broyeur ; (2) Système d'électrodes ; (3) Armoire électrique avec écran tactile ; (4) Caisses-palettes.

Le nouveau séparateur industriel PRD de type triboélectrostatique à deux électrodes cylindriques rotatives [144, 115] est présenté sur les Figure II-8 et II-9. Il est capable de trier les matériaux granulaires isolants par l'utilisation de l'effet triboélectrique comme mécanisme physique de charge électrique par le biais d'un chargeur triboélectrique cylindrique.

La triboélectrification des matériaux à l'intérieur du chargeur à cylindre tournant est due aux multiples collisions particules-particules et particules-paroi. Ce dispositif de charge est disponible en deux versions de cylindre PEHD et PVC avec une longueur de 800 mm et un

angle d'inclinaison de 6 degrés. Les granules sont alors récupérés sur une table vibrante qui assure que les particules chargées sont uniformément réparties, en monocouche, transportées et déposées entre deux électrodes cylindriques tournantes à vitesse variable. Chacune d'elles est reliée à une alimentation haute tension de polarité opposée, soit positive de 0 kV à +50 kV, soit négative de -50 kV à 0 kV afin de générer le champ électrique nécessaire pour séparer les particules [145-147].

Les particules séparées sont récupérées dans deux caisses-palettes. Des volets (4), d'inclinaison réglables, sont placés entre les deux caisses-palettes afin d'améliorer la pureté des produits obtenus. De plus, des brosses (3) permettent de décoller les particules isolantes dont la charge est suffisamment importante. Pour les particules moins chargées, tombant entre les volets, une vis sans fin a été intégrée permettant de ramener les particules mixtes sur un convoyeur à taquets qui assure un deuxième passage du produit mixte dans le chargeur et le séparateur.

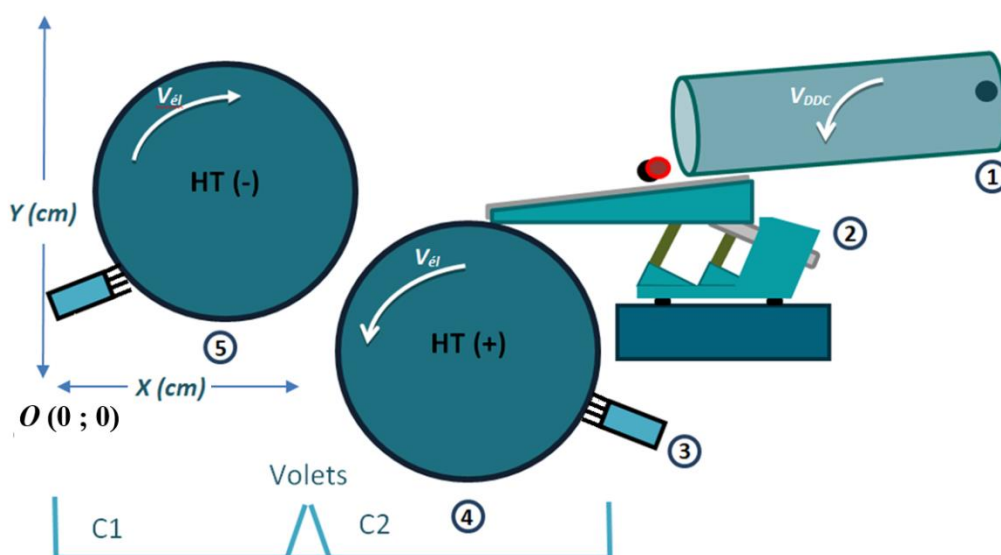


Figure II-9. Configuration d'électrodes utilisée pour la séparation de mélanges isolant-isolant avec le prototype de séparateur industriel PRD. (1) Dispositif de charge triboélectrique type cylindrique ; (2) Table vibrante ; (3) Balais ; (4) Electrode cylindrique tournante inférieure reliée à une source de haute tension positive ; (5) Electrode cylindrique tournante supérieure reliée à une source de haute tension négative ; Compartiment gauche C1 ; Compartiment droit C2.

### II.4. Techniques de mesure et procédures expérimentales

#### II.4.1. Mesure simultanée des charges et des masses des produits

La mesure de charge électrique, pour déterminer la polarité et la valeur de la charge électrique que portent les granules chargés, est réalisée directement par un électromètre, connecté à une cage de Faraday de construction particulière [186], constituée de deux

cylindres conducteurs concentriques et séparés par un isolant. Le cylindre extérieur est relié à la terre pour faire écran au champ électrique extérieur. Le cylindre intérieur est connecté à un électromètre afin d'évaluer la charge électrique des particules qui y sont accumulées.

Les valeurs de charges mesurées sont lues par le biais d'un électromètre Keithley Instruments, modèle 6514. Il est possible d'enregistrer en continu l'évolution de cette charge via un PC équipé d'une carte d'acquisition de données, en utilisant un instrument virtuel créé avec LabView (Figure II-10). La masse peut être mesurée simultanément en utilisant une balance électronique (KERN, modèle PCB 250-3, résolution 0,01 g), connectée au même ordinateur.



Figure II-10. Système de mesure de charge. (1) PC équipé d'une carte d'acquisition de données ; (2) Cage de Faraday ; (3) Balance ; (4) Electromètre.

Dans tous les essais, la mesure de la charge massique des granules récupérés durant la séparation ou le chargement est directe et continue. Cette méthode permet d'obtenir des mesures instantanées et précises.

### II.4.2. Système d'acquisition et traitement des données

La mesure de la charge électrique est un processus fortement influencé par les conditions environnementales et sujettes à de nombreuses erreurs de traitement. Une bonne interprétation des résultats nécessite une bonne compréhension des processus physiques et des hypothèses formulées. L'instrumentation virtuelle est une solution fiable et efficace pour surveiller les variables d'entrée et de réponses des procédés électrostatiques complexes, où la charge électrique est le paramètre de base dans ses procédés.

LabView (abréviation de Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) est le cœur d'une plate-forme de conception de systèmes de mesure et de contrôle. Il utilise un langage de programmation graphique pour créer des programmes sous la forme de diagrammes. De plus, il comprend plusieurs bibliothèques avancées permettant de faire de l'acquisition de données et du contrôle d'instruments série ou GPIB en utilisant le langage de

## II : INSTALLATIONS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

programmation graphique G. Ce type de langage simplifie les calculs numériques et les interfaces de communication. Un programme LabView est appelé VI (Virtual Instrument) à cause de sa ressemblance avec les instruments réels. Les VIs sont décomposées en trois parties : la face-avant, le diagramme et l'icône/connecteur. La face-avant est principalement utilisée pour les boutons de commandes, les graphiques et les différents types d'indicateurs. Le diagramme est le code source du programme. Comme les VIs sont modulaires, il est très facile de diviser le programme en petits modules qui seront reliés entre eux dans le diagramme. L'icône/connecteur permet de personnaliser son VI et de pouvoir l'utiliser en tant que sous-VI.

L'interface graphique présente deux graphiques déroulants qui décrivent les acquisitions des évolutions de la masse et de la charge électrique (Figure II-11). Les acquisitions continues sont aussi enregistrées dans un fichier (\*.txt) en vue d'un post traitement pour le calcul de la charge massique par exemple.

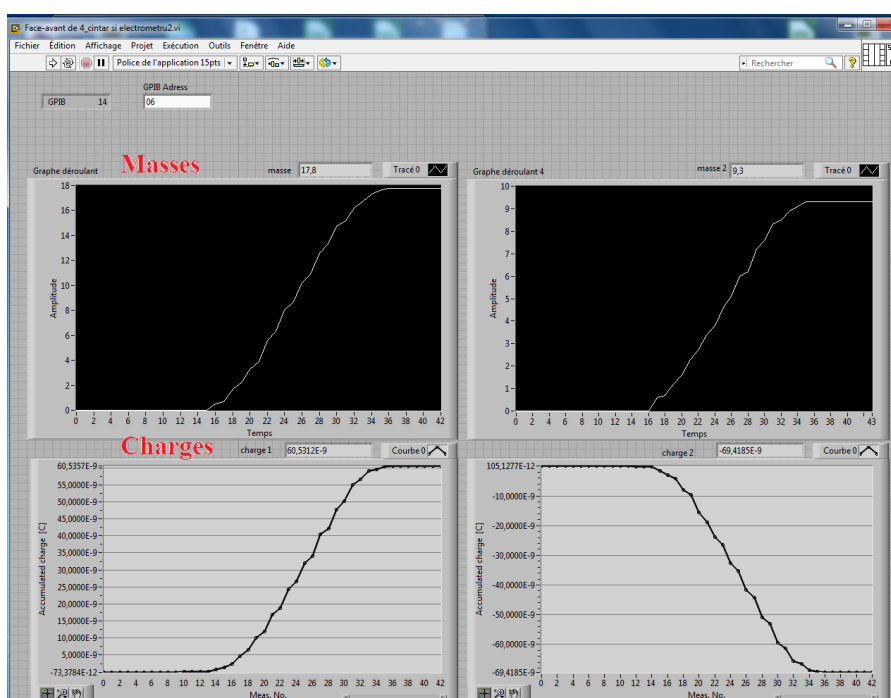


Figure II-11. Interface graphique de l'instrumentation virtuelle.

### II.4.3. Méthode d'analyse de la pureté et de la récupération des produits séparés

Les récupérations et les puretés des produits séparés et collectés dans les compartiments sont calculées à l'aide des équations suivantes :

$$REC x (\%) = \frac{m_{xCi}}{m_{xC1} + m_{xC2}} \times 100 \quad (\text{II-1})$$

$$PUR x (\%) = \frac{m_{xCi}}{m_{TCi}} \times 100 \quad (\text{II-2})$$

Où :

$m_{xCi}$  : est la masse du produit  $x$  collecté dans le compartiment  $Ci$  ;

$Ci$  : correspond aux compartiments gauche ( $C1$ ) ou droit ( $C2$ ) ;

$m_{TCi}$  : est la masse totale récupérée dans le compartiment  $Ci$ .

### II.4.4. Technique spectrométrique d'analyse des polymères

La technique utilisée pour caractériser et identifier le polymère est la spectrométrie FTIR (Fourier Transform Infrared). Il s'agit d'une méthode de caractérisation rapide et sensible de la plupart des molécules existantes. Cette méthode est largement utilisée pour déterminer la composition de matériaux non métalliques et fournit un spectre de la mesure de la diminution de l'intensité du rayonnement qui traverse un échantillon en fonction de la longueur d'onde. Les structures chimiques des polymères utilisés dans nos travaux ont été déterminées par un spectromètre FTIR (Shimadzu modèle Miracle 10), présenté sur la Figure II-12. Le spectre obtenu est comparé aux spectres de plusieurs bases de données pour identifier le polymère de l'échantillon.

Ce spectromètre nous a également permis de caractériser la pureté de certains produits récupérés en sortie de séparation.



Figure II-12. Dispositif pour l'analyse spectrométrique FTIR.

### II.4.5. Techniques de neutralisation des charges de surface

Les matériaux isolants granulaires peuvent acquérir une grande quantité de charge qu'ils gardent le plus souvent pour une durée beaucoup plus longue que nécessaire au bon déroulement d'un processus électrostatique. En effet, la majorité des applications ne durent que quelques minutes tandis qu'un isolant peut conserver des charges pendant des heures voire des jours. Ces charges électriques résiduelles peuvent générer des décharges électrostatiques et endommager l'électronique des circuits, électro-choquer l'opérateur humain



## II : INSTALLATIONS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

ou encore initier des incendies et explosions. Afin d'éviter ces nuisances, l'élimination des charges électriques résiduelles sur la surface des matériaux isolants granulaires après leur séparation est une condition préalable pour le fonctionnement optimal du processus. Il est donc nécessaire de contrôler la charge accumulée à la surface des matériaux isolants et la maintenir à des niveaux non dangereux ou simplement non gênants aux processus, par exemple pour séparer un mélange contenant plus de deux types de plastiques qui nécessite un deuxième passage dans le séparateur avec un produit non chargé. Les charges de surface peuvent être réduites et éliminées par plusieurs procédés, les plus utilisés étant ceux qui font appel à des barres antistatiques.

Ce type de neutralisateurs de charge, comme le modèle ECA88-BS de la société ELCOWA, présenté sur la Figure II-13), est un ensemble d'électrodes couronne de type « pointes » disposées rectilignement et équidistantes. L'alimentation est faite avec une tension alternative pour générer des charges positives et négatives dont le rôle est de neutraliser les charges résiduelles.



Figure II-13. Dispositif pour la neutralisation de la charge électrique résiduelle.

### II.4.6. Technique de contrôle d'humidité et de température

La mesure de la charge électrique est un processus influencé par les conditions ambiantes d'humidité et de température. Il est primordial de débiter l'étude expérimentale par la mesure de l'humidité relative car les résultats obtenus dépendent fortement de ce paramètre.

L'humidité de l'échantillon et l'humidité ambiante affectent la charge des particules et modifient leurs propriétés physiques et chimiques.

## II : INSTALLATIONS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Afin d'assurer une bonne compréhension des effets de ces facteurs sur les résultats des processus de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique, le laboratoire vient de se doter d'une machine de contrôle d'humidité et de température (Figure II-14). Lors des essais, les réglages consignés dans la salle ont été les suivants : une humidité relative de 20% à 80% et une température de 19 °C à 22 °C.

Pour vérifier le point de consigne réglé dans la salle, un thermo-hygromètre numérique (Testo 608-H1) a été utilisé pour mesurer l'humidité et la température.



Figure II-14. Machine de contrôle d'humidité et température, modèle CA S011-U DCI.

### II.4.7. Méthode des plans d'expériences

De manière générale, la méthode des plans d'expériences à permet de déterminer les liens existants entre 2 types de variables : d'entrée (les facteurs) et de sortie (les réponses). Plus précisément, elle vise aussi bien à comprendre les effets des facteurs, que les interactions entre eux. Pour cela, la méthode conduit à établir un modèle mathématique exprimant la réponse en fonction des facteurs. Le modèle est déduit à partir des résultats d'une série de  $N$  essais réalisés pour des valeurs de facteurs convenablement choisies selon la méthodologie des plans d'expériences (PE). La réalisation d'un plan revient à déterminer la valeur de la fonction réponse pour ces  $N$  configurations. C'est une méthode qui permet la modélisation ainsi que l'optimisation d'un processus [187].



## II : INSTALLATIONS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Le procédé d'un système peut être défini, exprimant les  $n$  variables de sortie  $y_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , comme fonctions des variables d'entrée  $u_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , qui peuvent être contrôlées (Figure II-15).

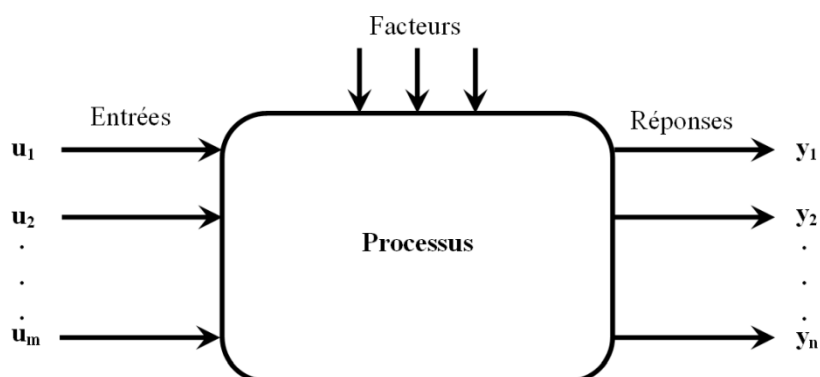


Figure II-15. Représentation schématique d'un processus.

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

$$y_i = c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ij} u_i^2 \quad (\text{II-3})$$

Une variable centrée réduite  $x_i$  est définie pour chaque facteur  $u_i$ , avec la relation :

$$x_i = \frac{(u_i - u_{i0})}{\Delta u_i} = u_i^* \quad (\text{II-4})$$

Où :

$$u_{i0} = \frac{(u_{imax} + u_{imin})}{2} ; \Delta u_i = \frac{(u_{imax} - u_{imin})}{2} \quad (\text{II-5})$$

La fonction de réponse devient :

$$y_i = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ij} x_i^2 \quad (\text{II-6})$$

$x_i$  ayant la valeur -1 pour le niveau inférieur  $u_{imin}$  du facteur et la valeur +1 pour le niveau supérieur du même facteur  $u_{imax}$ .

Un plan factoriel complet permet d'exprimer la réponse par un polynôme de premier degré alors qu'un plan factoriel composite conduit à un polynôme de second degré.

Le plan composite centré est particulièrement adapté pour la modélisation de la surface de réponse expérimentale, c'est-à-dire de l'évolution du critère de performance dans le domaine de variation des facteurs contrôlables du processus. Ces plans sont les plus utilisés car ils présentent l'avantage de la facilité de construction. Ils sont obtenus en ajoutant des points de mesures à un plan factoriel complet (Figure II-16).

Les plans pour l'étude d'une surface de réponse étant souvent utilisés après une étude des effets des facteurs, il suffit alors de réaliser seulement quelques expériences supplémentaires pour estimer la surface de réponse. Un plan composite centré de  $k$  facteurs est défini par :

- 1- Un plan factoriel complet de  $2^k$  expériences ;

- 2-  $n_0$  répétitions au centre du domaine expérimental, dédiées à l'analyse statistique ;
- 3-  $2k$  points en étoile positionnés sur les axes de chaque paramètre. Ces points contribuent à l'évaluation des termes quadratiques du modèle polynomial, c'est-à-dire qu'ils donnent des informations sur la courbure de la surface de réponse.

Le nombre total d'essais qui devront être réalisés est :

$$N = 2^k + 2.k + n_0 \quad (\text{II-7})$$

Le logiciel MODDE 5.0 de la société UMETRICS permet de modéliser et d'optimiser des processus, après avoir précisé les divers facteurs et réponses, ainsi que le type de plan d'expérience [188]. Le logiciel fournit des informations sur les expériences à effectuer. Lorsque les résultats de ces expériences sont entrés dans le programme, il calcule ensuite les modèles mathématiques qui représentent chaque réponse en fonction de tous les facteurs. Ainsi, il peut déterminer, dans les plages de variation des facteurs, le point de fonctionnement optimal qui répond aux objectifs de l'utilisateur, c'est-à-dire les valeurs des facteurs optimaux pour lesquels les réponses du processus sont les plus proches des objectifs.

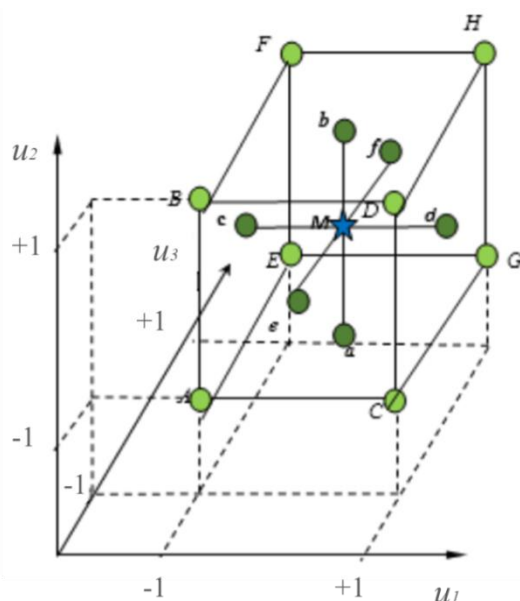


Figure II-16. Représentation graphique des points expérimentaux du plan composite.

### ***Qualité descriptive du modèle***

$R^2$  et  $Q^2$  sont des indicateurs statistiques qui permettent d'évaluer la qualité du modèle. L'indicateur  $R^2$  est descriptif : il mesure la qualité d'ajustement du modèle, c'est-à-dire l'adéquation entre les valeurs calculées par le modèle et les réponses mesurées dans les points du plan d'expérience.  $Q^2$  est davantage prédictif : il mesure la capacité du modèle à prévoir la réponse dans d'autres points du domaine expérimental.

## II : INSTALLATIONS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Le coefficient  $R^2$  traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, le coefficient appartient à l'intervalle suivant :

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad (\text{II-8})$$

Où la valeur 1 indique un modèle parfait.

Le modèle obtenu peut servir à prédire la valeur de la réponse. Il est possible de définir la qualité prédictive du modèle  $Q^2$ . Par définition, le coefficient  $Q^2$  appartient à l'intervalle suivant :

$$-\infty \leq Q^2 \leq 1 \quad (\text{II-9})$$

Plus la valeur du coefficient  $Q^2$  est proche de 1, plus la qualité prédictive du modèle est importante.

### II.5. Conclusions

La diversification des mélanges granulaires à recycler est une des caractéristiques que l'on retrouve particulièrement au niveau des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).

Des études seront menées sur divers matériaux plastiques provenant des DEEE. Plusieurs installations de laboratoire seront utilisées, afin d'évaluer les effets de plusieurs facteurs sur le comportement triboélectrique des matériaux isolants et sur leur séparabilité électrostatique. Ceci permettra par la suite d'évaluer la faisabilité de la séparation sur une installation industrielle avec une grande quantité de produits à traiter.

L'étude approfondie de la séparation des mélanges de plastiques nécessite l'utilisation d'un système d'acquisition de données en temps réel. La mesure simultanée de la charge massique et de la récupération du produit séparé permettra une meilleure compréhension des phénomènes physiques en jeu. Les processus triboélectrostatiques étant fortement influencés par la température et l'humidité relative de l'air, ainsi que par le contenu en eau des particules, ces facteurs seront contrôlés et maîtrisés par l'usage de moyens techniques appropriés.

Enfin, la méthodologie des plans d'expériences permettra de mieux organiser les essais, à visée de recherche fondamentale ou dans un contexte industriel, afin d'optimiser le fonctionnement des installations de séparation électrostatique et d'améliorer la qualité des produits séparés.

### **III. PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES**

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. Quand les constituants des mélanges granulaires plastiques ont des tailles, des densités, des perméabilités magnétiques et des conductivités électriques similaires, la séparation triboélectrostatique s'impose comme la seule solution de tri.

Les granules se chargent par collisions et frottements entre eux ou avec les parois du dispositif de charge. Ils sont ensuite introduits dans un séparateur électrostatique où les forces électriques les conduisent vers les électrodes de polarités opposées et sont finalement collectés par des moyens appropriés.

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit les différents dispositifs de chargement triboélectrique utilisés dans cette thèse.

L'objectif de ce chapitre est d'optimiser et d'évaluer deux dispositifs de charge triboélectrique à cylindre et à multicylindre tournant construits par la société CITF, en vue de leur utilisation industrielle pour la séparation électrostatique de mélanges de plastiques granulaires issus de déchets d'équipements électriques et électroniques.

Les performances des dispositifs de charge triboélectrique ont été évaluées en mesurant la charge massique des granules collectés en sortie du dispositif.

#### **III.1. Étude et optimisation du chargeur triboélectrique à cylindre tournant**

##### **III.1.1. Procédure expérimentale**

Plusieurs facteurs peuvent influencer la charge acquise par les particules isolantes dans le dispositif de charge à cylindre tournant (décrit au paragraphe II.2.1 ; figure II-2). Parmi ces facteurs, on retrouve : son inclinaison, sa vitesse de rotation, la matière du cylindre et le temps de séjour des particules dans celui-ci. L'objectif de cette première étude est de définir la configuration optimale du dispositif permettant un transfert de charge le plus élevé possible vers et entre les particules.

Les déchets plastiques granulaires utilisés dans la présente étude étaient du PC blanc (Figure II-1e). La taille des particules était typiquement comprise entre 2 mm et 5 mm. Les expériences ont toutes été dupliquées et réalisées sur des échantillons similaires et dans des

### III : PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES

conditions climatiques quasi constantes : température ambiante ( $T$ ) de 18,3 °C à 19,0 °C et humidité relative ( $HR$ ) de l'air de 40,2% à 55,7%.

Dans chaque expérience, 100 g de particules ont été utilisés.

Pour chaque essai, une procédure expérimentale a été élaborée et strictement respectée :

- Fermer la trappe de sortie du cylindre ;
- Déposer le mélange de particules dans l'entonnoir ;
- Régler l'angle d'inclinaison ;
- Régler la vitesse de rotation du cylindre ;
- Lancer le mouvement de rotation du cylindre ;
- Ouvrir la vanne de sortie de l'entonnoir et, en même temps, mesurer le temps de séjour des particules dans le cylindre ;
- Arrêter la rotation ;
- Ouvrir la trappe ;
- Récupérer le produit dans une cage de Faraday reliée à un électromètre (pour mesurer sa charge électrique) elle-même placée sur une balance électronique de précision (KERN, résolution : 0,01 g) (pour la mesure de masse).

Le premier objectif de cette étude est de déterminer le point de fonctionnement optimal du dispositif de tribocharge en utilisant la méthode des plans d'expérience. Cette méthode détermine le nombre d'expériences à réaliser pour atteindre un objectif prédéterminé et prédit le comportement du procédé dans le domaine de définition de plusieurs facteurs pouvant varier simultanément.

De plus, elle permet d'évaluer l'importance des effets de ces facteurs et de leurs interactions. Dans le domaine industriel, cette méthode est d'un grand intérêt car elle permet l'évaluation des facteurs d'influence et l'optimisation d'un procédé tout en effectuant un minimum d'essais.

Le second objectif de cette étude était de déterminer la série triboélectrique correspondante à chaque cylindre (PEHD et PVC) avec la configuration optimale du dispositif de charge. Les essais ont été faits sur plusieurs types de particules (figure II-1) : (a) PP orange, (b) PP gris, (c) PVC, (d) PE, (e) PC, (f) PS noir, (h) PC Cristal, (i) HIPS, (j) ABS jaune.

### III.1.2. Modélisation et optimisation du processus de chargement

#### *Détermination et modélisation du domaine expérimental*

Les domaines de variation de trois variables de contrôle du système ont été considérés suite à plusieurs essais préliminaires [110] :

- L'angle d'inclinaison  $\alpha$  [°] = [3, 7] ;
- La vitesse de rotation  $n$  [tr/min] = [50, 90] ;
- Temps de résidence des particules dans le cylindre  $t$  [min] = [1, 3].

L'analyse des résultats expérimentaux, présentés dans le Tableau III-1, ont été traités par le logiciel MODDE 5.0. Il permet de calculer les coefficients  $a_{ii}$  du modèle mathématique et de donner une cartographie de la réponse (ici, la charge massique des particules).

Tableau III-1. Charge massique ( $Q/m$ ) du PC, pour les 17 expériences du plan factoriel composite.

$N$	Angle d'inclinaison $\alpha$ [°]	Vitesse de rotation $n$ [tr/min]	Temps de résidence $t$ [min]	Charge massique $Q/m$ [nC/g]
1	3	50	1	5,83
2	7	50	1	3,47
3	3	90	1	6,14
4	7	90	1	4,31
5	3	50	3	7,12
6	7	50	3	3,26
7	3	90	3	7,06
8	7	90	3	4,00
9	3	70	2	7,08
10	7	70	2	4,20
11	5	50	2	5,46
12	5	90	2	5,81
13	5	70	1	5,59
14	5	70	3	6,11
15	5	70	2	6,32
16	5	70	2	6,26
17	5	70	2	6,25

### ***Qualité du modèle***

L'évaluation des effets des facteurs révèle que l'angle d'inclinaison du cylindre est celui qui a le plus d'influence sur la charge massique acquise par les particules. La charge massique s'exprime par une fonction polynomiale :

$$Q/m = 6.14 - 1.4\alpha' + 0.22n' + 0.22t' - 0.41\alpha'^2 - 0.41n'^2 - 0.20t'^2 + 0.16\alpha'n' - 0.34\alpha't - 0.06n't' \quad (III1)$$

Où  $n'$  et  $\alpha'$  sont les valeurs centrées normalisées de la vitesse de rotation  $n$  et de l'angle d'inclinaison  $\alpha$ , respectivement. Les indicateurs statistiques obtenus pour cette étude,  $R^2 = 0.9945$  et  $Q^2 = 0.9694$ , qui caractérisent respectivement la qualité de la régression et de la prédiction, sont proches de 1. Ceci indique que le modèle obtenu peut être utilisé de manière sûre pour l'optimisation du procédé de charge triboélectrique.

### ***Influence des facteurs sur la réponse***

A partir du modèle mathématique (III.1), le logiciel MODDE 5.0 trace la variation de la réponse en fonction de chaque facteur (Figure III.1). Les résultats montrent une diminution de la charge des particules avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison du cylindre tournant comme montré en figure III.1a. Lorsque l'inclinaison est faible, les particules sont plus dispersées le long du cylindre et moins en contact les unes avec les autres, ce qui augmente le nombre d'impacts et le frottement entre les particules et les parois, facilitant ainsi le transfert de charge.

Premièrement, la charge augmente avec la vitesse de rotation du cylindre puis atteint son maximum pour des vitesses de rotation supérieure à 70 tr/min (Figure III-1b). Ceci peut s'expliquer par le glissement relatif entre les particules et les parois du cylindre.

La charge est quasiment proportionnelle au temps de résidence jusqu'à ce que la saturation de charge de la particule se produise à 2 min 30. Comme présenté en figure III. 1c. L'augmentation de la charge est due au nombre plus élevé d'impacts et au temps de contact plus long entre les particules et les parois.

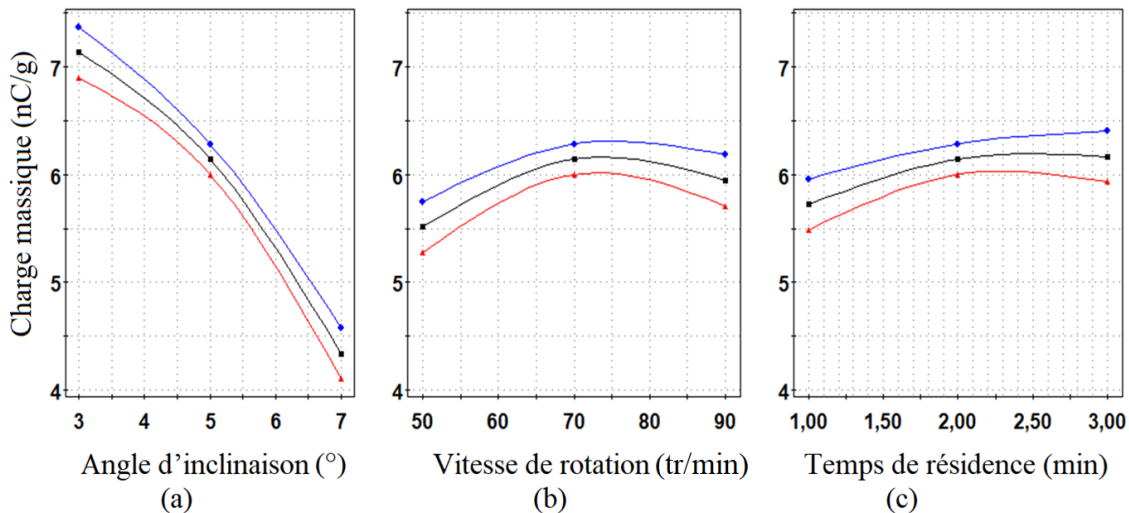


Figure III-1. Charge massique prédite par MODDE 5.0, en fonction de : (a) l'angle d'inclinaison  $\alpha$ , pour  $n = 70$  tr/min,  $t = 2$  min ; (b) la vitesse de rotation  $n$ , pour  $\alpha = 5^\circ$ ,  $t = 2$  min ; (c) le temps de résidence  $t$ , pour  $\alpha = 5^\circ$ ,  $n = 70$  tr/min.

#### Détermination du point optimum de fonctionnement

MODDE 5.0 propose des représentations graphiques de la réponse prédite en fonction des facteurs étudiés (Figure III-2). Ce graphique confirme que l'angle d'inclinaison a un impact important sur la charge électrique acquise par les particules. Le point de fonctionnement optimal du procédé est obtenu lorsque la vitesse de rotation du cylindre est réglée sur un intervalle compris entre 52,5 tr/min et 90 tr/min et un angle d'inclinaison faible entre  $3^\circ$  et  $3,5^\circ$ .

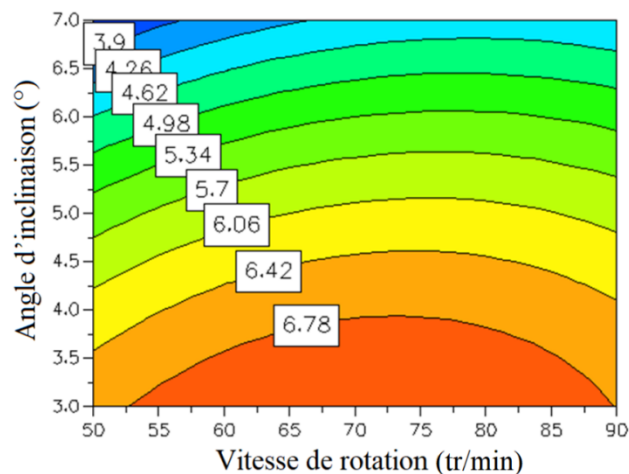


Figure III-2. Iso-contours de la charge massique prédite par MODDE 5.0 pour les particules du PC en fonction des facteurs (vitesse de rotation et angle d'inclinaison) pour un temps de résidence des particules  $t = 2$  min.

Conformément aux prédictions du logiciel MODDE 5.0, la charge massique la plus élevée est obtenue lorsque les facteurs sont réglés aux valeurs données dans le Tableau III-2. Deux



### III : PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES

expériences ont été effectuées pour une durée de résidence minimale et maximale afin d'adapter le dispositif de charge à cylindre tournant au fonctionnement continu, en amont d'une installation de séparation électrostatique de mélanges de matériaux isolants. Celles-ci ont été en bonne corrélation avec les prédictions théoriques.

Tableau III-2. Comparaison entre les résultats prédits par MODDE 5.0 et ceux obtenus expérimentalement.

Résultats	Angle d'inclinaison $\alpha$ [°]	Vitesse de rotation $n$ [tr/min]	Temps de résidence $t$ [min]	Charge massique $Q/m$ [nC/g]
Prédits	5.5	50	1	4,68
Expérimentaux				4,82
Prédits	4.3	90	3	6,36
Expérimentaux				5,88

En 1 min, les particules de PC peuvent acquérir une charge massique maximale de 4,68 nC/g dans le chargeur triboélectrique à cylindre tournant avec une inclinaison du cylindre de 5,5° et une vitesse de rotation de 50 tr/min. Des charges massiques plus élevées, proches de 6,5 nC/g, peuvent être obtenues pour des durées de résidence plus longues (3 min).

#### III.1.3. Séries triboélectriques obtenus avec des cylindres en PVC et en PEHD

Pour chaque matière, au moins deux essais ont été effectués afin de déterminer une valeur moyenne. Dans certains cas, un troisième essai a dû être conduit afin de conforter les résultats.

##### *Cylindre PVC*

Lors des essais utilisant ce cylindre (Tableau III-3), l'humidité relative était comprise entre 54,0% et 54,6% et la température entre 24,1 °C et 24,3 °C. La vitesse de rotation du cylindre a été fixée à 90 tr/min et l'angle d'inclinaison à 6°.

Tableau III-3. Charge massique acquise par différents types de particules grâce au dispositif de charge équipé du cylindre en PVC.

Polymère	PVC	PE	PP gris	PC cristal	PP orange	PS	HIPS	ABS
Charge massique (nC/g)	- 0,3	- 0,2	0,5	2,2	1,6	2,2	5,1	7,6

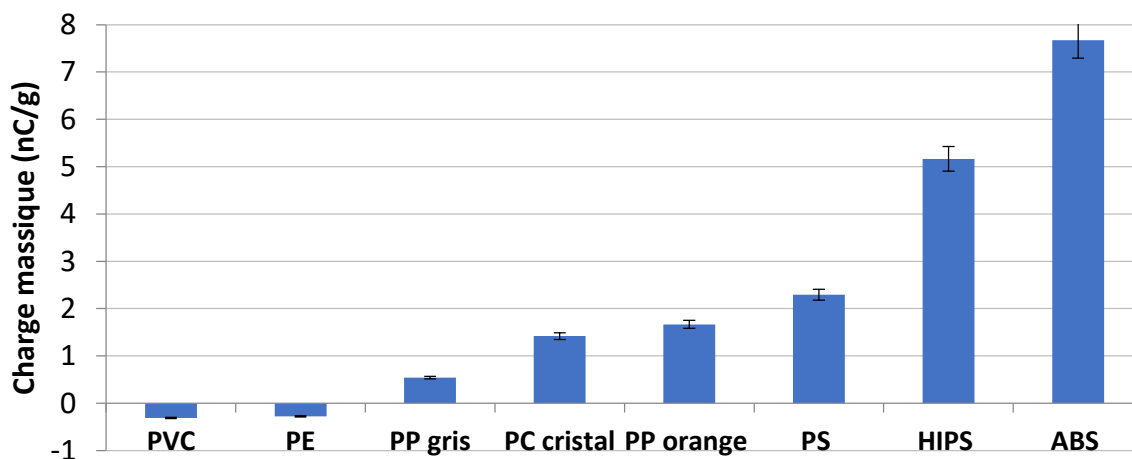


Figure III-3. Charge massique acquise par différents types de particules grâce au dispositif de charge monocylindre équipé du cylindre en PVC.

Seules deux matières se chargent négativement (Figure III-3) : le PVC et le PE. De plus, la matière correspondante au cylindre (PVC) se charge positivement. Les particules de PVC sont plus petites que le cylindre (PVC), elles ont donc tendance à se charger négativement.

Les 6 autres se chargent positivement. Les PP orange et gris acquièrent une charge de même polarité mais avec des niveaux différents. En effet, le PP orange acquiert une charge plus importante que le PP gris. Cela s'explique par les différents additifs introduits dans les matières tels que les colorants par exemple qui modifient la composition chimique et l'état de surface des matières.

#### *Cylindre PEHD*

Lors des essais utilisant ce cylindre, l'humidité relative était comprise entre 58,3% et 58,6% et la température entre 20,1°C et 21,3°C. La vitesse de rotation du cylindre a été fixée à 90 tr/min et l'angle d'inclinaison à 6°.

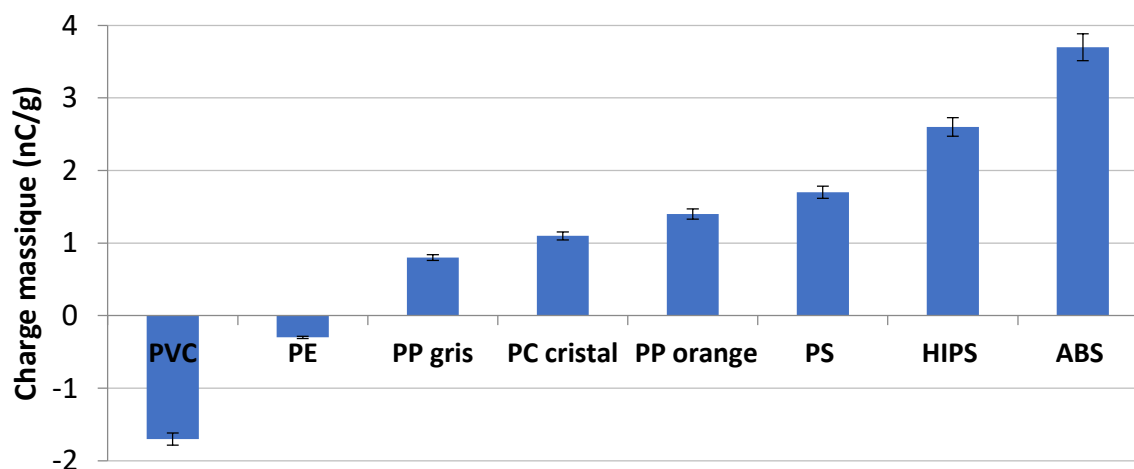


Figure III-4. Charge massique acquise par différents types de particules grâce au dispositif de charge équipé du cylindre en PEHD.

### III : PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES

Dans les deux cylindres, la charge la plus élevée est celle acquise par l'ABS avec une charge massique positive de 7,6 nC/g avec le cylindre en PVC et 3,7 nC/g avec le cylindre en PEHD (Figure III-4).

La charge négative la plus élevée est acquise par le PVC avec une charge massique de - 1,6 nC/g avec le cylindre en PEHD et - 0,3 nC/g avec le cylindre en PVC.

Avec le cylindre en PVC (Figure III-3), les charges acquises par les particules sont plus élevées que celles acquises avec le cylindre en PEHD (Figure III.4).

#### **III.2. Test d'endurance du chargeur triboélectrique à cylindre tournant**

##### **III.2.1. Procédure expérimentale**

L'objectif de cette étude est d'étudier l'endurance de dispositif de charge à cylindre tournant en vue de leur utilisation industriel. Les expériences ont été effectuées sur le banc d'essais de la Figure III-5 pour différentes durées. Le dispositif de charge triboélectrique testé (décrit au paragraphe II.2.1 ; figure II-2) est constitué d'un cylindre creux de longueur de 600 mm, en PVC. Sa surface intérieure est équipée d'ailettes à orientation radiale de 15 mm de hauteur, pour augmenter les impacts particules/particules et particules/parois. Ce cylindre est entraîné par un moteur électrique (1), à vitesse variable jusqu'à 120 tr/min. Les particules à tribocharger sont introduites dans un convoyeur vibrant (3) qui alimente un entonnoir (4). Une vanne (5) est utilisée pour réguler le flux de particules à l'entrée du cylindre creux. L'angle d'inclinaison du cylindre a été fixé à 6° (6). L'armoire de commande (7) contient l'équipement électrique utilisé pour régler la vitesse du cylindre. A la sortie de ce dispositif (8), les particules peuvent soit être récupérées dans une cage de Faraday (9), pour mesurer leur charge, soit directement introduites dans un séparateur électrostatique. Les expériences ont été réalisées pour différentes durées (1 h à 4 h).

Les particules ont été récupérées dans une cage de Faraday reliée à un électromètre (KEITHLEY, modèle 6514) (10). La cage a été placée sur une balance électronique de 6 kg (KERN, modèle 440-47N) (11) avec une résolution de 0,1 g. L'électromètre et la balance ont été connectés à un PC via GPIB et RS232. La charge et la masse mesurées par les instruments ont été enregistrées en continu à l'aide du logiciel Lab View.

Les déchets plastiques granulaires utilisés dans la présente étude étaient l'ABS jaune et le PS noir (Figure II-1). Les tailles des particules étaient typiquement comprises entre 2 mm et 5 mm. Les déchets plastiques étaient fournis par Hertus, une société française spécialisée dans la fabrication de produits en plastique. Les expériences ont toutes été dupliquées. Une

### III : PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES

opération de tamisage supplémentaire a été réalisée sur le produit PS, pour obtenir deux classes de granules et éliminer les particules fines (sous-millimétriques), afin d'éviter l'agglomération sur la paroi du cylindre. Les échantillons ont été maintenus pendant 24 heures dans des conditions climatiques presque constantes avant les essais : température ambiante de 21,1°C à 24,0°C et humidité relative de l'air de 55,2% à 60,7%.

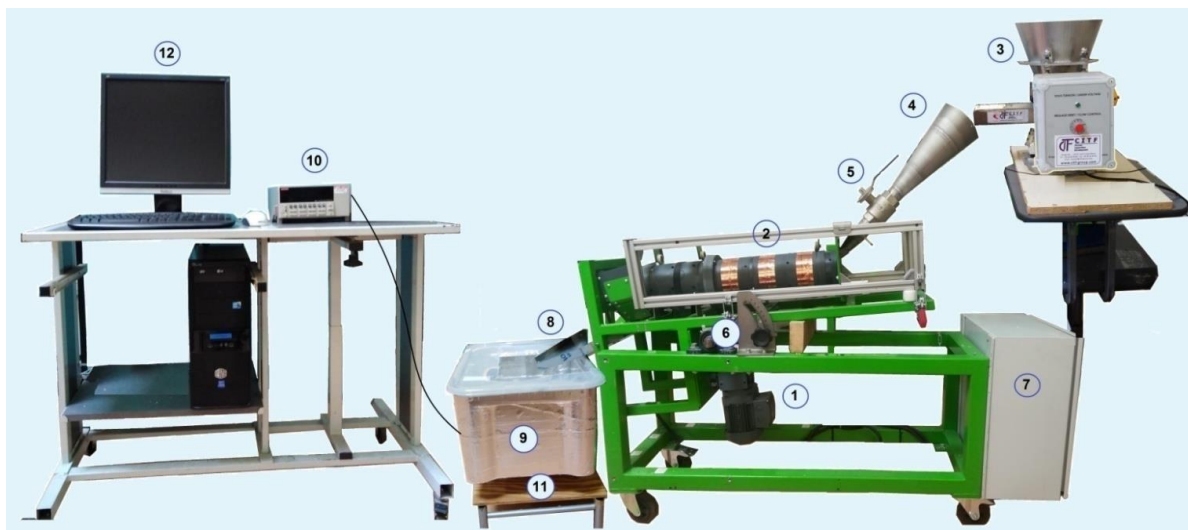


Figure III-5. Dispositif de charge triboélectrique à cylindre tournant. (1) Moteur ; (2) Cylindre creux ; (3) Chargeur vibrant ; (4) Entonnoir ; (5) Valve ; (6) Système de réglage de l'inclinaison ; (7) Armoire de commande électrique ; (8) Trémie de sortie ; (9) Cages de Faraday ; (10) Électromètre (Keithley 6514) ; (11) Balance ; (12) Ordinateur.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'endurance du chargeur triboélectrique de type cylindre tournant, en utilisant deux types de matériaux granulaires provenant de déchets d'équipements électriques et électroniques : Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS) et Polystyrène (PS). Les performances du chargeur ont été quantifiées en calculant le rapport entre la charge électrique et la masse des granules collectés à la sortie du dispositif. Le résultat du processus dépend de la vitesse de rotation du cylindre ainsi que du débit massique du produit.

#### III.2.2. Étude des facteurs influents

##### *Effet de la vitesse de rotation du cylindre*

La valeur optimale de l'angle d'inclinaison ( $\alpha$ ) était de 6°, obtenu par une série d'expériences préliminaires réalisées sur la même machine, avec la même classe de matériaux. Le débit massique de produit était de 13 kg/h.

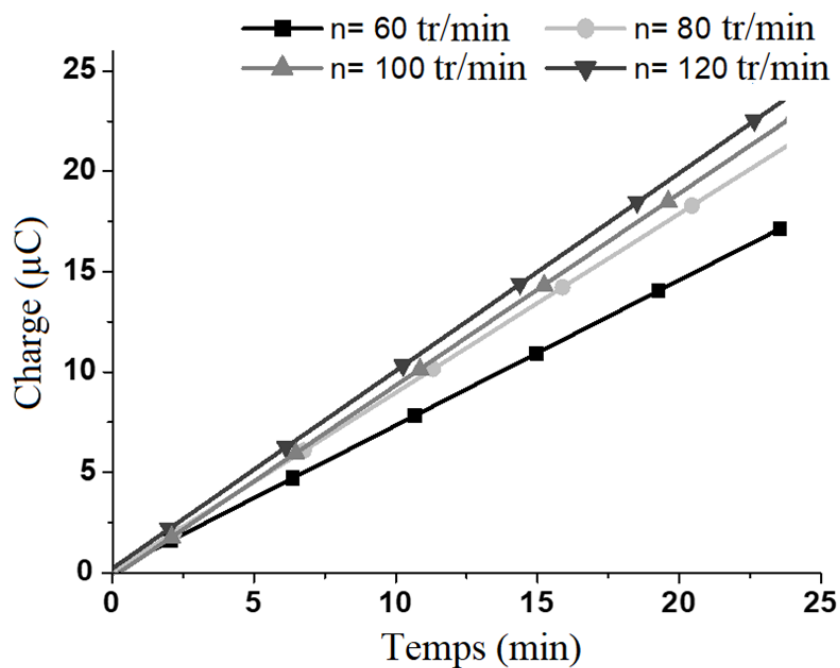


Figure III-6. Charge des particules d'ABS en fonction du temps, pour différentes vitesses de rotation du cylindre  $n = 60$  tr/min ;  $80$  tr/min ;  $100$  tr/min ;  $120$  tr/min.

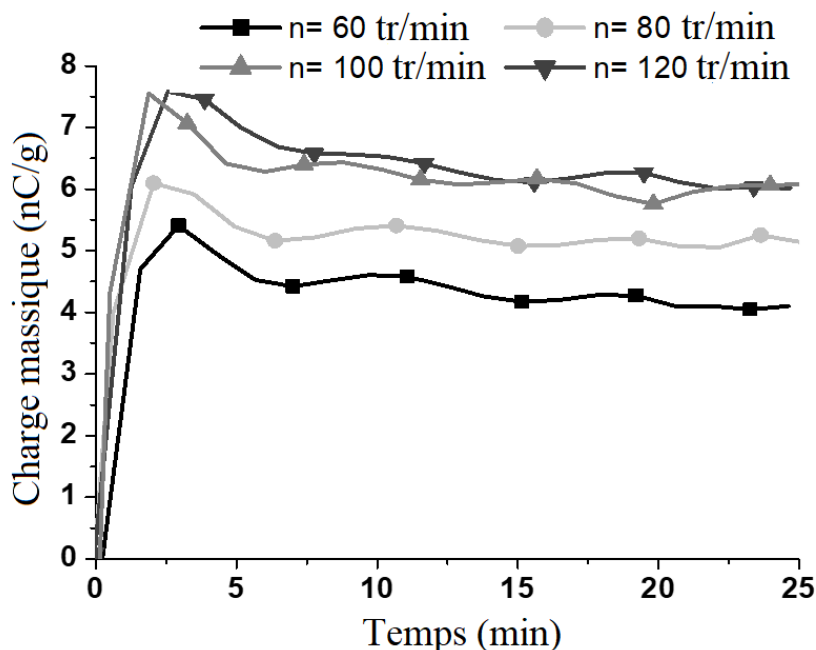


Figure III-7. Charge massique des particules d'ABS en fonction du temps, pour différentes vitesses de rotation du cylindre  $n = 60$  tr/min ;  $80$  tr/min ;  $100$  tr/min ;  $120$  tr/min.

La masse du produit ABS utilisée dans les essais sur l'influence de la vitesse de rotation du cylindre de  $60$  tr/min et  $80$  tr/min était de  $4$  kg et de  $3,5$  kg avec  $100$  tr/min et  $120$  tr/min. En

effet, les masses de particules ne sont pas les mêmes car le temps d'évacuation du produit augmente avec l'augmentation de la vitesse du cylindre.

Le processus de tribocharge des particules d'ABS est illustré par les résultats représentés sur la Figure III-6 qui montre l'évolution de la charge des produits collectés dans la cage de Faraday en fonction du temps. On constate que la charge triboélectrique acquise par les particules augmente avec l'augmentation de la vitesse du cylindre.

La charge massique est plus élevée à des valeurs plus hautes de la vitesse de rotation du cylindre (Figure III-7). Elle atteint une valeur quasiment stable  $Q/m = 6,5 \text{ nC/g}$ , qui est presque la même à une vitesse de 100 tr/min et 120 tr/min. La vitesse de rotation pour les tests suivants a été fixée à 100 tr/min.

#### ***Effet du débit massique du produit***

Les résultats de l'effet du débit de produit introduit dans le dispositif sont présentés sur les Figure III-8 et Figure III-9. Les valeurs optimales de fonctionnement du chargeur ont été utilisées (angle d'inclinaison  $\alpha = 6^\circ$  et une vitesse de rotation  $n = 90 \text{ tr/min}$ ) avec des quantités de 18 kg d'ABS dans les essais à  $Q = 6 \text{ kg/h}$ ,  $Q = 16 \text{ kg/h}$ ,  $Q = 33 \text{ kg/h}$ , et de 14 kg d'ABS à  $Q = 44 \text{ kg/h}$ .

La charge massique la plus élevée obtenue pour l'ABS a été de  $5,5 \text{ nC/g}$ , obtenue pour un débit de  $6 \text{ kg/h}$ . Ceci s'explique par le fait que les particules acquièrent une charge plus élevée pour un faible débit massique où le nombre de collisions entre les particules et les parois est plus important.

En effet, pour une séparation triboélectrostatique efficace, la charge massique des particules plastique doit être suffisamment élevée, typiquement supérieure à  $2 \text{ nC/g}$ , afin que les forces électrostatiques puissent surmonter les forces mécaniques et gravitationnelles. La légère diminution de la charge massique mesurée dans le temps (Figure III-9) est due à la saturation du cylindre.

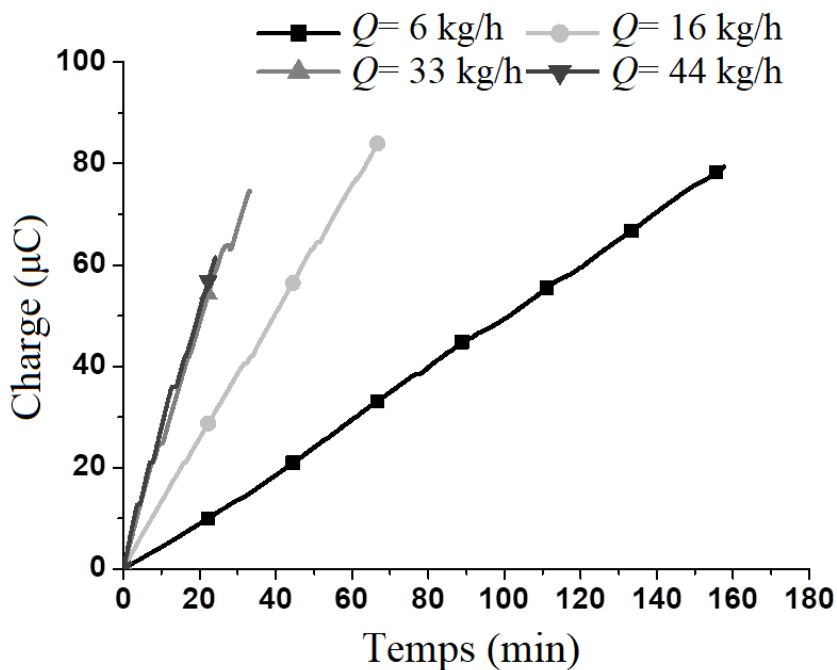


Figure III-8. Charge des particules d'ABS, en fonction du temps, pour différents débits massiques  $Q = 6 \text{ kg/h}$  ;  $16 \text{ kg/h}$  ;  $33 \text{ kg/h}$  ;  $44 \text{ kg/h}$ .

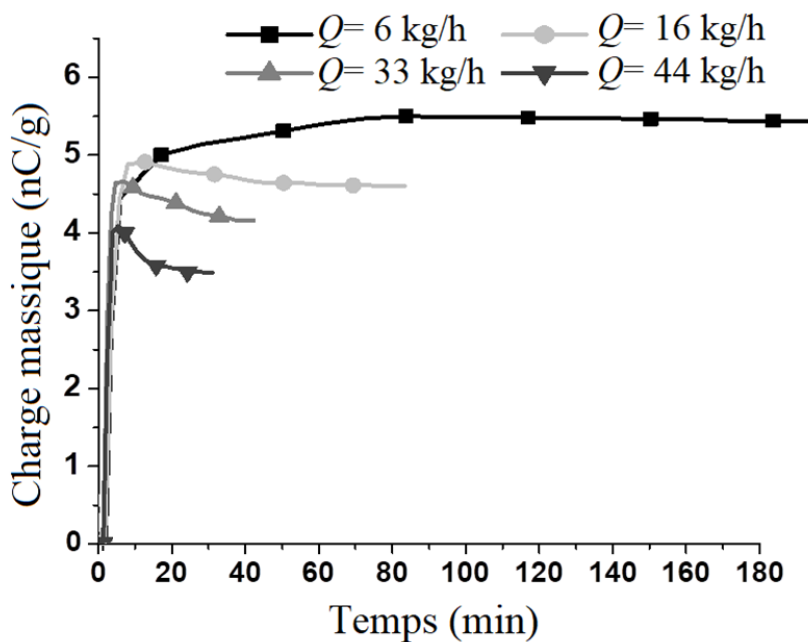


Figure III-9. Charge massique des particules d'ABS en fonction du temps, pour différents débits massiques  $Q = 6 \text{ kg/h}$  ;  $16 \text{ kg/h}$  ;  $33 \text{ kg/h}$  ;  $44 \text{ kg/h}$ .

### Chargement de l'échantillon PS

Les résultats des expériences menées avec des échantillons de 4 kg des particules de PS jaune (Figure II-1g), à un débit d'alimentation  $Q = 44 \text{ kg/h}$  sont représentés sur les figures III-10 et III-11. Selon la série triboélectrique, les particules de PS devraient se charger

positivement avec le cylindre en PVC. De manière surprenante, pendant les expériences d'endurance, la polarité du PS passe de positive à négative (Figure III-10 et Figure III-11). Ce comportement peut s'expliquer par le fait que les particules de PS contiennent beaucoup de particules fines (Figure II-1g) qui restent collées à la paroi du cylindre et modifient progressivement les conditions du tribochargeur.

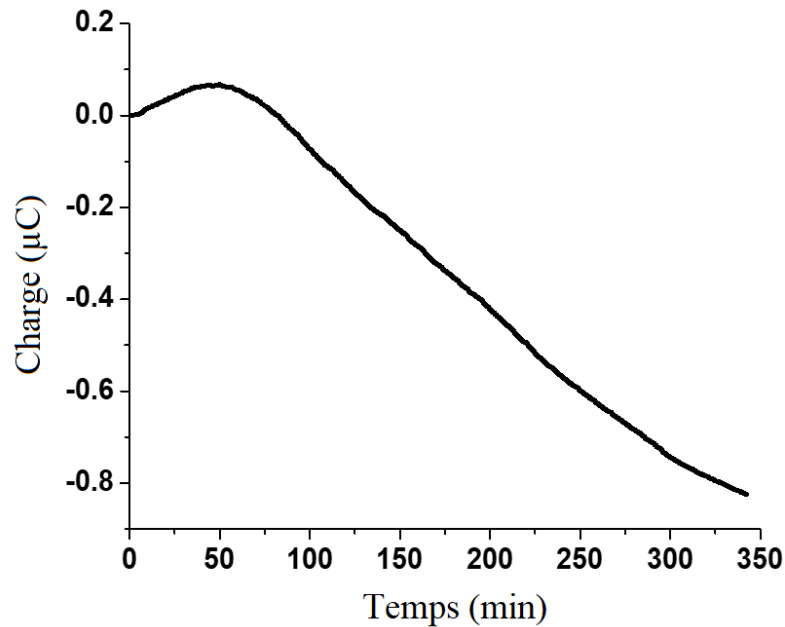


Figure III-10. Charge des particules PS non tamisés en fonction du temps, pour un débit massique  $Q = 44$  kg/h.

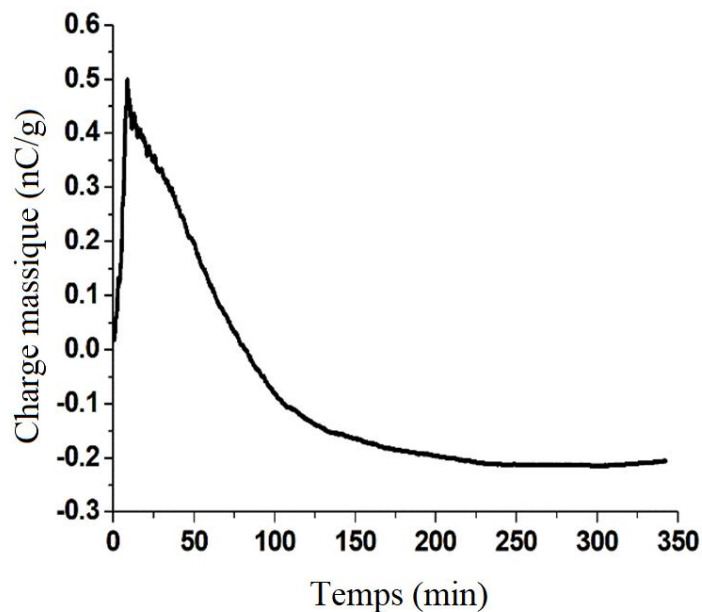


Figure III-11. Charge massique des particules PS non tamisés en fonction du temps, pour un débit massique  $Q = 44$  kg/h.



### III : PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES

Des tests ont été réalisés pour confirmer cette hypothèse. A cet effet, le produit PS a été tamisé pour éliminer les particules fines de taille inférieure à 1 mm. Ensuite le reste du produit a été divisé en deux échantillons selon les tailles des particules, 75% d'échantillon 1 avec des tailles entre 3 mm et 5 mm (Figure III-12a) et 25% d'échantillon 2 avec des tailles de 2 mm à 3 mm (Figure III-12b). Toutes les expériences ont été dupliquées sur les deux tailles de particules.

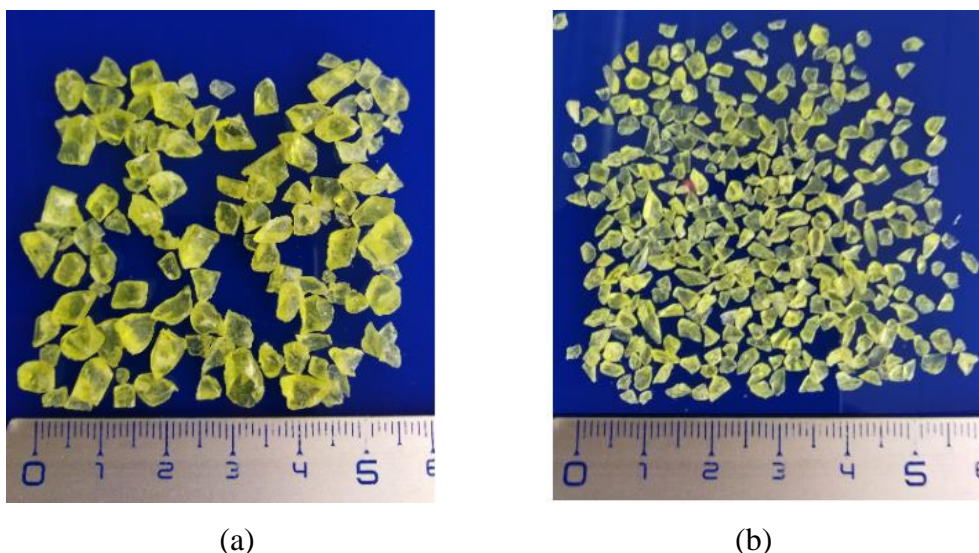


Figure III-12. Aspect et taille : (a) Echantillon 1 de particules PS d'une taille comprise entre 3 mm et 5 mm ; (b) Echantillon 2 de particules de PS d'une taille comprise entre 2 mm et 3 mm.

Le processus de tribochargement des particules de PS entre 3 mm et 5 mm est illustré par les résultats représentés sur les Figure III-13 Figure III-14 et Figure III-15.

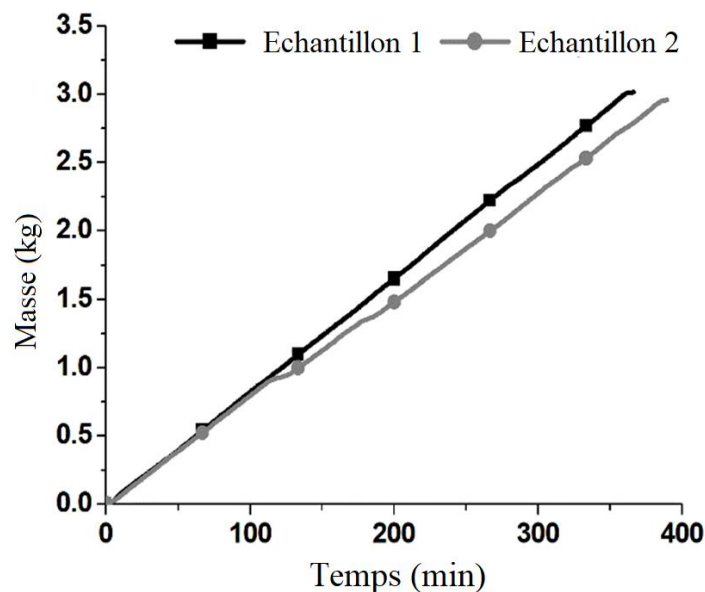


Figure III-13. Masse des particules PS tamisés de taille de 3 mm à 5 mm en fonction du temps, pour un débit massique  $Q = 33$  kg/h.

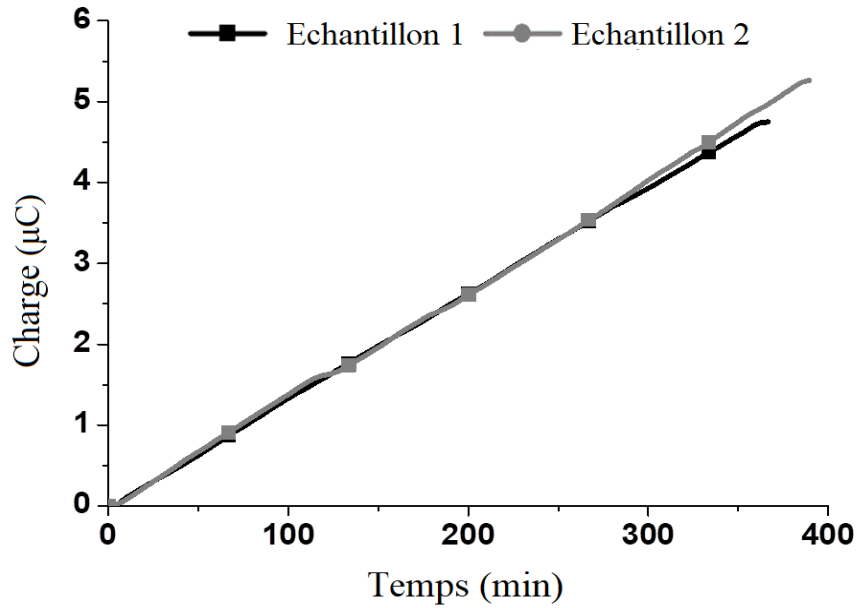


Figure III-14. Charge des particules PS tamisés de taille de 3 mm à 5 mm en fonction du temps, pour un débit massique  $Q = 33$  kg/h.

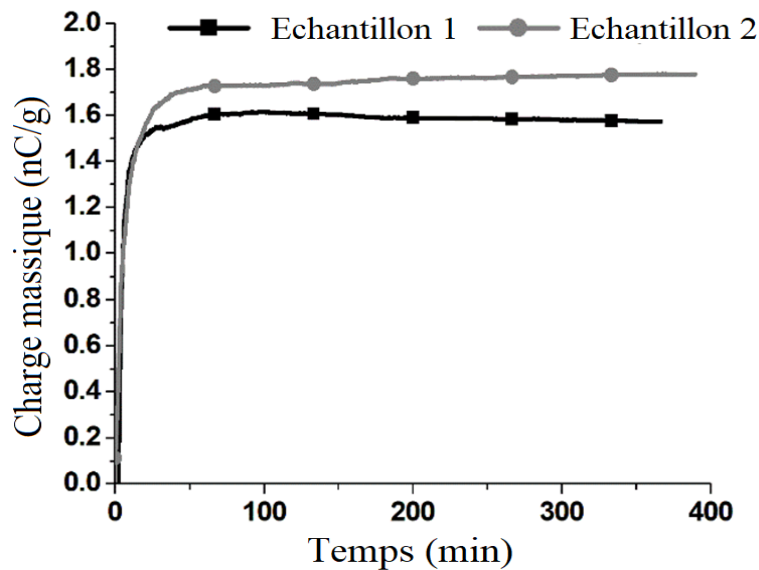


Figure III-15. Charge massique des particules de PS tamisés entre 3 mm et 5 mm en fonction du temps, pour un débit massique  $Q = 33$  kg/h.

Les résultats de l'évolution de la charge des produits collectés dans la cage de Faraday en fonction de temps (représentés sur la Figure III-14) montrent qu'il y a une petite différence entre les deux courbes qui peut s'expliquer par la taille non homogène des particules qui sortent du convoyeur vibrant. Avec l'élimination des particules fines par tamisage, il n'y a pas de changement du signe de charge. Le rapport charge / masse était de 1,6 nC/g et 1,7 nC/g (Figure III-15).

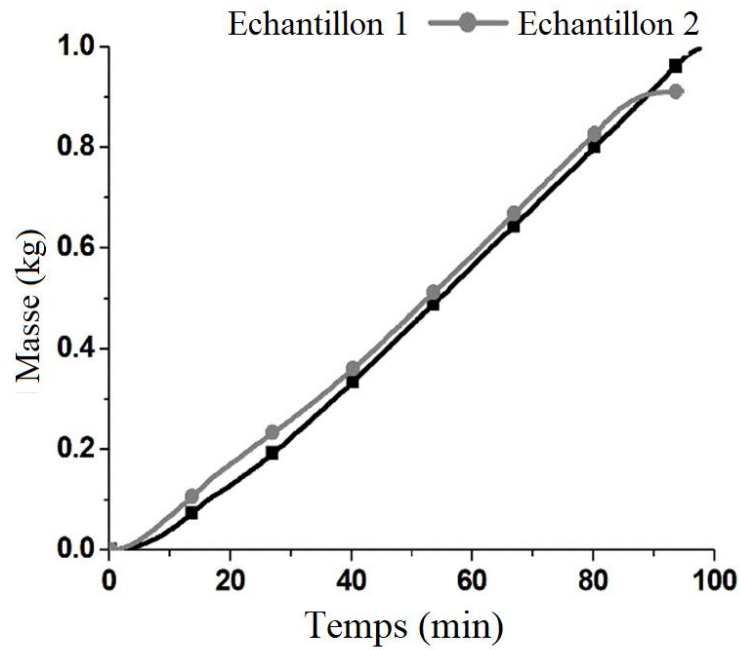


Figure III-16. Masse des particules PS tamisés de taille 2 mm à 3 mm en fonction du temps, pour un débit massique  $Q = 33$  kg/h.

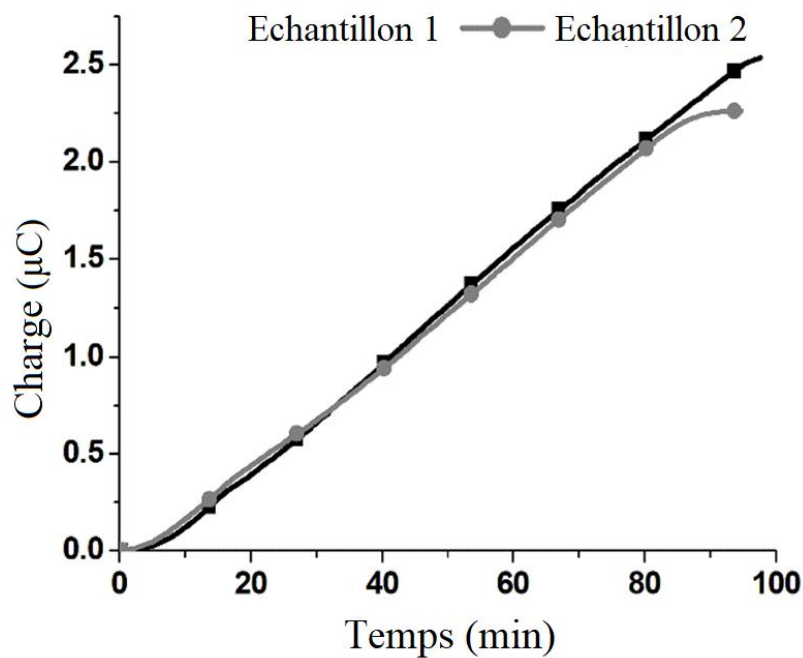


Figure III-17. Charge des particules PS tamisés de taille 2 mm à 3 mm en fonction du temps, pour un débit massique  $Q = 33$  kg/h.

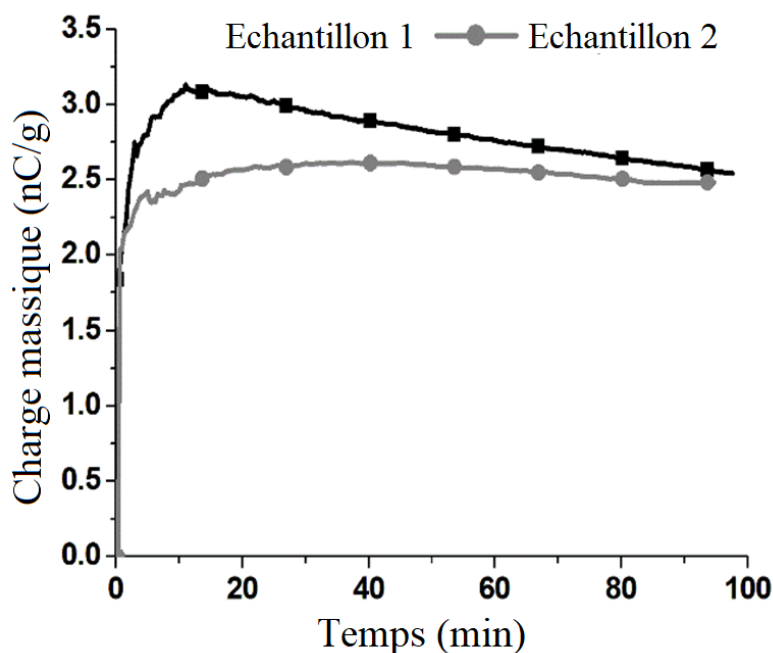


Figure III-18. Charge massique de particules de PS tamisés dont la taille est comprise entre 2 mm et 3 mm en fonction du temps, pour un débit massique  $Q = 33$  kg/h.

Aucun changement du signe de la charge n'a été enregistré quelle que soit les tailles des particules (Figure III-16 et Figure III-17) ; ce qui confirme notre hypothèse de présence des particules fines. Le rapport charge/masse des particules de tailles comprises entre 2 mm et 3 mm (Figure III-18) était de 2,5 nC/g, plus élevé donc que dans le cas des particules de tailles comprises entre 3 mm et 5 mm. Ceci s'explique par le fait que, d'une part, la tribocharge est un phénomène de surface dans lequel les plus petites particules ont tendance à être plus chargées et d'autre part, les particules plus grosses ont tendance à passer moins de temps dans le tribochargeur.

### III.3. Étude et optimisation du chargeur triboélectrique à multicylindre tournant

#### III.3.1. Procédure expérimentale

Le but de cette étude était d'évaluer les facteurs qui influencent la charge triboélectrique et d'identifier les conditions de fonctionnement optimales d'un nouveau tribochargeur tournant de type multicylindre (Figure II.5). Ce dispositif a été conçu pour maximiser le volume actif et la surface interne par rapport à un dispositif tribochargeur de type cylindre tournant afin de fournir les meilleures conditions de frottement particule-paroi et augmenter l'effet de charge triboélectrique.

### III : PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES

A la sortie du nouveau dispositif de tribocharge présenté au paragraphe II.3.1 sur la figure II-5, les particules sont collectées dans une cage de Faraday reliée à un électromètre et placée sur une balance électronique. Les performances du chargeur triboélectrique à multicylindre sont évaluées en calculant le rapport charge/masse des granules collectés.

Une série d'expériences a été réalisée avec 100 g de particules de plastique PS noir ayant une position médiane dans la série triboélectrique avec des tailles comprises entre 3 mm et 6 mm comme indiqué sur la figure II.1f . Les résultats de ces expériences devraient permettre le choix approprié des limites de variation des deux facteurs qui affectent la tribocharge : l'inclinaison de l'ensemble des 6 cylindres et la vitesse de rotation de l'ensemble.

Enfin, un plan expérimental factoriel composite a été utilisé pour la modélisation et l'optimisation du processus. Cette méthode permet d'obtenir un maximum d'informations sur le fonctionnement du dispositif de tribocharge avec un minimum de tests. Plusieurs facteurs peuvent varier simultanément. De plus, elle permet d'évaluer les effets de ces facteurs et leurs interactions. Toutes les expériences ont été réalisées avec des échantillons de 100 g de PS, dans des conditions atmosphériques ambiantes presque constantes : température ambiante de 16,5°C à 19,1°C et humidité relative de l'air de 51% à 61%.

D'autres expériences ont été menées pour établir la série triboélectrique de huit plastiques granulaires issus de DEEE avec trois types de parois des cylindres : PVC, ABS et PC. Cette étude devrait simplifier le choix des parois des cylindres à utiliser pour la séparation électrostatique des mélanges de déchets plastiques.

Les expériences qui ont été réalisées avec des particules (a) PP orange, (b) PP gris, (c) PVC, (d) PE, (f) PS noir, (h) PC Cristal, (i) HIPS, (j) ABS jaune, issus des DEEE (Figure II.1), visaient également à comparer les performances du nouveau tribochargeur de type multicylindre en PVC avec celles du dispositif de type monocylindre tournant en PVC.

Pour chaque matériau, au moins deux essais ont été effectués pour déterminer une valeur moyenne. Dans certains cas, un troisième test a été effectué afin de confirmer les résultats.

#### **III.3.2. Étude des facteurs influents : angle d'inclinaison et vitesse de rotation de l'ensemble des 6 cylindres**

Un ensemble d'expériences de tribochargement réalisées avec des particules de PS noir (figure II-1f) a permis d'évaluer les effets de l'angle d'inclinaison ( $\alpha$ ) et de la vitesse de rotation ( $n$ ) des cylindres.

Le rapport charge/masse mesuré pour divers angles d'inclinaison allant de 2° à 12° est illustré sur la Figure III-19. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour la valeur la plus faible

### III : PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES

de l'angle d'inclinaison car le temps de séjour des particules à l'intérieur du cylindre était plus long, ce qui a permis un plus grand nombre de collisions particule-paroi. A  $2^\circ$ , les particules ne glissent pas assez le long des cylindres pour être évacuées du dispositif. Les expériences ont été triplées.

Les résultats expérimentaux montrent que le rapport charge/masse des particules de PS augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation du cylindre (Figure III-20). En effet, lorsque la vitesse de rotation du cylindre est élevée, le nombre d'impacts et la durée de frottement entre les particules et les parois du dispositif (qui servent au transfert de charges) augmentent.

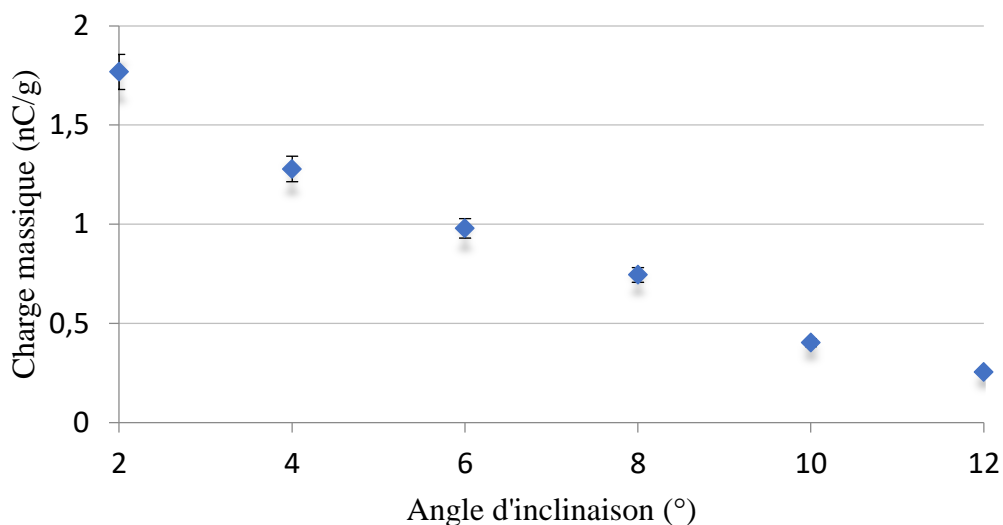


Figure III-19. Charge massique des particules de PS en fonction de l'angle d'inclinaison des cylindres en PVC ( $HR = 58,2\%$ ,  $T = 17,5^\circ\text{C}$ ,  $n = 90$  tr/min).

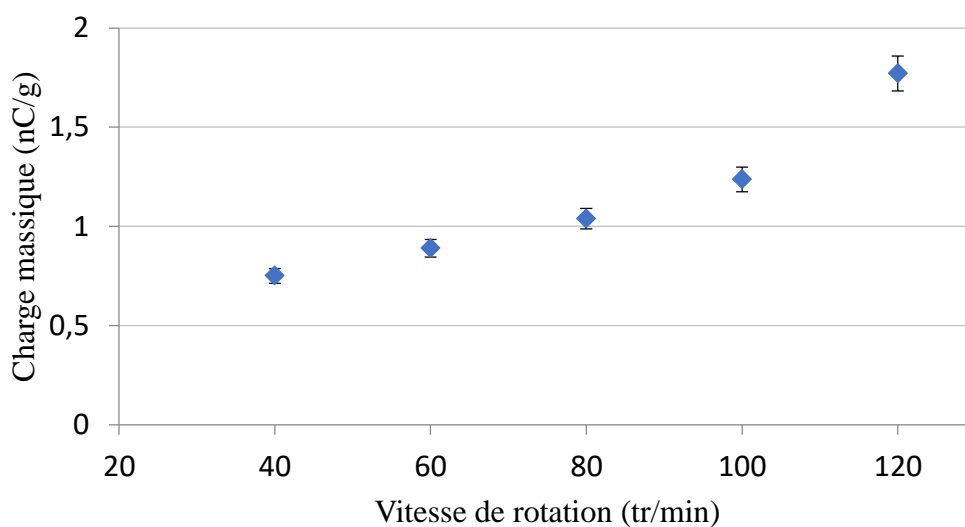


Figure III-20. Charge massique des particules de PS en fonction de la vitesse de rotation des cylindres en PVC ( $HR = 60,1\%$ ,  $T = 19,1^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ).

### III.3.3. Modélisation et optimisation du processus de charge

A partir des résultats de l'étude des facteurs influents, il a été possible d'établir un domaine de variation réduit des deux variables de contrôle du procédé en vue de sa modélisation expérimentale et de son optimisation :

- Angle d'inclinaison  $\alpha$  [°] = [4, 8], car à un angle de 2° l'évacuation du produit était difficile ;
- Vitesse de rotation  $n$  [tr/min] = [80, 120].

Tableau III-4. Charge massique ( $Q/m$ ) de particules de PS pour un plan factoriel composite.

N	Angle d'inclinaison	Vitesse de rotation	Charge massique
	$\alpha$ [°]	$n$ [tr/min]	$Q/m$ [nC/g]
1	4	80	2,2
2	4	120	4,0
3	8	80	1,6
4	8	120	2,2
5	6	80	1,6
6	6	120	2,6
7	4	100	2,6
8	8	100	1,8
9	6	100	1,7
10	6	100	1,8
11	6	100	1,7

#### Détermination du point de fonctionnement optimal

L'analyse des résultats du plan expérimental factoriel composite (Tableau III-4) a été réalisée avec le logiciel MODDE 5.0, qui a déterminé le modèle mathématique du rapport charge/masse  $Q/m$  (la réponse du processus du tribochargeur) par un polynôme du second ordre :

$$Q/m = 1.75 - 0.53\alpha' + 0.55n' + 0.47\alpha'^2 - 0.31n'^2 - 0.29\alpha' n' \quad (\text{III-2})$$

Où  $n'$  et  $\alpha'$  sont les valeurs centrées normalisées de la vitesse de rotation  $n$  et de l'angle d'inclinaison  $\alpha$ , respectivement. Les paramètres statistiques obtenus pour ce plan d'expérience  $R^2 = 0,986$  et  $Q^2 = 0,864$  sont proches de 1,0, indiquant que le modèle obtenu peut être utilisé en toute confiance pour optimiser le processus de chargement triboélectrique.

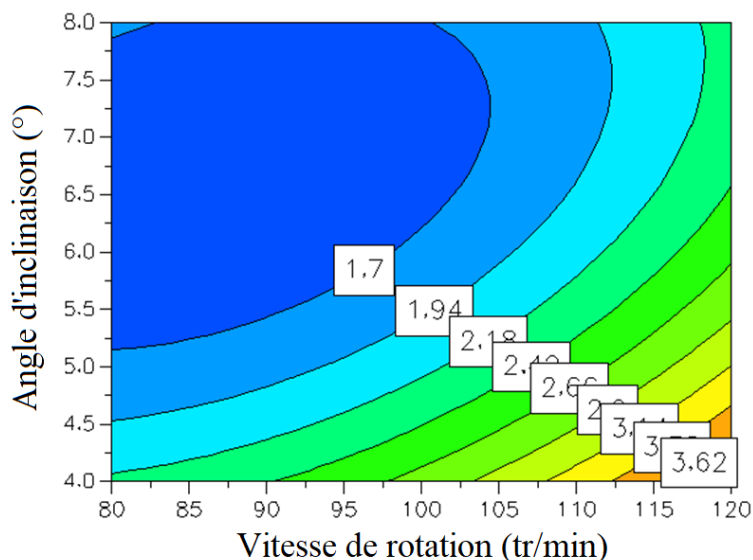


Figure III-21. Iso-contours de la charge massique (nC/g) prédite par MODDE 5.0 pour les particules de PS en fonction de la vitesse de rotation et de l'angle d'inclinaison.

Les iso-contours de la charge massique prédite par MODDE 5.0 (Figure III-21) montrent que l'angle d'inclinaison et la vitesse de rotation des cylindres ont un effet significatif sur la tribocharge des particules de PS. Ainsi, la charge acquise par les particules de PS est plus élevée lorsque l'inclinaison est faible et la vitesse de rotation est élevée, ce qui conduit à une augmentation du nombre d'impacts auxquels les particules sont exposées et donc de la quantité de charge transférée entre les particules en contact. Le meilleur chargement triboélectrique des particules de PS (3,62 nC/g) est obtenu lorsque les facteurs de contrôle sont ajustés à des valeurs allant de 112,5 tr/min à 120 tr/min pour la vitesse de rotation et de 4° à 4,7° pour l'angle d'inclinaison.

Les valeurs optimales prédites par le logiciel MODDE 5.0 ont été confirmées par des expériences supplémentaires comme indiqué dans le Tableau III-5. Ils étaient en bon accord avec les prédictions théoriques qui ont permis de formuler de précieuses recommandations concernant l'application industrielle du dispositif.

Tableau III-5. Comparaison entre les résultats prédits par MODDE 5.0 et ceux obtenus expérimentalement

Résultats	Angle d'inclinaison $\alpha$ [°]	Vitesse de rotation $n$ [tr/min]	Charge massique $Q/m$ [nC/g]
Prédits	4	120	3,90
Expérimentaux			3,8



### III.3.4. Séries triboélectriques obtenues avec des cylindres en PVC, en ABS et en PC

L'objectif de cette série d'expériences est d'établir les séries triboélectriques correspondantes à chaque type de paroi (ABS, PC et PVC) pour les huit polymères suivants (Figure II.1) : (a) PP orange, (b) PP gris, (c) PVC, (d) PE, (f) PS noir, (h) PC Cristal, (i) HIPS, (j) ABS jaune.

La Figure III-22 montre les séries triboélectriques avec les parois ABS et PC, ainsi que les niveaux de charge obtenus pour les huit types de polymères. La série triboélectrique avec des parois PVC est présentée dans le paragraphe II.3.5 sur la Figure III-23a.

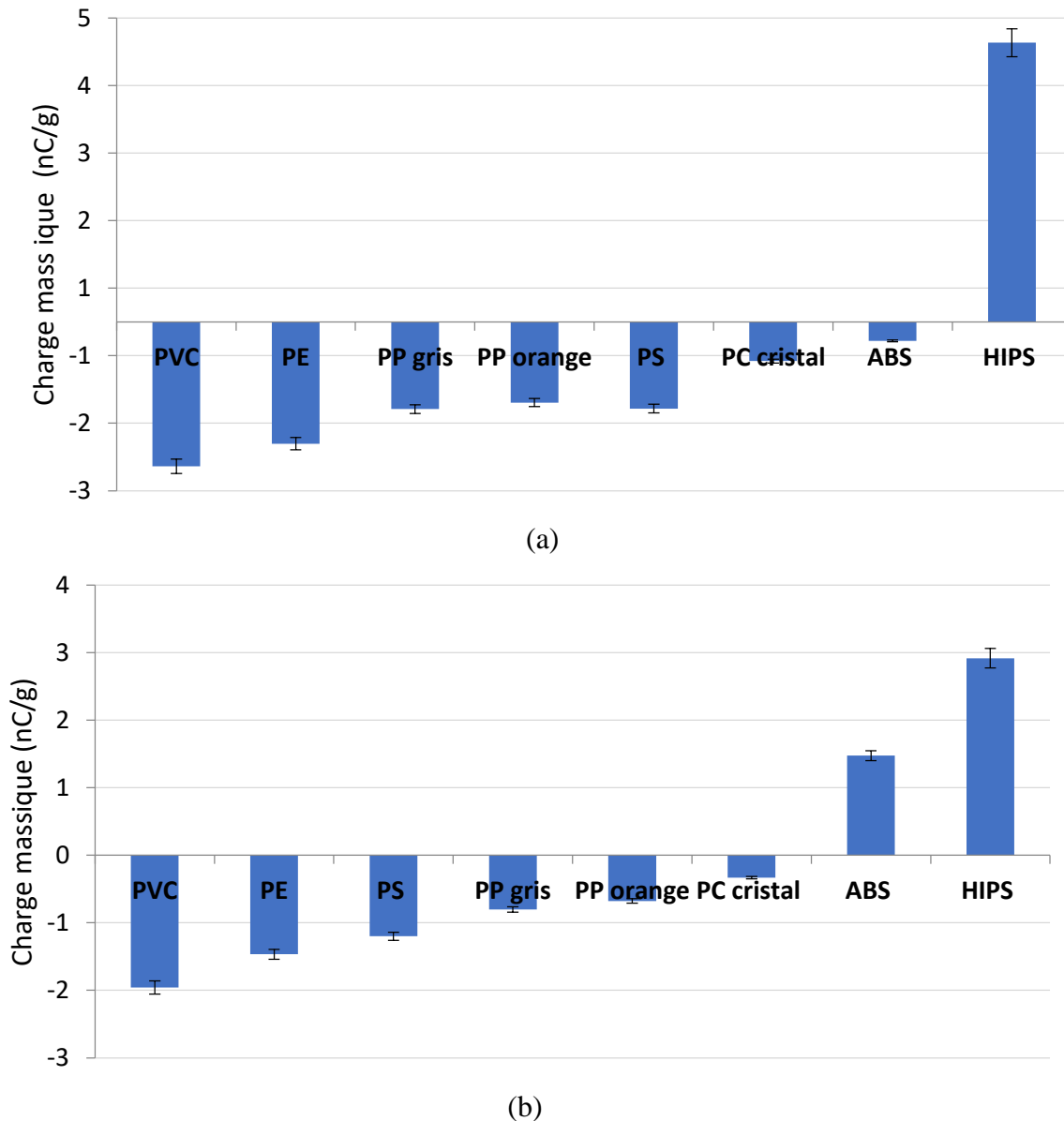


Figure III-22. Charge massique de différents types de particules dans le nouveau dispositif de tribochargement équipé de cylindres ABS (a) et PC (b), à  $\alpha = 6^\circ$  et  $n = 90$  tr/min.

### III : PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES

Lorsque les particules ont été tribochargées dans le dispositif de charge avec des parois ABS, sept types de polymère ont été chargés négativement et seul le HIPS a été chargé positivement.

Avec la paroi des cylindres en PC, deux matériaux sont chargés positivement (Figure III.21) : HIPS et ABS. Les 6 autres particules se chargent négativement.

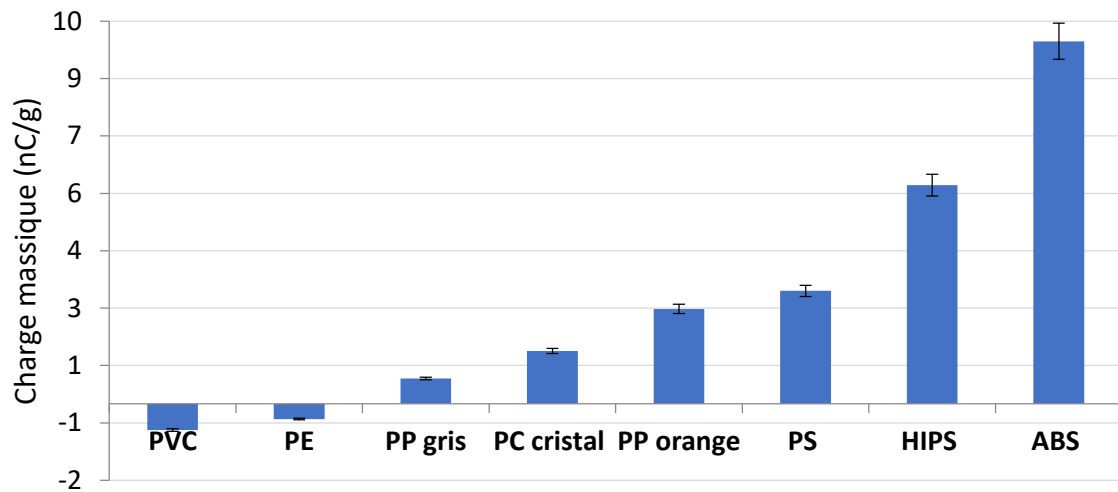
La charge positive la plus élevée est celle des particules de HIPS : + 4,3 nC/g, en contact avec les parois des cylindres en ABS et + 2,9 nC/g avec les parois des cylindres en PC. La charge négative maximale est acquise par les particules de PVC : - 2,6 nC/g et - 1,9 nC/g, au contact des parois des cylindres ABS et PC, respectivement.

Il est intéressant de noter que :

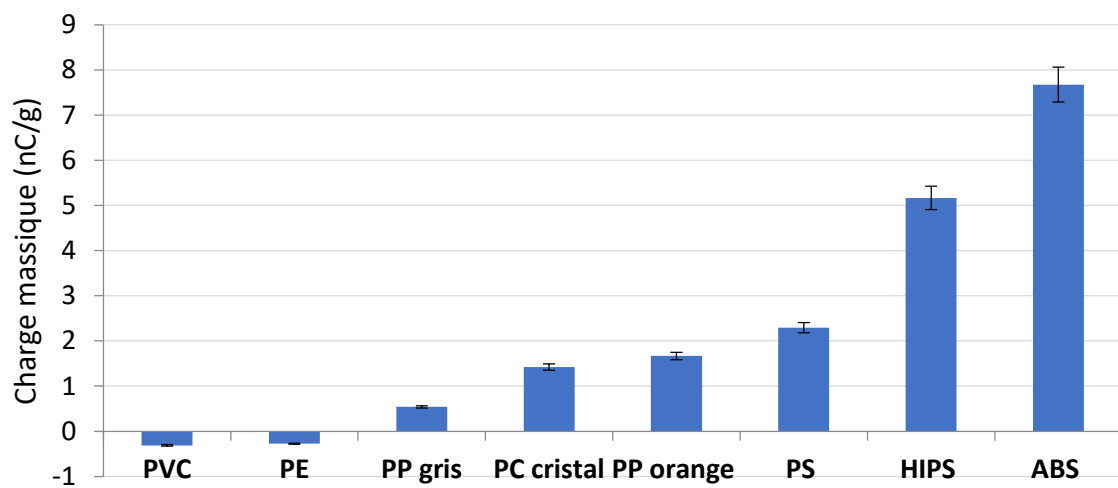
- (i) Les particules de PS se chargent négativement au contact des parois en ABS et en PC mais positivement avec celles en PVC (Figure III-23a) ;
- (ii) Les particules de PVC, d'ABS et de PC se chargent toujours négativement lorsqu'elles sont en contact avec les parois des cylindres du même matériau. Cette dernière observation est en bon accord avec les prédictions théoriques : les particules plus petites se chargent toujours négativement au contact des plus grosses de même matériau et les parois des tribochargeurs pourraient être assimilées à de grandes particules.

#### **III.3.5. Comparaison entre les chargeurs triboélectriques à monocylindre et multicylindre tournants**

La série triboélectrique correspondant aux deux dispositifs de tribocharge équipés de cylindres en PVC peut être examinée sur la Figure III-23a et Figure III-23b. Pour n'importe lequel des 8 polymères, la charge massique était plus élevée (en valeurs absolues) dans le cas du tribochargeur de type multicylindre. Par exemple, les particules d'ABS ont acquis + 9,9 nC/g dans le dispositif à multicylindre et seulement + 7,8 nC/g dans le tribochargeur à un cylindre. Ceci peut s'expliquer par le fait que la surface intérieure des 6 cylindres composant le dispositif multicylindre est plus grande et leur volume est plus petit que celui d'un cylindre tournant. Une surface interne plus grande implique plus de collisions particule-paroi, un volume plus petit favorise plus de contacts particule-particule.



(a)



(b)

Figure III-23. Charge massique de différents types de particules dans les dispositifs de tribochargement multicylindre PVC (a) et (b) monocylindre PVC, à ( $\alpha = 6^\circ$ ,  $n = 90$  tr/min).

Les formules de calcul des surfaces intérieures et des volumes des cylindres composant les deux dispositifs sont données dans le Tableau III-6 :

Tableau III-6. Surfaces internes et volumes des dispositifs de tribocharge multicylindre et monocylindre.

Dispositif	Multicylindre	Monocylindre
Surface intérieure ( $m^2$ )	$S = N \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$ 0.37	$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$ 0.22
Volume ( $mm^3$ )	$V = N \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l$ 3.07	$V = \pi \cdot r^2 \cdot l$ 6.8

$N$  : nombre de cylindres ;  $r$  : rayon du cylindre (m) ;  $l$  : longueur du cylindre (m).

### **III.4. Étude des mécanismes de chargement triboélectrique des polymères granulaires (particule-particule / particules-paroi) dans un chargeur triboélectrique multicylindre tournant**

#### **III.4.1. Procédure expérimentale**

Ce travail a pour objectif de prouver l'efficacité du chargeur triboélectrique multicylindre pour charger un mélange granulaire d'ABS et de PVC originaires de déchets d'équipements électriques et électroniques (Figure II.1).

Les valeurs optimales de fonctionnement pour le dispositif de charge sont fixées suite à plusieurs essais préliminaires [82] : angle d'inclinaison  $\alpha = 6^\circ$  et vitesse de rotation  $n = 100$  tr/min. En sortie du dispositif de charge, les particules sont collectées dans une cage de Faraday connectée à un électromètre et placée sur une balance électronique. Les mesures de charge et de masse des instruments sont enregistrées par le biais d'un logiciel d'acquisition de données piloté par LabVIEW. La performance du dispositif de charge a été évaluée en calculant la charge massique des granules collectés.

La séparation électrostatique des matériaux chargés par le dispositif de charge a été faite avec un équipement fourni par la société Prodecologia (Rivne, Ukraine) décrit au paragraphe II.2.3, sur la figure II-4.

Le montage expérimental est présenté en Figure III-24. Les expériences ont été menées dans des conditions environnementales stables (température : [16,5°C ; 19,1°C] ; humidité relative : [51% ; 60%]) et répétées trois fois. Dans une première série d'expériences, des échantillons de 50 g de plastique granulaire, d'ABS ou de PVC, ont été introduits dans le dispositif de charge. Les échantillons tribochargés ont été transférés au séparateur électrostatique, à la sortie duquel a été mesurée la charge massique ( $Q_s$ ) des produits collectés dans chaque cage de Faraday (5) et (6). Il est ainsi possible de déterminer la charge acquise par chaque matière due au contact particule-paroi. Une deuxième série d'expérience a été menée sur des échantillons de 100 g de mélange granulaire composé de 50% de PVC et de 50% d'ABS. Après avoir été chargé par le tribochargeur, les particules ont été introduites dans le séparateur. Selon leur polarité, les produits de la séparation ont été collectés dans les cages de Faraday (10). La charge mesurée a été acquise à la fois par collision entre les particules et les parois mais aussi entre les particules elles-mêmes ( $Q_m$ ). Dans les deux séries d'expériences, chaque échantillon a été chargé dans le dispositif de charge à multicylindre tournant équipé d'un des trois types de cylindre : ABS, PC ou PVC.

### III : PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES

L'objectif de cette étude est de comprendre les mécanismes de charge triboélectrique des particules et l'évaluation des charges acquises par collision entre particules elles-mêmes et entre les particules et les parois du dispositif.

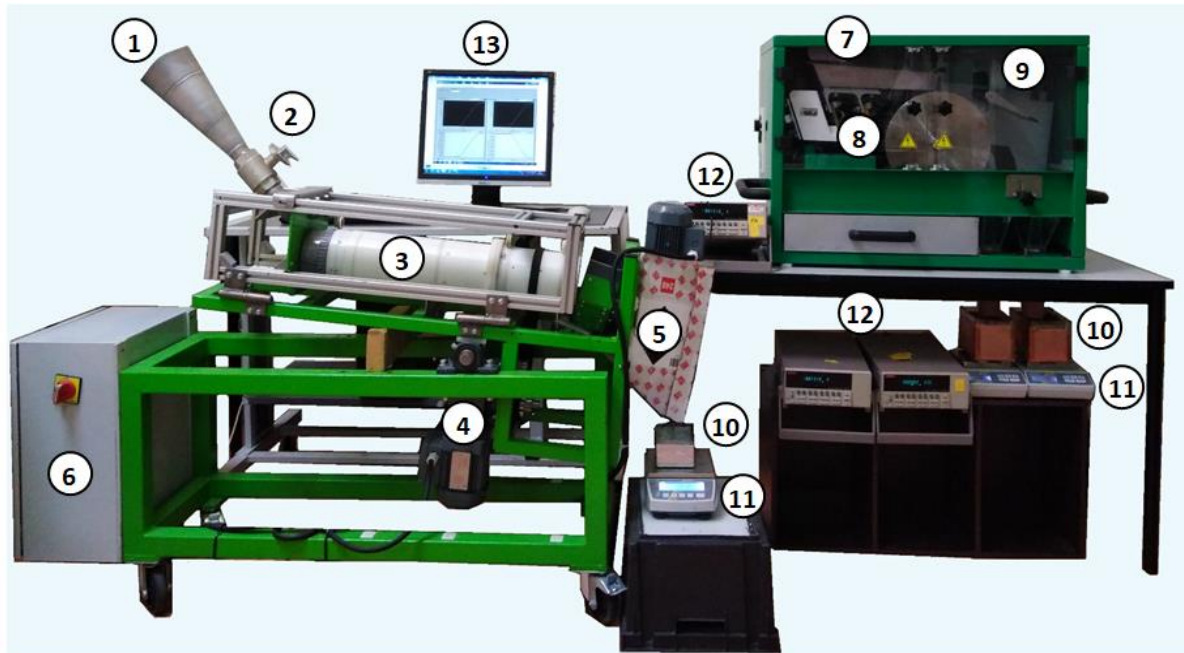


Figure III-24. Montage expérimental du séparateur électrostatique à tambour et du dispositif de charge à multicylindre tournant. (1) Trémie d'entrée ; (2) Vanne ; (3) Ensemble de six cylindres creux ; (4) Moteur ; (5) Trémie de sortie ; (6) Armoire électrique ; (7) Table vibrante ; (8) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (9) Electrode elliptique reliée à une source de haute tension réversible ; (10) Cages de Faraday ; (11) Balance électronique ; (12) Electromètres (Keithley 6514) ; (13) Ordinateur.

#### III.4.2. Mécanismes de chargement triboélectrique de polymères dans des cylindres en PVC, ABS et PC

La charge nette accumulée par les particules du mélange binaire de plastiques lors de leur passage dans le tribochargeur est due aux collisions entre les particules de différentes natures ( $Q_{Par-Par}$ ) et aux impacts entre les particules et les parois du dispositif ( $Q_{Par-Paroi}$ ).

Le pourcentage de la charge transférée par chaque mécanisme peut être calculé avec les formules suivantes :

$$Q_{Par-Par} = \frac{(Q_m - Q_s)}{Q_m} \times 100 \quad (\text{III3})$$

$$Q_{Par-Paroi} = 100 - Q_{Par-Par} \quad (\text{III4})$$

Les résultats des deux séries d'expériences sont donnés dans le Tableau III-7. L'erreur expérimentale est inférieure à 5%. Pour toutes les expériences concernant la séparation de mélange de plastique (ABS+PVC), la pureté des produits séparés dans les cages de Faraday est supérieure à 98%. Ces excellents résultats s'expliquent par le fait que le PVC et l'ABS

### III : PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES

sont éloignés dans la série triboélectrique et se chargent avec des polarités opposées lorsqu'ils sont en contact.

Tableau III-7. Résumé des tests de charge et de séparation d'un seul produit et de mélange.

Parois	PVC		ABS		PC	
Produit	ABS gauche	PVC droite	ABS gauche	PVC droite	ABS gauche	PVC droite
$Q_S$ (nC/g)	4,1	- 1,7	1,2	- 3,5	2,0	- 3,8
$Q_m$ (nC/g)	10,5	- 6,7	7,0	- 7,9	8,6	- 10,6
$Q_{Par-Par}$ (%)	61	75	83	56	77	64
$Q_{Par-Paroi}$ (%)	39	25	17	44	23	36

Le transfert de charge qui apparaît en chargeant un seul produit est inférieur à celui où le mélange est traité et ce indépendamment de la matière des parois utilisées (PVC, ABS et PC). Cela peut s'expliquer facilement par le fait que l'ABS et le PVC sont très éloignés dans la série triboélectrique et que, par conséquent, les contacts particule-particule sont plus efficaces que ceux avec les parois. Les particules se chargent toujours faiblement lorsqu'elles sont en contact avec des parois du dispositif de charge du même matériau. Les particules de PVC acquièrent une charge de - 1,7 nC/g en contact avec les parois en PVC et les particules d'ABS se chargent à + 1,2 nC/g avec des parois en ABS. La charge des produits seuls est similaire lorsqu'ils sont en contact avec les parois en PC et en ABS (Tableau III-7).

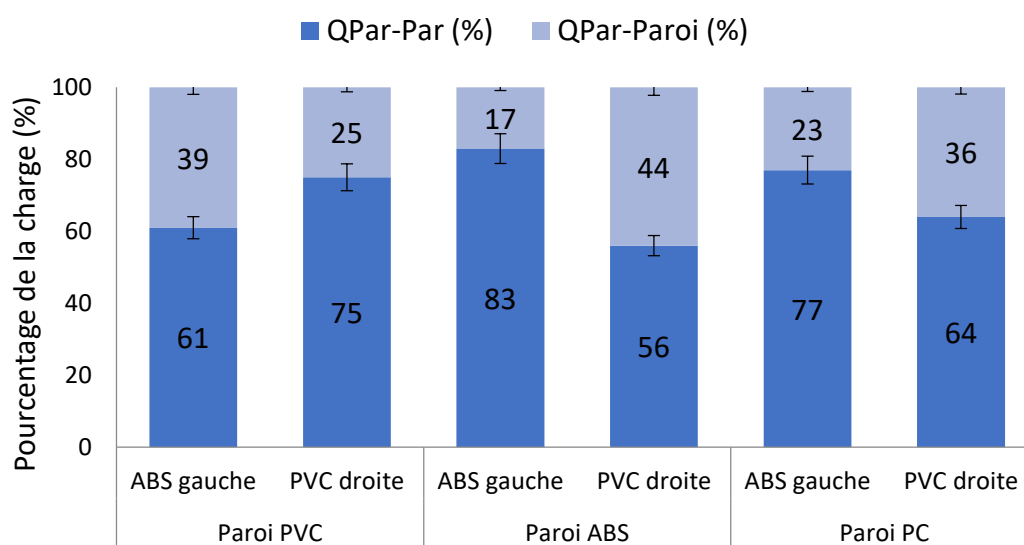


Figure III-25. Mécanisme de charge par collision particule-particule et particule-paroi avec les parois en PVC, ABS et PC.

### III : PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES

La charge totale des particules d'ABS, lorsqu'elles sont mélangées avec des particules de PVC dans le dispositif multicylindre avec des parois en PVC, est due à 61% aux collisions particules-particules et à 39% aux collisions particules-paroi (Figure III-25). Dans le cas des particules d'ABS, 75% de la charge totale est due aux collisions avec les particules de PVC et seulement 25% est due aux impacts avec les parois en PVC.

Lorsque le dispositif de charge est utilisé avec les parois en ABS et en PC, respectivement 83% et 77% de la charge totale de l'ABS est due aux collisions entre particules. Pour les particules de PVC, la part de leur charge totale est due aux collisions entre les particules dans le tribochargeur avec des cylindres en ABS et en PC est respectivement de 56% et de 64%. Dans tous les cas, la partie de la charge acquise par impacts particules-parois est inférieure à 50% de la charge totale.

#### III.5. Conclusions

Les dispositifs de tribochargement présentés dans ces études ont prouvé leur efficacité dans le traitement des polymères granulaires. Les constituants d'un mélange granulaire qui doivent être séparés sont tribochargés dans des dispositifs monocylindre ou multicylindre tournants par des collisions particule contre particule et particule contre paroi. Le choix approprié du matériau à partir duquel le cylindre est fabriqué peut améliorer le processus de tribochargement et faciliter la séparation.

La méthode des plans d'expériences permet la modélisation et l'optimisation des dispositifs de charge triboélectrique. Le modèle mathématique obtenu peut être utilisé pour la détermination des valeurs optimales des différents facteurs du procédé de charge triboélectrique.

Le logiciel MODDE 5.0 facilite la modélisation expérimentale et l'optimisation du processus de tribocharge.

L'efficacité des dispositifs de tribocharge monocylindre ou multicylindre tournants dépend de plusieurs facteurs tels que l'angle d'inclinaison, la vitesse de rotation du cylindre, le temps de séjour des particules dans le cylindre, le type de parois des cylindres et le débit massique du produit. Lorsque l'angle d'inclinaison est de  $6^\circ$  ou moins et que la vitesse de rotation des cylindres est supérieure à 90 tr/min, le nombre d'impacts et la durée de frottement entre les particules et les parois du dispositif augmentent ainsi que le transfert de charges.

L'efficacité du tribochargeur à cylindre tournant est également influencée par les tailles des particules, plus les tailles des particules sont petites, plus la charge massique est élevée. Les

### III : PROCÉDÉS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DE MÉLANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES

expériences réalisées sur les particules de PS non tamisées ont démontré que la polarité de la charge peut dépendre de la présence de fines particules.

Le cylindre en PVC s'est avéré être un bon choix pour la séparation d'un mélange ABS + PS, car il charge très bien le premier constituant et a beaucoup moins d'effet sur le second. Le PVC étant un isolant, la libération de la charge accumulée à sa surface est un processus beaucoup plus lent que dans le cas des cylindres métalliques, ce qui devrait affecter le fonctionnement à long terme de tribochargeur. Les expériences d'endurance du dispositif de charge montrent que l'accumulation de charge est limitée à des niveaux qui n'affectent pas le résultat du processus, même lorsque le tribochargeur est en fonctionnement continu pendant plus de 180 min.

Les séries triboélectriques des huit polymères les plus courants issus des DEEE facilitent le choix de la nature des parois du dispositif de tribocharge car elles donnent une idée générale de la manière dont la charge se transfère lorsque deux matériaux quelconques seront mis en contact par frottement. Les particules du même matériau que les parois du tribochargeur reçoivent une faible charge négative.

Le programme d'acquisition de données a permis la surveillance continue de la charge et de la masse pour faciliter l'étude d'endurance du tribochargeur à cylindre tournant. Il permet également la détermination des effets des collisions particule-particule et particule-paroi sur la charge triboélectrique dans le dispositif de charge multicylindre tournant. La charge acquise par les particules en contact avec des parois du même matériau ne dépasse pas 25% de la charge totale. Plus de 60% de la charge des particules d'une nature différente de celle des parois est due aux collisions entre les particules elles-mêmes.



#### IV. PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

Le flux de déchets d'équipements électriques et électroniques augmente de plus en plus rapidement dans le monde et est considéré comme un problème mondial. Selon le dernier rapport de "Global E-waste Monitor" publié par l'Organisation des Nations Unies, 53,6 millions de tonnes de DEEE ont été produits en 2019.

La séparation électrostatique est l'une des meilleures solutions pour réduire la pollution et protéger l'environnement. En utilisant la technique de flottaison, les entreprises de recyclage sont capables de séparer les mélanges contenant les plastiques les plus couramment utilisés dans le domaine industriel PS, ABS, PP et PE en deux mélanges : (ABS + PS) et (PP + PE). Ces particules de plastiques sont immergées dans un liquide (par exemple l'eau) ayant une masse volumique intermédiaire entre celles des plastiques à séparer (Tableau IV-1). Les particules (ABS+PS) dont la masse volumique est plus élevée que celle du liquide vont couler tandis que les autres (PP+PE) vont flotter, comme montré dans la (Figure IV-1).

Tableau IV-1. Masse volumique des plastiques.

	PP	PE	Eau	PS	ABS
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	0.89 - 0.95	0.91 – 0.96	0.99	1.05	1.03 – 1.08

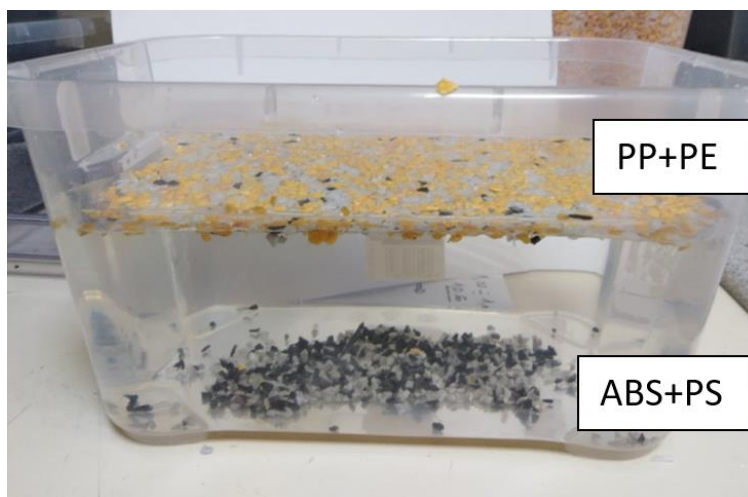


Figure IV-1. Séparation d'un mélange contenant les plastiques ABS, PS, PE et PP par flottaison.

La meilleure solution pour récupérer distinctement les constituants de ces deux mélanges est la séparation électrostatique. Cette technique nécessite la charge électrique des plastiques granulaires par effet triboélectrique. Les granules sont chargés positivement et négativement par des collisions et des frottements entre eux ou avec les parois de différents dispositifs de

tribochargement. Les granules différemment chargés sont séparés dans le champ électrique généré par différentes configurations d'électrodes, connectées à des alimentations haute tension continue : les particules de même charge que l'électrode sont repoussées et celles de signe opposé sont attirées, par les forces électriques de Coulomb.

Les objectifs de cette étude étaient :

- 1) D'évaluer l'influence des parois du dispositif de charge triboélectrique sur l'efficacité du processus de séparation ;
- 2) D'identifier le type de dispositif le plus approprié pour charger des mélanges de plastiques dont les constituants sont proches dans la série triboélectrique (ABS/PS), (PP/PE) et (PP/PE/ABS), en vue de leur séparation électrostatique ;
- 3) D'étudier l'effet de l'humidité sur les processus de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique ;
- 4) D'étudier l'effet de l'humidité ambiante sur l'efficacité du processus de charge triboélectrique et de séparation électrostatique, en particulier dans un environnement industriel où les déchets plastiques granulaires peuvent contenir de l'humidité résiduelle en raison de leurs stockage ou en raison de la combinaison avec la technique de séparation par flottaison ;
- 5) De développer et d'optimiser de nouvelles machines industrielles (PRD et TVE) pour la séparation électrostatique de mélanges de plastiques granulaires.

#### **IV.1. Séparation triboélectrostatique de mélanges de deux ou trois plastiques granulaires**

##### **IV.1.1. Procédure expérimentale**

Le tri électrostatique des matières tribochargées a été effectué avec le séparateur à tambour (Figure IV-2). Toutes les expériences ont été réalisées au point de fonctionnement optimal des installations. Pour le séparateur électrostatique : la vitesse du tambour (électrode reliée à la terre)  $n = 25$  tr/min, la distance entre les deux électrodes,  $d = 90$  mm, l'angle d'inclinaison de l'électrode à profil NACA reliée à la haute tension  $\alpha = 30^\circ$ , la valeur de haute tension appliquée à l'électrode avec la polarité positive  $U = + 31$  kV ou  $U = - 31$  kV avec la polarité négative, l'inclinaison du volet déflecteur  $\beta = - 19^\circ$ . Les tests préliminaires ont montré que ces réglages peuvent fournir une bonne séparation tout en évitant les arcs électriques entre les deux électrodes.

Les valeurs optimales de fonctionnement du tribochargeur multicylindre utilisé ont été établies après plusieurs tests préliminaires [185] : angle d'inclinaison  $\alpha = 6^\circ$ , vitesse de

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

rotation  $n = 100$  tr/min, temps de séjour des particules dans le chargeur multicylindre de 3 min.

Pour le tribochargeur à lit fluidisé, les valeurs optimales des Facteurs pouvant influencer la charge ont également été obtenues après avoir effectué plusieurs essais préliminaires : la vitesse de rotation de la soufflante, 1700 tr/min, et le temps de séjour des particules dans la chambre de fluidisation, 3 min.

La première série d'expériences a été réalisée avec des échantillons de 50 g de deux mélanges de plastiques composés à parts égales de (ABS + PS) et (PP + PE), avec des tailles moyennes de particules comprises entre 4 mm et 6 mm, provenant de déchets d'équipements électriques et électroniques. La deuxième série d'expériences a été réalisée sur un mélange de 60 g de trois plastiques en proportions égales de (33% PP + 33% PE + 33% ABS) et la troisième série d'expériences a été effectuée sur un mélange de 100 g de quatre plastiques en proportions égales de (25% PP + 25% PE + 25% ABS + 25% PS ).

Ces mélanges ont été choisis car ils sont les plus représentatifs de la composition des DEEE et ne peuvent être séparés par les autres techniques de tri existantes.

La méthode expérimentale consiste à tester différents types de dispositifs de charge, équipés de parois de natures différentes, afin de trouver la solution adéquate pour chaque mélange.

Ainsi, le mélange a été chargé soit dans le chargeur multicylindre en PVC, soit dans le dispositif de chargement à lit fluidisé, dont les parois sont disponibles en cinq matériaux (PVC, PMMA, PP, PE et PS), puis immédiatement placé dans la trémie de la table vibrante du séparateur (Figure IV-2). A la sortie du séparateur, les particules ont été collectées dans deux cages de Faraday reliées à des électromètres et placées sur des balances électroniques, permettant l'acquisition continue et simultanée des mesures de masse et de charge en fonction du temps, via une instrumentation virtuelle, créée avec le logiciel LabView. Les expériences ont toutes été dupliquées et réalisées dans des conditions climatiques quasi constantes, contrôlées par un dispositif déshumidificateur d'air, à des températures comprises entre 19°C et 22,8°C et des humidités relatives ambiantes comprises entre 48,2% et 50,3%.

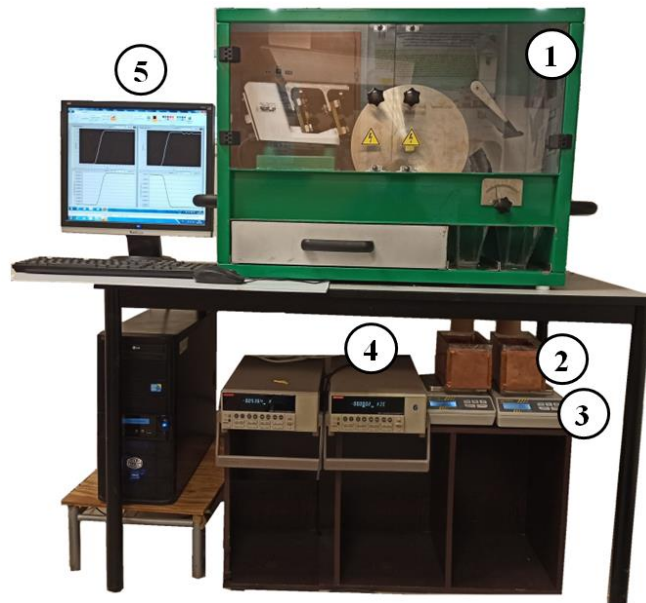


Figure IV-2. Montage expérimental composé du séparateur électrostatique à tambour et du système d'acquisition de données. (1) Séparateur électrostatique ; (2) Cages de Faraday ; (3) Balances électroniques ; (4) Electromètres (Keithley 6514) ; (5) Ordinateur.

#### IV.1.2. Séparation triboélectrostatique des mélanges binaires

Dans cette étude, une tension de polarité positive de + 31 kV a été appliquée à l'électrode à profil NACA pour mener les expériences de séparation triboélectrostatique des mélanges binaires. Dans ce séparateur (Figure IV-3), les particules traversent un champ électrique créé entre une électrode reliée à une source de haute tension (HT) de polarité réversible et une électrode reliée à la terre. Les particules chargées de manière opposées à la tension appliquée sont alors attirées par l'électrode HT, celles chargées de la même polarité sont repoussées. Les particules ainsi séparées sont récupérées dans les compartiments du collecteur (5).

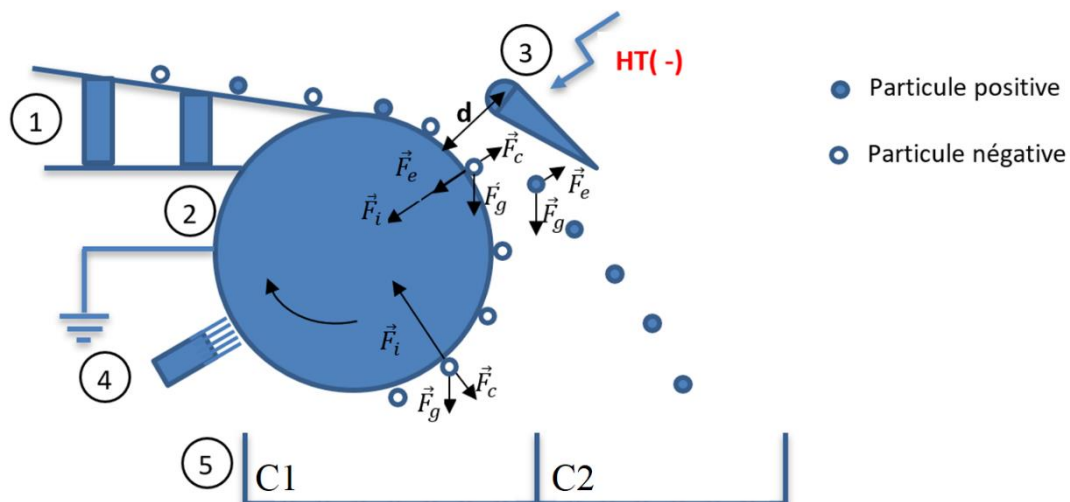


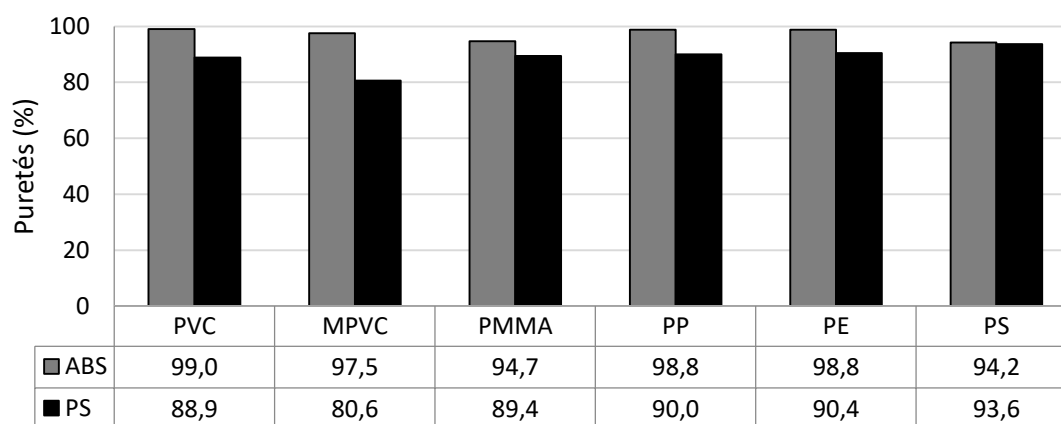
Figure IV-3. Séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante. (1) Table vibrante ; (2) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (3) Electrode reliée à une source de haute tension réversible ; (4) Brosse ; (5) Collecteur (C1 collecteur gauche, C2 collecteur droit).

**Séparation du mélange (ABS+PS)**

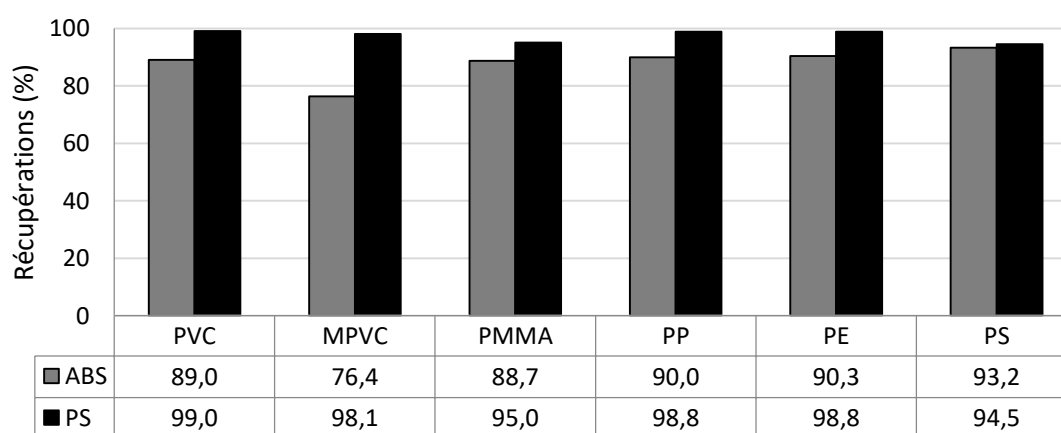
Pour toutes les expériences de séparation du mélange (ABS+PS), la pureté du produit (ABS) récupéré dans la cage de Faraday gauche C1 était supérieure à 94%. La pureté du produit (PS) récupéré dans la cage de Faraday droite C2 dépassait les 81%. Cette très bonne séparation s'explique par les niveaux de charge élevés acquis par les particules, où le PS et l'ABS étant convenablement situés dans la série triboélectrique. En effet, les deux types de particules acquièrent des charges de polarités opposées (Tableau IV-2) au contact de toutes les parois du lit fluidisé et du dispositif multicylindre en PVC.

Les récupérations et les puretés des produits séparés dans les cages Faraday gauche et droite (Figure IV-2) sont calculées à l'aide des équations données au paragraphe II.4.3.

La paroi en PS est celle qui donne les meilleurs résultats de séparation (Figure IV-4) puisque 93,2% des particules de PS ont été récupérées dans le compartiment gauche, avec une pureté de 94,2%, tandis que 94,5% des particules d'ABS ont été récupérées dans le compartiment droit, à une pureté de 93,6%.



(a)



(b)

Figure IV-4. Pureté (a) et récupération (b) des constituants séparés du mélange (ABS+PS), avec les parois (PVC, PMMA, PP, PE et PS) du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC (MPVC).

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

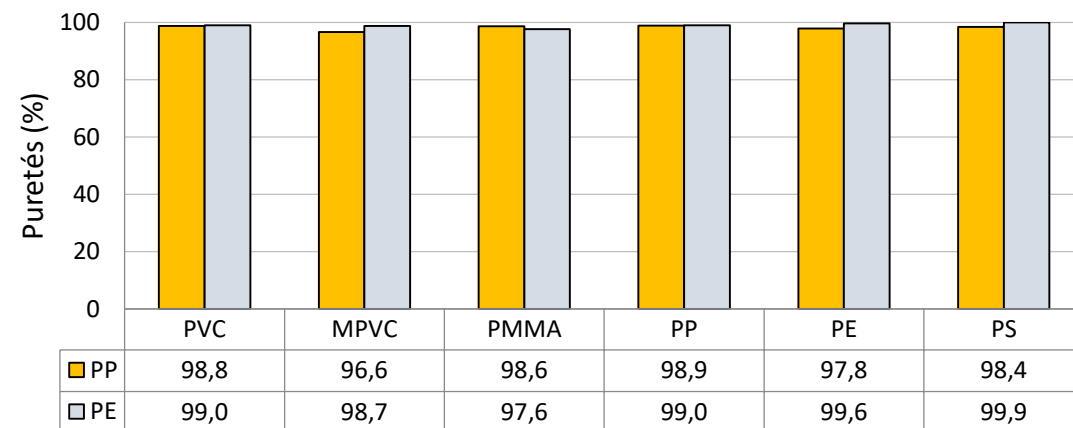
Les charges massiques des produits collectés après chaque essai de séparation ont été enregistrées par le système d'acquisition de données LabVIEW. Les résultats obtenus pour les différentes parois sont regroupés dans le Tableau IV-2.

Tableau IV-2. Charge massique des particules séparées pour les parois (PVC, PMMA, PP, PE et PS) du lit fluidisé et pour le dispositif à multicylindre en PVC (MPVC).

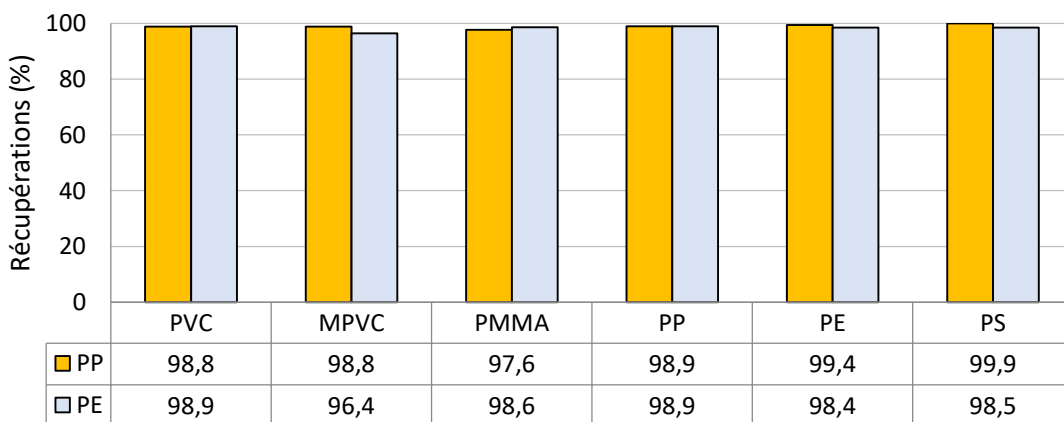
Paroi	PVC	MPVC	PMMA	PP	PE	PS
$Q_{droite}$ (PS) [nC/g]	- 14,83	- 8,54	- 14,99	- 15,64	- 14,88	- 15,67
$Q_{gauche}$ (ABS) [nC/g]	9,83	4,38	6,57	9,31	11,87	5,91

#### *Séparation du mélange PP+PE*

Dans tous les cas de séparation de mélanges (PP+PE), la plupart des particules de PE étaient chargées négativement et collectées dans le compartiment droit, tandis que la plupart des particules PP étaient chargées positivement et collectées dans le compartiment gauche.



(a)



(b)

Figure IV-5. Pureté (a) et récupération (b) des constituants séparés du mélange (PP+PE) avec les parois (PVC, PMMA, PP, PE et PS) du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC (MPVC).

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

Les résultats de séparation étaient excellents (Figure IV-5) car les deux plastiques se chargent avec des charges très élevées et avec des polarités opposées. Dans toutes les expériences, comme montré dans le Tableau IV-3, la pureté du PP dépassait 96,6%. Les granules de PP qui avaient une charge positive élevée étaient collés à l'électrode mise à la terre et collectés dans le compartiment de gauche. La pureté des particules de PE récupérées dans le compartiment droit était de 97,6%.

Tableau IV-3. Charge massique de particules séparées avec les parois (PVC, PMMA, PP, PE et PS) du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC (MPVC).

Paroi	PVC	MPVC	PMMA	PP	PE	PS
$Q_{droite(PE)}$ [nC/g]	-22,49	-12,71	-23,36	-21,60	-19,42	-22,35
$Q_{gauche(PP)}$ [nC/g]	27,41	15,00	27,11	29,51	31,10	25,81

#### IV.1.3. Séparation triboélectrostatique des mélanges de plusieurs plastiques

Il a été constaté après une série d'expériences préliminaires qu'une meilleure qualité de séparation a été obtenue avec une polarité positive de la haute tension appliquée à l'électrode à profil NACA. Ainsi, dans cette étude, une tension de + 31 kV a été utilisée dans les tests de séparation.

##### *Séparation du mélange trois polymères (PP+PE+ABS)*

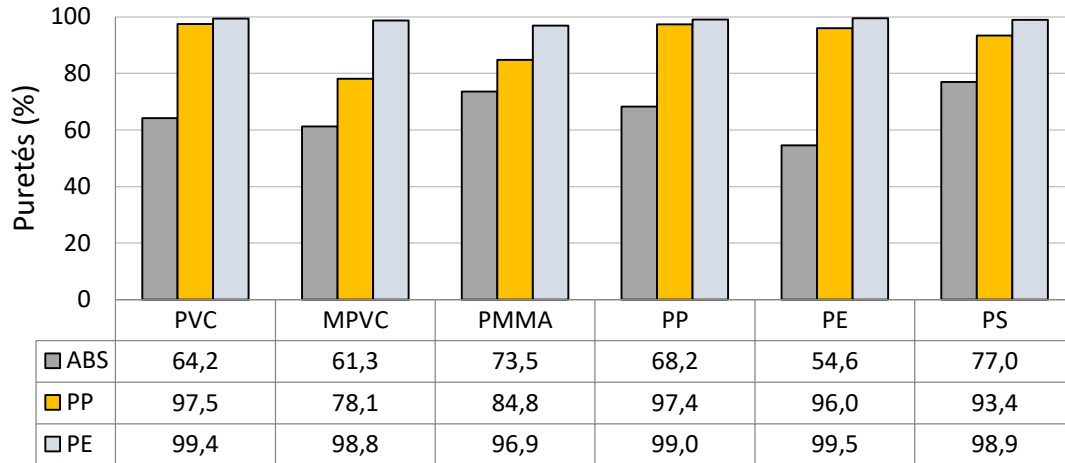
Ce mélange a été séparé en le faisant passer deux fois à travers le séparateur (Figure IV-6). Les meilleurs résultats de séparation ont été obtenus en utilisant la paroi en PS (Figure IV-7). Dans la première étape de séparation, les particules de PE étaient chargées négativement (Tableau IV-4), attirées par l'électrode positive et collectées dans le compartiment droit. La récupération du PE a dépassé 98% avec une pureté de 98,9%. La charge massique enregistrée des particules de PE récupérées dans la cage de Faraday est supérieur à celui obtenu avec d'autres types de parois : -21,6 nC/g.

Le mélange de particules (PP+ABS) a été chargé positivement avec une charge massique de (+7 nC/g) et s'est retrouvé dans le compartiment gauche.

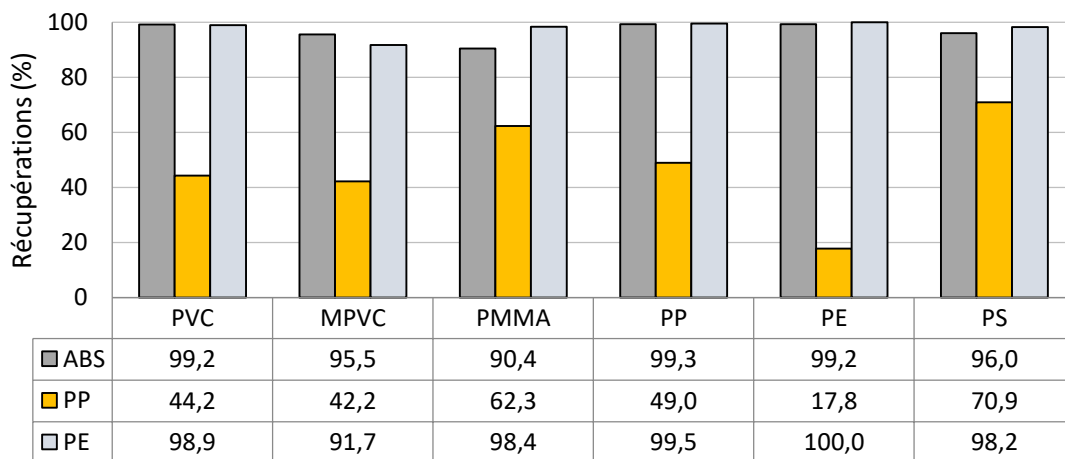
Ensuite, le produit collecté dans le compartiment de gauche a été neutralisé pour éliminer les charges résiduelles des particules et chargé de nouveau par les dispositifs de charge triboélectrique afin d'avoir un autre transfert de charge entre les deux plastiques PP et ABS, en vue d'une seconde séparation. Ainsi, il a été possible de récupérer 96% des particules

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

d'ABS chargées positivement, d'une pureté de 77%, dans le compartiment gauche, et 70,9% des particules de PP chargées négativement, d'une pureté de 98,9%, dans le compartiment droit. Les rapports de charge par masse des deux produits étaient de -9,3 nC/g et +1,1 nC/g, respectivement pour le PP et l'ABS.



(a)



(b)

Figure IV-6. Pureté (a) et récupération (b) des constituants séparés du mélange (PP + PE + ABS) pour différentes parois du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC.



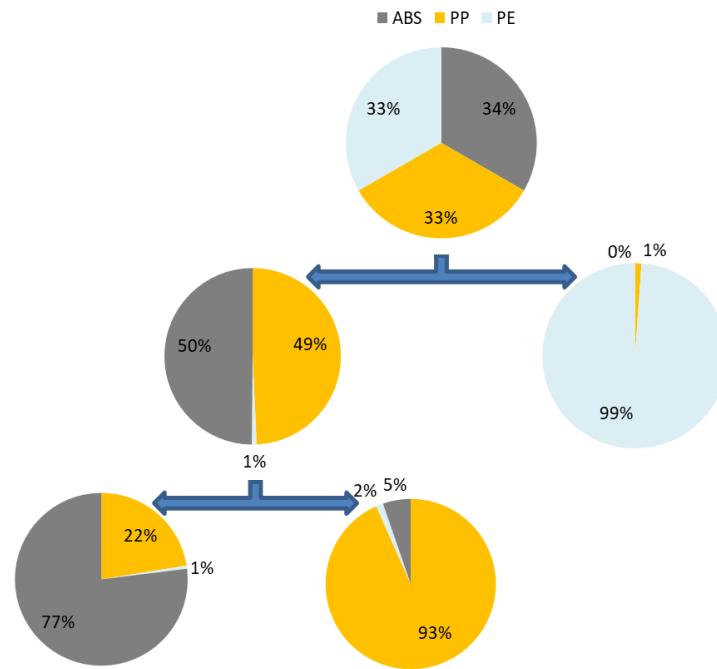


Figure IV-7. Puretés des constituants séparés du mélange (PP+PE+ABS) avec la paroi PS du lit fluidisé.

Tableau IV-4. Charge massique des particules séparées pour différentes parois du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC pour un mélange de (PE+PP+ABS), (a) première séparation avec une tension +31 kV, (b) deuxième séparation, avec neutralisation du mélange et avec une tension de + 31 kV.

(a)

Paroi	PVC	MPVC	PMMA	PP	PE	PS
$Q_d(PE)$ [nC/g]	- 20.7	- 14.4	- 19.5	- 20.9	- 13.1	- 21.6
$Q_g(PP+ABS)$ [nC/g]	9.3	6.4	7.4	10.3	6.9	7.0

(b)

Paroi	PVC	MPVC	PMMA	PP	PE	PS
$Q_d(PP)$ [nC/g]	- 7.5	- 6.5	- 9.1	- 7.3	- 5.0	- 9.3
$Q_g(ABS)$ [nC/g]	2.0	3.4	2.1	3.9	1.1	1.3

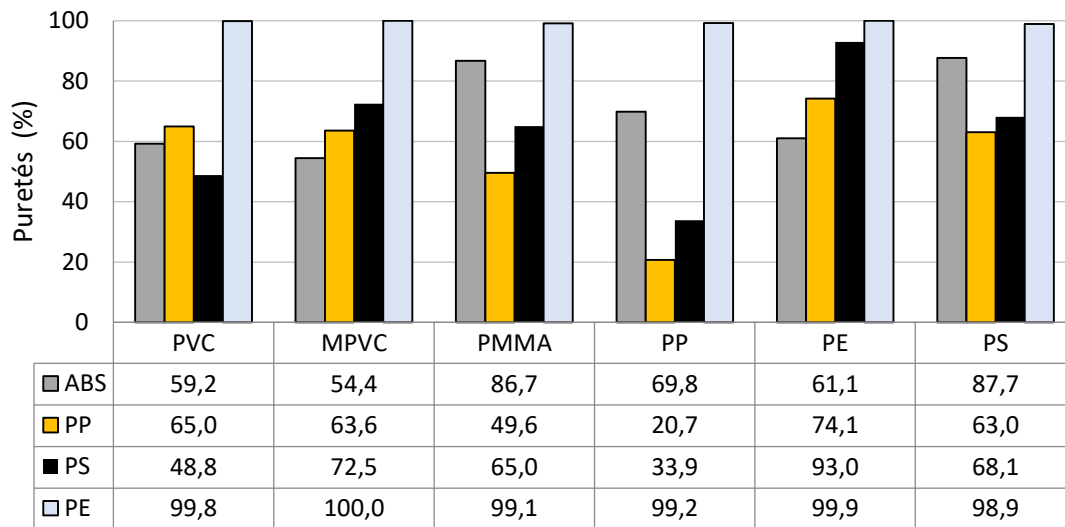
### *Séparation d'un mélange de quatre polymères PP+PE+ABS+PS*

La figure IV-8 montre les résultats obtenus pour la séparation d'un mélange de quatre plastiques composés à parts égales du PP, PE, ABS et PS avec une tension appliquée à l'électrode de + 31 kV. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec la paroi en PS (Figure IV-9).

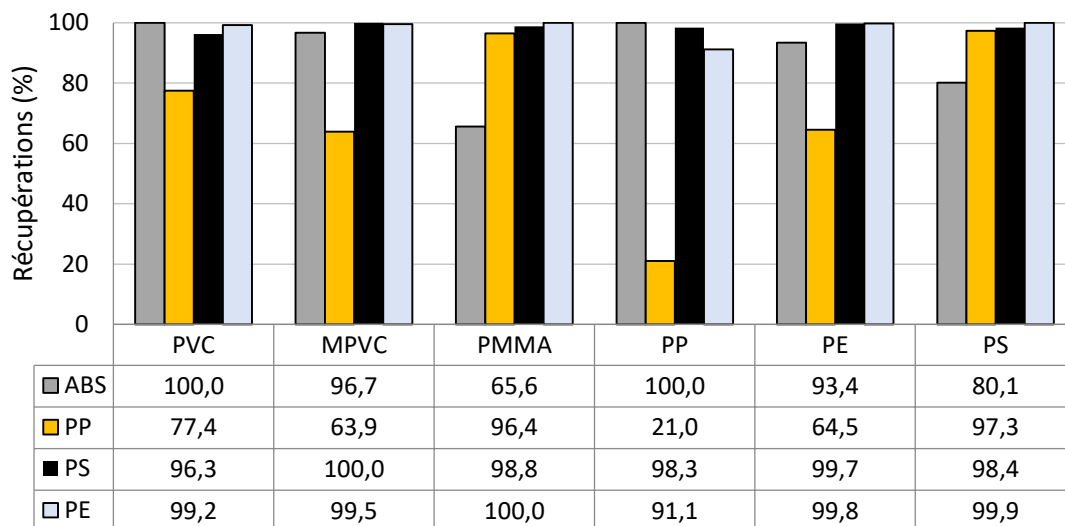
Un schéma décrivant la distribution du produit dans chaque étape de séparation est présenté en figure IV-9 et la charge massique pour les différentes étapes de séparation est

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

illustrée au Tableau IV-5. La première séparation est très efficace puisque le produit récupéré dans la cage de Faraday de droite est majoritairement composé de PE et de PS chargé négativement et celui collecté dans la cage de gauche est un mélange d'ABS et de PP avec une charge de polarité positive. A la suite d'une seconde séparation du produit récupéré dans la boîte de gauche du collecteur, 80,1% de l'ABS est récupéré avec une pureté de 87,7% et 97,3% du PP est récupéré à une pureté de 63%. Concernant le produit récupéré après le premier passage dans la boîte de droite du collecteur, 98,4% de particules de PS ont été récupérés avec une pureté de 68,1%, tandis que la récupération et la pureté du PE étaient respectivement de 99,9% et de 98,9%.



(a)



(b)

Figure IV-8. Pureté (a) et récupération (b) des constituants séparés du mélange (PP+PE+ABS +PS) pour différents parois du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC.

IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

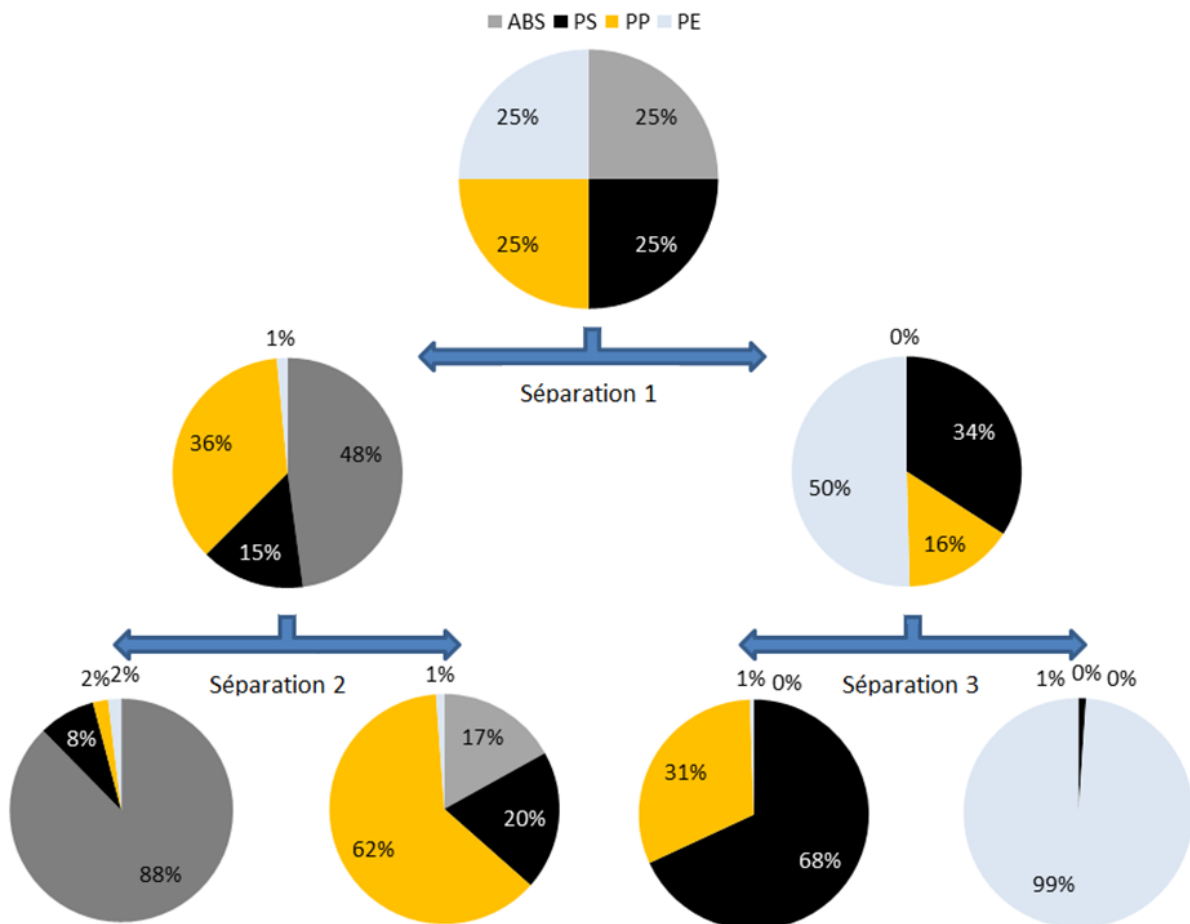


Figure IV-9. Puretés des constituants séparés du mélange (PP+PE+ABS+PS) pour la paroi en PS du lit fluidisé.

Tableau IV-5. Charge massique des particules séparées pour différentes parois du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC pour un mélange de (PE+PP+ABS+PS), (a) première séparation + 31 kV, (b) deuxième séparation récupération gauche + 31 kV, (c) deuxième séparation récupération droite + 31 kV.

(a)

Paroi	PVC	MPVC	PMMA	PP	PE	PS
$Q_d(PE+PS)$ [nC/g]	-20,92	-13,09	-14,59	-20,42	-18,65	-16,11
$Q_g(PP+ABS)$ [nC/g]	7,46	7,46	5,45	6,77	10,27	5,39

(b)

Paroi	PVC	MPVC	PMMA	PP	PE	PS
$Q_d(PE)$ [nC/g]	-13,51	-10,44	-23,20	-7,47	-17,32	-20,09
$Q_g(PS)$ [nC/g]	12,01	8,87	6,21	5,32	14,30	8,94

(c)

Paroi	PVC	MPVC	PMMA	PP	PE	PS
$Q_d(PS)$ [nC/g]	-7,47	-7,32	-10,64	-14,78	-10,78	-11,06
$Q_g(ABS)$ [nC/g]	5,85	4,34	0,80	15,36	5,77	1,40

## **IV.2. Étude de l'effet de l'humidité et de la température sur la séparation triboélectrostatique des mélanges des plastiques granulaires**

### **IV.2.1. Procédure expérimentale**

Pour étudier les effets de l'humidité relative, les dispositifs expérimentaux et les matériaux plastiques utilisés ont été placés dans une chambre dans laquelle l'humidité peut être contrôlée grâce à l'installation de contrôle simultané de l'humidité et de température présentée dans le chapitre II, dans le paragraphe II.4.6.

Toutes les expériences ont été effectuées dans des conditions climatiques contrôlés, les consignes d'humidité ont été programmées la veille pour le lendemain. Ainsi, l'ensemble des matériaux ont été exposés aux mêmes conditions ambiantes au moins 12 heures avant les essais.

Les expériences ont été effectuées sur le séparateur électrostatique à tambour de la société Ukrainienne Prodecologia et sur le chargeur triboélectrique multicylindre développé dans cette thèse, construit par la société CITF, en utilisant les configurations optimales de fonctionnement, comme montré sur la figure III-24.

Dans une première série d'essais, l'étude s'est portée uniquement sur le dispositif de charge multicylindre ayant des parois en PVC afin de définir l'influence de l'humidité sur le chargement triboélectrique des particules de plastiques et de déterminer la série triboélectrique correspondante. Des tests ont été effectués avec 20 g de plusieurs types de particules (figure II-1) : (a) PP orange, (b) PP gris, (c) PVC, (d) PE, (e) PC, (f) PS noir, (h) PC Cristal, (i) HIPS, (j) ABS jaune, en variant le taux d'humidité relative de 20% à 70% avec un pas de 10%.

Dans une autre série d'expériences, dont l'objectif a été d'étudier l'influence de l'humidité sur la séparation triboélectrostatique, deux mélanges granulaires de 40 g ont été utilisés (50% d'ABS + 50% de PS) et (50% de PP + 50% de PE). Le mélange à séparer a été chargé dans le chargeur multicylindre et puis déposé directement sur la goulotte oscillante du séparateur. La tension appliquée à l'électrode de profil NACA du séparateur a été de + 31 kV.

A la fin de chaque expérience, la charge et la masse des produits après la séparation ou après le chargement ont été mesurées à l'aide respectivement d'une cage de Faraday connectée à un électromètre et d'une balance électronique. Les taux de pureté et de récupération des matériaux granulaires séparés dans chaque expérience ont été calculés à partir des formules du

## IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

paragraphe II.4.3 afin de déterminer l'efficacité de la séparation triboélectrostatique. Toutes les expériences ont été menées à des températures comprises entre 19 °C et 22 °C.

### IV.2.2. Effets de l'humidité sur le chargement triboélectrique

Tableau IV-6. Charge massique (nC/g) acquise par différents types de particules en fonction de l'humidité (%).

Humidité (±3%)	HIPS	ABS	PC	PS	PP orange	PC cristal	PP gris	PVC	PE
20	5,95	4,00	4,70	1,90	1,33	0,56	0,93	- 0,11	- 0,01
30	5,23	3,05	3,50	1,20	1,01	0,20	0,20	- 0,01	- 1,24
40	6,75	3,29	4,53	1,81	1,44	0,77	0,56	- 0,24	- 0,64
50	7,59	6,38	6,23	3,92	2,63	2,45	2,08	- 0,66	- 1,49
60	5,96	3,84	4,29	3,42	0,49	1,59	0,96	- 0,25	- 1,51
70	4,03	2,74	3,39	2,95	0,03	1,38	0,38	- 0,05	- 1,64

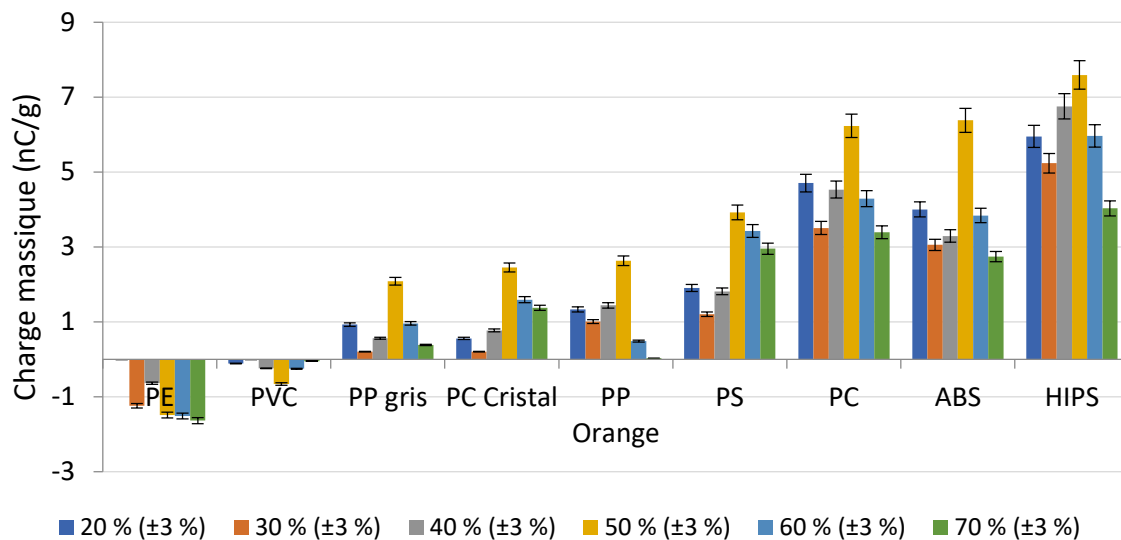


Figure IV-10. Charge massique acquise par différents types de particules en fonction de l'humidité relative.

La Figure IV-10 représente la charge massique de neuf plastiques pour différents taux d'humidité de 20% à 70% avec une erreur d'humidité relative de  $\pm 3\%$ . Les plastiques sont classés selon leur niveau relatif de charge acquise.

Pour chaque plastique, nous pouvons observer et comparer l'impact de l'humidité sur les valeurs de charge massique maximale et minimale atteintes (Tableau IV-6). Le graphique tend à montrer qu'une humidité trop faible ou trop importante pourrait réduire les performances de tribochargement des particules plastiques (Figure IV-10). Nous constatons d'autre part que

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

l'humidité n'exercera pas la même influence selon la matière : le chargement du PE et du PVC sera par exemple beaucoup moins affecté que celui de l'ABS ; du PE, du PVC et du PP gris qui sont chargés très faiblement en collision avec les parois des cylindres en PVC.

L'analyse de l'évolution de la charge massique de chaque plastique, en fonction de l'humidité nous a permis de conclure que quel que soit le matériau, les meilleurs résultats s'obtiennent pour une humidité comprise entre 40% et 60%, le maximum étant atteint le plus souvent aux alentours de 50%.

Lorsque l'atmosphère contient de la vapeur d'eau, les particules plastiques adsorbent de l'eau à la surface ce qui peut modifier leurs propriétés électriques et chimiques et affecter ainsi de manière significative la conductivité électrique superficielle. Une atmosphère sèche ralentit le transfert des charges électriques (électrons ou ions) entre les corps en contact. Cela se produit pour les plastiques, où l'adsorption d'eau peut augmenter considérablement la conductivité de surface, ce qui peut affecter le chargement triboélectrique.

##### IV.2.3. Effets de l'humidité sur la séparation électrostatique

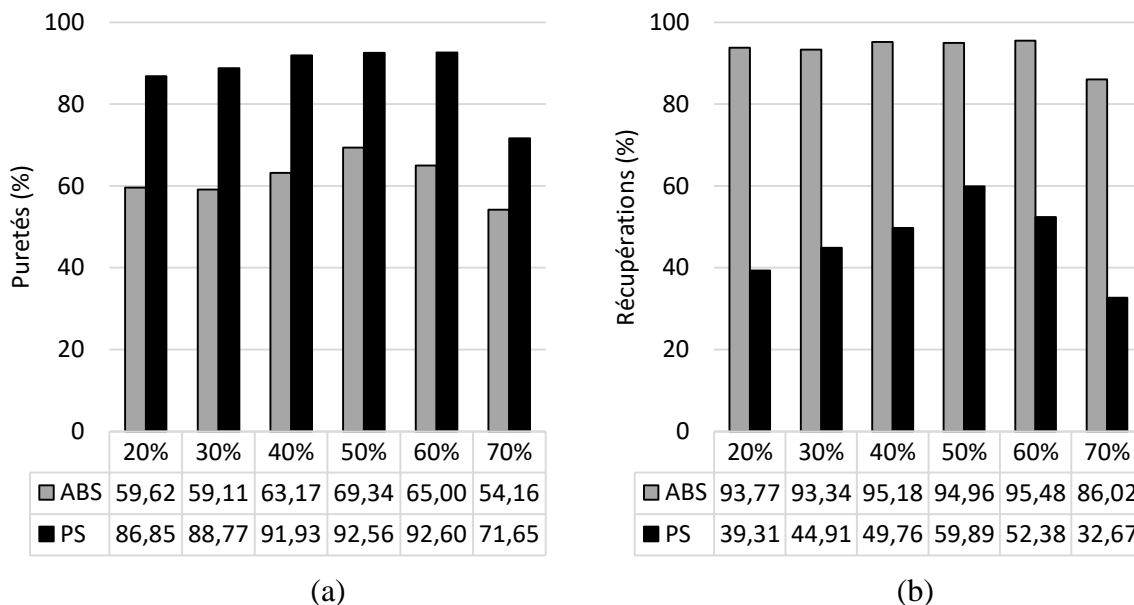


Figure IV-11. Puresé (a) et récupération (b) des constituants séparés du mélange (PS + ABS) en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant.

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

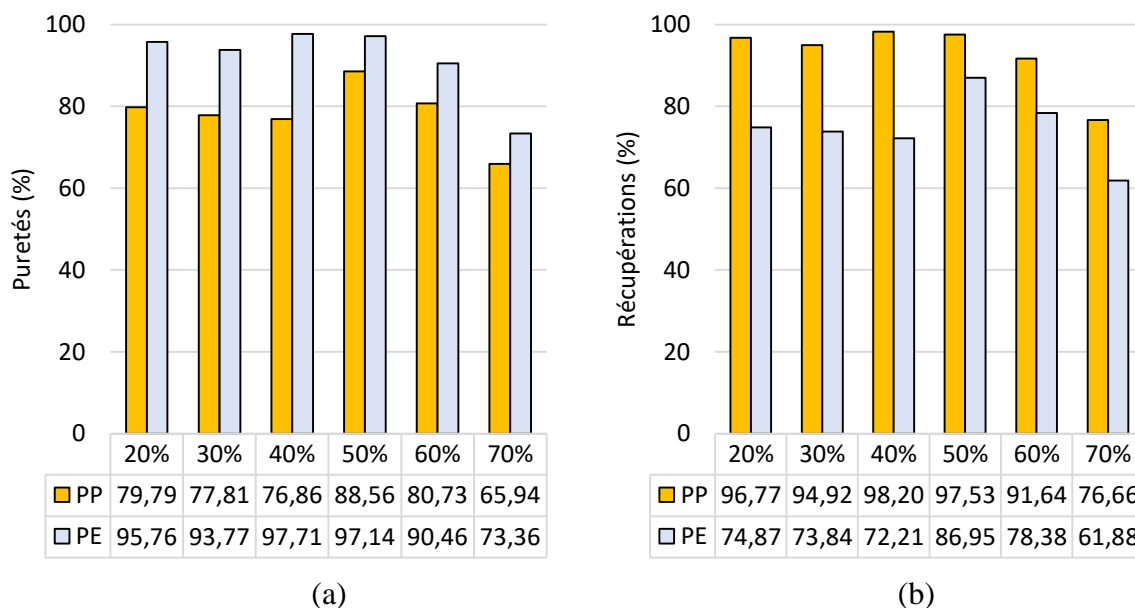


Figure IV-12. Pureté (a) et récupération (b) des constituants séparés du mélange (PP + PE) en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant.

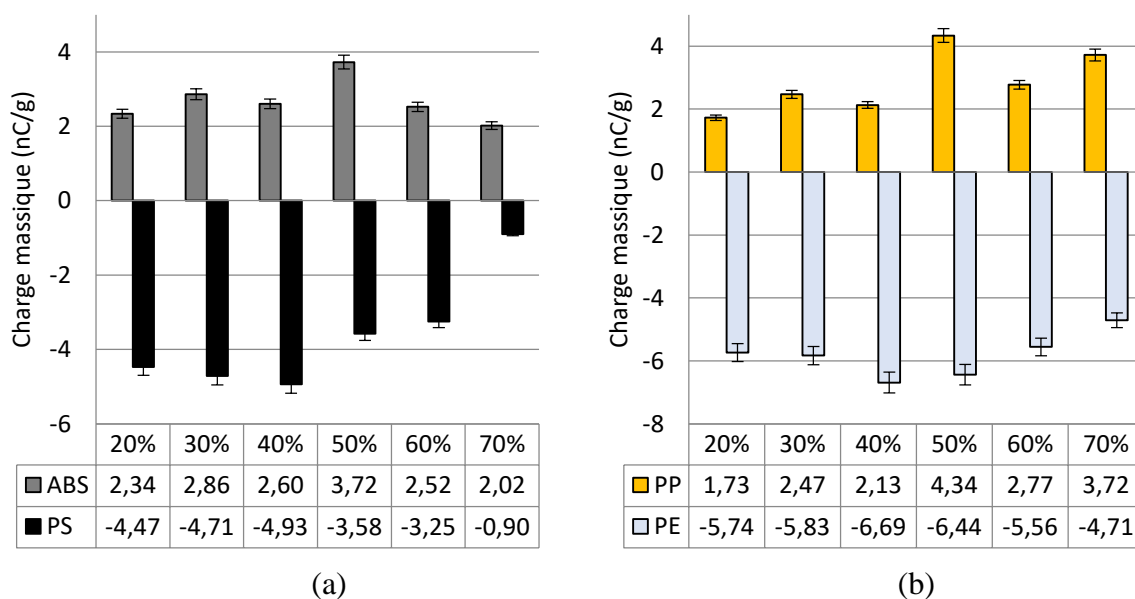


Figure IV-13. Charge massique acquise des constituants séparés des mélanges, (a) PS + ABS, (b) PP + PE en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant.

Dans toutes les expériences de séparation du mélange (ABS+PS), les particules d'ABS ont acquis une charge positive tandis que les particules PS se sont chargées négativement. En ce qui concerne le mélange (PP+PE), les particules de PP acquièrent une charge positive et les particules de PE se chargent négativement. Les particules chargées de manière opposées sont ainsi séparées et récupérées dans des compartiments distincts du collecteur.

D'après les résultats présentés sur la Figure IV-11 et la Figure IV-12, les taux de récupération et de pureté les plus élevés sont obtenus lorsque l'humidité relative est comprise

## IV : PROCÉDÉS DE SÉPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

entre 30% et 60%, le plus souvent aux alentours de 50%. C'est dans ce domaine de variation de l'humidité relative de l'air ambiant que les particules de plastique acquièrent les quantités de charge les plus élevées, en valeurs absolues, comme le montre la Figure IV-13. Il a également été observé que si l'humidité relative atteint 70%, il n'y aura pas de séparation.

Une humidité relative de 50% conduit à de meilleurs résultats de séparation pour le mélange de plastiques (PS+ABS) : 94,96% des particules d'ABS ont été récupérés avec une pureté de 69,34%, tandis que la récupération et la pureté du PS étaient respectivement de 59,89% et de 92,56%. Une bonne séparation est également obtenue pour le mélange (PP+PE). Dans ce cas, 97,53 % des particules de PP ont été récupérées avec une pureté supérieure à 88,56 % tandis que le PE était caractérisé par une pureté de 97,14% pour un taux de récupération de 86,95%.

Leurs charges acquises étant plus élevées, les particules d'ABS et de PE sont plus facilement attirées vers l'électrode positive. C'est pour cela que nous avons choisi la polarité positive pour alimenter l'électrode « NACA ».

### IV.3. Étude du séparateur électrostatique à table vibrante

L'objectif de cette étude a été de valider la possibilité d'utiliser un nouveau modèle de séparateur électrostatique à table vibrante (TVE) pour le tri des constituants de plusieurs mélanges de matériaux isolants provenant de déchets d'équipements électriques et électroniques. Dans un premier temps, la faisabilité de cette séparation a été démontrée sur un prototype (TVE). Ensuite, nous avons analysé la possibilité d'intégrer ce dispositif dans le prototype de séparateur industriel (PRD) et l'utiliser pour le prétraitement des déchets de mélanges plastiques.

#### IV.3.1. Procédure expérimentale

Les premières expériences ont été menées sur des mélanges de plastiques composés à parts égales de PP / HIPS et de PVC / ABS de tailles comprises entre 2 mm et 5 mm, issues de déchets d'équipements électriques et électroniques (Figure II-2). Pour chaque expérience, le mélange a tout d'abord été chargé par effet triboélectrique comme montré dans le banc d'essai sur la Figure IV-14, en utilisant le chargeur triboélectrique à cylindre tournant en PVC décrit dans le paragraphe II.2.1. La vitesse de rotation de ce dernier a été réglée à 100 tr/min et l'angle d'inclinaison à 6°. La séparation des matériaux chargés a été réalisée avec le nouveau séparateur électrostatique à table vibrante fabriqué par la société CITF, décrit dans le paragraphe II.3.2.



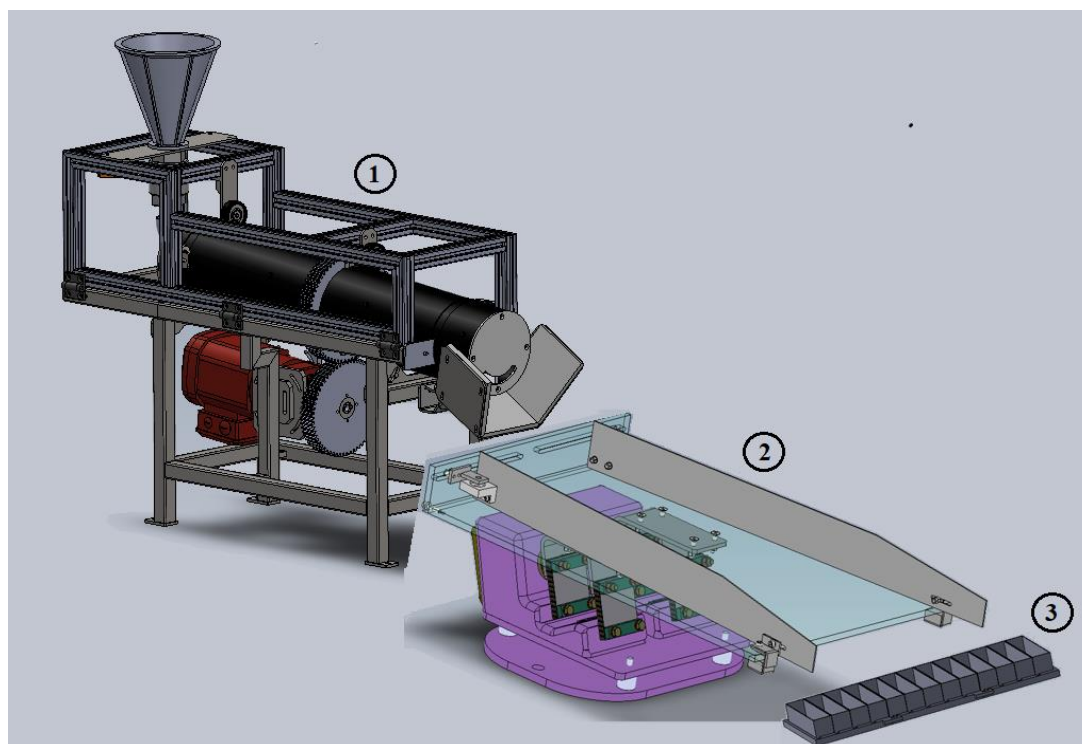


Figure IV-14. Montage expérimental. (1) Dispositif de charge à cylindre tournant ; (2) Séparateur électrostatique à table vibrante ; (3) Collecteur composé de 13 compartiments.

Dans la première série d'expériences, trois longueurs de plateau ont été comparées : court (longueur  $L = 31$  cm et largeur  $l = 41$  cm), moyen ( $L = 62$  cm et  $l = 41$  cm) et long ( $L = 93$  cm et  $l = 41$  cm). Dans toutes les expériences, l'amplitude des vibrations de la table vibrante était fixée à 70% de l'amplitude maximale, la tension appliquée aux deux électrodes était de  $\pm 16$  kV avec une distance inter-électrodes de 8 cm. Des essais préliminaires ont montré que ces réglages conduisaient à éviter le risque d'apparition d'arcs électriques entre les deux électrodes, qui peuvent être dangereux pour l'opérateur et pour le matériel.

Pour la deuxième série d'expériences et après avoir déterminé le plateau adéquat pour la séparation, trois configurations d'électrodes ont été étudiées : en parallèle « II » (distance inter-électrode  $d_{el} = 8$  cm), en forme de « V » (distance en entrée  $d_{elE} = 30$  cm et en sortie  $d_{elS} = 8$  cm) et en forme de «  $\Lambda$  » ( $d_{elE} = 8$  cm et  $d_{elS} = 38$  cm), afin d'évaluer l'efficacité de chaque configuration. Le dépôt de matière dans la TVE a été assuré par une trémie réglable. Dans ces deux séries d'expériences, nous avons utilisé un mélange de 80 g de PP / HIPS.

Le mélange utilisé dans la troisième série d'expériences était composé de 50 g de PVC / ABS, présenté dans la figure II.1, afin de prouver que la TVE est capable de séparer plusieurs mélanges de plastiques et de trouver les valeurs optimales de chaque facteur pour les trois

configurations : l'amplitude de vibration de la table vibrante et la tension appliquée aux électrodes. L'étude a été menée en variant un facteur à la fois et en fixant tous les autres paramètres aux valeurs de référence. L'efficacité de la séparation a été analysée en mesurant la récupération et la pureté du produit collecté dans chaque compartiment.

Dans toutes les expériences, l'électrode gauche du séparateur TVE était connectée à une alimentation haute tension à courant continu de polarité négative et celle de droite à la polarité positive. Les expériences ont été effectuées à une humidité relative ambiante qui variait entre 53% et 63,6% et à une température comprise entre 20,5°C et 24°C.

### **IV.3.2. Étude des facteurs influents : longueur du plateau, configuration des électrodes, amplitude des vibrations, durée de chargement**

#### ***Effet de la longueur du plateau***

La Figure IV-15 présente les trois longueurs de plateaux qui ont été étudiés : court, moyen et long. Les essais réalisés avec la TVE sur les deux longueurs de plateau court et long sur le mélange PP / HIPS chargé par le chargeur triboélectrique n'ont pas montré de séparation efficace. Sur la Figure IV-15.a et 15.c, nous pouvons voir qu'il n'y a pas séparation.

Dans le cas 15.a (plateau court) : le temps de séparation du mélange est très court, car le plateau est trop petit, ce qui fait que le mélange tombe directement, sans séparation.

Dans le cas 15.c (plateau long) : Les vibrations ne sont pas uniformes sur toute la surface du plateau à cause de sa longueur. Ainsi, la répartition et la trajectoire des particules sont grandement affectées par les nœuds et ventres de vibration ; les forces mécaniques combinées aux forces gravitationnelles sont supérieures à la force électrostatique qui attire ou repousse les particules.

Les meilleurs résultats de séparation sont obtenus dans le cas 15.b (plateau moyen) car la taille du plateau convient à une bonne répartition des particules et un temps de séparation des particules suffisant pour séparer le mélange. 65,33% des particules de HIPS sont collectées dans les quatre compartiments de gauche avec une pureté d'environ 92,33%, tandis que 68,12% des particules de PP ont été récupérées dans les quatre compartiments de droite avec une pureté de 86,34%, et le reste du mélange (mixte) s'est retrouvé dans les cinq compartiments du milieu qui représentent 33% du mélange.

Ces résultats laissent penser que si les vibrations étaient correctement réparties dans le cas du plateau le plus long, la séparation pourrait être encore meilleure.

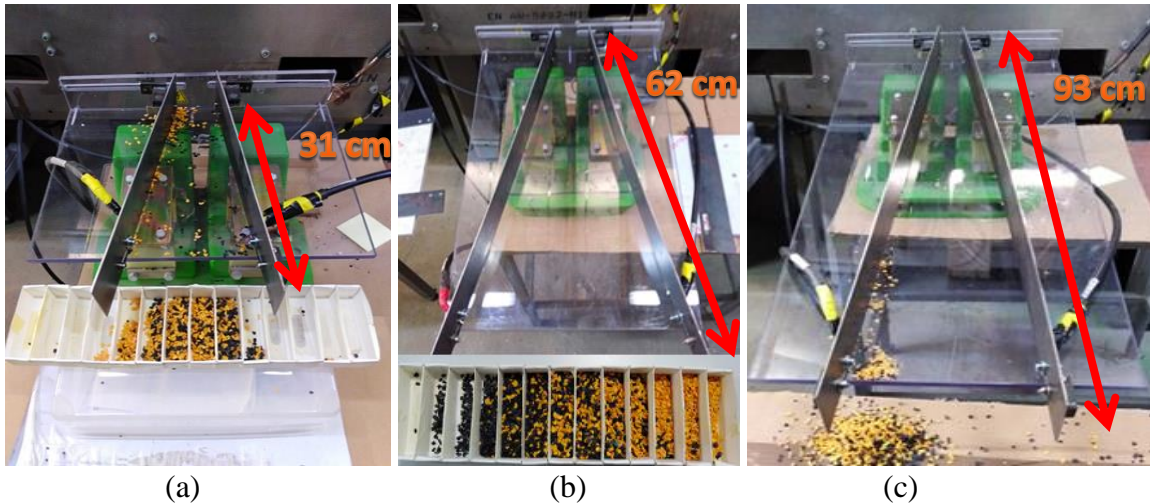


Figure IV-15. Séparateur électrostatique à table vibrante. (a) plateau court ; (b) plateau moyen ; (c) plateau long.

### *Effet des configurations des électrodes*

Des expériences sur l'effet des configurations des électrodes du séparateur à table vibrante électrostatique ont été effectuées en utilisant le plateau moyen (Figure IV-15.b) et un collecteur constitué de 13 compartiments numérotés de gauche à droite, de 1 à 13. Chacune de ces configurations s'est montrée efficace dans la séparation du mélange plastique PP/HIPS (Figure IV-16).

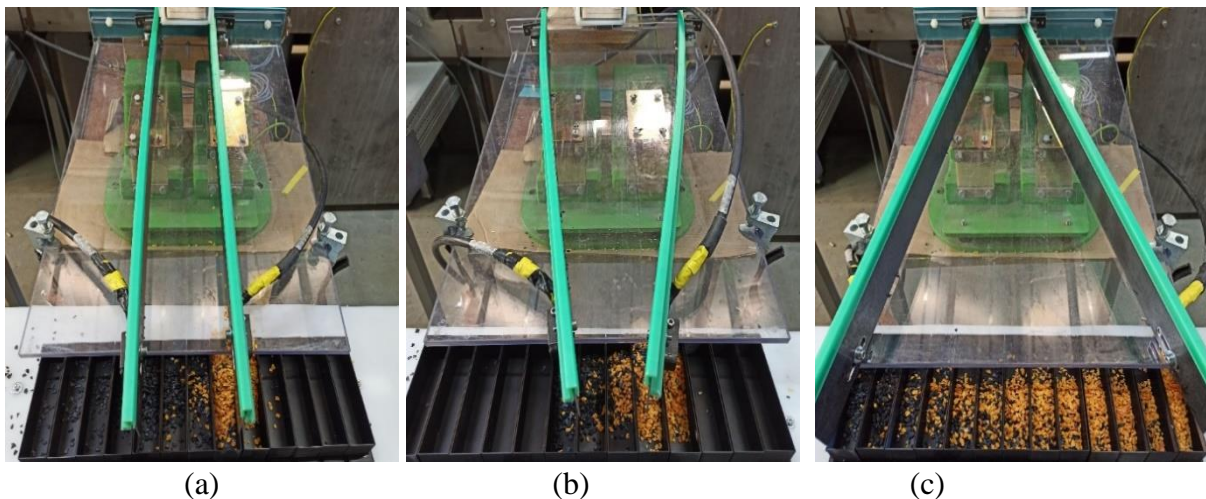


Figure IV-16. Séparateur électrostatique à table vibrante avec un plateau de longueur moyenne (a) en parallèle (« II ») ; (b) en forme de « V » ; (c) en forme de «  $\Lambda$  ».

La comparaison entre les configurations des électrodes a été faite en analysant les puretés et les récupérations des produits collectés dans les 13 compartiments, comme montré sur la figure IV-17.

Les meilleurs résultats de séparation ont été obtenus dans le cas de la configuration d'électrodes 16.a. Dans la partie gauche du compartiment, 76,37% du HIPS est récupéré avec une pureté de 89,33% tandis que dans la partie droite du compartiment, 84,45% du PP est

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

recupéré pur à 85,44%. Cela peut s'expliquer par le fait que les électrodes dans cette configuration sont parallèles et que la distance entre les électrodes est la plus courte le long de la plaque, donc le champ électrique est plus intense et plus uniforme entre les électrodes, permettant aux particules de se séparer facilement.

Pour la configuration 16.b, la récupération du HIPS est montée à 89,97% mais la pureté était faible : 61,02%. Quant à la récupération et la pureté du PP, les valeurs n'ont pas été satisfaisantes : 79,23% et de 77,49%, respectivement.

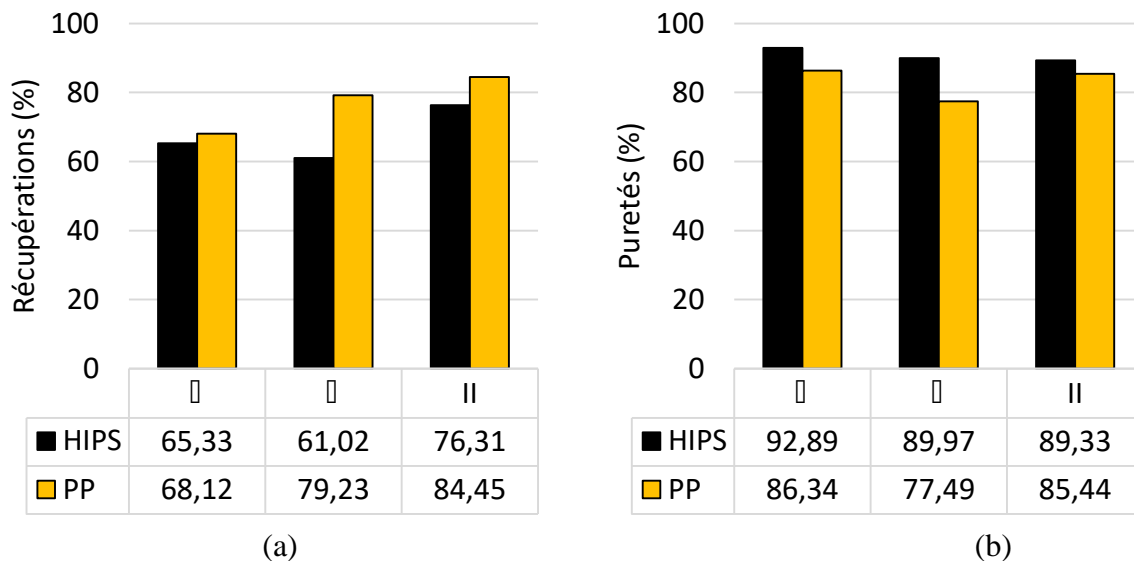


Figure IV-17. Résultats de séparation obtenus avec les trois configurations d'électrodes. (a) Récupérations ; (b) Puretés des produits.

Les produits séparés dans la configuration 16.c sont collectés dans 13 compartiments. La pureté du produit HIPS récupéré dans les compartiments de 1 à 3 était de 92,89%, avec une récupération de 65,33%. Dans les compartiments de 7 à 13, la récupération du PP est de 68,12% avec une pureté de 83,34%. Ainsi, le mixte est collecté dans les compartiments de 4, 5 et 6. Enfin, la pureté des produits collectés dans les compartiments les plus proches des électrodes est suffisamment élevée et peut être considérée comme pure à 99%.

#### ***Effet de l'amplitude de vibration***

Nous avons cherché à déterminer les valeurs optimales de l'amplitude de vibration du séparateur électrostatique à table vibrante pour les trois types de configurations des électrodes (II, V et  $\Lambda$ ). Pour ce faire, nous avons utilisé un mélange de 50 g composé de 50% de PVC et 50% d'ABS et fait varier l'amplitude de vibration de 40% à 90% de sa valeur maximale. Dans tous les cas étudiés (Tableau IV-7), les particules d'ABS se sont chargées positivement et ont été attirées par l'électrode négative puis récupérées dans le compartiment de gauche, tandis que la plupart des particules de PVC, chargées négativement et attirées par l'électrode

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

positive, ont été collectées dans le compartiment de droite. Le produit mixte a été collecté dans le compartiment central. Dans toutes les expériences, les particules sont chargées par le même chargeur triboélectrique et avec la même durée de chargement.

Tableau IV-7. Résultats de séparation obtenu avec la configuration des électrodes en parallèle.

Amplitude de vibration (%)	Compartiment gauche (ABS)		Compartiment milieu (mixte)	Compartiment droit (PVC)	
	$PUR_{ABS}$ (%)	$REC_{ABS}$ (%)	$REC_{mix}$ (%)	$PUR_{PVC}$ (%)	$REC_{PVC}$ (%)
40	83,59	73,09	18,24	89,94	63,84
50	86,07	73,62	16,07	89,74	70,00
60	87,86	64,96	15,59	85,85	74,90
70	91,71	77,05	14,39	92,61	76,11
80	89,01	70,54	15,15	89,66	74,90
90	89,64	70,33	17,78	90,91	72,58

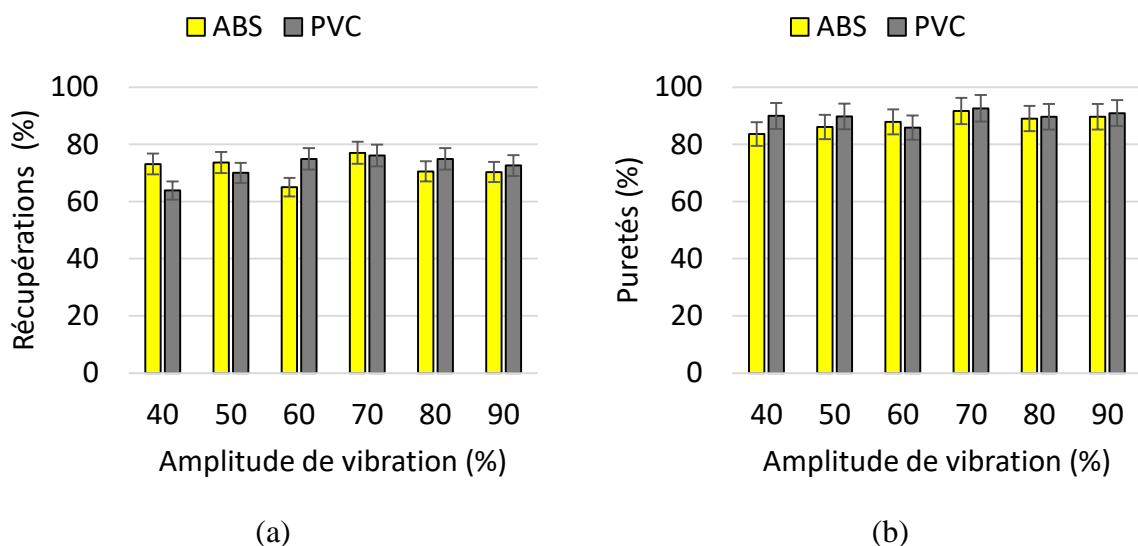


Figure IV-18. Résultats de séparation obtenus avec la configuration des électrodes en parallèle II. (a) Récupérations ; (b) Puretés des produits.



Figure IV-19. Résultat de séparation du mélange ABS / PVC obtenus avec la configuration d'électrodes en parallèle II, (Paroi en PVC,  $U = \pm 16$  kV,  $A_m = 70\%$ ).



IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

Tableau IV-8. Résultats de séparation obtenus avec la configuration des électrodes en forme de V.

Amplitude de vibration (%)	Compartment gauche (ABS)		Compartment milieu (mixte)	Compartment droit (PVC)	
	$PUR_{ABS}$ (%)	$REC_{ABS}$ (%)	$REC_{mix}$ (%)	$PUR_{PVC}$ (%)	$REC_{PVC}$ (%)
40	83,33	73,53	19,84	89,93	60,09
50	86,80	70,95	18,90	87,71	66,53
60	86,16	58,05	16,70	84,83	75,21
70	94,09	69,12	15,61	92,31	80,00
80	87,91	65,31	18,07	85,13	70,64
90	91,62	70,00	20,10	91,89	71,13

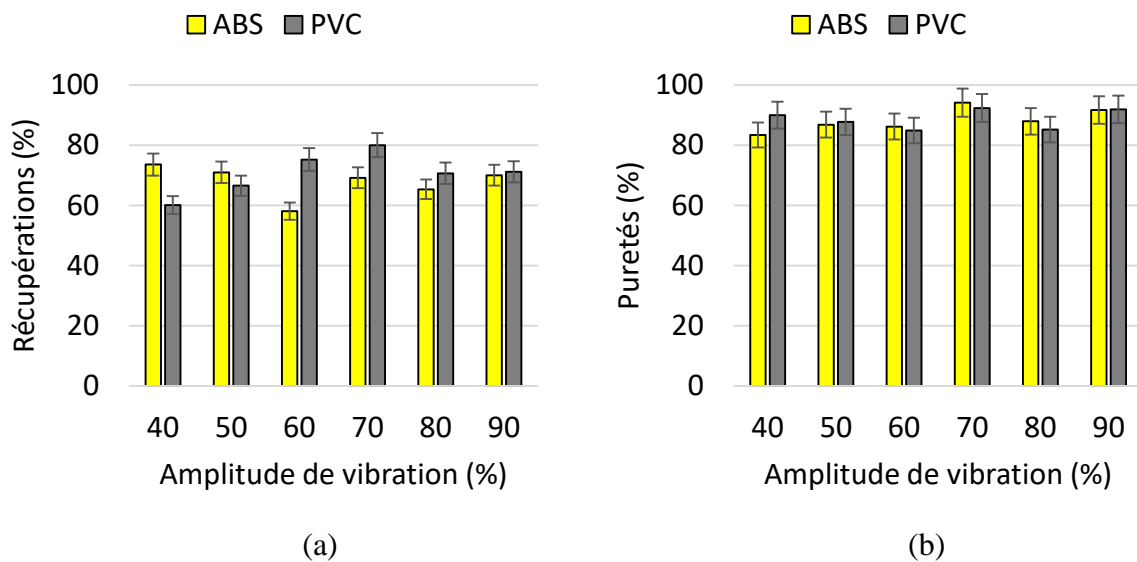


Figure IV-20. Résultats de séparation obtenu avec la configuration des électrodes en forme de « V ». (a) Récupérations ; (b) Puretés des produits.



Figure IV-21. Résultat de séparation du mélange ABS / PVC obtenu avec la configuration d'électrodes en forme de « V » (Paroi en PVC,  $U = \pm 16$  kV,  $Am = 70\%$ ).

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

Pour les essais avec les configurations d'électrodes en parallèle et en forme de « V », la pureté du produit récupéré dans le compartiment de gauche est supérieure à 83%. La pureté de celui récupéré dans le compartiment de droite est supérieure à 84% (Tableau IV-8 et Tableau IV-8). La qualité de la séparation avec une amplitude de vibration de la table vibrante de 70% est meilleure dans les deux configurations (Figure IV-18 et Figure IV-20) puisque dans la configuration des électrodes II, 77,05% d'ABS est récupéré dans le compartiment gauche pur à 91,71% alors que 76,11% du PVC est récupéré dans le compartiment droit avec une pureté de 92,61%. Une bonne séparation est également obtenue dans le cas des électrodes en forme de « V ». Dans ce cas, 69,12% des granules d'ABS ont été récupérés avec une pureté supérieure à 94 % tandis que le PVC était caractérisé par une pureté de 80% pour un taux de récupération de 92,31%.

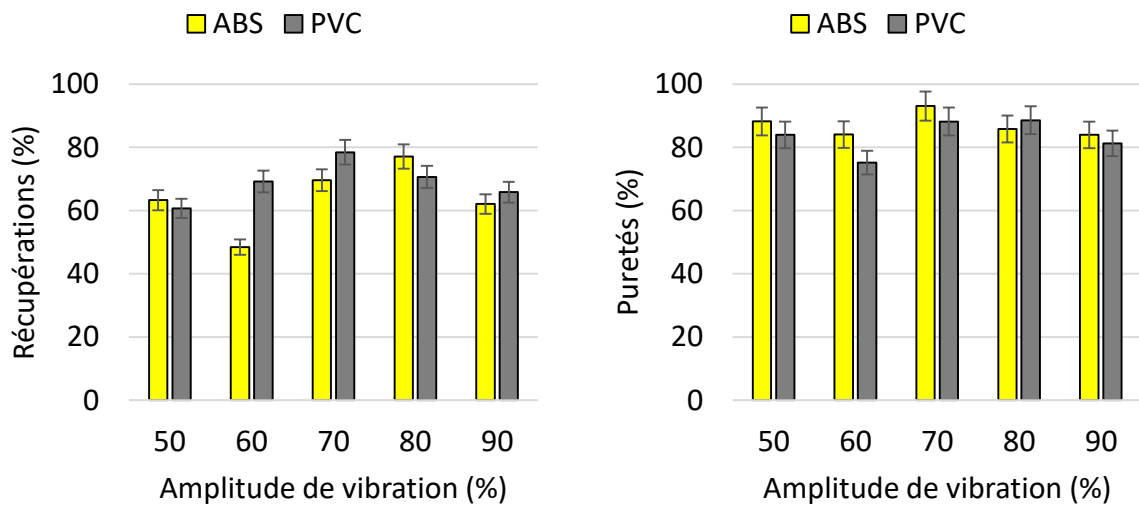
Cette bonne séparation (Figure IV-19 et Figure IV-21) s'explique par l'homogénéité de la distribution du produit dans le plateau en monocouche qui permettra à la force électrique d'attirer ou de repousser les particules. Cette force est plus élevée que les forces de gravité et mécaniques.

Tableau IV-9. Résultats de séparation obtenus avec la configuration des électrodes en forme de «  $\Lambda$  ».

Vibration (%)	Compartiment	Gauche (ABS)					Mixte			Droit (PVC)				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	Masse d'ABS (g)	1,6	4,3	3,3	3,5	2,8	2,6	2,1	2,2	1,0	0,5	0,4	0,1	0,0
	Masse de PVC (g)	0,1	0,2	0,2	0,6	1,0	2,0	2,4	3,5	3,9	5,4	3,3	2,0	0,7
	PUR (%)	95	96	94	85	74	56	47	39	80	91	88	94	100
	Total (g)	15,43					6,9			15,39				
	PUR (%)	88,2					46,5			88,0				
	REC (%)	69,2					29,7			67,2				
60	Masse d'ABS (g)	1,7	3,3	2,3	2,2	2,6	2,8	2,5	2,1	2,2	2	1	0,2	0,1
	Masse de PVC (g)	0,1	0,2	0,4	0,8	0,8	1	1,6	2,5	3,5	5,6	3	2,8	1,7
	PUR (%)	94	94	85	73	76	74	61	46	61	74	75	93	97
	Total (g)	12,1					7,4			16,6				
	PUR (%)	84,0					59,2			75,1				
	REC (%)	48,4					25,5			69,2				
70	ABS	2	6,5	3,2	2,1	2,2	1,9	1,5	1,2	0,8	0,7	0,7	0,1	0,1
	PVC	0	0,1	0,1	0,4	0,6	1	1	1,7	2,8	4,7	3,6	3,1	3,6
	PUR (%)	100	99	98	84	79	66	60	41	78	87	84	97	99
	Total (g)	16					4,6			17,8				
	PUR (%)	93,0					55,4			88,1				

IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

	REC (%)	69,6					18,2			78,4				
80	ABS	3	7,2	3,3	2	2	1,4	0,9	0,6	0,8	0,8	0,5	0,1	0,1
	PVC	0	0,6	0,6	0,7	1	1,3	1,5	1,7	2,4	3,8	3,8	2,5	5,3
	PUR (%)	100	92	85	74	67	52	38	26	75	83	88	96	98
	Total (g)	17,5					2,9			17,8				
	PUR (%)	85,8					39,2			88,6				
	REC (%)	77,1					15,4			70,6				
90	ABS	3,2	4,4	2,9	2,4	2,3	2,0	1,7	1,8	1,3	1,0	0,7	0,4	0,3
	PVC	0,1	0,5	0,5	0,8	1,0	1,5	2,3	1,7	2,3	2,9	2,6	3,4	5,0
	PUR (%)	97	91	85	75	69	57	43	51	64	74	78	91	94
	Total (g)	15,19					5,54			16,2				
	PUR (%)	83,9					50,2			81,2				
	REC (%)	62,1					22,5			65,8				



(a) (b)  
Figure IV-22. Résultats de séparation obtenus avec la configuration des électrodes en forme de «  $\Lambda$  ». (a) Récupérations ; (b) Puretés des produits.



Figure IV-23. Résultat de séparation du mélange ABS / PVC obtenu avec la configuration des électrodes en forme de «  $\Lambda$  » (Paroi en PVC,  $U = \pm 16$  kV,  $Am = 70\%$ ).



#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

La configuration des électrodes en forme de «  $\Lambda$  » donne de bons résultats pour la séparation électrostatique d'un mélange ABS / PVC (Figure IV-22) avec une amplitude de vibration de 70%. Ainsi, 69,6% des particules d'ABS, pures à 93%, sont récupérées dans le secteur gauche du collecteur, constitué des compartiments de 1 à 5 (Figure IV-23). 18,2% de la masse totale du mélange tombe dans les compartiments du milieu numérotés de 6 à 8, qui contiennent aussi la majorité des particules d'ABS (55,4%). Les taux de récupération et de pureté du PVC dans le secteur de droite qui regroupe les compartiments de 9 à 13 sont respectivement de 78,4% et de 88,1%. Cependant, dans la plupart des expériences, la pureté des produits contenus dans les compartiments qui sont proche des électrodes (1, 2 et 12, 13) est supérieure à 99% (Tableau IV-9). Ceci s'explique par le fait que les particules qui ont une charge négative ou positive élevée sont facilement déviées vers l'électrode de polarité opposée, tandis que les particules mal chargées tombent dans les compartiments centraux.

#### *Effet du temps de chargement des particules*

Le principe de séparation étant basé sur les forces exercées par le champ électrique sur des particules chargées, la charge triboélectrique des particules joue un rôle très important sur la qualité de la séparation. En effet, si les particules sont bien chargées, la qualité de séparation est bonne. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence du temps de chargement des particules dans le chargeur triboélectrique à cylindre tournant de 0 min (la trappe placée dans la partie basse du cylindre est ouverte) à 3 min sur un mélange de 50 g composés à parts égales d'ABS et de PVC (Tableau IV-10), afin d'améliorer la pureté des produits récupérés par le séparateur TVE avec une configuration des électrodes en forme de « V ».

Tableau IV-10. Résultats de séparation du mélange PVC /ABS obtenu par la TVE (électrodes en forme de « V ») en fonction du temps de chargement.

Temps de chargement (min)	Compartiment gauche (ABS)		Compartiment milieu (mixte)	Compartiment droit (PVC)	
	$PUR_{ABS}$ (%)	$REC_{ABS}$ (%)	$REC_{mix}$ (%)	$PUR_{PVC}$ (%)	$REC_{PVC}$ (%)
0	73,32	45,18	8,9	71,5	71,1
1	88,11	55,97	10,9	76,2	80,6
2	89,08	63,23	10,4	84,6	81,2
3	93,17	62,98	12,9	81,8	86,5

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

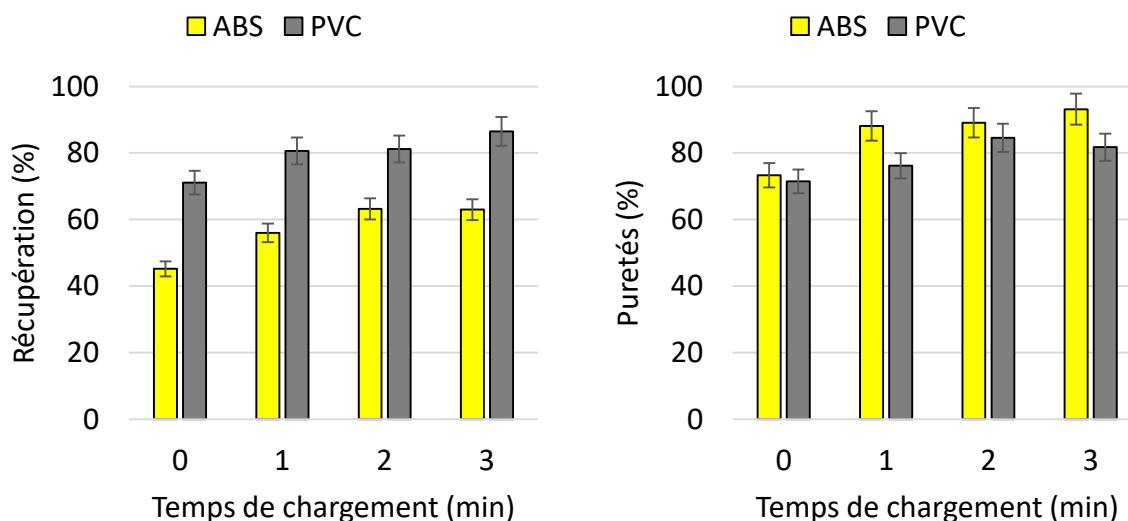


Figure IV-24. Résultats de séparation obtenus en fonction du temps de chargement. (a) Récupérations ; (b) Puretés des produits.



Figure IV-25. Résultat de la séparation du mélange ABS / PVC obtenu avec la configuration des électrodes en forme de « V » (Paroi en PVC,  $t = 3$  min,  $U = \pm 16$  kV,  $A_m = 70\%$ ).

Les résultats (Figure IV-24) montrent que plus le temps de chargement est important, plus les produits récupérés sont purs. La séparation est meilleure avec un temps de chargement de 3 min puisque, dans le compartiment gauche, la pureté d'ABS est de 93,17% alors que le PVC du compartiment droit atteint une pureté de 81,8% (Figure IV-25). En effet, lorsque le temps de séjour des particules dans le chargeur triboélectrique est plus long, ceci augmente le nombre d'impacts et la durée des frottements entre les particules et la paroi, ce qui favorise le transfert de charges. Par conséquent, la charge acquise par les particules est plus grande.

Les particules seront attirées par l'électrode de polarité opposée et la qualité de la séparation sera bonne, si la force électrique exercée sur les particules est suffisante.

### IV.3.3. Séparation électrostatique des mélanges ABS / PS et PP / PE

Le principal objectif de cette étude est de séparer des mélanges des déchets réels, fournis par des recycleurs (SKYTECH, SIRMET) qui n'ont pas trouvé des solutions techniques pour le traitement des mélanges de plastiques (ABS / PS) et (PP / PE). Ces polymères sont les plus utilisés dans le domaine industriel.

Les premiers tests ont été réalisés sur des mélanges de 50 g de particules de référence, ayant des couleurs bien identifiées et mélangées en proportions égales (50% - 50%) puis sur un mélange des déchets réels.

Pour la séparation électrostatique des mélanges ABS / PS et PP /PE, le séparateur électrostatique à table vibrante a été utilisé en association avec le dispositif de charge à cylindre tournant. Les particules chargées ont été déposées en monocouche sur le plateau du TVE et séparées selon la polarité de leur charge.

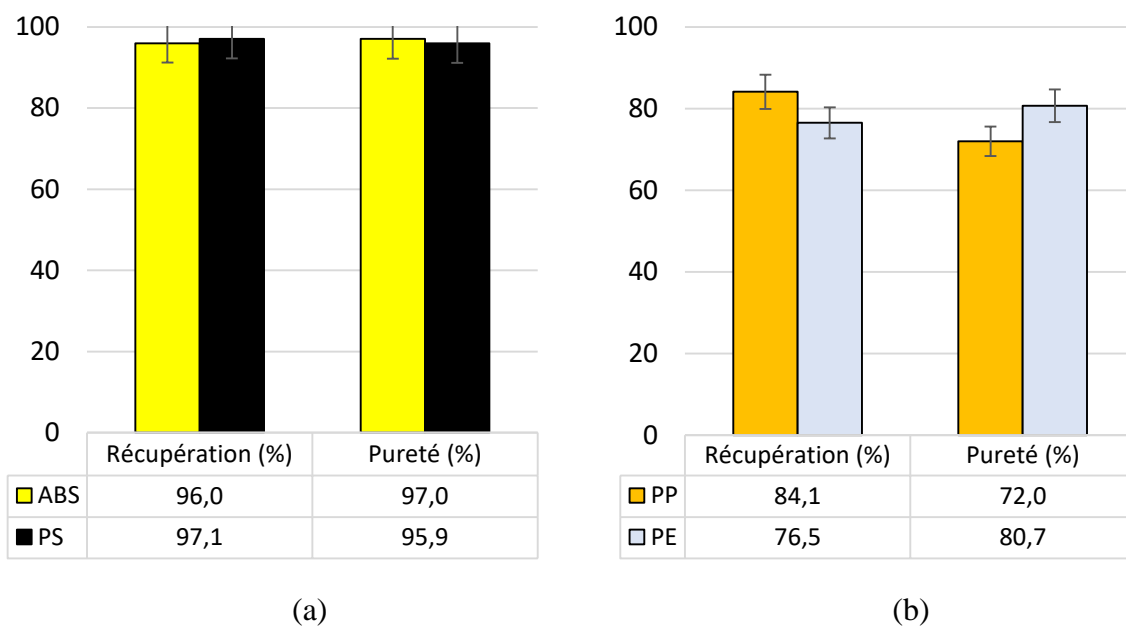


Figure IV-26. Résultats de séparation des mélanges de référence obtenus avec la configuration des électrodes en forme de « V ». (a) Mélange ABS / PS ; (b) Mélange PP / PE.

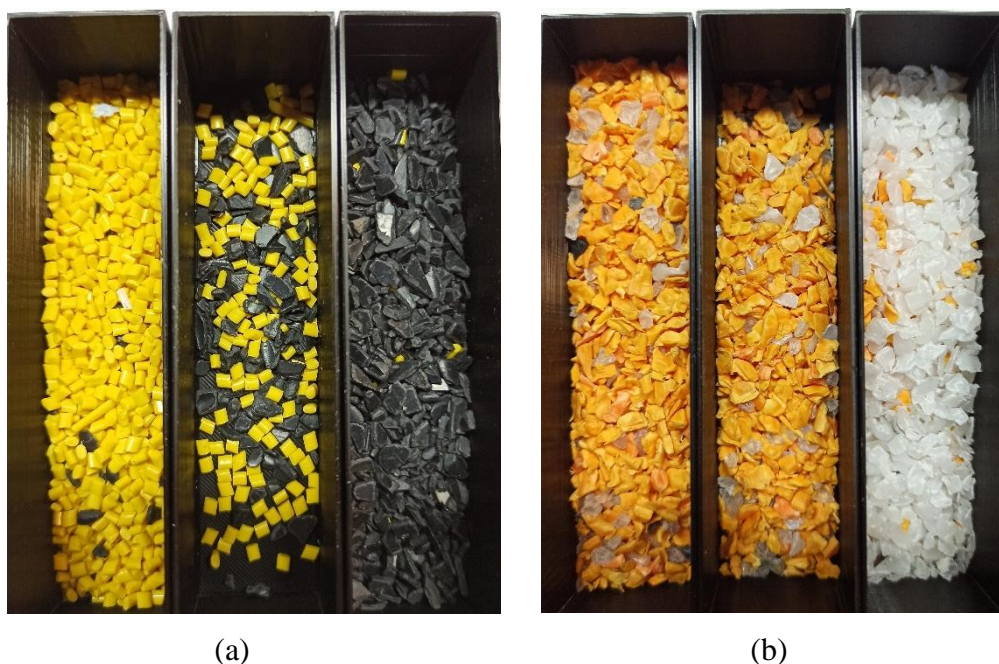


Figure IV-27. Résultats de la séparation des mélanges de référence obtenu avec la configuration des électrodes en forme de «  $\Lambda$  », (a) Mélange ABS / PS ; (b) Mélange PP / PE (Paroi en PVC,  $t = 3$  min,  $U = \pm 16$  kV,  $Am = 70\%$ ).

Cette étude a permis de démontrer que de meilleurs résultats de séparation sont obtenus dans le cas d'un mélange ABS / PS (Figure IV-26 et Figure IV-27). En effet, 96,0% des granules d'ABS ont été récupérés dans le compartiment gauche avec une pureté de 97,0%, la pureté des particules du PS était d'environ 96% pour un taux de récupération de 97,1%.

Les résultats montrent que la séparation du mélange PP / PE était moins bonne, la pureté du PP atteint une valeur de 72% avec une récupération de 84,1%, tandis que la récupération et la pureté du PE étaient respectivement de 76,5% et de 80,7%.

#### IV.4. Étude expérimentale et optimisation du fonctionnement d'un séparateur électrostatique industriel

##### IV.4.1. Procédure expérimentale

Le mélange granulaire de cette étude est un produit plastique récupéré à partir de déchets d'équipements électriques et électroniques. Le mélange isolant-isolant de 100 g est composé de 50% PP orange et 50% HIPS (Figure II-1).

Les expériences ont été faites sur le prototype de séparateur électrostatique à deux tambours (PRD) décrit au paragraphe II.3.3.

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

L'utilisation de la méthode des plans d'expérience a permis de trouver l'influence des facteurs et de déterminer leurs valeurs optimales, tout en réduisant le nombre d'essais au strict nécessaire. Deux plans d'expériences ont été réalisés :

Le premier était un plan factoriel complet de 17 expériences permettant de mettre en évidence très rapidement l'existence d'interactions entre les variables de contrôle du processus, pour optimiser :

- La valeur de la haute tension appliquée aux électrodes ( $U$ , [kV]),
- La distance ( $d$ , [cm]) entre les deux électrodes cylindriques selon l'axe horizontal ( $X$ , [cm]) et l'axe vertical ( $Y$ , [cm]).

Ces facteurs affectent l'intensité du champ électrique. En augmentant la tension  $U$  ou en diminuant la distance  $d$ , le champ devient plus intense et la force électrique s'intensifie.

Un deuxième plan d'expériences composites de 11 expériences a été fait afin d'optimiser :

- La vitesse de rotation du dispositif de charge ( $V_{DCC}$ , [tr/min]),
- La vitesse de rotation des électrodes ( $V_{el}$ , [tr/min]).

Quatre réponses ont été considérées dans cette étude :

- Le taux de récupération du PP ( $REC_{PP}$ , [g]),
- La pureté du PP ( $PUR_{PP}$ , [%]),
- Le taux de récupération du HIPS ( $REC_{HIPS}$ , [g]),
- La pureté du HIPS ( $RUR_{PP}$ , [%]).

Ces expériences ont toutes été réalisées sur la même machine, en utilisant les mêmes échantillons et dans les mêmes conditions d'humidité relative (entre 46,2% et 53,8%) et de température (entre 23,8°C et 25,6°C) de l'air ambiant, afin d'éliminer toute cause de variabilité du processus de séparation, en respectant la même méthode de travail.

#### **IV.4.2. Optimisation de la tension appliquée aux électrodes et la distance inter-électrodes**

Les résultats des dix-sept expériences réalisées selon le plan factoriel composite recommandé par la méthodologie des plans d'expériences sont présentés dans le Tableau IV-11.

IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES  
GRANULAIRES

Tableau IV-11. Récupérations et puretés des produits PP et HIPS collectés dans les 17 expériences.

Essai	<i>X</i> [cm]	<i>Y</i> [cm]	<i>U</i> [kV]	<i>PUR</i> <sub>HIPS</sub> [%]	<i>PUR</i> <sub>PP</sub> [%]	<i>REC</i> <sub>HIPS</sub> [%]	<i>REC</i> <sub>PP</sub> [%]
1	-3	-4	±16	77,63	87,52	86,38	79,34
2	3	-4	±16	72,78	77,94	77,33	73,46
3	-3	4	±16	73,65	82,92	82,92	73,65
4	3	4	±16	65,48	80,70	77,93	69,20
5	-3	-4	±20	78,40	83,64	82,77	79,44
6	3	-4	±20	71,54	74,78	71,06	75,22
7	-3	4	±20	75,89	84,59	84,90	75,45
8	3	4	±20	65,84	81,72	78,13	70,69
9	-3	0	±18	69,17	77,91	72,97	74,56
10	3	0	±18	63,34	71,31	64,17	70,56
11	0	-4	±18	69,06	76,97	72,01	74,36
12	0	4	±18	69,19	65,80	60,72	73,65
13	0	0	±16	73,71	85,46	85,09	74,28
14	0	0	±20	73,32	86,97	86,19	74,61
15	0	0	±18	73,28	87,04	85,39	75,90
16	0	0	±18	73,26	88,49	88,01	74,15
17	0	0	±18	73,89	90,28	89,51	75,50

La pureté (*PUR*<sub>PP</sub>) et la récupération (*REC*<sub>PP</sub>) du Polypropylène collecté dans le compartiment droit C1 et la pureté (*PUR*<sub>HIPS</sub>) et la récupération (*REC*<sub>HIPS</sub>) du High-Impact Polystyrène collecté dans le compartiment gauche C2 sont calculées à partir d'équations décrites dans le paragraphe II.4.3.

Le plan d'expériences permet d'exprimer la réponse par un modèle polynomial de second degré. Les modèles mathématiques des réponses de la pureté et la récupération de HIPS et de PP sont donnés par les équations suivantes :

$$REC_{HIPS} = 45.74 - 0.99X^* + 0.90Y^* - 0.51U^* - 1.77X^{*2} + 0.26Y^{*2} + 3.60U^{*2} - 0.22X^*Y^* - 0.55X^*U^* + 0.39Y^*U^* \quad (IV-1)$$

$$PUR_{HIPS} = 0.74 - 0.04X^* + 0.01Y^* - 0.01U^* - 0.04X^{*2} + 0.09U^{*2} - 0.01X^*U^* + 0.01Y^*U^* \quad (IV-2)$$

$$PUR_{PP} = 0.73 - 0.02X^* + 0.02Y^* + 0.01U^* + 0.01U^{*2} \quad (IV-3)$$

IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

$$REC_{PP} = 50.09 + 0.89X^* - 1.16Y^* + 0.63U^* + 2.4X^{*2} - 0.25Y^{*2} - 4.01U^{*2} + 0.10X^*Y^* + 0.59X^*U^* - 0.42Y^*U^* \quad (IV-4)$$

Les coefficients trouvés sont mentionnés dans le Tableau IV-12. On constate que presque tous ces facteurs sont proches de 100%, ce qui indique une bonne qualité des modèles obtenus.

Tableau IV-12. Résultats des coefficients  $Q^2$  et  $R^2$ .

	$REC_{HIPS}$	$PUR_{HIPS}$	$REC_{PP}$	$PUR_{PP}$
$Q^2$ (%)	70.3	85.1	82.2	72.6
$R^2$ (%)	96.2	99.2	97.9	98.2

**Influence des facteurs choisis sur les réponses**

A partir des modèles mathématiques obtenus, nous avons pu déterminer, à l'aide du logiciel MODDE 5.0, l'influence de chaque facteur sur chacune des réponses en traçant les contours iso-réponses, comme montré sur la Figure IV-28.

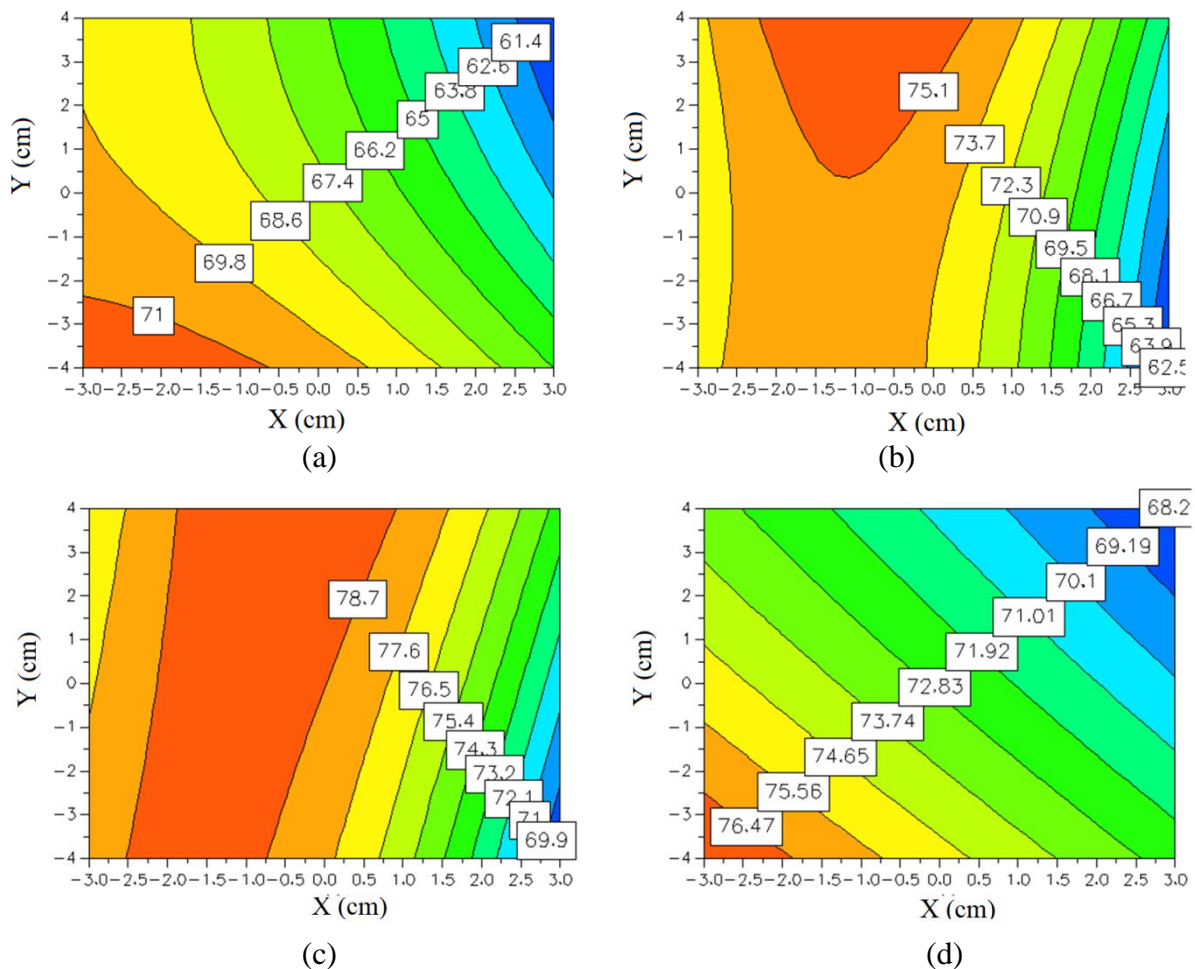


Figure IV-28. Iso-contours tracés par MODDE 5.0 en fonction des positions des électrodes selon l'axe X [cm] et l'axe Y [cm], à une tension de  $U = \pm 18$  kV, pour : (a) la pureté du HIPS ; (b) la récupération du HIPS ; (c) la pureté du PP ; (d) la récupération du PP.

## IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

En analysant la Figure IV-28, nous constatons que :

- Le taux de récupération et la pureté du produit HIPS croit avec la diminution de la distance inter-électrodes au niveau de l'axe horizontal X ;
- Le taux de récupération du HIPS décroît avec l'augmentation de la distance inter-électrodes au niveau de l'axe vertical Y, contrairement au taux de pureté du HIPS ;

Nous concluons également qu'en augmentant la distance entre les électrodes au niveau de l'axe horizontal X, le taux de récupération du PP diminue contrairement au taux de pureté.

Le taux de récupération et la pureté du PP diminuent avec l'augmentation de la distance inter-électrodes au niveau de l'axe vertical Y ;

D'après ces résultats, la distance entre les électrodes selon l'axe horizontal X et de l'axe vertical Y a une grande influence sur la récupération et la pureté des produits PP et HIPS. En effet, le champ électrique devient plus intense et la force électrique s'intensifie si la distance entre les électrodes ( $d$ ) est courte ou si la tension ( $U$ ) augmente, ce qui conduit à de bons résultats de séparation.

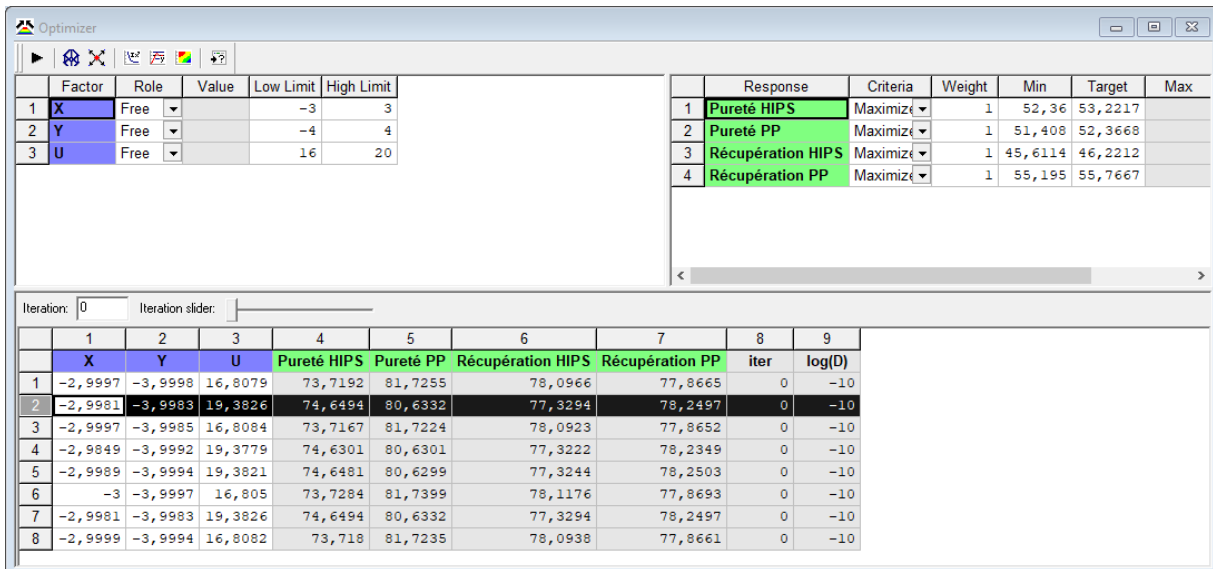


Figure IV-29. Valeurs optimales des facteurs et des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0

Les meilleurs résultats de séparation prédites par le logiciel MODDE 5.0 (Figure IV-29) avec des puretés de HIPS = 75% et PP = 81% et de récupérations de HIPS = 77% et PP= 78% correspond aux valeurs suivantes : une tension appliquée aux électrodes de  $\pm 19,4$  kV et une distance entre électrodes selon l'axe X = -3 cm et selon l'axe Y = -4 cm.

Les résultats expérimentaux obtenus en utilisant les valeurs optimales données par le logiciel sont regroupés dans le Tableau IV-13.



Tableau IV-13. Comparaison des résultats du logiciel et expérimentaux.

Résultats	$X$ (cm)	$Y$ (cm)	$U$ (kV)	$PUR_{HIPS}$ (%)	$PUR_{PP}$ (%)	$REC_{HIPS}$ (%)	$REC_{PP}$ (%)
Prédits	-3	-4	$\pm 19.4$	75	81	77	78
Expérimentaux				75	86	78	83

Les faibles écarts entre les récupérations prédites et les récupérations mesurées ainsi qu'entre les puretés prédites et mesurées (Tableau IV-13) confirment l'excellente qualité du modèle mathématique établi par la méthode des plans d'expériences pour la séparation d'un mélange de PP et de HIPS.

#### IV.4.3. Optimisation des vitesses de rotation du dispositif de charge et des électrodes

Les résultats des 11 expériences effectuées selon le plan d'expériences composite sont donnés sur le Tableau IV-14. Ils permettent de calculer les effets des vitesses de rotation du dispositif de charge cylindrique ( $V_{DDC}$ ) et des électrodes ( $V_{el}$ ) sur la qualité de la séparation. Les essais ont été réalisés pour les valeurs optimales de la tension appliquée aux électrodes de  $\pm 19$  kV et les distances entre électrodes selon l'axe  $X = -3$  cm et selon l'axe  $Y = -4$  cm trouvées dans le premier plan d'expérience.

Tableau IV-14. Récupérations et puretés des produits PP et HIPS collectés dans les 11 expériences.

Essai	$V_{DDC}$ (tr/min)	$V_{el}$ (tr/min)	$PUR_{HIPS}$ (%)	$PUR_{PP}$ (%)	$REC_{HIPS}$ (%)	$REC_{PP}$ (%)
1	60	30	86,04	86,62	87,4	85,19
2	90	30	85,09	88,7	89,41	84,14
3	60	50	77	91,17	92,93	72,42
4	90	50	75,64	89,83	92,27	69,68
5	60	40	82,05	91,2	92,18	80,06
6	90	40	82,79	92,42	92,59	82,43
7	75	30	87,29	88,16	88,63	86,77
8	75	50	76,71	89,7	91,42	72,92
9	75	40	83,41	92,34	92,84	82,38
10	75	40	84,56	89,15	91,39	80,92
11	75	40	85,37	91,6	92,21	84,32

***Influence des facteurs choisis sur les réponses***

Les particules de HIPS, chargées positivement au contact avec les particules de PP et la paroi du dispositif de charge, étaient attirées par l'électrode cylindrique tournante de polarité négative et finissaient dans le bac de gauche. D'après le logiciel MODDE 5.0, les résultats obtenus montrent qu'il existe une relation proportionnelle entre la vitesse de rotation du dispositif de charge (DDC) et la récupération et la pureté du produit HIPS (Figure IV-30). Ceci s'explique par des collisions croissantes entre les particules et la paroi, ce qui améliore la charge des particules.

Une augmentation de la vitesse de rotation des électrodes conduit à une diminution du taux de pureté du produit HIPS contrairement au taux de récupération du HIPS, jusqu'à une vitesse  $V_{el} = 50$  tr/min où la récupération commence à diminuer.

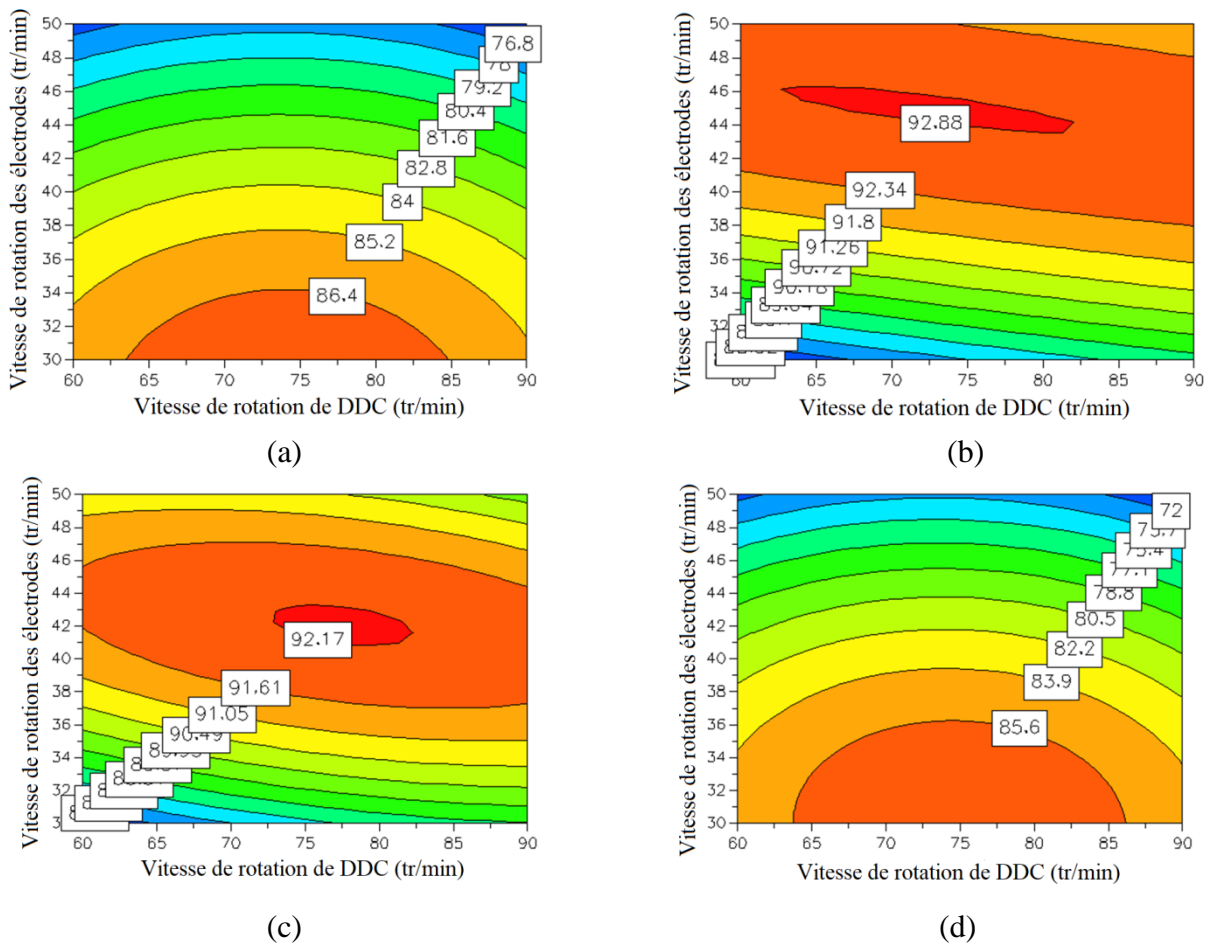


Figure IV-30. Iso-contours des produits en fonction de la vitesse de rotation du dispositif de charge (DDC)  $V_{DDC}$  (tr/min) et de la vitesse de rotation des électrodes  $V_{el}$  (tr/min), (a) pureté HIPS ; (b) récupération HIPS ; (c) pureté PP (d) récupération PP.

Les particules de PP, chargées négativement, restent collées sur l'électrode cylindrique tournante de polarité positive et tombent dans le bac de droite.

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

En augmentant la vitesse de rotation du dispositif de charge (DDC), les taux de récupération et de pureté augmentent jusqu'à la valeur centrale de l'intervalle puis décroissent.

Le taux de récupération diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation des électrodes contrairement au taux de pureté qui augmente jusqu'à la valeur centrale de l'intervalle puis décroît.

Les courbes d'iso-contours sont représentées sur la Figure IV-30. Ces graphiques confirment que l'influence de ces facteurs est significative sur les récupérations et les puretés. Le point de fonctionnement optimal du procédé est obtenu dans la zone de couleur rouge.

Selon les prédictions du logiciel MODDE 5.0, les meilleurs résultats de séparation seraient les suivants : des puretés de HIPS = 84% et de PP = 92% et des récupérations de HIPS = 92% et de PP = 83%, correspondant aux valeurs optimales suivantes : une vitesse de rotation du DDC de 77 tr/min et une vitesse de rotation des électrodes de 40 tr/min (Figure IV-31).

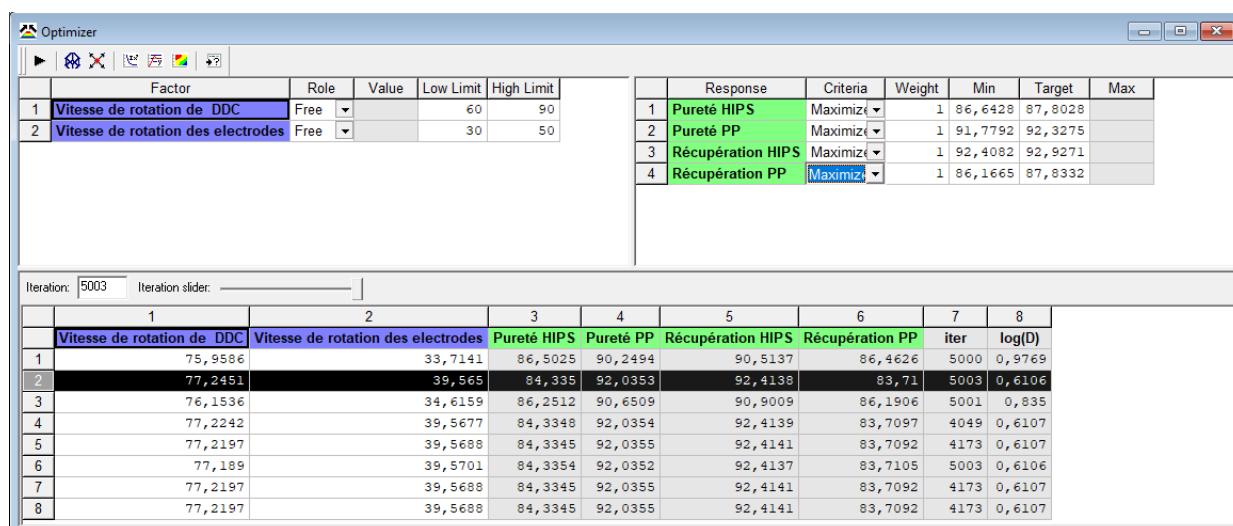


Figure IV-31. Optimisations prédites par le logiciel MODDE 5.0.

Les résultats expérimentaux obtenus en utilisant les valeurs optimales données par le logiciel sont regroupés dans le tableau IV-16 :

Tableau IV-15. Comparaison des résultats du logiciel et expérimentaux.

Résultats	$V_{DDC}$ (tr/min)	$V_{el}$ (tr/min)	$PUR_{HIPS}$ (%)	$PUR_{PP}$ (%)	$REC_{HIPS}$ (%)	$REC_{PP}$ (%)
Prédits	77	40	84	92	92	83
Expérimentaux			81	94	94	82

Les récupérations et les puretés mesurées expérimentalement pour les produits HIPS et PP sont presque égales aux récupérations et aux puretés prédites par MODDE 5.0 (Tableau IV-15), ce qui confirme l'excellente qualité du modèle mathématique établi par la méthode des plans d'expériences pour la séparation du mélange de plastiques PP et HIPS.

#### IV.4.4. Application de la séparation électrostatique aux déchets réels

Après avoir déterminé les paramètres optimaux du fonctionnement du séparateur PRD, d'autres essais ont été effectués sur des mélanges de plastiques réels (Figures II-11 et II-1m) : ABS / PS et de PP / PE, fournis par plusieurs sociétés de valorisation des déchets, environnement recycling, skytech et sirmet. En effet, un flux industriel se caractérise par la diversité des formes, tailles et couleurs des particules, dues à leur provenance et au prétraitement par un broyeur industriel. De plus, la présence de poussières dans les mélanges industriels diminue l'efficacité de la séparation électrostatique et la qualité de la séparation.

Afin de séparer ces mélanges, un broyeur fabriqué par l'entreprise CITF a été utilisé pour réduire la taille de granules à des valeurs comprises entre 4 mm et 6 mm. En effet, lors d'expériences menées sur les deux mélanges de plastiques ABS / PS et de PP / PE de tailles comprises entre 7 mm et 20 mm (Figures II-11 et II-1m), il a été constaté que les taille des particules sont très importantes pour l'efficacité de la séparation de ce type de mélange. Les particules de grandes tailles tombent directement sous l'action de leur propre poids dans la partie centrale de la trémie, au niveau des volets séparant les compartiments du collecteur, sans se séparer.

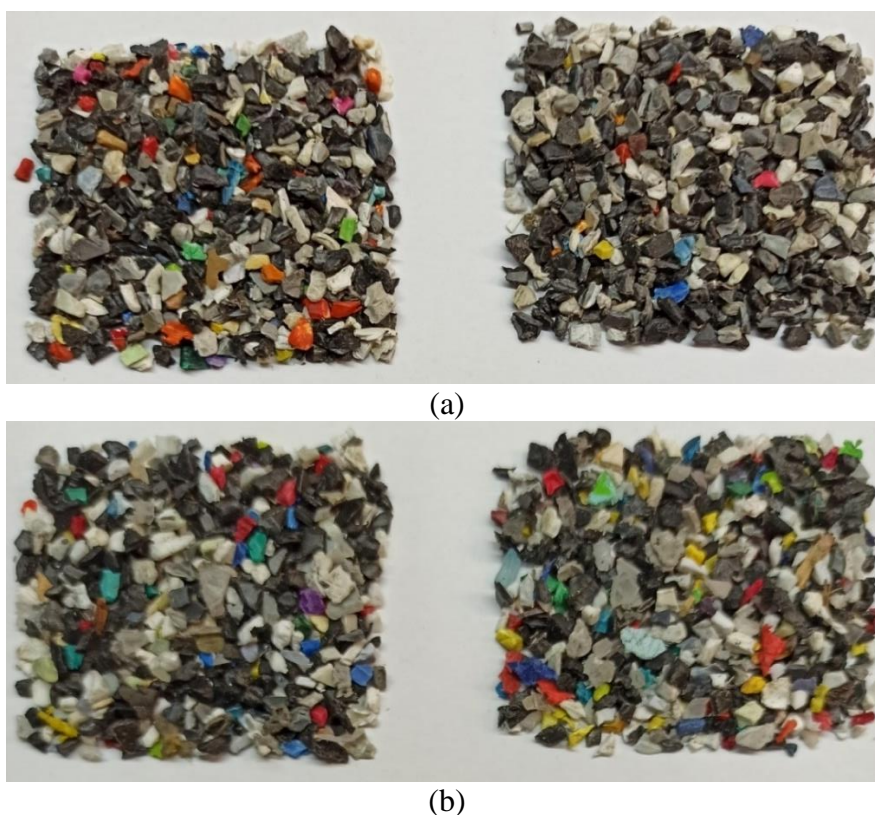


Figure IV-32. Photographies des résultats de séparation des mélanges de déchets réels de particules de taille entre 4 mm et 6 mm obtenus par le séparateur PRD, (a) Mélange ABS + PS ; (b) Mélange PP + PE.

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

Les puretés des produits séparés dans les compartiments gauche et droit (Figure IV-32) sont mesurées après identification des polymères par spectrométrie FTIR, selon la méthode décrite au paragraphe II.4.4.

Les puretés des produits récupérés sont présentées sur la figure IV-33. La réduction des tailles des particules conduit à de meilleurs résultats de séparation : 96,0% des particules d'ABS ont été récupérés dans le compartiment de gauche C1 avec une pureté de 97,0%, et 97,1% des particules de PS ont été collectées dans le compartiment de droite, C2, avec une pureté de 95,9% (Figure IV-33a).

Selon les résultats présentés sur la figure IV-33b, 84,1% des particules de PP ont été récupérées avec une pureté de 72,0%, tandis que la récupération et la pureté du PE étaient respectivement de 76,5% et de 80,7%.

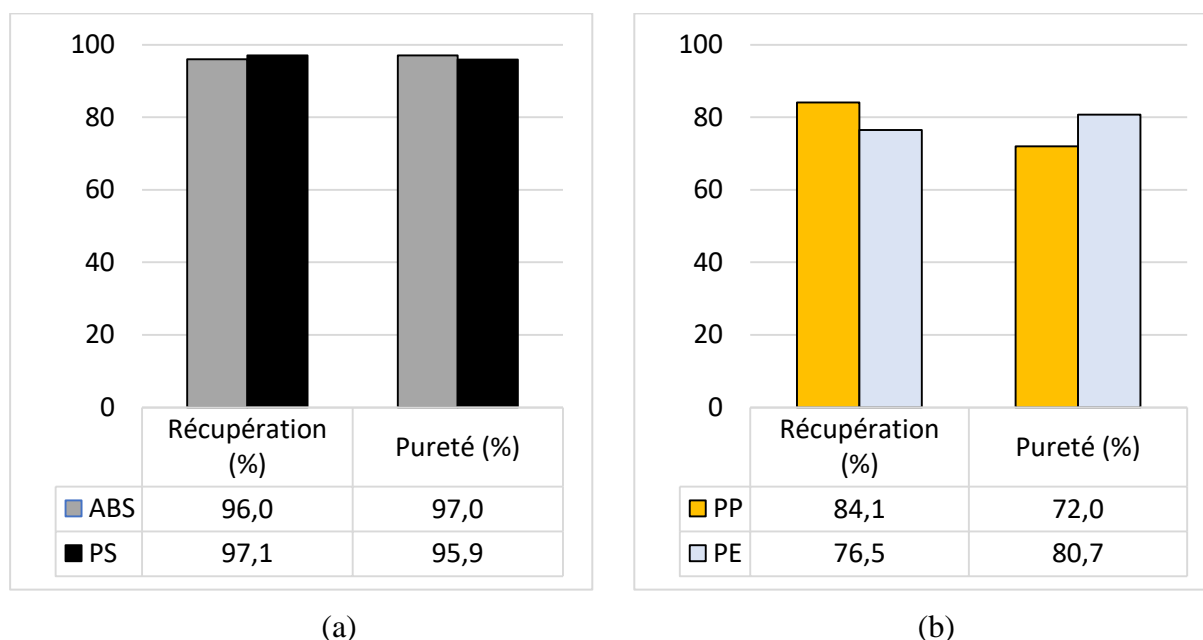


Figure IV-33. Résultats de séparation des mélanges de déchets réels de particules de tailles entre 2 mm et 7 mm obtenus par le séparateur PRD, (a) Mélange ABS + PS ; (b) Mélange PP + PE

L'efficacité de la séparation électrostatique dépend des tailles et formes des granules. Des particules petites peuvent être plus facilement attirées par la force électrique vers l'électrode reliée à la haute tension de polarité opposée. La quantité de charge transférée entre particules dépend des tailles des granules. Plus la taille des particules est petite, plus la charge massique est élevée et plus la qualité de la séparation est bonne.

#### IV.5. Conclusions

- La séparation triboélectrostatique s'est avérée être une solution efficace pour le traitement des mélanges de deux ou plusieurs plastiques (ABS + PS), (PP + PE), (PP + PE + ABS) et (PP + PE + ABS + PS).
- La composition du mélange a une grande influence sur le mécanisme de charge des particules et donc sur les niveaux de puretés et les récupérations des produits obtenus après la séparation triboélectrostatique.
- Le choix du chargeur triboélectrique est de la plus haute importance pour la qualité de la séparation électrostatique. L'efficacité de la séparation dépend du type de paroi utilisé pour le chargement triboélectrique des particules.
- Le dispositif de chargement à cylindre tournant permet le chargement en continu de grandes quantités de plastiques. L'augmentation du temps de séjour des particules dans le cylindre augmente la charge acquise des particules et améliore la qualité de la séparation.
- Le chargeur à lit fluidisé s'est avéré plus efficace que le chargeur à plusieurs cylindres car il offre de meilleures conditions pour le transfert de charge de particule à particule.
- La charge résiduelle peut affecter la qualité de la deuxième séparation. Une neutralisation des particules en sortie de la première étape de séparation et une opération de tribochargement supplémentaire sont nécessaires pour obtenir un transfert de charge efficace entre les plastiques à séparer.
- L'humidité joue un rôle très important dans le processus de charge électrostatique et dans la séparation triboélectrostatique des mélanges plastiques. L'humidité de l'environnement dans lequel l'expérience a été menée peut influencer les conditions physiques et chimiques des échantillons de particules de plastique. Pour les mélanges de plastiques étudiés, les meilleurs résultats de séparation et de chargement triboélectrique ont été obtenus avec une humidité relative d'environ 50%.
- La séparation électrostatique par le biais d'un nouveau dispositif à table vibrante a prouvé son efficacité dans le traitement des mélanges de plastiques quels que soient les matières à séparer. Ce séparateur est caractérisé par sa simplicité de construction et ses faibles besoins en énergie par rapport à d'autres séparateurs électrostatiques.
- La séparation de mélange de plastiques par TVE avec un plateau moyen donne de meilleurs résultats que ceux obtenus avec les autres plateaux en termes de récupération et pureté du produit séparé. Cela est vraisemblablement dû au fait que les particules sont bien réparties dans le plateau en plexiglas et qu'elles ont suffisamment de temps de séparation.

#### IV : PROCÉDÉS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MÉLANGES DE POLYMERES GRANULAIRES

La longueur et l'amplitude de vibration du plateau sont les facteurs primordiaux pour une séparation électrostatique réussie.

- L'efficacité de la séparation électrostatique dépend de la configuration du système d'électrodes. Parmi les trois configurations d'électrodes étudiées, les meilleurs résultats ont été obtenus dans le cas d'électrodes parallèles car l'effet de la force électrostatique est plus important par rapport aux forces mécaniques et de gravité.
- La configuration d'électrodes en forme de « V » qui est plus large à l'entrée est recommandée pour les cas où le séparateur TVE est utilisé comme première étape de prétraitement du mélange à séparer dans le prototype industriel PRD.
- La configuration d'électrodes en forme de «  $\Lambda$  » est également efficace, car elle permet de récupérer des produits purs à 99% dans les compartiments proches des électrodes.
- La séparation électrostatique des mélanges de plastiques nécessite leur chargement triboélectrique. Plus la charge des particules est élevée, plus la séparation électrostatique sera efficace et plus la qualité de séparation est bonne.
- Le séparateur triboélectrostatique à deux électrodes tournantes PRD a prouvé son efficacité pour le traitement de mélanges plastiques HIPS et PP issus de DEEE. La modélisation et l'optimisation de l'installation électrostatique en utilisant la méthodologie des plans d'expériences pourrait représenter une solution viable pour améliorer de façon importante la qualité des produits à séparer.
- Les paramètres de fonctionnement optimaux du séparateur électrostatique PRD pour séparer un mélange plastique HIPS et PP permettant d'obtenir respectivement des puretés de 81% et 94% sont :
  - Tension appliquée aux électrodes de  $\pm 19$  kV,
  - Distance inter-électrodes selon l'axe  $X = -3$  cm et selon l'axe  $Y = -4$  cm,
  - Vitesse de rotation du DDC de 77 tr/min,
  - Vitesse de rotation des électrodes de 40 tr/min.

Les prochaines études seront focalisées sur l'effet de la température sur le processus de séparation électrostatique ainsi que sur la modélisation et l'optimisation expérimentale de processus de séparation pour plusieurs tailles des particules et combinaisons de produits.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les déchets d'équipements électriques et électroniques sont composés d'une grande diversité de matériaux plastiques dont la récupération et le recyclage nécessite la recherche et le développement de nouvelles technologies de séparation électrostatique, en vue de leur récupération et de leur valorisation à l'échelle du laboratoire et de l'industrie.

Pour répondre aux besoins de la recherche sur le tri des mélanges des matériaux granulaires isolants et aux exigences du partenaire industriel, après une brève synthèse de l'état de l'art dans ces domaines, nous avons présenté dans un premier temps les installations de chargement triboélectrique et les installations de séparation électrostatique, conçues et mises en œuvre à l'Institut PPRIME de l'Université de Poitiers. Dans un seconde temps nous avons présenté les résultats des recherches que nous avons effectuées sur la triboélectrification des matériaux plastiques et sur la séparation triboélectrostatique des mélanges de polymères. La conclusion générale de notre travail peut être formulée ainsi :

- Le chargement triboélectrique suivi de la séparation en champ électrostatique est un procédé efficace de récupération des principaux matériaux polymères provenant des déchets d'équipements électriques et électroniques. Par ailleurs, ces procédés non-polluants sont caractérisés par des coûts d'exploitation et de maintenance relativement réduits ainsi que par une faible consommation d'énergie.
- L'une des contributions originales de cette thèse est le développement et la réalisation d'un nouveau dispositif de charge triboélectrique multicylindre tournant. Ce dispositif s'est avéré plus efficace qu'un dispositif de charge triboélectrique monocylindre tournant dans le cas de particules isolantes de tailles millimétriques provenant des DEEE.
- Le chargement par effet triboélectrique des particules isolantes est dû aux collisions et frottements entre elles ou avec les parois du dispositif de charge. Afin d'obtenir un bon rendement des chargeurs triboélectriques à mono cylindre ou multicylindre tournants, il faut régler correctement les paramètres suivants : la vitesse de rotation, le temps de séjour des particules dans le dispositif, la nature des parois et l'angle d'inclinaison de(s) cylindre(s), le débit massique du produit entrant. De plus, il est important de prendre en considération les conditions climatiques (la température et l'humidité ambiantes). Les résultats obtenus avec ces dispositifs montrent la possibilité d'obtenir une bonne séparation des mélanges granulaires. Plusieurs constats peuvent être dressés. La charge des particules isolantes augmente avec la vitesse de rotation du dispositif et avec le temps



de séjour des particules à l'intérieur de celui-ci. L'augmentation de l'inclinaison du dispositif par rapport à l'horizontale et du débit du produit traité diminue la charge acquise par les particules.

Les séries triboélectriques facilitent le choix du matériau des parois du dispositif de tribochargement utilisé lors de la séparation des mélanges de plastiques, car elles donnent une idée générale de la façon dont la charge se produit lorsque deux matériaux quelconques seront mis en contact.

Le chargeur triboélectrique multicylindre transmet une charge plus élevée aux particules que le chargeur triboélectrique monocylindre tournant.

Le programme d'acquisition de données a permis une surveillance continue de la charge et de la masse pour comprendre les mécanismes de chargement triboélectrique des particules de plastiques et démontrer l'efficacité et l'endurance des dispositifs utilisés.

La séparation électrostatique des particules isolantes chargées par les dispositifs de tribochargement s'est avérée être une solution efficace pour le traitement des mélanges de deux ou plusieurs plastiques (ABS+PS), (PP+PE), (PP+PE+ABS) et (PP+PE+ABS+PS).

L'humidité ambiante joue un rôle très important dans le processus de charge électrostatique et dans la séparation triboélectrostatique des mélanges plastiques. Les meilleurs résultats de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique ont été obtenus avec une humidité relative d'environ 50%.

L'étude de laboratoire a permis l'adaptation du prototype de la société CITF pour la séparation des mélanges (isolant – isolant) tout en gardant sa configuration originale.

La conception, la réalisation et la validation fonctionnelle d'un nouveau séparateur électrostatique type table vibrante électrostatique est l'une des contributions originales et majeure de cette thèse. La séparation électrostatique par la TVE a prouvé son efficacité dans le traitement des mélanges de plastiques quelles que soient les matières à séparer. Elle peut être utilisée comme première étape de prétraitement du mélange à séparer dans le prototype industriel PRD.

La modélisation et l'optimisation du fonctionnement d'un séparateur industriel à deux électrodes tournantes PRD en utilisant la méthodologie des plans d'expériences à l'aide du logiciel MODDE 5.0, montre que plus la charge des particules est élevée, plus la séparation électrostatique est efficace, et plus la qualité de séparation sera bonne.

### **Perspectives :**

La thèse ouvre des perspectives sur de nouveaux sujets de recherche dans le domaine de la séparation triboélectrostatique des matériaux plastiques provenant d'équipements électriques et électroniques :

- L'étude du rôle d'autres types de parois dans les dispositifs de tribochargement.
- L'application de la séparation électrostatique à de déchets de plastique qui contiennent du brome (les retardateurs de flamme).
- L'évaluation de l'effet de la température des matériaux sur la charge triboélectrique des polymères granulaires et sur la qualité de la séparation électrostatique.
- La faisabilité de la séparation triboélectrostatique de mélanges de plus de deux plastiques, démontrée en condition de laboratoire, doit encore être validée dans l'installation industrielle PRD.
- L'étude des mécanismes de chargement triboélectrique pour des mélanges de plus de deux plastiques granulaires de tailles millimétriques.
- L'intégration de la table vibrante électrostatique dans le séparateur PRD de sorte que le mélange plastique puisse être séparé en deux étapes, la première dans la table vibrante électrostatique par le champ électrique généré entre les électrodes plates et la seconde par le champ électrique créé entre les deux électrodes cylindriques.
- Appliquer la charge triboélectrique et la séparation électrostatique à d'autres mélanges isolants (bois, caoutchouc, tissus...).

## TABLE DES FIGURES

Figure I-1. Charge triboélectrique de deux particules en contact. (a) Particules électriquement neutre avant contact ; (b) Contact et transfert de charge ; (c) Rupture du contact, particules chargées.....	6
Figure I-2. Représentation de trois mécanismes de charge de surfaces isolantes [61, 62].....	8
Figure I-3. Mécanisme de transfert de charge par un transfert d'électrons [68]. ....	9
Figure I-4. Mécanisme de transfert de charge par un transfert d'ions [68]. ....	10
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 [78]. ....	11
Figure I-6. La forme des particules prédispose le mouvement [79]. ....	11
Figure I-7. Charge triboélectrique d'une sphère métallique de 12,7 mm de diamètre en fonction de l'humidité relative [91]. ....	13
Figure I-8. Charge triboélectrique d'une sphère métallique de 12,7 mm de diamètre en fonction de la température [91]. ....	14
Figure I-9. Dispositif de chargement à vis sans fin [100]. ....	15
Figure I-10. Dispositif de charge triboélectrique vibrant de marque Retsch; (1) Dispositif vibrant ; (2) Récipient en acier inoxydable (Diam. : 160 mm) [103]. ....	16
Figure I-11. 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. ....	16
Figure I-12. Représentation schématique d'un dispositif de charge à cylindre tournant [108]. ....	17
Figure I-13. Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [111]. ....	18
Figure I-14. Représentation schématique du granulateur [115]. ....	19
Figure I-15. Représentation schématique d'un dispositif de chargement à hélices [116]. ....	20
Figure I-16. Dispositif de charge tribo-électrique à plusieurs hélices et à fonctionnement continu [118]. ....	20
Figure I-17. Représentation schématique d'un dispositif de chargement de type cyclone [119]. ....	21
Figure I-18. Dispositif de chargement à lit fluidisé [126]. ....	22
Figure I-19. Régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse du gaz [125]. ....	23
Figure I-20. Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique [131]. ....	24
Figure I-21. Séparateur électrostatique à électrode-convoyeur multifonctions [150, 151] ; 1 : Goulotte oscillante ; 2 : Moteur électrique entraînant le convoyeur métallique ; 3 : Convoyeur métallique ; 4 : Electrode couronne ; 5 : Moteur électrique entraînant 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.....	25
Figure I-22. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à chute libre alimenté par un tribochargeur à cylindre tournant. ....	26
Figure I-23. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour [158]. ....	27
Figure I-24. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses [160]. ....	28
Figure I-25. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à cylindres tournants [164]. ....	29
Figure I-26. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants [165]. ....	30
Figure I-27. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales [168]. ....	31
Figure I-28. Séparateur d'HAMOS EKS [170]. ....	32
Figure I-29. Schéma de principe de la zone de séparation électrostatique de séparateur EKS-HAMOS : A, B – granules en plastique ; 6- électrode haute tension ; 7- cylindre métallique rotatif ; 8- contacts	

haute tension ; 9,12- brosses pour enlever le matériau ; 10- tube collecteur ; 11- palette déflecteur ; C1,..., C5- collecteurs.....	33
Figure I-30. Ajout d'un média dans un mélange traité par un séparateur électrostatique à chute libre [171]. (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.....	33
Figure I-31. Séparateur tribo électrostatique à chute libre Carpco.....	34
Figure I-32. Séparateur tribo-électrostatique PRODECOLOGIA [174]. .....	35
Figure I-33. Séparateur électrostatique industriel de série CP100 ; 1 : châssis ; 2 : armoires électriques ; 3 : pré-broyeur ; 4 : convoyeur ; 5 : broyeur granulateur ; 6 : table vibrante ; 7 : électrodes ; 8 : convoyeur ; 9 : vis sans fin ; 10 : caisses palettes [115].....	36
Figure II-1. Photographies des tailles et formes des matériaux granulaires étudiés : (a) PP orange, (b) PP gris, (c) PVC, (d) PE, (e) PC, (f) PS noir, (g) PS jaune, (h) PC Cristal, (i) HIPS, (j) ABS jaune, (k) ABS gris, (l) PS + ABS, (m) PP + PE.....	41
Figure II-2. Dispositif de chargement triboélectrique à cylindre tournant. (1) Entonnoir ; (2) Vanne ; (3) Cylindre creux ; (4) Moteur ; (5) Réglage de l'inclinaison ; (6) Trémie de sortie ; (7) Armoire électrique.....	43
Figure II-3. (a) Photographie du chargeur à lit fluidisé, (b) Parois en PVC, PMMA PP, PE et PS. ....	44
Figure II-4. Représentation schématique du séparateur électrostatique à tambour. (1) Table vibrante ; (2) Electrode cylindrique rotative reliée à la terre ; (3) Electrode connectée à une source haute tension réversible ; (4) Brosse ; (5) Collecteur gauche ; (6) Collecteur droite ; (7) Volet déflecteur.....	45
Figure II-5. Dispositif de charge rotatif de type multicylindre. (1) Entonnoir ; (2) Vanne ; (3) Assemblage de six cylindres creux ; (4) Système de réglage de l'inclinaison ; (5) Moteur ; (6) Trémie de sortie. ....	46
Figure II-6. Ensemble de six cylindres avec différents types de parois (PVC, ABS et PC) : (a) Représentation schématique, (b) Photographie.....	46
Figure II-7. Séparateur électrostatique à table vibrante (TVE). (1) Plateau en plexiglas ; (2) Embase vibrante ; (3) Electrodes plates reliée à des sources de haute tension continue ; (4) Système de réglage de la position des électrodes ; (5) Collecteur composé de 13 compartiments.....	47
Figure II-8. Prototype de séparateur électrostatique industriel PRD. (1) Broyeur ; (2) Système d'électrodes ; (3) Armoire électrique avec écran tactile ; (4) Caisses-palettes.....	48
Figure II-9. Configuration d'électrodes utilisée pour la séparation de mélanges isolant–isolant avec le prototype de séparateur industriel PRD. (1) Dispositif de charge triboélectrique type cylindrique ; (2) Table vibrante ; (3) Balais ; (4) Electrode cylindrique tournante inférieure reliée à une source de haute tension positive ; (5) Electrode cylindrique tournante supérieure reliée à une source de haute tension négative ; Compartiment gauche C1 ; Compartiment droit C2.....	49
Figure II-10. Système de mesure de charge. (1) PC équipé d'une carte d'acquisition de données ; (2) Cage de Faraday ; (3) Balance ; (4) Electromètre. ....	50
Figure II-11. Interface graphique de l'instrumentation virtuelle.....	51
Figure II-12. Dispositif pour l'analyse spectrométrique FTIR.....	52
Figure II-13. Dispositif pour la neutralisation de la charge électrique résiduelle. ....	53
Figure II-14. Machine de contrôle d'humidité et température, modèle CA S011-U DCI.....	54
Figure II-15. Représentation schématique d'un processus.....	55
Figure II-16. Représentation graphique des points expérimentaux du plan composite.....	56
Figure III-1. Charge massique prédite par MODDE 5.0, en fonction de : (a) l'angle d'inclinaison $\alpha$ , pour $n = 70$ tr/min, $t = 2$ min ; (b) la vitesse de rotation $n$ , pour $\alpha = 5^\circ$ , $t = 2$ min ; (c) le temps de résidence $t$ , pour $\alpha = 5^\circ$ , $n = 70$ tr/min.....	62
Figure III-2. Iso-contours de la charge massique prédite par MODDE 5.0 pour les particules du PC en fonction des facteurs (vitesse de rotation et angle d'inclinaison) pour un temps de résidence des particules $t = 2$ min.....	62
Figure III-3. Charge massique acquise par différents types de particules grâce au dispositif de charge monocylindre équipé du cylindre en PVC.....	64

Figure III-4. Charge massique acquise par différents types de particules grâce au dispositif de charge équipé du cylindre en PEHD. ....	64
Figure III-5. Dispositif de charge triboélectrique à cylindre tournant. (1) Moteur ; (2) Cylindre creux ; (3) Chargeur vibrant ; (4) Entonnoir ; (5) Valve ; (6) Système de réglage de l'inclinaison ; (7) Armoire de commande électrique ; (8) Trémie de sortie ; (9) Cages de Faraday ; (10) Électromètre (Keithley 6514) ; (11) Balance ; (12) Ordinateur. ....	66
Figure III-6. Charge des particules d'ABS en fonction du temps, pour différentes vitesses de rotation du cylindre $n = 60$ tr/min ; 80 tr/min ; 100 tr/min ; 120 tr/min. ....	67
Figure III-7. Charge massique des particules d'ABS en fonction du temps, pour différentes vitesses de rotation du cylindre $n = 60$ tr/min ; 80 tr/min ; 100 tr/min ; 120 tr/min. ....	67
Figure III-8. Charge des particules d'ABS, en fonction du temps, pour différents débits massiques $Q = 6$ kg/h ; 16 kg/h ; 33 kg/h ; 44 kg/h. ....	69
Figure III-9. Charge massique des particules d'ABS en fonction du temps, pour différents débits massiques $Q = 6$ kg/h ; 16 kg/h ; 33 kg/h ; 44 kg/h. ....	69
Figure III-10. Charge des particules PS non tamisés en fonction du temps, pour un débit massique $Q = 44$ kg/h. ....	70
Figure III-11. Charge massique des particules PS non tamisés en fonction du temps, pour un débit massique $Q = 44$ kg/h. ....	70
Figure III-12. Aspect et taille : (a) Echantillon 1 de particules PS d'une taille comprise entre 3 mm et 5 mm ; (b) Echantillon 2 de particules de PS d'une taille comprise entre 2 mm et 3 mm. ....	71
Figure III-13. Masse des particules PS tamisés de taille de 3 mm à 5 mm en fonction du temps, pour un débit massique $Q = 33$ kg/h. ....	71
Figure III-14. Charge des particules PS tamisés de taille de 3 mm à 5 mm en fonction du temps, pour un débit massique $Q = 33$ kg/h. ....	72
Figure III-15. Charge massique des particules de PS tamisés entre 3 mm et 5 mm en fonction du temps, pour un débit massique $Q = 33$ kg/h. ....	72
Figure III-16. Masse des particules PS tamisés de taille 2 mm à 3 mm en fonction du temps, pour un débit massique $Q = 33$ kg/h. ....	73
Figure III-17. Charge des particules PS tamisés de taille 2 mm à 3 mm en fonction du temps, pour un débit massique $Q = 33$ kg/h. ....	73
Figure III-18. Charge massique de particules de PS tamisés dont la taille est comprise entre 2 mm et 3 mm en fonction du temps, pour un débit massique $Q = 33$ kg/h. ....	74
Figure III-19. Charge massique des particules de PS en fonction de l'angle d'inclinaison des cylindres en PVC ( $HR = 58,2\%$ , $T = 17,5^{\circ}\text{C}$ , $n = 90$ tr/min). ....	76
Figure III-20. Charge massique des particules de PS en fonction de la vitesse de rotation des cylindres en PVC ( $HR = 60,1\%$ , $T = 19,1^{\circ}\text{C}$ , $\alpha = 6^{\circ}$ ). ....	76
Figure III-21. Iso-contours de la charge massique (nC/g) prédite par MODDE 5.0 pour les particules de PS en fonction de la vitesse de rotation et de l'angle d'inclinaison. ....	78
Figure III-22. Charge massique de différents types de particules dans le nouveau dispositif de tribochargement équipé de cylindres ABS (a) et PC (b), à $\alpha = 6^{\circ}$ et $n = 90$ tr/min. ....	79
Figure III-23. Charge massique de différents types de particules dans les dispositifs de tribochargement multicylindre PVC (a) et (b) monocylindre PVC, à ( $\alpha = 6^{\circ}$ , $n = 90$ tr/min). ....	81
Figure III-24. Montage expérimental du séparateur électrostatique à tambour et du dispositif de charge à multicylindre tournant. (1) Trémie d'entrée ; (2) Vanne ; (3) Ensemble de six cylindres creux ; (4) Moteur ; (5) Trémie de sortie ; (6) Armoire électrique ; (7) Table vibrante ; (8) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (9) Electrode elliptique reliée à une source de haute tension réversible ; (10) Cages de Faraday ; (11) Balance électronique ; (12) Electromètres (Keithley 6514) ; (13) Ordinateur. ....	83
Figure III-25. Mécanisme de charge par collision particule-particule et particule-paroi avec les parois en PVC, ABS et PC. ....	84
Figure IV-1. Séparation d'un mélange contenant les plastiques ABS, PS, PE et PP par flottaison. ....	87

Figure IV-2. Montage expérimental composé du séparateur électrostatique à tambour et du système d'acquisition de données. (1) Séparateur électrostatique ; (2) Cages de Faraday ; (3) Balances électroniques ; (4) Electromètres (Keithley 6514) ; (5) Ordinateur. ....	90
Figure IV-3. Séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante. (1) Table vibrante ; (2) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (3) Electrode reliée à une source de haute tension réversible ; (4) Brosse ; (5) Collecteur (C1 collecteur gauche, C2 collecteur droit). ....	90
Figure IV-4. Pureté (a) et récupération (b) des constituants séparés du mélange (ABS+PS), avec les parois (PVC, PMMA, PP, PE et PS) du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC (MPVC). ....	91
Figure IV-5. Pureté (a) et récupération (b) des constituants séparés du mélange (PP+PE) avec les parois (PVC, PMMA, PP, PE et PS) du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC (MPVC). ....	92
Figure IV-6. Pureté (a) et récupération (b) des constituants séparés du mélange (PP + PE + ABS) pour différentes parois du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC. ....	94
Figure IV-7. Puretés des constituants séparés du mélange (PP+PE+ABS) avec la paroi PS du lit fluidisé. ....	95
Figure IV-8. Pureté (a) et récupération (b) des constituants séparés du mélange (PP+PE+ABS +PS) pour différentes parois du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC. ....	96
Figure IV-9. Puretés des constituants séparés du mélange (PP+PE+ABS+PS) pour la paroi en PS du lit fluidisé. ....	97
Figure IV-10. Charge massique acquise par différents types de particules en fonction de l'humidité relative. ....	99
Figure IV-11. Pureté (a) et récupération (b) des constituants séparés du mélange (PS + ABS) en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant. ....	100
Figure IV-12. Pureté (a) et récupération (b) des constituants séparés du mélange (PP + PE) en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant. ....	101
Figure IV-13. Charge massique acquise des constituants séparés des mélanges, (a) PS + ABS, (b) PP + PE en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant. ....	101
Figure IV-14. Montage expérimental. (1) Dispositif de charge à cylindre tournant ; (2) Séparateur électrostatique à table vibrante ; (3) Collecteur composé de 13 compartiments. ....	103
Figure IV-15. Séparateur électrostatique à table vibrante. (a) plateau court ; (b) plateau moyen ; (c) plateau long. ....	105
Figure IV-16. Séparateur électrostatique à table vibrante avec un plateau de longueur moyenne (a) en parallèle (« II ») ; (b) en forme de « □ » ; (c) en forme de « Λ ». ....	105
Figure IV-17. Résultats de séparation obtenus avec les trois configurations d'électrodes. (a) Récupérations ; (b) Puretés des produits. ....	106
Figure IV-18. Résultats de séparation obtenus avec la configuration des électrodes en parallèle II. (a) Récupérations ; (b) Puretés des produits. ....	107
Figure IV-19. Résultat de séparation du mélange ABS / PVC obtenus avec la configuration d'électrodes en parallèle II, (Paroi en PVC, $U = \pm 16$ kV, $Am = 70\%$ ). ....	107
Figure IV-20. Résultats de séparation obtenu avec la configuration des électrodes en forme de « □ ». (a) Récupérations ; (b) Puretés des produits. ....	108
Figure IV-21. Résultat de séparation du mélange ABS / PVC obtenu avec la configuration d'électrodes en forme de « □ » (Paroi en PVC, $U = \pm 16$ kV, $Am = 70\%$ ). ....	108
Figure IV-22. Résultats de séparation obtenus avec la configuration des électrodes en forme de « Λ ». (a) Récupérations ; (b) Puretés des produits. ....	110
Figure IV-23. Résultat de séparation du mélange ABS / PVC obtenus avec la configuration des électrodes en forme de « Λ » (Paroi en PVC, $U = \pm 16$ kV, $Am = 70\%$ ). ....	110
Figure IV-24. Résultats de séparation obtenus en fonction du temps de chargement. (a) Récupérations ; (b) Puretés des produits. ....	112

Figure IV-25. Résultat de la séparation du mélange ABS / PVC obtenus avec la configuration des électrodes en forme de « V » (Paroi en PVC,  $t = 3$  min,  $U = \pm 16$  kV,  $Am = 70\%$ )..... 112

Figure IV-26. Résultats de séparation des mélanges de référence obtenus avec la configuration des électrodes en forme de « V ». (a) Mélange ABS / PS ; (b) Mélange PP / PE. .... 113

Figure IV-27. Résultats de la séparation des mélanges de référence obtenu avec la configuration des électrodes en forme de «  $\Lambda$  », (a) Mélange ABS / PS ; (b) Mélange PP / PE (Paroi en PVC,  $t = 3$  min,  $U = \pm 16$  kV,  $Am = 70\%$ ). .... 114

Figure IV-28. Iso-contours tracés par MODDE 5.0 en fonction des positions des électrodes selon l'axe X [cm] et l'axe Y [cm], à une tension de  $U = \pm 18$  kV, pour : (a) la pureté du HIPS ; (b) la récupération du HIPS ; (c) la pureté du PP ; (c) la récupération du PP..... 117

Figure IV-29. Valeurs optimales des facteurs et des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0.. 118

Figure IV-30. Iso-contours des produits en fonction de la vitesse de rotation du dispositif de charge (DDC)  $V_{DDC}$  (tr/min) et de la vitesse de rotation des électrodes  $V_{el}$  (tr/min), (a) pureté HIPS ; (b) récupération HIPS ; (c) pureté PP (d) récupération PP. .... 120

Figure IV-31. Optimisations prédites par le logiciel MODDE 5.0. .... 121

Figure IV-32. Photographies des résultats de séparation des mélanges de déchets réels de particules de taille entre 4 mm et 6 mm obtenus par le séparateur PRD, (a) Mélange ABS + PS ; (b) Mélange PP + PE. .... 122

Figure IV-33. Résultats de séparation des mélanges de déchets réels de particules de tailles entre 2 mm et 7 mm obtenus par le séparateur PRD, (a) Mélange ABS + PS ; (b) Mélange PP + PE..... 123

## TABLE DES TABLEAUX

Tableau I-1. Série triboélectrique obtenue par Bill Lee [60].....	6
Tableau I-2. Les caractéristiques des différents modèles de machines proposés par HAMOS [170]... 32	32
Tableau III-1. Charge massique ( $Q/m$ ) du PC, pour les 17 expériences du plan factoriel composite... 60	60
Tableau III-2. Comparaison entre les résultats prédits par MODDE 5.0 et ceux obtenus expérimentalement. ....	63
Tableau III-3. Charge massique acquise par différents types de particules grâce au dispositif de charge équipé du cylindre en PVC.....	63
Tableau III-4. Charge massique ( $Q/m$ ) de particules de PS pour un plan factoriel composite.....	77
Tableau III-5. Comparaison entre les résultats prédits par MODDE 5.0 et ceux obtenus expérimentalement .....	78
Tableau III-6. Surfaces internes et volumes des dispositifs de tribocharge multicylindre et monocylindre.....	81
Tableau III-7. Résumé des tests de charge et de séparation d'un seul produit et de mélange.....	84
Tableau IV-1. Masse volumique des plastiques. ....	87
Tableau IV-2. Charge massique des particules séparées pour les parois (PVC, PMMA, PP, PE et PS) du lit fluidisé et pour le dispositif à multicylindre en PVC (MPVC). ....	92
Tableau IV-3. Charge massique de particules séparées avec les parois (PVC, PMMA, PP, PE et PS) du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC (MPVC).....	93
Tableau IV-4. Charge massique des particules séparées pour différentes parois du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC pour un mélange de (PE+PP+ABS), (a) première séparation avec une tension +31 kV, (b) deuxième séparation, avec neutralisation du mélange et avec une tension de + 31 kV. ....	95
Tableau IV-5. Charge massique des particules séparées pour différentes parois du lit fluidisé et pour le dispositif multicylindre en PVC pour un mélange de (PE+PP+ABS+PS), (a) première séparation + 31 kV, (b) deuxième séparation récupération gauche + 31 kV, (c) deuxième séparation récupération droite + 31 kV.....	97
Tableau IV-6. Charge massique (nC/g) acquise par différents types de particules en fonction de l'humidité (%). ....	99
Tableau IV-7. Résultats de séparation obtenu avec la configuration des électrodes en parallèle. ....	107
Tableau IV-8. Résultats de séparation obtenus avec la configuration des électrodes en forme de $\square$ . 108	108
Tableau IV-9. Résultats de séparation obtenus avec la configuration des électrodes en forme de « $\Lambda$ ». ....	109
Tableau IV-10. Résultats de séparation du mélange PVC /ABS obtenu par la TVE (électrodes en forme de « $\square$ ») en fonction du temps de chargement. ....	111
Tableau IV-11. Récupérations et puretés des produits PP et HIPS collectés dans les 17 expériences.116	116
Tableau IV-12. Résultats des coefficients $Q^2$ et $R^2$ .....	117
Tableau IV-13. Comparaison des résultats du logiciel et expérimentaux. ....	119
Tableau IV-14. Récupérations et puretés des produits PP et HIPS collectés dans les 11 expériences.119	119
Tableau IV-15. Comparaison des résultats du logiciel et expérimentaux. ....	121



## LISTE DES PUBLICATIONS

### Articles dans des revues avec comité de lecture :

1. **I. E. Achouri**, T. Zeghloul, G. Richard, K. Medles, H. Nouri, and L. Dascalescu, "Factors that Influence the Performance of a Two-Rotating Disks-Type Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Micronized WEEE," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 1, pp. 802-811, Jan.-Feb. 2019.
2. **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," *Materials Science and Engineering*, Vol. 724 no. 1, p. 012048, January 2020, IOP Publishing.
3. **I. E. Achouri**, T. Zeghloul, G. Richard, K. Medles, K. Senouci, and L. Dascalescu, "Endurance Test for Evaluating the Performances of a Novel Rotating-Cylinder-Type Triboelectric Charging Device," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 6, pp. 7005-7011, 01 September 2020.
4. **I. E. Achouri**, G. Richard, T. Zeghloul, K. Medles, M.F. Boukhoulida, & L. Dascalescu, "Factors influencing the triboelectric charging of granular plastics in a new rotating multi-cylinder type device," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 4, pp. 4155-4161, 17 may 2021.

### Communications internationales :

1. **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," *International Conference on Tribology (ROTRIB'19)*, September 19-21, 2019, Cluj Napoca, ROMANIA.
2. **I. E. Achouri**, T. Zeghloul, G. Richard, K. Medles, K. Senouci, and L. Dascalescu, "Endurance test of a rotating-cylinder-type tribocharger," *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-4), 29 Sept.-3 Oct. 2019, Baltimore, MD, USA.
3. M. F. Boukhoulida, M. Rezoug, W. Aksa, **I. E. Achouri**, K. Medles, and Zeghloul, "Experimental study of a new tribocharging device for the electrostatic separation of mixed granular insulating materials," *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-3), 29 Sept.-3 Oct. 2019, Baltimore, MD, USA.
4. **I.E. Achouri**, G. Richard, T. Zeghloul, K. Medles, M. F. Boukhoulida and L. Dascalescu, "Factors influencing the triboelectric charging of granular plastics in a new multi-cylinder type device," *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, (pp. 1-4), 10-16 Oct. 2020, Detroit, MI, USA.
5. M. Maammar, T. Zeghloul, W. Aksa, **I.E. Achouri**, K. Medles and L. Dascalescu, "Experimental observation of charged particles trajectories in roll-type electrostatic separators," *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, (pp. 1-4), 10-16 Oct. 2020, Detroit, MI, USA.

6. **I. E. Achouri**, T. Zegloul, K. Medles, G. Richard and L. Dascalescu, " Multiple-rotating-cylinder-type Tribo-charger for Mixed Granular Polymers in view of Electrostatic Separation," *2021 Annual Meeting of the Electrostatics Society of America (ESA)*, 14-16 june 2021 Oklahoma, Etats-Unis.
7. **I. E. Achouri**, T. Zegloul, K. Medles, G. Richard and L. Dascalescu, "Tribo-Electrostatic separation of granular plastics mixtures of two or more granular plastics from WEEE," *2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, (pp. 1-6), 10-14 Oct. 2021, Vancouver, BC, Canada.

## REFERENCES

- [1] Forti, V., Balde, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential.
- [2] Haeusler, L., Guyot M., (2021). Déchets chiffres-clés, Édition 2020, *ADEME*, disponible sur :[https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/dechets\\_chiffres\\_cles\\_edition\\_2020\\_010692.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/dechets_chiffres_cles_edition_2020_010692.pdf).
- [3] Merrington, A. (2017). Recycling of plastics. In *Applied plastics engineering handbook* (pp. 167-189). William Andrew Publishing.
- [4] Lundquist, L., Leterrier, Y., Sunderland, P., & Månson, J. A. E. (Eds.). (2001). *Life cycle engineering of plastics: technology, economy and environment*. Elsevier.
- [5] Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste management*, 69, 24-58.
- [6] Chagnes, A., Cote, G., Ekberg, C., Nilsson, M., & Retegan, T. (Eds.). (2016). *WEEE recycling: research, development, and policies*. Elsevier.
- [7] Yuan, H., Fu, S., Tan, W., He, J., & Wu, K. (2015). Study on the hydrocyclonic separation of waste plastics with different density. *Waste management*, 45, 108-111.
- [8] Wang, C. Q., Wang, H., Fu, J. G., & Liu, Y. N. (2015). Flotation separation of waste plastics for recycling—A review. *Waste Management*, 41, 28-38.
- [9] Dascalescu, L., Zeghloul, T., & Iuga, A. (2016). Electrostatic separation of metals and plastics from waste electrical and electronic equipment. In *WEEE Recycling* (pp. 75-106). Elsevier.
- [10] Robin, J.J. (1998) *Etat de l'art concernant les methods de tri des matières plastiques*. RECORD, No. 96-0901/1A.
- [11] Wang, C., Wang, H., Fu, J., Zhang, L., Luo, C., & Liu, Y. (2015). Flotation separation of polyvinyl chloride and polyethylene terephthalate plastics combined with surface modification for recycling. *Waste Management*, 45, 112-117.
- [12] Maris, J., Bourdon, S., Brossard, J. M., Cauret, L., Fontaine, L., & Montembault, V. (2018). Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes. *Polymer Degradation and Stability*, 147, 245-266.
- [13] Dascalescu, L., Morar, R., Iuga, A., Samuila, A., & Neamtu, V. (1998). Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes. *Particulate Science and Technology*, 16(1), 25-42.

- [14] Whitelaw, W. (2002). *U.S. Patent No. 6,365,856*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, No 6,365,856, 2 avr. 2002.
- [15] Iuga, A., Cuglesan, I., Samuila, A., Blajan, M., Vadan, D., & Dascalescu, L. (2004). Electrostatic separation of muscovite mica from feldspathic pegmatites. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(2), 422-429.
- [16] Dwari, R. K., & Rao, K. H. (2009). Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator. *Minerals Engineering*, 22(2), 119-127.
- [17] Morar, R., Munteanu, R., Simion, E., Munteanu, I., & Dascalescu, L. (1995, October). Electrostatic treatment of bean seeds. In *IAS'95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting* (Vol. 2, pp. 1335-1337). IEEE.
- [18] Bohm, A., & Kratzer, A. (2010). *U.S. Patent No. 7,780,101*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [19] Hemery, Y., Chaurand, M., Holopainen, U., Lampi, A. M., Lehtinen, P., Piironen, V., ... & Rouau, X. (2011). Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part I: Influence of ultra-fine grinding. *Journal of Cereal Science*, 53(1), 1-8.
- [20] Beck, M. H., Rollend, G. F., Nichols, R. C., & Muszynski, J. (1992). *U.S. Patent No. 5,118,407*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [21] He, W., Li, G., Ma, X., Wang, H., Huang, J., Xu, M., & Huang, C. (2006). WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China. *Journal of hazardous materials*, 136(3), 502-512.
- [22] Li, J., Lu, H., Guo, J., Xu, Z., & Zhou, Y. (2007). Recycle technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards. *Environmental science & technology*, 41(6), 1995-2000.
- [23] Medles, K., Dascalescu, L., Tilmatine, A., Bendaoud, A., & Younes, M. (2007). Experimental modeling of the electrostatic separation of granular materials. *Particulate Science and Technology*, 25(2), 163-171.
- [24] Miloudi, M., Dascalescu, L., Li, J., El-Mossouess, S., & Medles, K. (2013). Tribo-aero-electrostatic separator for coarse granular insulating materials. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20(5), 1510-1515.
- [25] Zeghloul, T., Touhami, S., Richard, G., Miloudi, M., Dahou, O., & Dascalescu, L. (2016). Optimal operation of a plate-type corona-electrostatic separator for the recovery

- of metals and plastics from granular wastes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(3), 2506-2512.
- [26] Richard, G., Touhami, S., Zeghloul, T., & Dascalescu, L. (2017). Optimization of metals and plastics recovery from electric cable wastes using a plate-type electrostatic separator. *Waste Management*, 60, 112-122.
- [27] Hemery, Y., Rouau, X., Dragan, C., Bilici, M., Beleca, R., & Dascalescu, L. (2009). Electrostatic properties of wheat bran and its constitutive layers: Influence of particle size, composition, and moisture content. *Journal of Food Engineering*, 93(1), 114-124.
- [28] Stencil, J. M., Schaefer, J. L., Neathery, J. K., Ban, H., & Finseth, D. (2002). Electrostatic Particle Separation System, Apparatus, and Related Method. U.S. Patent No 6,498,313.
- [29] Chang, J. S., Kelly, A. J., & Crowley, J. M. (1995). *Handbook of electrostatic processes*. CRC Press.
- [30] Higashiyama, Y., & Asano, K. (1998). Recent progress in electrostatic separation technology. *Particulate science and technology*, 16(1), 77-90.
- [31] Dascalescu, L., Mizuno, A., Tobazeon, R., Atten, P., Morar, R., Iuga, A., ... & Samuila, A. (1995). Charges and forces on conductive particles in roll-type corona-electrostatic separators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(5), 947-956.
- [32] Dragan, C., Fati, O., Radu, M., Calin, L., Samuila, A., & Dascalescu, L. (2011). Tribocharging of mixed granular plastics in a fluidized-bed device. *IEEE transactions on industry applications*, 47(4), 1922-1928.
- [33] Boukhoulda, M. F., Miloudi, M., Medles, K., Rezoug, M., Tilmatine, A., & Dascalescu, L. (2013). Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(6), 2375-2381.
- [34] Lawver, J. E., Dyrenforth, W. P., & Moore, A. D. (1973). Electrostatic separation. In *Electrostatics and its Applications* (pp. 221-249). New York, NY: Wiley.
- [35] Trigwell, S., Grable, N., Yurteri, C. U., Sharma, R., & Mazumder, M. K. (2003). Effects of surface properties on the tribocharging characteristics of polymer powder as applied to industrial processes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(1), 79-86.
- [36] Lowell, J., & Rose-Innes, A. C. (1980). Contact electrification. *Advances in Physics*, 29(6), 947-1023.

- [37] Iuga, A., Vlad, S., Mihailescu, M., & Dascalescu, L. (2004). A laboratory plate/screen-type electrostatic separator for granular mixtures: Design, engineering, and application. *Particulate science and technology*, 22(3), 275-283.
- [38] Iuga, A., Samuila, A., Neamtu, V., Morar, R., Beleca, R., Das, S., & Dascalescu, L. (2010). Removal of metallic particles from acrylonitrile butadiene styrene wastes using electrostatic separation methods. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(1), 322-330.
- [39] Brands, L., Beier, P. M., & Stahl, I. (2000). Electrostatic separation. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*.
- [40] Manouchehri, H. R., Rao, K. H., & Forssberg, E. (2000). Review of electrical separation methods: Part 2: Practical considerations. *Minerals & metallurgical processing*, 17(3), 139-166.
- [41] Dascalescu, L., Urs, A., Dumitran, L. M., & Samuila, A. (2003). Charging of one or several cylindrical particles by monopolar ions in electric fields. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(2), 362-367.
- [42] Urs, A., Samuila, A., Mihalcioiu, A., & Dascalescu, L. (2004). Charging and discharging of insulating particles on the surface of a grounded electrode. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(2), 437-441.
- [43] Bendaoud, A., Tilmatine, A., Medles, K., Rahli, M., Huzau, M., & Dascalescu, L. (2008). Characterization of dual corona-electrostatic electrodes for electrostatic processes applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44(3), 692-698.
- [44] Colas, D. F., Ferret, A., Pai, D. Z., Lacoste, D. A., & Laux, C. O. (2010). Ionic wind generation by a wire-cylinder-plate corona discharge in air at atmospheric pressure. *Journal of Applied Physics*, 108(10), 103306.
- [45] Vlad, S., Iuga, A., & Dascalescu, L. (2000). Modelling of conducting particle behaviour in plate-type electrostatic separators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 33(2), 127.
- [46] Dascalescu, L., Dragan, C., Bilici, M., Beleca, R., Hemery, Y., & Rouau, X. (2010). Electrostatic basis for separation of wheat bran tissues. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(2), 659-665.
- [47] Lee, L. H. (1994). Dual mechanism for metal-polymer contact electrification. *Journal of electrostatics*, 32(1), 1-29.
- [48] Dascalescu, L., Bilici, M., Dragan, C., Samuila, A., Ramdani, Y., & Tilmatine, A. (2011). Robust Design and Capability Evaluation of a Tribo-Aerodynamic Charging

- Process for Fine Particles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(3), 1086-1092.
- [49] Castle, G. S. P. (1997). Contact charging between insulators. *Journal of Electrostatics*, 40, 13-20.
- [50] Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1989). The theory of electrostatic separations: A review Part I. Fundamentals. *Minerals Engineering*, 2(1), 33-46.
- [51] Wei, J., & Realf, M. J. (2003). Design and optimization of free-fall electrostatic separators for plastics recycling. *AIChE Journal*, 49(12), 3138-3149.
- [52] Pascoe, R. D., & O'Connell, B. (2003). Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation. *Minerals engineering*, 16(11), 1205-1212.
- [53] Diaz, A. F., & Felix-Navarro, R. M. (2004). A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties. *Journal of Electrostatics*, 62(4), 277-290.
- [54] Park, C. H., Jeon, H. S., Cho, B. G., & Park, J. K. (2007). Triboelectrostatic separation of covering plastics in chopped waste electric wire. *Polymer Engineering & Science*, 47(12), 1975-1982.
- [55] Park, C. H., Park, J. K., Jeon, H. S., & Chun, B. C. (2008). Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger. *Journal of Electrostatics*, 66(11-12), 578-583.
- [56] Sanford, F. (1918). On the Specific Inductive Capacity of Metals. *Physical Review*, 12(2), 130.
- [57] Sutra, G. (1950). La triboélectricité. *J. Phys. Radium*, 11(8-9), S1-S6.
- [58] Richards, H. F. (1923). The contact electricity of solid dielectrics. *Physical Review*, 22(2), 122.
- [59] Shaw, P. E. (1917). Experiments on tribo-electricity. I.—The tribo-electric series. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 94(656), 16-33.
- [60] Lee, B. W., & Orr, D. E. (2019). The Triboelectric Series, Alphaslab Inc. *AlphaLab, Inc.*
- [61] Galembeck, F., Burgo, T. A., Balestrin, L. B., Gouveia, R. F., Silva, C. A., & Galembeck, A. (2014). Friction, tribochemistry and triboelectricity: recent progress and perspectives. *Rsc Advances*, 4(109), 64280-64298.

- [62] McCarty, L. S., Winkleman, A., & Whitesides, G. M. (2007). Ionic electrets: electrostatic charging of surfaces by transferring mobile ions upon contact. *Journal of the American Chemical Society*, 129(13), 4075-4088.
- [63] Liu, C., & Bard, A. J. (2008). Electrostatic electrochemistry at insulators. *Nature materials*, 7(6), 505-509.
- [64] Lacks, D. J., & Sankaran, R. M. (2011). Contact electrification of insulating materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(45), 453001.
- [65] Lowell, J., & Truscott, W. S. (1986). Triboelectrification of identical insulators. II. Theory and further experiments. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 19(7), 1281.
- [66] Guardiola, J., Rojo, V., & Ramos, G. (1996). Influence of particle size, fluidization velocity and relative humidity on fluidized bed electrostatics. *Journal of Electrostatics*, 37(1-2), 1-20.
- [67] Thomas III, S. W., Vella, S. J., Kaufman, G. K., & Whitesides, G. M. (2008). Patterns of electrostatic charge and discharge in contact electrification. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(35), 6654-6656.
- [68] McCarty, L. S., & Whitesides, G. M. (2008). Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: contact electrification of ionic electrets. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(12), 2188-2207.
- [69] Diaz, A. F., & Guay, J. (1993). Contact charging of organic materials: Ion vs. electron transfer. *IBM Journal of Research and Development*, 37(2), 249-260.
- [70] Diaz, A. F., & Fenzel-Alexander, D. (1993). An ion transfer model for contact charging. *Langmuir*, 9(4), 1009-1015.
- [71] Hogue, M. D., Buhler, C. R., Calle, C. I., Matsuyama, T., Luo, W., & Groop, E. E. (2004). Insulator-insulator contact charging and its relationship to atmospheric pressure. *Journal of electrostatics*, 61(3-4), 259-268.
- [72] Gu, Z., Wei, W., Su, J., & Yu, C. W. (2013). The role of water content in triboelectric charging of wind-blown sand. *Scientific reports*, 3(1), 1-6.
- [73] Baytekin, B., Baytekin, H. T., & Grzybowski, B. A. (2012). What really drives chemical reactions on contact charged surfaces?. *Journal of the American Chemical Society*, 134(17), 7223-7226.
- [74] Lacks, D. J., & Levandovsky, A. (2007). Effect of particle size distribution on the polarity of triboelectric charging in granular insulator systems. *Journal of Electrostatics*, 65(2), 107-112.



- [75] Baytekin, H. T., Baytekin, B., Incorvati, J. T., & Grzybowski, B. A. (2012). Material transfer and polarity reversal in contact charging. *Angewandte Chemie International Edition*, 51(20), 4843-4847.
- [76] Da Silveira Balestrin, L. B., Del Duque, D., da Silva, D. S., & Galembeck, F. (2014). Triboelectricity in insulating polymers: evidence for a mechanochemical mechanism. *Faraday discussions*, 170, 369-383.
- [77] Salaneck, W. R., Paton, A., & Clark, D. T. (1976). Double mass transfer during polymer-polymer contacts. *Journal of Applied Physics*, 47(1), 144-147.
- [78] Pandey, R. K., Kakehashi, H., Nakanishi, H., & Soh, S. (2018). Correlating material transfer and charge transfer in contact electrification. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(28), 16154-16160.
- [79] Ireland, P. M. (2010). Triboelectrification of particulate flows on surfaces: Part I—Experiments. *Powder Technology*, 198(2), 189-198.
- [80] Mazuyer, D. (1989). La force de frottement limite. *Ecole Centrale de Lyon, Mécanique, Nd'ordre ECL*, 89.
- [81] Greenwood, J. A., & Williamson, J. P. (1966). Contact of nominally flat surfaces. *Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences*, 295(1442), 300-319.
- [82] Shinohara, I., Yamamoto, F., Anzai, H., & Endo, S. (1976). Chemical structure and electrostatic properties of polymers. *Journal of Electrostatics*, 2(2), 99-110.
- [83] Lowell, J., & Akande, A. R. (1988). Contact electrification-why is it variable?. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 21(1), 125.
- [84] Uyama, Y., & Ikada, Y. (1990). Electrostatic properties of UV-irradiated and surface-grafted polymers. *Journal of applied polymer science*, 41(3-4), 619-629.
- [85] Kodama, J., Foerch, R., McIntyre, N. S., & Castle, G. S. P. (1993). Effect of plasma treatment on the triboelectric properties of polymer powders. *Journal of applied physics*, 74(6), 4026-4033.
- [86] Matsusaka, S., Maruyama, H., Matsuyama, T., & Ghadiri, M. (2010). Triboelectric charging of powders: A review. *Chemical Engineering Science*, 65(22), 5781-5807.
- [87] Bekkara, M. F., Dascalescu, L., Benmimoun, Y., Zegloul, T., Tilmatine, A., & Zouzou, N. (2018). Modification of surface characteristic and tribo-electric properties of polymers by DBD plasma in atmospheric air. *The European Physical Journal Applied Physics*, 81(1), 10801.

- [88] Richard, G., Tilmatine, A., Benabderrahmane, A., Zegloul, T., Medles, K., & Dascalescu, L. (2018). Factors that affect tribocharging of Polyethylene (PE) granules after exposure to a dielectric barrier discharge (DBD). *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1), 812-816.
- [89] Nadjem, A., Kachi, M., Bekkara, F., Medles, K., Zegloul, T., & Dascalescu, L. (2017). Triboelectrification of granular insulating materials as affected by dielectric barrier discharge (DBD) treatment. *Journal of Electrostatics*, 86, 18-23.
- [90] Ireland, P. M. (2012). Dynamic particle-surface tribocharging: The role of shape and contact mode. *Journal of Electrostatics*, 70(6), 524-531.
- [91] Greason, W. D. (2000). Investigation of a test methodology for triboelectrification. *Journal of Electrostatics*, 49(3-4), 245-256.
- [92] Nomura, T., Satoh, T., & Masuda, H. (2003). The environment humidity effect on the tribo-charge of powder. *Powder Technology*, 135, 43-49.
- [93] Wiles, J. A., Fialkowski, M., Radowski, M. R., Whitesides, G. M., & Grzybowski, B. A. (2004). Effects of surface modification and moisture on the rates of charge transfer between metals and organic materials. *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(52), 20296-20302.
- [94] Xie, L., Bao, N., Jiang, Y., & Zhou, J. (2016). Effect of humidity on contact electrification due to collision between spherical particles. *AIP Advances*, 6(3), 035117.
- [95] Ramer, E. M., & Richards, H. R. (1968). Correlation of the electrical resistivities of fabrics with their ability to develop and to hold electrostatic charges. *Textile Research Journal*, 38(1), 28-35.
- [96] Nouri, H., Zouzou, N., Moreau, E., Dascalescu, L., & Zebboudj, Y. (2012). Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*, 70(1), 20-24.
- [97] Pence, S., Novotny, V. J., & Diaz, A. F. (1994). Effect of surface moisture on contact charge of polymers containing ions. *Langmuir*, 10(2), 592-596.
- [98] Nieh, S., & Nguyen, T. (1988). Effects of humidity, conveying velocity, and particle size on electrostatic charges of glass beads in a gaseous suspension flow. *Journal of Electrostatics*, 21(1), 99-114.
- [99] Elajnaf, A., Carter, P., & Rowley, G. (2006). Electrostatic characterisation of inhaled powders: effect of contact surface and relative humidity. *European journal of pharmaceutical sciences*, 29(5), 375-384.

- [100] Labair, H., Touhami, S., Tilmatine, A., Hadjeri, S., Medles, K., & Dascalescu, L. (2017). Study of charged particles trajectories in free-fall electrostatic separators. *Journal of Electrostatics*, 88, 10-14.
- [101] Dascalescu, L., Urs, A., Bente, S., Huzau, M., & Samuila, A. (2005). Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices. *Journal of electrostatics*, 63(6-10), 705-710.
- [102] Li, J., Wu, G., & Xu, Z. (2015). Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation. *Waste management*, 35, 36-41.
- [103] Blajan, M., Beleca, R., Iuga, A., & Dascalescu, L. (2010). Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation. *IEEE transactions on industry applications*, 46(4), 1558-1563.
- [104] Dodbiba, G., & Fujita, T. (2004). Progress in separating plastic materials for recycling. *Physical Separation in Science and Engineering*, 13(3-4), 165-182.
- [105] Higashiyama, Y., Ujiie, Y., & Asano, K. (1997). Triboelectrification of plastic particles on a vibrating feeder laminated with a plastic film. *Journal of Electrostatics*, 42(1-2), 63-68.
- [106] Inculet, I. I., Castle, G. S. P., & Brown, J. D. (1998). Electrostatic separation of plastics for recycling. *Particulate Science and Technology*, 16(1), 91-100.
- [107] Inculet, I. I., Castle, G. S. P., & Brown, J. D. (1994, October). Tribo-electrification system for electrostatic separation of plastics. In *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (Vol. 2, pp. 1397-1399). IEEE.
- [108] Wu, G., Li, J., & Xu, Z. (2013). Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review. *Waste management*, 33(3), 585-597.
- [109] Brown, J. D., Wynen, P. F., & Doyle, T. E. (2005). *U.S. Patent No. 6,927,354*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [110] Achouri, I. E., Zeghloul, T., Medles, K., Richard, G., & Dascalescu, L. (2020). Factors influencing the triboelectric charging of granular plastics in a rotating-cylinder-type tribocharger. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 724, No. 1, p. 012048). IOP Publishing.
- [111] Benabboun, A., Tilmatine, A., Brahami, Y., Bendimerad, S. E., Miloudi, M., & Medles, K. (2014). Experimental investigation of electrostatic separators of plastic particles using different charging devices. *Separation science and technology*, 49(3), 464-468.
- [112] Zelmat, M. E. M., Rizouga, M., Tilmatine, A., Medles, K., Miloudi, M., & Dascalescu, L. (2013). Experimental comparative study of different tribocharging devices

- for triboelectric separation of insulating particles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(3), 1113-1118.
- [113] Benabderrahmane, A., Zeghloul, T., Aksa, W., Tilmatine, A., Medles, K., & Dascalescu, L. (2019). Shredding as simultaneous size-reduction and tribo-charging operation for improved performances of an electrostatic separation process for granular plastic wastes. *Particulate Science and Technology*.
- [114] Menad, N. E. (2016). Physical separation processes in waste electrical and electronic equipment recycling. In *WEEE Recycling* (pp. 53-74). Elsevier.
- [115] Richard, G. (2018). *Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires* (Doctoral dissertation, Poitiers)..
- [116] Miloudi, M., Medles, K., Tilmatine, A., Brahami, M., & Dascalescu, L. (2011). Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials. *Journal of Electrostatics*, 69(6), 631-637.
- [117] Saeki, M., & Masumoto, A. (2007). Electrostatic separation of chopped waste electric cables. *Journal of environment and engineering*, 2(2), 227-236.
- [118] Benhafssa, A. M., Zeghloul, T., Messal, S., Dascalescu, L., & Medles, K. (2016). Factors that influence the efficiency of a propeller-type tribocharging device for granular plastics. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(2), 1446-1451.
- [119] Masuda, S., Toraguchi, M., Takahashi, T., & Haga, K. (1983). Electrostatic beneficiation of coal using a cyclone-tribocharger. *IEEE transactions on industry applications*, (5), 789-793.
- [120] Zelmat, M. E. M., Tilmatine, A., Rizouga, M., Gouri, R., Medles, K., & Dascalescu, L. (2013). Experimental analysis of a cyclone tribocharging device for free-fall triboelectric separation of plastic particles. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20(5), 1584-1589.
- [121] Zelmat, M. E. M., Rizouga, M., Tilmatine, A., Bendaoud, A., Medles, K., & Dascalescu, L. (2014). Experimental analysis of a vibrating tribocharging device of plastic particles for a free-fall electrostatic separator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(6), 4228-4232.
- [122] Yanar, D. K., & Kwetkus, B. A. (1995). Electrostatic separation of polymer powders. *Journal of Electrostatics*, 35(2-3), 257-266.
- [123] Dodbiba, G., Shibayama, A., Miyazaki, T., & Fujita, T. (2003). Triboelectrostatic separation of ABS, PS and PP plastic mixture. *Materials Transactions*, 44(1), 161-166.

- [124] Bilici, M., Dascalescu, L., Dragan, C., Fati, O., Iuga, A., & Samuila, A. (2011). Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18(5), 1476-1483.
- [125] Iuga, A., Calin, L., Neamtu, V., Mihalcioiu, A., & Dascalescu, L. (2005). Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device. *Journal of Electrostatics*, 63(6-10), 937-942.
- [126] Calin, L., Mihalcioiu, A., Iuga, A., & Dascalescu, L. (2007). Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification. *Particulate Science and Technology*, 25(2), 205-211.
- [127] Escalante, S. L., Touchard, G., & Dominguez, G. (2002, October). Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes. In *Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena* (pp. 694-697). IEEE.
- [128] Messal, S. (2016). *Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire* (Doctoral dissertation, Poitiers).
- [129] Geldart, D. (1973). Types of gas fluidization. *Powder technology*, 7(5), 285-292.
- [130] Mountain, J. R., Mazumder, M. K., Sims, R. A., Wankum, D. L., Chasser, T., & Pettit, P. H. (2001). Triboelectric charging of polymer powders in fluidization and transport processes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(3), 778-784.
- [131] Rezoug, M., Ouidir, R., Aksa, W., Medles, K., Bilici, M., & Dascalescu, L. (2014). Tribo-aero-electrostatic separator for ternary mixtures of granular plastics. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(2), 1161-1167.
- [132] Zelmat, M. E. M., Rizouga, M., Tilmatine, A., Medles, K., Miloudi, M., & Dascalescu, L. (2013). Experimental comparative study of different tribocharging devices for triboelectric separation of insulating particles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(3), 1113-1118.
- [133] Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P. S., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*, 115, 409-422.
- [134] Haldar, S. K. (2018). Chapter 13—Mineral Processing. *Mineral Exploration, 2nd ed.; Haldar, SK, Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands*, 259-290.
- [135] Calin, L., Caliap, L., Neamtu, V., Morar, R., Iuga, A., Samuila, A., & Dascalescu, L. (2008). Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44(4), 1045-1051.

- [136] Iuga, A., Morar, R., Samuila, A., & Dascalescu, L. (2001). Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 148(2), 47-54.
- [137] Gill, C. B. (1991). Electrostatic Separation. In *Materials Beneficiation* (pp. 141-147). Springer, New York, NY.
- [138] Li, J., & Dascalescu, L. (2012). Newly-patented technical solutions for improving the tribo-electrostatic separation of mixed granular solids. *Recent Patents on Engineering*, 6(2), 104-115.
- [139] Liu, C., & Wang, Q. (2021). Study on Electrostatic Preparation High-Ash Coal from China Using Roll-Type Electrostatic Separator and the Combustion Characteristics of the Cleaned Coal. *Processes*, 9(7), 1139.
- [140] Reriballah, H., Akxa, W., Touhami, S., Medles, K., Zeghloul, T., & Dascalescu, L. (2019). Experimental analysis of the operation of a free-fall separator equipped with four rotating cylinders. In *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-5). IEEE.
- [141] Benabderrahmane, A., Medles, K., Zeghloul, T., Renoux, P., Dascalescu, L., & Parenty, A. (2020). Triboelectric Charging and Electrostatic Separation of Granular Polymers Containing Brominated Flame Retardants. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(1), 915-922.
- [142] Ali, F. S., Inculet, I. I., & Tedoldi, A. (1999). Charging of polymer powder inside a metallic fluidized bed. *Journal of electrostatics*, 45(3), 199-211.
- [143] Wei, J., & Realf, M. J. (2005). Design and optimization of drum-type electrostatic separators for plastics recycling. *Industrial & engineering chemistry research*, 44(10), 3503-3509.
- [144] Richard, G., Salama, A., Medles, K., Zeghloul, T., & Dascalescu, L. (2017). Comparative study of three high-voltage electrode configurations for the electrostatic separation of aluminum, copper and PVC from granular WEEE. *Journal of Electrostatics*, 88, 29-34.
- [145] Akxa, W., Medles, K., Rezoug, M., Boukhoulda, M. F., Bilici, M., & Dascalescu, L. (2013). Two stage electrostatic separator for the recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment. *Journal of Electrostatics*, 71(4), 681-688.
- [146] Samuila, A., Dascalescu, L., Calin, L., Bilici, M., & Catinean, A. (2020, March). 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). AIP Publishing LLC.
- [147] Hamerski, F., Krummenauer, A., Bernardes, A. M., & Veit, H. M. (2019). Improved settings of a corona-electrostatic separator for copper concentration from waste printed circuit boards. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102896.
- [148] Salama, A., Richard, G., Medles, K., Zeghloul, T., & Dascalescu, L. (2018). Distinct recovery of copper and aluminum from waste electric wires using a roll-type electrostatic separator. *Waste Management*, 76, 207-216.
- [149] Dascalescu, L., Das, S., & Kumar, U. (2009). Numerical simulation of conductive particle behaviour at the surface of a plate electrode affected by a DC corona field. *Journal of Electrostatics*, 67(2-3), 167-172.
- [150] Reguig, A., Bendaoud, A., Dordizadeh, P., Salama, A. R., Messal, S., & Dascalescu, L. (2017). Experimental study of a modified dual-type high-voltage electrode for electrostatic separation applications. *Journal of Electrostatics*, 88, 232-235.
- [151] Messal, S., Corondan, R., Chetan, I., Ouiddir, R., Medles, K., & Dascalescu, L. (2015, September). 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). IOP Publishing.
- [152] Dwari, R. K., & Rao, K. H. (2009). Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator. *Minerals Engineering*, 22(2), 119-127.
- [153] Jeon, H. S., Park, C. H., Cho, B. G., & Park, J. K. (2009). Separation of PVC and rubber from covering plastics in communication cable scrap by tribo-charging. *Separation Science and Technology*, 44(1), 190-202.
- [154] Matsushita, Y., Mori, N., & Sometani, T. (1999). Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades. *Electrical engineering in Japan*, 127(3), 33-40.
- [155] Bendimerad, S., Tilmatine, A., Ziane, M., & Dascalescu, L. (2009). Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator. *International Journal of Environmental Studies*, 66(5), 529-538.
- [156] Barron, C., Abecassis, J., Chaurand, M., Lullien-Pellerin, V., Mabilille, F., Rouau, X., ... & Samson, M. F. (2012). Accès à des molécules d'intérêt par fractionnement par voie sèche. *Innovations Agronomiques*, 19, 51-62.
- [157] Dascalescu, L. (1993). Numerical analysis of the electric field of roll-type electrostatic separators. *Journal of electrostatics*, 29(3), 255-267.

- [158] Tilmatine, A., Medles, K., Bendimerad, S. E., Boukholda, F., & Dascalescu, L. (2009). Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures. *Waste management*, 29(1), 228-232.
- [159] Boukhoulda, M. F., Miloudi, M., Medles, K., Rezoug, M., Tilmatine, A., & Dascalescu, L. (2013). Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(6), 2375-2381.
- [160] Calin, L. F., & Dascalescu, L. (2013). *U.S. Patent No. 8,541,709*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [161] Miloudi, M., Remadnia, M., Dragan, C., Medles, K., Tilmatine, A., & Dascalescu, L. (2013). Experimental study of the optimum operating conditions of a pilot-scale tribo-aero-electrostatic separator for mixed granular solids. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(2), 699-706.
- [162] Miloudi, M., Medles, K., Bendaoud, A., Tilmatine, A., & Dascalescu, L. (2015). Improvement of the industrial pilot of a tribo-aero-electrostatic separator for binary mixtures of granular insulating materials. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(4), 3479-3484.
- [163] Fodil, B. M., Karim, M., Mohamed, M., Amar, T., Abdelber, B., & Dascalescu, L. (2013, October). Effect of ambient humidity on the outcome of electrostatic separation process for mixed granular polymers. In *2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-5). IEEE.
- [164] Benhafssa, A. M., Medles, K., Boukhoulda, M. F., Tilmatine, A., Messal, S., & Dascalescu, L. (2015). Study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(5), 4166-4172.
- [165] Achouri, I. E., Zeghloul, T., Richard, G., Medles, K., Nouri, H., & Dascalescu, L. (2018). Factors that influence the performance of a two-rotating disks-type tribo-aero-electrostatic separator for micronized WEEE. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1), 802-811.
- [166] Tilmatine, A., Benabboun, A., Brahmi, Y., Bendaoud, A., Miloudi, M., & Dascalescu, L. (2014). Experimental investigation of a new triboelectrostatic separation process for mixed fine granular plastics. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(6), 4245-4250.



- [167] Brahami, Y., Tilmatine, A., Ouiddir, R., Bendaoud, A., Medles, K., & Dascalescu, L. (2015). Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for micronized plastics. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(5), 4145-4150.
- [168] Smallwood, J. M. (2001). Electrostatic Recovery of Paper and Plastic Packaging Wastes (ELREC). *ERA Technology Ltd.*
- [169] Felsing, S., Kochleus, C., Buchinger, S., Brennholt, N., Stock, F., & Reifferscheid, G. (2018). A new approach in separating microplastics from environmental samples based on their electrostatic behavior. *Environmental Pollution*, 234, 20-28.
- [170] Hamos. hamos EKS electrostatic plastic/plastic separators, disponible sur: <https://www.hamos.com/infocenter/brochure.html#hamos/6>
- [171] Xiao, C., & Allen III, L. (2002). *U.S. Patent No. 6,452,126*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [172] Dragan, I. C. (2010). *Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aérodélectrostatique de matériaux plastiques granulaires* (Doctoral dissertation, Poitiers).
- [173] MILOUDI, M. (2012). *Application de la charge par effet triboélectrique des matériaux granulaires dans la séparation électrostatique* (Doctoral dissertation).
- [174] PRODECOLOGIA, Electrostatic separators type EBS-T (triboelectric), disponible sur: <https://www.directindustry.fr/prod/prodecologia-smf/product-165205-1879107.html>
- [175] Olivera, S., Muralidhara, H. B., Venkatesh, K., Gopalakrishna, K., & Vivek, C. S. (2016). Plating on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) plastic: a review. *Journal of materials science*, 51(8), 3657-3674.
- [176] Narita, S., Ichinohe, S., & Enomoto, S. (1959). Infrared spectrum of polyvinyl chloride. I. *Journal of Polymer Science*, 37(131), 273-280.
- [177] Bendler, J. T. (Ed.). (1999). *Handbook of polycarbonate science and technology*. CRC press.
- [178] Lin, L., & Argon, A. S. (1994). Structure and plastic deformation of polyethylene. *Journal of Materials Science*, 29(2), 294-323.
- [179] Maddah, H. A. (2016). Polypropylene as a promising plastic: A review. *Am. J. Polym. Sci*, 6(1), 1-11.
- [180] Lotz, B., & Kovacs, A. J. (1966). Propriétés des copolymères biséquencés polyoxyéthylène-polystyrène. *Kolloid-Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere*, 209(2), 97-114.
- [181] Benabderrahmane, A., Medles, K., Zegloul, T., Renoux, P., Dascalescu, L., & Parenty, A. (2019, September). Triboelectrostatic separation of brominated flame

- retardants polymers from mixed granular wastes. In *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-4). IEEE.
- [182] Achouri, I. E., Zeghloul, T., Richard, G., Medles, K., Dascalescu, L., & Senouci, K. (2020). Endurance Test for Evaluating the Performances of a Novel Rotating-Cylinder-Type Triboelectric Charging Device. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(6), 7005-7011.
- [183] Benabderrahmane, A. (2021). *Contribution à l'analyse des facteurs influents du processus de charge triboélectrique des matériaux granulaires* (Doctoral dissertation, Université de Poitiers; Université Djillali Liabès (Sidi Bel-Abbès, Algérie)).
- [184] Benabderrahmane, A., Zeghloul, T., Aksa, W., Tilmatine, A., Medles, K., & Dascalescu, L. (2019). Shredding as simultaneous size-reduction and tribo-charging operation for improved performances of an electrostatic separation process for granular plastic wastes. *Particulate Science and Technology*.
- [185] Achouri, I. E., Richard, G., Zeghloul, T., Medles, K., Boukhoulida, M. F., & Dascalescu, L. (2021). Factors influencing the triboelectric charging of granular plastics in a new rotating multi-cylinder type device. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- [186] Dascalescu, L., Medles, K., Das, S., Younes, M., Caliap, L., & Mihalcioiu, A. (2008). Using design of experiments and virtual instrumentation to evaluate the tribocharging of pulverulent materials in compressed-air devices. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44(1), 3-8.
- [187] Tinsson, W. (2010). *Plans d'expérience : constructions et analyses statistiques* (Vol. 67). Springer Science & Business Media.
- [188] Umetrics, A. B. (1999). Modde 5.0. user guide and tutorial. *Umetrics, Umea, Sweden*.

**Titre :** INSTALLATIONS DE SEPARATIONS TRIBO-ELECTROSTATIQUE DE MELANGES DE PLASTIQUES GRANULAIRES PROVENANT DES DECHETS D'EQUIPEMENTS ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES

**Résumé :** La séparation électrostatique désigne l'ensemble des méthodes qui font usage des forces exercées par le champ électrique sur des particules chargées ou polarisées, pour faire le tri des constituants de mélanges granulaires. L'efficacité et la qualité de la séparation électrostatique dépendent de la charge électrique acquise par les particules dans les dispositifs de tribochargement appropriés. L'objectif de cette thèse a été de trouver des solutions techniques viables aux problèmes de séparation électrostatique des matériaux plastiques granulaires, pour des applications au recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques. En effet, la société CITF, partenaire de cette thèse CIFRE, vise de pouvoir proposer à ses clients des installations capables d'assurer le traitement d'une gamme élargie de mélanges de plastiques granulaires recyclables, avec des rendements de séparation élevés et une meilleure efficacité énergétique. Afin d'atteindre cet objectif, la thèse a dû répondre en amont à plusieurs questions d'intérêt scientifique indéniable : (1) Quels mécanismes physiques (contact particule – particule, contact particule-parois) et quels types de dispositifs de charge (à vibrations, à cylindre tournant, à lit fluidisé...) s'adaptent à quels types de mélange de matériaux plastiques granulaires ? (2) Comment évaluer la faisabilité de la séparation triboélectrostatique d'un mélange ? (3) Quelles sont les limites des procédés actuels de séparation triboélectrostatique et quelles sont les solutions pour lever les verrous technologiques ? L'originalité de la démarche repose sur la mise en œuvre de techniques expérimentales de pointe pour une investigation pluridisciplinaire et multi-échelles des phénomènes triboélectriques, électrostatiques et aérodynamiques dont l'utilisation associée au prétraitement des matériaux par une décharge à barrière diélectrique rendrait possible la séparation de mélanges de matériaux plastiques granulaires de tailles < 10 mm.

**Mots-clés :** Séparation électrostatique, charge triboélectrique, DEEE.

**Title:** TRIBO-ELECTROSTATIC SEPARATION INSTALLATIONS FOR MIXTURES OF GRANULAR PLASTICS FROM WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT

**Abstract:** Electrostatic separation refers to all the methods that make use of the forces exerted by the electric field on charged or polarized particles, to sort the constituents of granular mixtures. The efficiency and quality of the electrostatic separation depends on the electric charge acquired by the particles in the appropriate tribocharging devices. The objective of this thesis was to find viable technical solutions to the problems of electrostatic separation of granular plastic materials, for applications in the recycling of waste electrical and electronic equipment. Indeed, the CITF company, partner of this CIFRE thesis, aims to be able to offer its customers facilities capable of processing a wide range of recyclable granular plastic mixtures, with high separation yields and elevated energy efficiency. In order to achieve this objective, the thesis had to respond in advance to several questions of undeniable scientific interest: (1) What physical mechanisms (particle - particle contact, particle-wall contact), and what types of charging devices (vibration, rotating cylinder, fluidized bed, etc.) for what types of mixture of granular plastic materials? (2) How to assess the feasibility of triboelectrostatic separation of a mixture? (3) What are the limits of current triboelectrostatic separation processes and what are the solutions to remove technological barriers? The originality of the approach is based on the implementation of cutting-edge experimental techniques for a multidisciplinary and multi-scale investigation of triboelectric, electrostatic and aerodynamic phenomena, the use of which associated with the pretreatment of materials by a dielectric barrier discharge would make possible the separation of mixtures of granular plastic materials of sizes <10 mm.

**Keywords:** Electrostatic separation, triboelectric charge, WEEE.