

THÈSE



Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS
UFR des sciences fondamentales et appliquées
Pôle poitevin de recherche pour l'ingénieur en mécanique, matériaux et énergétique -
PPRIMME (Poitiers)
(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)

École doctorale : Sciences et ingénierie en matériaux, mécanique, énergétique et aéronautique -
SIMMEA (Poitiers)
Secteur de recherche : Génie électrique

Présentée par :
Gontran Richard

Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires

Directeur(s) de Thèse :
Lucian Dascalescu, Thami Zeghloul

Soutenue le 12 avril 2018 devant le jury

Jury :

Président	Petru Notingher	Professeur, Institut d'Electronique du Sud, Université de Montpellier
Rapporteur	Khashayar Saleh	Enseignant Chercheur, département de Génie Chimique, Université de Technologie de Compiègne
Rapporteur	Jean-Luc Reboud	Professeur des Universités, Université De Grenoble Alpes
Membre	Lucian Dascalescu	Professeur des Universités, Université de Poitiers
Membre	Thami Zeghloul	Maître de conférences, Université de Poitiers
Membre	Eric Moreau	Professeur des Universités, Université de Poitiers
Membre	Jean-Charles Laurentie	Maître de conférences, Université de Montpellier
Membre	Khouira Senouci	Maître de conférences, Université de Sidi-bel-Abbès

Pour citer cette thèse :

Gontran Richard. *Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires* [En ligne]. Thèse Génie électrique. Poitiers : Université de Poitiers, 2018. Disponible sur Internet <<http://theses.univ-poitiers.fr>>

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)

Ecole Doctorale : Science et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Energétique et
Aéronautique

Secteur de Recherche : Génie électrique

Présentée par :

Gontran RICHARD

ETUDE EXPERIMENTALE ET OPTIMISATION FONCTIONNELLE DES INSTALLATIONS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MELANGES DE MATERIAUX GRANULAIRES

Directeur de Thèse : **Lucien DASCALESCU**
Co-encadreur de thèse : **Thami ZEGHLOUL**

Soutenue le 12 avril 2018

devant la Commission d'Examen

JURY

Jean-Luc REBOUD	Professeur, Université de Grenoble	Rapporteur
Kashayar SALEH	Professeur, Université de Technologie de Compiègne	Rapporteur
Petru NOTINGHER	Professeur, Université de Montpellier	Examineur
Khouira MEDLES-SENOUCI	Maître de Conférences, Université de Sidi-Bel-Abbès	Examineur
Jean-Charles LAURENTIE	Maître de Conférences, Université de Montpellier	Examineur
Eric MOREAU	Professeur, Université de Poitiers	Examineur
Lucien DASCALESCU	Professeur, Université de Poitiers	Examineur
Thami ZEGHLOUL	Maître de Conférences, Université de Poitiers	Examineur
Cédric LUBAT	Directeur Technique Development, CITF	Invité

Imagination is more important than knowledge.

A. Einstein

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, l'idée d'oublier de remercier certains me taraude. Je souhaite donc témoigner en premier lieu ma reconnaissance envers tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réussite de ce travail.

Je tiens à remercier **M. François LALUT**, PDG de l'entreprise CITF, et **M. Yves GERVAIS**, Directeur de l'Institut PPRIME, pour m'avoir accueilli dans leurs établissements respectifs ainsi que pour la confiance qu'ils m'ont accordée tout au long de ces trois ans.

Je désire également remercier chaleureusement **M. Lucien DASCALESCU** et **M. Thami ZEGHLOUL**, tous deux respectivement Professeur et Maître de Conférences à l'Institut Universitaire de Technologie d'Angoulême, pour le temps qu'ils m'ont consacré et les précieux et nombreux conseils qu'ils ont pu me prodiguer. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers **M. Cédric LUBAT**, Directeur Technique du département Développement de l'entreprise CITF et mon tuteur, pour son dynamisme et son soutien sans faille. Malgré la difficulté d'associer les objectifs de l'entreprise et ceux du laboratoire, vous avez tous les trois su créer les conditions parfaites à l'élaboration et au déroulement de cette thèse.

Je voudrais exprimer ma sincère reconnaissance envers **M. Jean-Luc REBOUD** et **M. Kashayar SALEH** pour avoir manifesté un grand intérêt pour le sujet en acceptant d'être les rapporteurs de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à **Mme. Khouira MEDLES-SENOUCI**, **M. Petru NOTINGHER**, **M. Jean-Charles LAURENTIE** et **M. Eric MOREAU** pour avoir accepté d'examiner la thèse.

Bien sûr, je n'oublie pas l'ensemble de mes collègues de l'entreprise CITF et de l'Institut PPRIME toujours prêts à apporter leur aide. Parmi eux, je tiens à remercier tout particulièrement **M. Arnaud CHAILLOU**, **M. Ronan GALLAND**, **M. Bastien SAUTON**, **M. Thomas FORESTIER** et **M. Aymeric FAUCONNET** pour leur disponibilité et leur bonne humeur communicative.

Je souhaite également remercier **M. Karim MEDLES**, **M. Jalil REGUIG**, **M. Fethi BEKKARA**, **M. Abdelkader BENHAFSSA**, **Mme Ahlem BENABDERRAHMANE**, **M. Bogdan NEAGOE** et **M. Yopa Eka PRAWATYA** pour les échanges scientifiques de grand intérêt que nous avons pu avoir.

Enfin, je tiens à remercier ma mère, ma famille et mes amis pour leur soutien et la patience dont ils ont fait preuve pendant ces trois ans et tout particulièrement ma compagne, **Marie**, qui a su me porter tout au long de ces trois ans.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	5
I-1. Mécanismes de charge électrique	5
I-1.1. Induction électrostatique	5
I-1.2. Effet couronne	7
I-1.3. Charge triboélectrique	10
I-2. Séparation électrostatique de matériaux granulaires.....	19
I-2.1. Séparation de matériaux conducteurs et isolants.....	19
I-2.2. Séparation de matériaux conducteurs.....	29
I-2.3. Séparation de matériaux isolants	30
I-3. Décharge à Barrière Diélectrique (DBD)	41
I-3.1. Notions générales sur les plasmas	41
I-3.2. Décharges à Barrière Diélectrique volumique	42
I-3.3. Traitement de surface par plasma froid.....	47
I-4. Conclusions.....	49
CHAPITRE II : INSTALLATIONS EXPÉRIMENTALES ET MÉTHODES D’ANALYSE. 50	
II-1. Caractérisation des matériaux.....	50
II-1.1. Particules « modèles » de déchets de câbles électriques.....	50
II-1.2. Déchets de câbles électriques.....	51
II-1.3. Déchets plastiques issus de DEEE	53
II-2. Installations de séparation électrostatiques de matériaux granulaires	54
II-2.1. Installations de séparations de mélanges conducteur – isolant et conducteur – conducteur.....	54
II-2.2. Installations pour la charge et la séparation de mélanges isolant – isolant.....	63
II-3. Installation de Décharges à Barrières Diélectriques.....	66
II-4. Techniques de mesures et méthode des plans d’expériences	67
II-4.1. Visualisation des trajectoires des particules par caméra rapide.....	68
II-4.2. Mesure de la charge électrique de particules isolantes	68
II-4.3. Méthode des plans d’expériences	69
II-5. Conclusions	72

CHAPITRE III : PROCÉDÉS DE SÉPARATION ÉLECTROSTATIQUE DE MÉLANGES GRANULAIRES CONDUCTEUR – ISOLANT..... 73

III-1. Comparaison entre deux configurations d'électrodes d'un séparateur électrostatique à plaque [191].....	73
III-1.1. Procédure expérimentale	73
III-1.2. Résultats expérimentaux	77
III-1.3. Optimisation du processus et discussion des résultats par modélisation numérique	83
III-2. Etude de l'influence des tailles et des formes des particules. Comparaison entre des particules « modèles » et réelles [193]	84
III-2.1. Procédure expérimentale	85
III-2.2. Application aux déchets de câbles électrique souples	86
III-2.3. Application aux déchets de câbles électriques rigides.....	91
III-3. Application industrielle	96
III-4. Conclusions	100

CHAPITRE IV : PROCÉDÉS DE SÉPARATION ÉLECTROSTATIQUE DE MÉLANGES GRANULAIRES CONDUCTEUR – CONDUCTEUR 102

IV-1. Programme de calcul numérique des trajectoires	102
IV-2. Application à la séparation cuivre – cuivre étamé [195]	107
IV-2.1. Procédure expérimentale	107
IV-2.2. Estimation des résultats par simulation numérique	109
IV-2.3. Résultats expérimentaux.....	111
IV-2.4. Discussion des résultats par visualisation des trajectoires	115
IV-3. Application à la séparation cuivre – aluminium [196].....	118
IV-3.1. Procédure expérimentale	118
IV-3.2. Résultats et comparaison avec les trajectoires réelles	119
IV-4. Application à la séparation cuivre – aluminium – isolants [197]	128
IV-4.1. Procédure expérimentale	128
IV-4.2. Comparaison des résultats obtenus avec trois configurations d'électrodes haute tension	130
IV-5. Conclusions	133

CHAPITRE V : PROCÉDÉS DE CHARGE ÉLECTRIQUE ET DE SÉPARATION ÉLECTROSTATIQUE DE MÉLANGES GRANULAIRES ISOLANT – ISOLANT 135

V-1. Dispositif de charge à cylindre tournant..... 135
 V-1.1. Optimisation de la charge acquise 136
 V-1.2. Séries triboélectriques..... 139
V-2. Application à la séparation de mélanges isolant – isolant..... 141
 V-2.1. Procédure expérimentale 141
 V-2.2. Résultats obtenus avec le tube en PEHD 142
 V-2.3. Résultats obtenus avec le tube en PVC..... 146
V-3. Application industrielle 150
V-4. Conclusions 155

CHAPITRE VI : APPLICATION DE LA DÉCHARGE À BARRIÈRE DIELECTRIQUE À LA CHARGE ÉLECTRIQUE ET À LA SÉPARATION ÉLECTROSTATIQUE DE MÉLANGES GRANULAIRES ISOLANT – ISOLANT 157

VI-1. Etude de la charge de particules après traitement par DBD 157
 VI-1.1. Procédure expérimentale 157
 VI-1.2. Application au traitement de particules de PP [201] 158
 VI-1.3. Application au traitement de particules de PE [206]..... 160
VI-2. Charge triboélectrique et séparation électrostatique de mélanges isolant – isolant.. 165
 VI-2.1. Séries triboélectriques de particules isolantes soumises à une DBD 165
 VI-2.2. Séparation électrostatique de particules isolantes traitées par DBD 167
VI-3. Conclusions..... 172

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES..... 173

SIGLES DES PLASTIQUES..... 177

TABLE DES FIGURES 178

TABLE DES TABLEAUX..... 185

BIBLIOGRAPHIE..... 187

Liste des publications..... 202

ANNEXES 204

Annexe I : Vue 3D du prototype de séparateur industriel PRD I

Annexe II : Vue 3D du séparateur électrostatique industriel de série CP100 II

Annexe III : Visualisation de l'état de surface et spectrométrie infrarouge d'une plaque de PP avec traitement par DBD..... III

Annexe IV : Récapitulatif des puretés des produits obtenus pour les différentes configurations étudiées pour la séparation de mélanges isolant – isolant V

INTRODUCTION

Précurseur du recyclage, la collecte et la gestion des déchets datent de -3000 avant Jésus-Christ. En 500 avant J-C, Athènes crée la première décharge municipale et oblige ses citoyens à y placer leurs déchets. Au fil des siècles, les villes se multiplient, les populations augmentent ainsi que les déchets qui s'amoncellent dans les rues et créent des problèmes sanitaires. Au XIX^{ème} siècle, la révolution industrielle permet un nouvel essor des activités de recyclage et c'est à partir des années 1970 que la prise de conscience du problème environnemental accélère encore le recyclage professionnel. Aujourd'hui, cette prise de conscience des populations et des états sur les ressources limitées de notre planète aboutit à des réglementations de plus en plus strictes sur l'ensemble des déchets dont la quantité augmente encore d'année en année.

Depuis ses vingt dernières années, la technologie moderne engendre une explosion de la consommation des Equipements Electriques et Electroniques (EEE) et des déchets qui y sont associés appelés DEEE (Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques). Les EEE regroupent les équipements fonctionnant grâce à un courant électrique ou à un champ électromagnétique [1]. Les équipements de production, de transfert ou de mesure de ces courants (ou champs) sont également compris dans cette catégorie. Ce terme regroupe donc un nombre important d'appareils aux poids et dimensions très variés tels que les machines à laver, téléphones, ordinateurs, télévisions, perceuses, distributeurs automatiques... que tout à chacun utilise quotidiennement. Ces objets sont à la fois composés de métaux (parfois précieux) et de matériaux isolants (souvent issus de produits pétroliers). Leur point commun étant qu'ils sont tous naturellement issus de ressources fossiles dont l'extraction est limitée aussi bien en termes de quantité qu'en termes de technologie nécessaire. Leur recyclage est donc indispensable et nécessite une ou plusieurs étapes. La plupart des matériaux ne peuvent pas être recyclés en mélange. En effet, les caractéristiques physico-chimiques (mécanique, électrique, thermique...) des matériaux recyclés en mélange sont souvent moindres que celles des matériaux d'origine. Une étape indispensable au recyclage est donc le tri en fractions séparées des éléments composant initialement le(s) déchet(s).

De nombreuses solutions de tri existent au niveau industriel allant du tri optique au tri densimétrique en passant par le tri manuel ou le criblage [2]. La plupart de ces installations sont gourmandes en énergie et ne permettent pas de séparer tous les types d'éléments composant les déchets.

Les séparateurs électrostatiques font partie de ces technologies de tri et ont l'avantage d'être économes en énergie et de pouvoir séparer (sous certaines conditions) aussi bien des mélanges de plusieurs conducteurs, des mélanges conducteurs-isolants et des mélanges de plusieurs isolants. Ce type d'installations utilise les propriétés électriques des matériaux à séparer en les chargeant électriquement puis en les plaçant dans un champ électrique intense créé par un système d'électrodes. La séparation électrostatique, peu énergivore, est de plus en

plus utilisée pour le recyclage des métaux. En effet, les difficultés croissantes d'extraction des minéraux, l'épuisement des ressources et la préservation de l'environnement font de cette technologie l'une des plus viables actuellement [3].

Pour répondre aux besoins grandissant du secteur du recyclage, l'équipe « Tribo-électrostatique » de l'Institut PPRIME, sur le site de l'IUT d'Angoulême, a mené de nombreuses recherches sur la mise au point de procédés efficaces utilisant les champs électriques intenses pour la séparation de matériaux granulaires et pulvérulents. Pour le tri des plastiques, les séparateurs à chute libre sont d'ores et déjà très largement utilisés dans l'industrie [4], [5]. Un partenariat avec la société APR2 a abouti, en 2009, à un brevet d'invention Français d'une installation capable d'effectuer la séparation tribo-aéro-électrostatique de déchets plastiques d'Equipements Electriques et Electroniques. Ce séparateur est capable de séparer des mélanges granulaires isolants dont les tailles des particules varient entre 1 mm et 6 mm [6]. La séparation des matériaux pulvérulents (dimension caractéristique inférieure au millimètre) est également un sujet important au sein de l'Institut PPRIME. Ce domaine est notamment utile pour l'industrie agro-alimentaire [7] ou encore la bio-raffinerie qui consiste à déstructurer et fractionner des matières végétales en différents éléments valorisables appelés agro-ressources. Ces dernières peuvent s'intégrer dans les domaines des bioénergies, des biomatériaux ou encore des cosmétiques [8], [9]. La séparation électrostatique sert ici à optimiser la production des agro-ressources.

La société CITF, basée à St Cybardeaux en Charente, est, depuis 2009, spécialisée dans la conception et la fabrication de machines spéciales et ne cesse de développer ses activités. En 2014, l'entreprise crée deux autres pôles qui se concentrent respectivement sur la supervision de lignes de production et sur la recherche et le développement d'installations industrielles liées au recyclage. Ce dernier, le pôle « Development », souhaite alors, dans un premier temps, concevoir et construire des installations permettant la séparation des éléments composants les câbles électriques en vue de leur recyclage. Un partenariat avec l'Institut PPRIME voit alors naturellement le jour. Ainsi, fin 2014, CITF construit, sur la base du prototype de laboratoire de l'équipe « Tribo-électrostatique », un prototype de séparateur électrostatique permettant la séparation des composants conducteurs et isolants des câbles électriques suite à la mise en place d'un dispositif « Prim'Innov ».

Dans la continuité de ce projet, l'entreprise CITF, en collaboration avec l'Institut PPRIME, commence cette thèse dans l'objectif d'améliorer le prototype existant et de déterminer la faisabilité de la séparation électrostatique de plusieurs types de mélanges granulaires (particules de longueurs caractéristiques supérieures au millimètre) qu'ils soient composés de plusieurs conducteurs, de plusieurs isolants ou à la fois d'isolants et de conducteurs. L'objectif principal de CITF est de pouvoir proposer à ses clients un panel de séparateurs électrostatiques convenant à leurs besoins. Ce partenariat permet également à l'Institut PPRIME de continuer ces recherches appliquées et de résoudre quelques difficultés liées à certains mélanges.

L'objectif de cette thèse est de démontrer la faisabilité de la séparation électrostatique d'une large gamme de mélanges de matériaux granulaires dans le but d'améliorer et/ou de permettre leur recyclage tout en réfléchissant aux potentielles applications industrielles et aux difficultés qu'elles impliquent. Trois mécanismes de charge électrique des matériaux ont été étudiés : l'induction électrostatique, la décharge couronne et la charge triboélectrique. Une installation de laboratoire et deux installations industrielles ont été réalisées. Pour la première, le dispositif de charge à cylindre(s) tournant(s), contribue à la compréhension de la charge triboélectrique de matières plastiques par effet triboélectrique alors que les deux séparateurs industriels permettent une meilleure appréhension de l'adaptation industrielle de tels procédés. La première installation industrielle, qui est un prototype, permet la séparation de mélange conducteur-isolant mais a également été adapté pour la séparation isolant - isolant. La seconde installation industrielle est la première machine de série créée par CITF et permet uniquement la séparation électrostatique de composants de déchets de câbles électriques.

Dans le **chapitre I**, l'état actuel des connaissances sur les mécanismes régissant les séparateurs électrostatiques et leurs applications (de laboratoires ou industrielles) sera exposé afin d'identifier les nouveaux défis scientifiques et techniques auxquels la thèse souhaite répondre.

Les installations utilisées ainsi que les méthodes de mesures et d'analyses seront présentées dans le **chapitre II**. Dans un premier temps, l'ensemble des matériaux (conducteurs et isolants) étudiés seront caractérisés. Il s'agit de matériaux issus du broyage de déchets de câbles électriques ou de Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques. Ensuite, les séparateurs de laboratoires et industriels seront décrits. Enfin, les méthodes de mesures ainsi que celle des plans d'expériences seront détaillées.

La séparation électrostatique de mélanges granulaires conducteurs – isolants sera étudiée dans le **chapitre III** en faisant une distinction entre particules « modèles » (de tailles et de formes constantes) et particules broyées (obtenues par le biais d'un broyeur industriel). D'un point de vue industriel, les configurations les plus simples sont souvent les plus robustes et sont donc préférées. C'est pourquoi l'efficacité de deux systèmes d'électrodes, de géométries différentes, composant le séparateur électrostatique à plaque sera évaluée. Enfin, une application industrielle et les adaptations nécessaires à son fonctionnement seront présentées.

Une fois les différentes particules conductrices et isolantes séparées en fractions distinctes, il est important de procéder au tri des différents éléments afin de garantir la meilleure pureté possible des produits et ainsi de garantir la fabrication de matières recyclées aux propriétés physico-chimiques au plus proche de celles des matières neuves. C'est pourquoi, l'objectif du **chapitre IV** est d'appliquer la séparation électrostatique à des mélanges conducteur – conducteur. Une simulation numérique ainsi qu'une visualisation par caméra rapide des trajectoires des particules conductrices seront effectuées afin de mieux comprendre le comportement de celles-ci dans un séparateur électrostatique à tambour. Les résultats obtenus en laboratoire montrent que la séparation de certains mélanges conducteur –

conducteur est possible, donnant à CITF les clés permettant le développement d'une telle installation en cas de demande commerciale.

Les métaux se vendent actuellement plus cher que les matières plastiques. Pourtant, le pétrole (dont sont issus les plastiques) se fait de plus en plus rare et sera un jour ou l'autre introuvable sur notre planète. Le recyclage des plastiques est donc un enjeu important pour les années à venir et CITF souhaite faire partie des pionniers français dans le domaine de la séparation électrostatique de tels mélanges. Le **chapitre V** se concentre donc sur l'application de séparateurs électrostatiques au tri de mélanges de plastiques granulaires. Un nouveau dispositif de charge des particules isolantes a été conçu au sein de l'Institut PPRIME et un prototype de séparateur industriel a été mis au point chez CITF. L'étude portera donc sur la charge de nombreuses matières et la séparation de mélanges caractéristiques.

Le **chapitre VI** portera sur l'application de la Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) à la charge et à la séparation de mélanges plastiques. En effet, la Décharge à Barrière Diélectrique est utilisée pour le traitement de surface et pour la purification de l'air. Dans ce chapitre, l'influence de ce traitement de surface sera étudiée sur des particules isolantes afin de voir son effet sur leur charge triboélectrique en vue d'améliorer leur séparation électrostatique.

Les procédés de séparations électrostatiques sont des solutions efficaces pour la séparation de mélanges de matériaux granulaires quels qu'ils soient et peuvent être très largement appliqués dans l'industrie, là où le recyclage se fait de plus en plus important. Les principales contributions apportées par la thèse dans ce domaine ainsi que les perspectives qui en découlent sont décrites dans la **conclusion générale** clôturant ce mémoire.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La séparation des matériaux granulaires représente aujourd'hui un important domaine d'application industrielle de l'électrostatique. Le tri des matériaux granulaires dans les séparateurs électrostatiques est produit par les forces qui agissent sur les particules chargées et qui sont soumises à un champ électrique intense [4], [10], [11]. A cause de leurs caractéristiques physiques différentes, la charge acquise diffère, tout comme les trajectoires des particules [3], [12]. C'est ce qui permet la séparation des matériaux.

La charge électrique peut prendre deux formes que l'expérience amène à considérer comme « opposées ». On les qualifie arbitrairement de positives et négatives. Deux charges de même nature, par exemple deux charges positives, se repoussent, alors que deux charges opposées s'attirent. L'unité de la charge électrique, qui est mesurable par un électromètre, est le Coulomb (du nom du physicien Charles-Augustin Coulomb).

Les charges électriques interviennent dans de nombreux phénomènes. Le premier phénomène qui nous intéresse est la force F d'attraction ou de répulsion qui existe entre deux corps ayant les charges Q_1 et Q_2 , situés à une distance d l'un par rapport à l'autre.

Le paragraphe I-1 de cet état de l'art vise à décrire les différents mécanismes permettant la charge électrique des particules dans l'objectif de leur séparation électrostatique ainsi que les dispositifs correspondants. Le second paragraphe, I-2, présente une synthèse de différents séparateurs électrostatiques exclusivement appliqués aux mélanges conducteur – isolant, conducteur – conducteur et isolant – isolant. Certains brevets d'invention (publiés dans la base de données de l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI)) et certaines installations industrielles déjà existantes seront également décrits. Enfin, le paragraphe I-3 portera sur la Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) et décrira succinctement les plasmas ainsi que les décharges volumiques et les traitements de surface par plasma.

I-1. Mécanismes de charge électrique

La séparation électrostatique de mélanges de matériaux, granulaires ou pulvérulents, ne peut se faire que si leurs composants portent des charges électriques différentes. Plusieurs mécanismes physiques peuvent générer ces charges électriques [13-16]. Les trois principaux sont : l'induction électrostatique, la décharge (ou effet) couronne et la triboélectricité.

I-1.1. Induction électrostatique

L'induction électrostatique est un phénomène créant un déplacement de charges électriques dans un objet, initialement électriquement neutre, par le biais d'un second objet électriquement chargé, sans contact direct entre eux. L'objet chargé génère un champ électrique qui provoque la polarisation de l'objet neutre. Ainsi, les charges positives et négatives présentes dans l'objet neutre vont se séparer et s'organiser en deux pôles situés aux deux extrémités de l'objet. Si celui-ci est conducteur et en contact avec la terre, les charges

proches du point de contact s'évacuent vers la terre. De ce fait, la charge électrique globale n'est plus nulle.

Par définition, un objet isolant ne transmet pas de charges électriques. Il ne peut donc pas être chargé par induction électrostatique [17]. L'induction électrostatique s'appliquera donc uniquement à la séparation de mélanges conducteur – isolant et conducteur – conducteur.

La figure I-1 illustre le mécanisme de charge par induction électrostatique d'une particule conductrice initialement neutre déposée sur une électrode plaque connectée à la terre puis soumise à un champ électrique créé par une électrode elliptique reliée à une source de haute tension de polarité négative. Sous l'action de ce champ électrique, la particule va successivement se polariser (deux pôles, l'un positif, l'autre négatif vont se créer au sein même de la particule), évacuer les charges négatives vers la terre et acquerra donc une charge globalement positive.

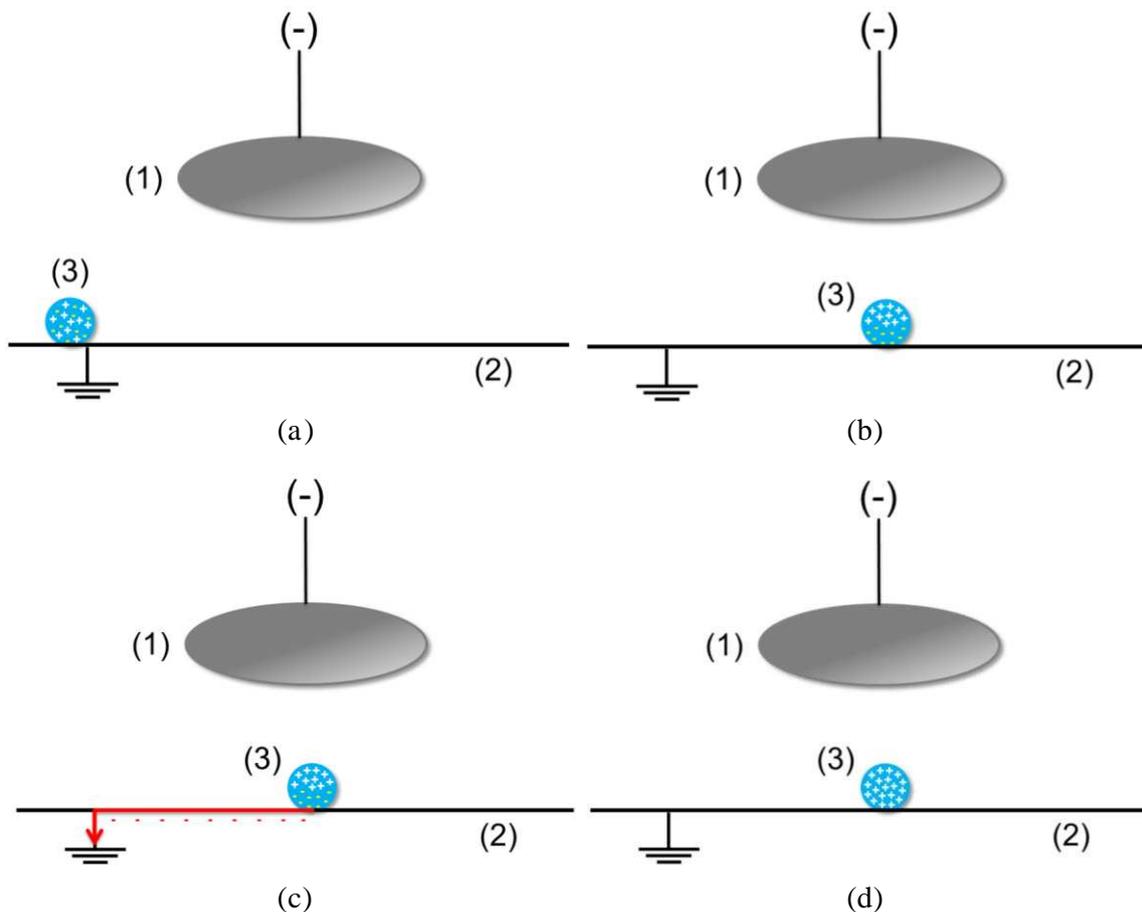


Figure I-1 : Représentation schématique de l'induction électrostatique. (a) Particule conductrice initialement neutre ; (b) Particule conductrice polarisée sous l'action du champ électrique ; (c) Ecoulement des charges négatives vers la terre ; (d) Particule conductrice chargée positivement. (1) Electrode elliptique reliée à une source de haute tension négative ; (2) Electrode plaque reliée à la terre ; (3) Particule conductrice.

Une multitude d'électrodes peuvent être utilisées pour générer le champ électrique nécessaire à l'induction électrostatique. Elles peuvent être de toutes formes mais sont le plus souvent cylindriques ou elliptiques. La présence d'arrêtes sur ces électrodes est proscrite afin

d'éviter toute décharge et diminuer le risque de passage à l'arc électrique. La forme elliptique est beaucoup utilisée dans les séparateurs électrostatiques pour étendre et uniformiser le champ. La figure I-2 représente deux types d'électrodes servant à l'induction électrostatique.

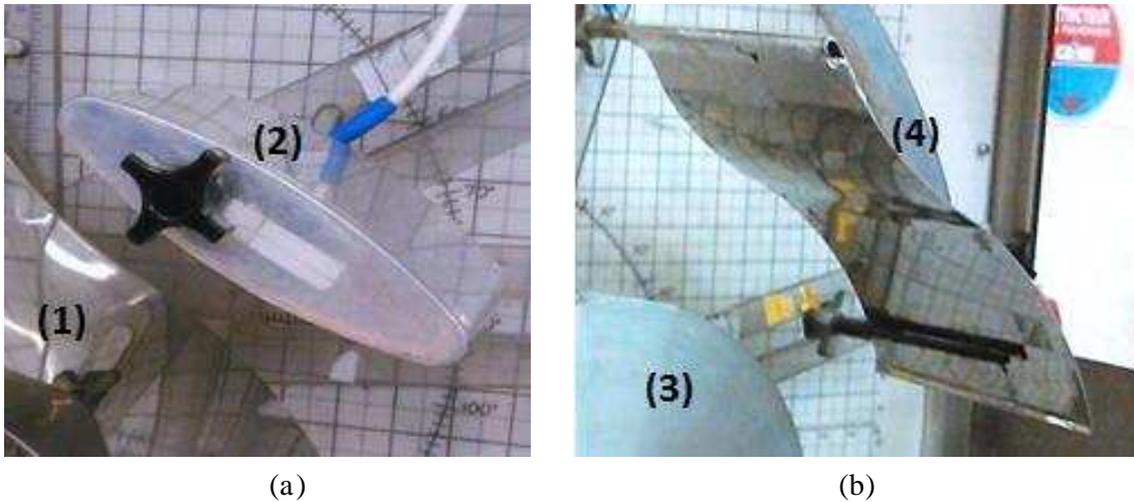


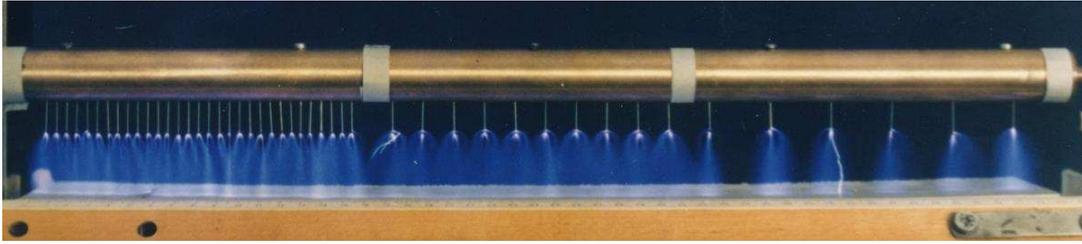
Figure I-2 : Electrodes statiques utilisées pour la charge par induction électrostatique. (a) Séparateur électrostatique à plaque ; (b) Séparateur électrostatique à tambour. (1) Electrode plaque en forme de « S » reliée à la terre ; (2) Electrode elliptique reliée à une source de haute tension ; (3) Electrode cylindrique reliée à la terre ; (4) Electrode plaque en forme de « S » reliée à une source de haute tension.

I-1.2. Effet couronne

Au départ simplement observée lors de phénomènes climatiques intenses, l'effet couronne possède actuellement bon nombre d'applications dans divers domaines. Cet effet est notamment utilisé dans la filtration de l'air par précipitation électrostatique [18], [19], la projection de peinture par pistolet électrostatique, le chargement électrique de films plastiques et de média textiles [20] et bien sûr dans la séparation électrostatique [21], [22].

Une électrode couronne (figure I-3) charge les granules par bombardement ionique. Un support cylindrique, en métal, sur lequel est fixé un fil, une lame ou une (ou plusieurs) lignes de pointes métalliques, est connecté à un générateur de haute tension continue. Les électrodes couronne à fil, par leur facilité de réalisation et leur faible coût de revient, sont les plus appréciés dans l'industrie.

Toutefois, leur utilisation n'est pas toujours optimale pour la séparation de mélanges conducteur – isolant [23-25]. En effet, la présence dans le mélange de particules conductrices réduit la rigidité diélectrique de l'espace inter-électrode ce qui augmente le risque d'apparition d'arcs électriques entre l'électrode couronne et celle reliée à la terre sur laquelle sont placées les particules à charger. Ainsi, il est important d'utiliser une électrode couronne capable de bien charger les particules pour de faibles tension.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure I-3 : Différentes configurations d'électrodes couronnes. (a) Electrode à points (image fournie par le Professeur Alexandru Iuga, de l'Université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie) ; (b) Electrode à fil ; (c) Electrode peigne ; (d) Electrode couronne type tige filetée.

De plus, la présence de poussières dans les mélanges industriels diminue l'efficacité de telles électrodes. Or, leur nettoyage est complexe. L'électrode type tige filetée est très efficace et facilement nettoyable par l'utilisation d'un balai et se révèle donc être un bon choix pour une application industrielle.

L'effet couronne est lié à l'ionisation de l'air dans la zone de champ électrique très intense produit à la surface d'une telle électrode à faible rayon de courbure.

Les granules soumis au bombardement ionique, généré par cette électrode, vont se charger avec la même polarité que la source de haute tension à laquelle l'électrode couronne est connectée (figure I-4) [26].

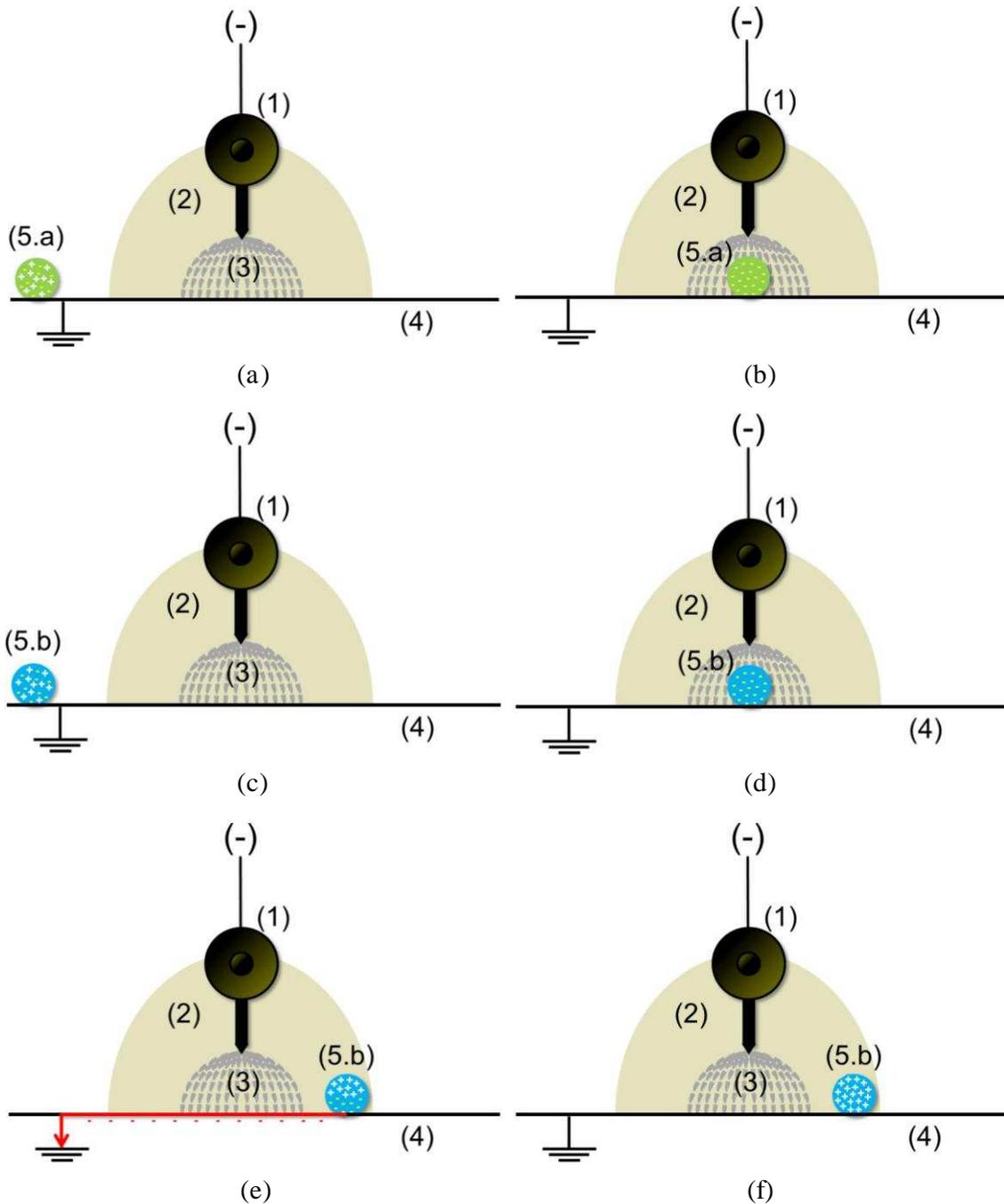


Figure I-4 : Représentation schématique de l'effet couronne sur une particule isolante (5.a) et conductrice (5.b).
 (a) Particule isolante initialement neutre ; (b) *Particule isolante chargée négativement par l'effet couronne* ; (c) Particule conductrice initialement neutre ; (d) *Particule conductrice chargée négativement par l'effet couronne* ;
 (e) Ecoulement des charges négatives vers la terre, particule conductrice polarisée par induction électrostatique ; (f) Particule conductrice chargée positivement par induction électrostatique. (1) Electrode couronne ; (2) *Zone d'induction électrostatique créé par le support de l'électrode couronne* ; (3) *Zone de décharge couronne* ; (4) Electrode plaque reliée à la terre.

Dans la zone de décharge couronne (3), seules les particules non-conductrices sont capables de conserver leurs charges lorsqu'elles sont en contact avec la terre. En dehors de cette zone, les particules conductrices se déchargent rapidement au contact de la surface d'une

électrode reliée à la terre. Toutefois, le support cylindrique de l'électrode couronne crée une zone d'induction électrostatique (2) qui charge les particules conductrices.

Beaucoup d'études ont été menées sur les électrodes couronnes dans le but d'optimiser leur fonctionnement [27-29]. Un des travaux les plus récents porte sur l'application d'un bouclier ou de bandes métalliques reliées à la terre autour d'une électrode couronne à fil afin d'améliorer son efficacité [30], [31].

I-1.3. Charge triboélectrique

L'électrification par contact [32], [33], aussi appelée effet triboélectrique (du grec « tribein » signifiant frotter), désigne le phénomène électrostatique par lequel un transfert de charges électriques a lieu lorsque deux objets de natures différentes sont mis en contact, entrent en collision ou se frottent entre eux. Quand deux objets électriquement neutres, quels qu'ils soient, entrent en contact, un transfert surfacique de charges électriques s'effectue de l'un à l'autre. Lorsque le contact est rompu, les deux objets portent des charges électriques de polarités opposées (figure I-5). La polarité et la quantité de charges acquises dépendent de la nature chimique du matériau, de la taille de l'objet, de son état de surface, de sa température, de son état de contrainte mécanique, des polluants gazeux, des champs électriques externes... [34-36]. Plusieurs mécanismes physiques ont été suggérés comme explications potentielles des échanges de charges : transfert d'électrons, d'ions ou de matières causés par des différences de propriétés de surface et/ou de volume des matériaux en contact. L'effet triboélectrique est majoritairement utilisé pour la charge de matières isolantes ou faiblement conductrices [32], [37-41]. C'est donc le mécanisme le plus utilisé pour charger des matières granulaires plastiques en vue de leur séparation électrostatique [36], [42-45].

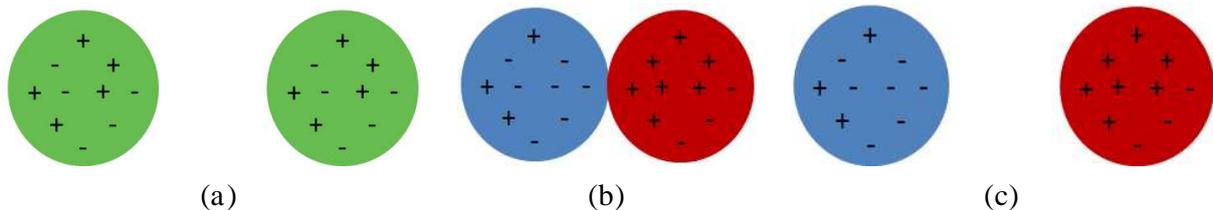


Figure I-5 : Charge triboélectrique de deux particules en contact. (a) Particules électriquement neutres sans contact entre elles ; (b) Contact et transfert de charge ; (c) Rupture du contact, particules chargées.

Les différentes matières sont classées dans ce qu'on appelle communément une série triboélectrique. Ce classement s'effectue par rapport à leur polarité puis à leur niveau de charge. Au centre de la série seront placées les matières qui acquièrent des charges faibles (une charge nulle correspondant au centre de la série) alors que celles se chargeant le plus fortement se trouveront aux extrémités de la série (une extrémité correspondant à une charge positive maximale, l'autre à une charge négative maximale). Il n'existe pas de série triboélectrique universelle puisque les résultats sont influencés aussi bien par les additifs et impuretés présents dans les matières que par les conditions et procédures expérimentales [37], [46-48].

Les premières séries triboélectriques furent proposées au XVIII^{ème} siècle par Wilcke et au XIX^{ème} siècle par Michael Faraday. Les matériaux alors étudiés étaient ceux correspondant aux usages de l'époque tels que la laine, les plumes, le verre, le bois ou encore la peau de chat (utilisée pour le soin de certaines douleurs rhumatismales). En 1917, Shaw a élaboré une série beaucoup plus étendue en prenant soin de définir les échantillons étudiés. Il a également étudié l'influence de la température sur cette charge triboélectrique.

Bill Lee, en 2009, [49] introduit le concept d'affinité triboélectrique, c'est-à-dire le rapport entre la charge triboélectrique échangée et l'énergie dépensée dans le frottement (tableau I-1). Il compare également les matériaux selon la charge qu'ils acquièrent lorsqu'ils sont frottés avec du métal.

Tableau I-1 : Série triboélectrique obtenue par Bill Lee [49].

Isolant	Affinité tribo- électrique (nC/J)	Charge acquise si frotté avec du métal (F : faible, N : normal)
Polyuréthane solide	+40	+N
Nylatron (nylon + MoS ₂)	+28	+N
Verre	+25	+N
Papier	+10	-F
Bois (pin)	+7	-F
Silicone	+6	+N
Coton	+5	+N
Caoutchouc nitrile	+3	-F
Laine	0	-F
Polycarbonate	-5	-F
ABS	-5	-N
Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	-10	-N
Époxy (circuit imprimé)	-32	-N
Caoutchouc en styrène-butadiène (SBR, Buna S)	-35	-N
PET (mylar) solide	-40	+F
Polystyrène	-70	-N
Polyamide	-70	-N
Silicone	-72	-N
Oléfines (alcènes) : LDPE, HDPE, PP	-90	-N
PVC (vinyle rigide)	-100	-N
Latex (naturel) en caoutchouc	-105	-N
Caoutchouc en EPDM, remplie	-140	-N
Téflon	-190	-N

De nombreux dispositifs de charge permettant la charge triboélectrique de matériaux isolants (notamment plastiques) sont décrits dans la littérature : cylindre tournant [11], lames ou hélices rotatives [50], [51], plaques ou tubes vibrants [38], [52-56], cyclone [57-59] ou encore lits fluidisés [37], [60-62].

- **Chargement statique :**

Le dispositif de chargement statique est un dispositif extrêmement simple. En effet, il est composé d'une enceinte parallélépipédique isolante comprenant des parois inclinées et détachables (figure I-6). Les particules tombent verticalement et glissent par gravité sur les parois. Le chargement s'effectue donc lors de ce glissement/frottement [63-65].

Ce système permet un fonctionnement continu et il est possible de le doter de plusieurs jeux de plaques de natures différentes. Ainsi, le dispositif peut s'adapter au mélange que l'on souhaite séparer de manière à charger un type de particule positivement et le second type négativement. Toutefois, si les particules sont trop fines, la gravité ne suffira pas forcément à les faire glisser le long des parois, c'est pourquoi il faudra lier ce dispositif à un vibreur de façon à ce que ces vibrations fassent chuter les particules.

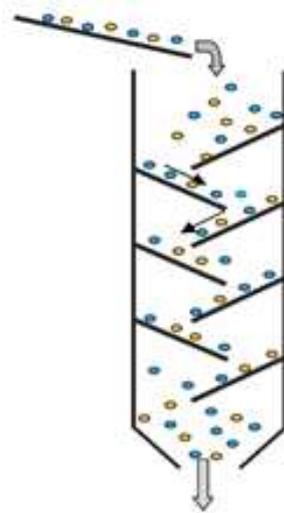


Figure I-6 : Représentation schématique d'un dispositif de charge statique [64].

- **Dispositifs à vibrations :**

Les goulottes vibrantes électromagnétiques (ou tables vibrantes) sont le plus souvent utilisées pour le transport et la répartition uniforme de matières granulaires. Toutefois, des études ont été menées pour les utiliser en tant que dispositif de charge triboélectrique [54], [55]. Dans un tel dispositif, les particules acquièrent leur charge par contact, impact et frottement avec le plateau ou les tubes vibrants. La charge des granules va dépendre de la matière du plateau ou des tubes [36], [39]. Ce type de dispositif fonctionne mieux sur les particules sous-millimétriques car l'intensité des frottements est faible. Une installation de ce type a été développée par Blajan et al. [52] (figure I-7). Le matériau à charger glisse dans des canaux en zigzag mis en mouvement vibratoire [48], [49] sur les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique et un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent avec les parois du dispositif. En changeant la vitesse de rotation du moteur, il est possible de modifier le mouvement oscillant du dispositif de charge.

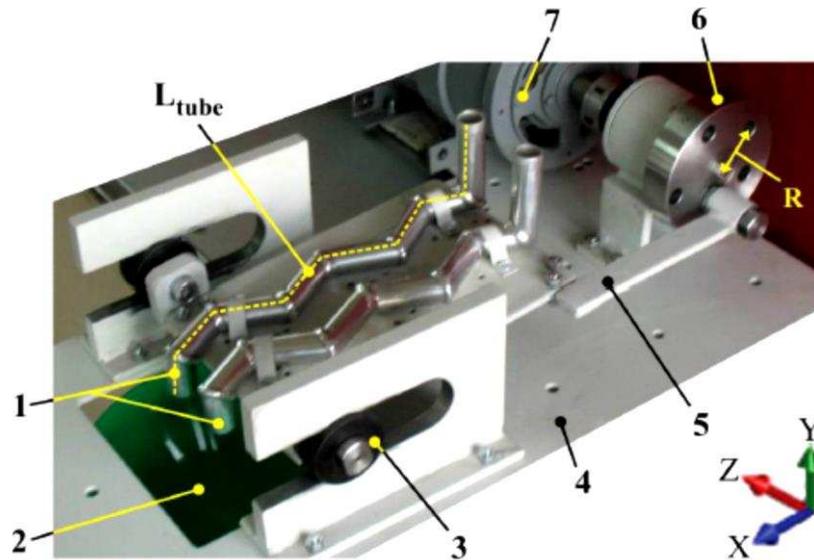


Figure I-7 : Dispositif à vibration [52] ; (1) Tubes de charge ; (2) Sortie des particules chargées ; (3) Glissière ; (4) Support ; (5) Bielle ; (6) Manivelle ; (7) Moteur électrique ; (R) Rayon ; L_{tube} : Longueur du tube.

Un autre dispositif de charge par vibration [66] consiste à placer une boîte, dans laquelle sont déposées les particules à charger, sur un plateau vibrant (figure I-8). Les vibrations du plateau se transmettent aux particules par le biais de la boîte et vont permettre leur frottement contre ses parois et entre elles, si le nombre de particules est suffisamment important. Dans ce cas, les vibrations, plus intenses, permettent de charger électriquement aussi bien des particules sous-millimétriques que millimétriques.

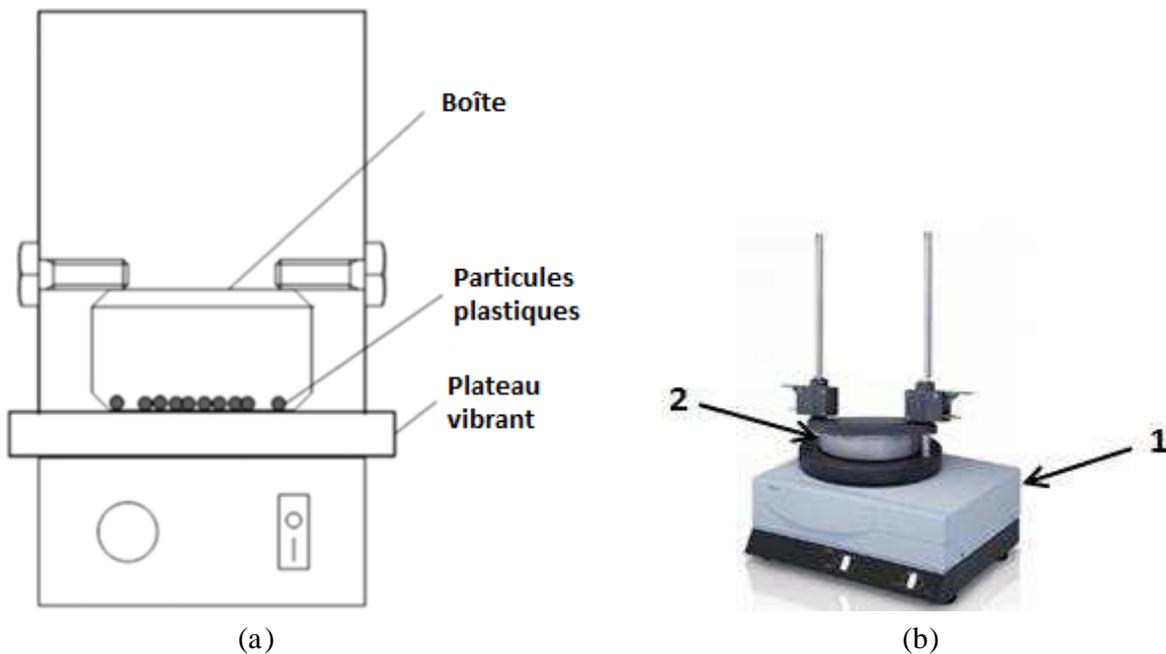


Figure I-8 : (a) Représentation schématique d'un dispositif de charge triboélectrique vibrant [66] ; (b) Dispositif de charge de marque Retsch ; (1) Dispositif vibrant ; (2) Boîte en acier inoxydable (Diam. : 160 mm).

- **Chargement par cyclone :**

Le cyclone [58], [64], [65], nécessite un flux d'air pour transporter les particules dans la zone de charge et créer la turbulence qui va permettre la charge triboélectrique. Le flux d'air pousse les particules jusqu'au dispositif et leur donne un mouvement hélicoïdal. Le mécanisme de charge est à la fois particule – particule et, majoritairement, particule – paroi. Ce type de système fonctionne très bien pour la séparation triboélectrostatique des mélanges PE/PVC [57], PE/PET [13] et ABS/PS/PP [67]. Une version modifiée de ce dispositif, combinant cyclone et lit fluidisé, est capable de séparer des mélanges de XLPE/PVC [57], PE/PET [68] et PVC/PET/ABS [69].

Le dispositif est un cylindre isolant (figure I-9), comprenant un ventilateur, dont le rôle est de transporter les particules à charger à l'intérieur du cylindre, où elles subissent un frottement relativement continu contre la paroi interne. Les particules acquièrent une charge triboélectrique au contact de cette paroi. Ce type de dispositif permet un fonctionnement continu. Le cyclone est particulièrement adapté à un fonctionnement industriel puisqu'il peut fonctionner en continu, permet le transport du produit et éventuellement son dépoussiérage. Toutefois, le principal inconvénient de ces dispositifs est que la matière du cylindre le composant ne peut pas être facilement changée.

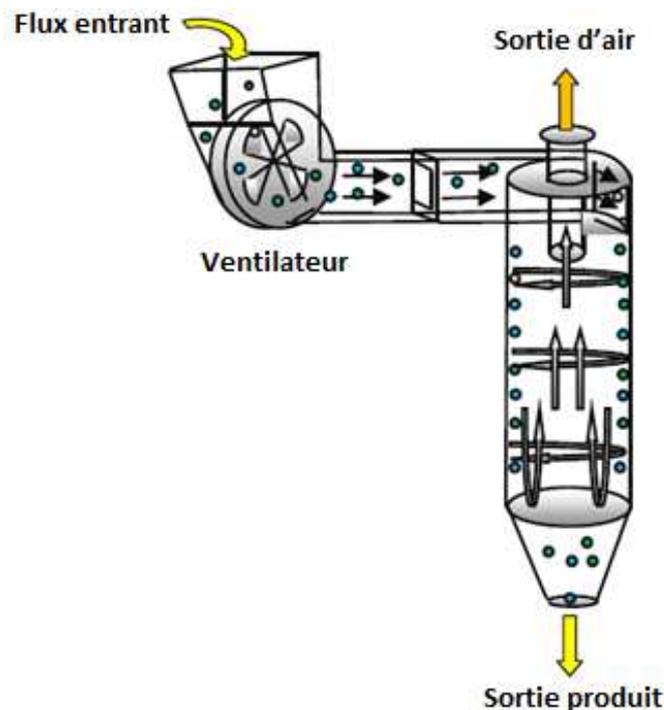


Figure I-9 : Représentation schématique d'un dispositif de charge par cyclone [65].

- **Chargement à lit fluidisé :**

Ce procédé est le plus utilisé pour le chargement triboélectrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (figure I-10) [65], [70], [71]. Considérons une colonne 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. Dans la plupart des cas, le gaz en question est de l'air.

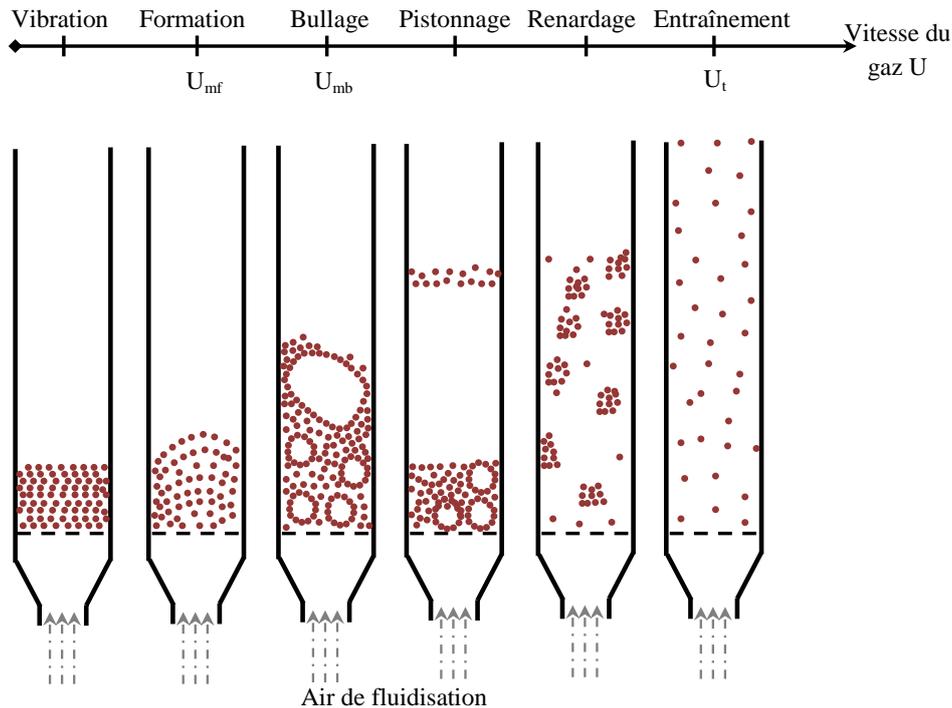


Figure I-10 : Régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse du gaz.

- **La vibration** : pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le tamis sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.
- **La formation** : le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques similaires aux 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 de particules, la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules est alors atteinte.
- **Le bullage** : à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage U_{mb} , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse permettant la distribution du gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide en ébullition.
- **Le 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.
- **Le renardage** : les particules s'accolent et créent des passages préférentiels pour le gaz.
- **L'entraînement** : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos U_t , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation.

Le dispositif (figure I-11) est un tube cylindrique isolant. Le mélange de particule est déposé sur le support (un tamis isolant) puis de l'air est injecté, à l'aide d'une pompe, au bas du cylindre. Les particules sont fluidisées, elles acquièrent des charges électriques de signes opposés grâce aux collisions entre elles.

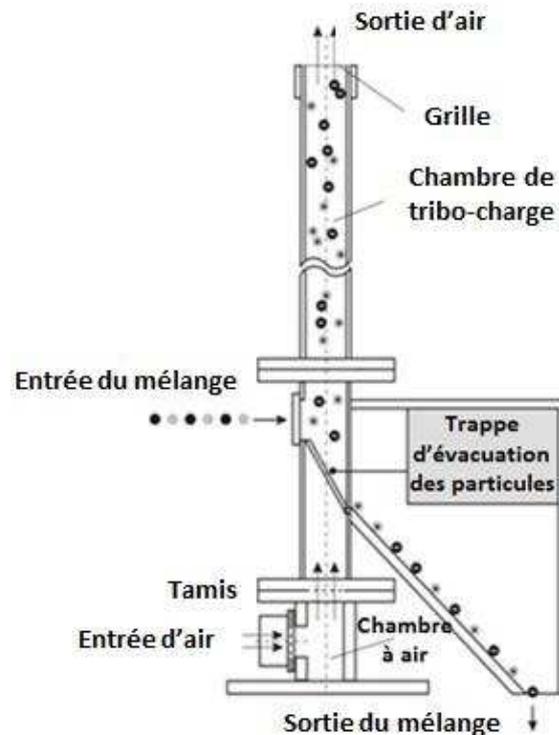


Figure I-11 : Dispositif de chargement à lit fluidisé [62].

Le principal inconvénient des dispositifs à lit fluidisé est l'hétérogénéité de la charge des particules qui peut jouer sur leur séparation. En présence d'un champ électrique, les trajectoires des granules peu chargés ne sont pas assez influencées par le champ électrique. Ceux-ci forment alors un produit mixte [62]. Cela réduit donc le taux de récupération de produit effectif.

- **Dispositifs à air comprimé :**

Dans ce type de dispositif, un flux d'air permet le transport mais aussi la charge triboélectrique des particules par contact entre elles ou bien avec les parois du tube dans lequel elles sont placées [7-9], [72-74]. Le dispositif à air comprimé le plus simple est celui décrit en figure I-12. Il est constitué d'un simple tube droit dans lequel sont injectés l'air comprimé et les particules à charger.

L'air comprimé est légèrement humide à cause de la vapeur d'eau présente dans l'air. Il contient également de petites quantités d'huile provenant du système de lubrification du compresseur. L'humidité et l'huile ne sont pas très compatibles avec les phénomènes électriques. Ainsi, la filtration voire même le séchage de l'air comprimé est nécessaire.

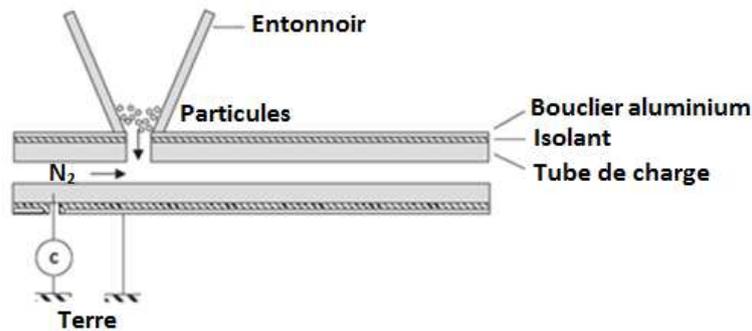


Figure I-12 : Représentation schématique d'un dispositif de charge triboélectrique à air comprimé [9].

D'autres dispositifs utilisant le même principe sont composés d'un tube de forme plus complexe, dans lequel circule l'air comprimé auquel sont mélangées les particules, permettant ainsi leur charge triboélectrique (figure I-13).

Des tubes comprenant plusieurs changements de directions ou plusieurs séries de spirales permettent théoriquement d'augmenter l'efficacité de la charge.

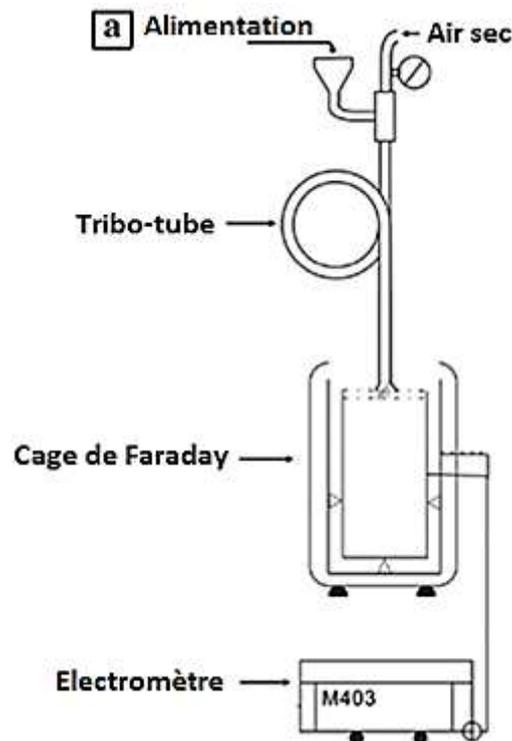


Figure I-13 : Installation expérimentale de charge triboélectrique à air comprimé [75].

- **Dispositifs à cylindre tournant :**

Les dispositifs de chargement cités précédemment (à vibrations, cyclones, lit fluidisé etc.) peuvent avoir dans certains cas deux inconvénients majeurs : la non-homogénéité de la charge et la formation d'agglomérats de particules fines. Dans un champ électrique intense, les particules qui ne sont pas suffisamment chargées sont peu déviées, et, au lieu de tomber dans le compartiment qui leur est destiné, elles se retrouvent dans le secteur médian du collecteur, réduisant ainsi le taux de récupération de l'ensemble des produits. Dans le cas où les

agglomérats sont composés d'un nombre équivalent de particules chargées positivement et négativement, ils sont quasi neutres et se comportent de façon similaire. La situation est pire lorsqu'ils ont une charge globale positive ou négative. Ces agglomérats sont attirés par une électrode et altèrent la pureté des produits collectés, car ils contiennent des particules de natures différentes.

Les dispositifs à cylindre tournant (figure I-14), [11], [76], [77] ont montré la possibilité de charger des mélanges de PP/PS et PP/HDPE. Dans chaque dispositif, le mélange granulaire est introduit en continu dans le cylindre tournant. Ce cylindre est légèrement incliné par rapport à l'horizontal afin que les particules puissent en sortir par gravité. Le nombre de collisions particules – particules et particule – paroi peut être augmenté en ajoutant au cylindre des ailettes (composées du même matériau que le cylindre), en diminuant l'angle d'inclinaison du dispositif ou encore en augmentant la longueur du cylindre afin d'allonger le temps passé par les particules au sein du dispositif de charge. Ce dispositif se caractérise par sa simplicité et sa faible consommation d'énergie.

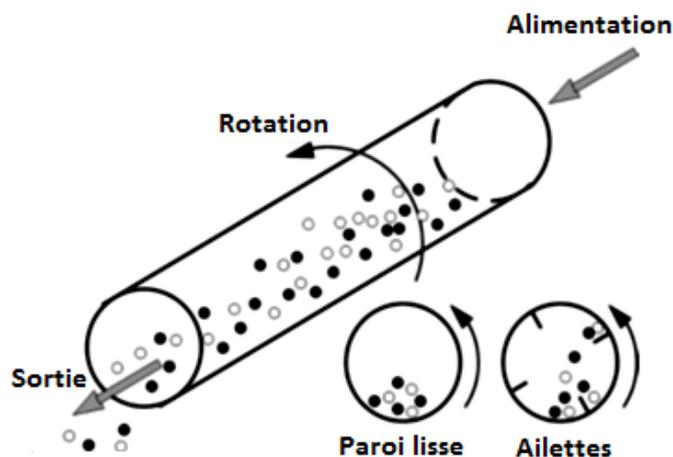


Figure I-14 : Représentation schématique d'un dispositif de charge à cylindre tournant [77].

Un second dispositif, breveté par Tao [78], utilise un cylindre horizontal tournant, entouré de deux parois, laissant une fente au-dessus de celui-ci afin d'introduire les particules et une seconde fente en-dessous du cylindre afin de les laisser sortir (figure I-15). Les collisions et les frottements entre les particules et les parois permettent leur chargement triboélectrique.

Une source de haute tension peut également être appliquée entre le cylindre intérieur et la paroi l'entourant afin de créer un champ électrique à l'intérieur du dispositif. Cette tension appliquée va permettre aux particules d'acquérir une certaine densité de charge et une certaine polarité. Tao explique le fait que, sans appliquer de tension, le phosphate et le quartz se chargent négativement dans ce dispositif mais que, lorsqu'une tension est appliquée, la polarité du phosphate change en fonction de celle de la haute tension. Celle du quartz reste négative même en présence de haute tension positive. Ainsi, en appliquant une haute tension positive, il est plus facilement possible de séparer ces deux matériaux.

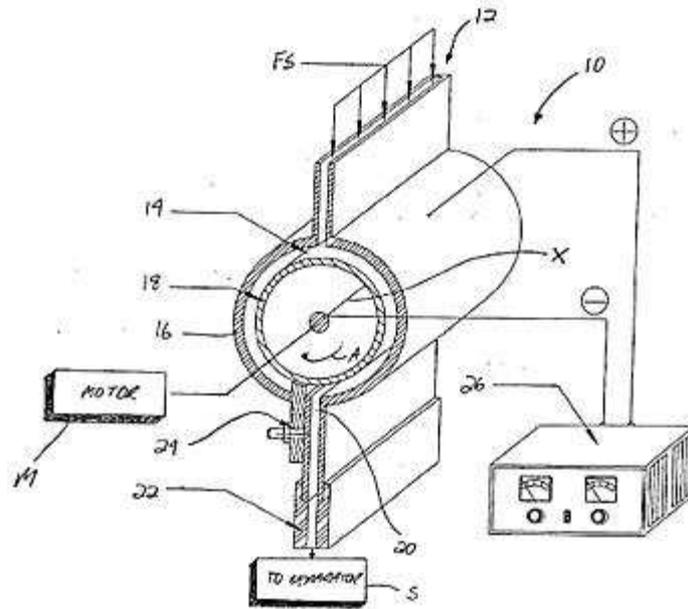


Figure I-15 : Dispositif de charge à cylindre tournant breveté par Tao [78].

I-2. Séparation électrostatique de matériaux granulaires

De nombreux procédés de séparation existent pour bon nombre de mélanges, qu'ils soient conducteur – isolant, conducteur – conducteur ou isolant – isolant (table densimétrique, trieuse optique, bacs de flottation/flottaison, criblage, poulie magnétique/« overband »...) [2]. Toutefois, ces procédés sont souvent coûteux (aussi bien financièrement qu'en termes d'énergie), peuvent utiliser des liquides avec certains additifs (problème de post-traitement) et sont souvent spécifiques à un seul type de mélange. L'avantage des séparateurs électrostatiques est sans conteste leur faible consommation d'énergie et leur grande adaptabilité.

L'industrie du recyclage devient de plus en plus exigeante et la réglementation sur la protection de l'environnement de plus en plus sévère. Ainsi, de nombreux laboratoires de recherche concentrent leur travail dans l'amélioration de cette technologie afin d'obtenir de meilleurs résultats de séparation [79], [80].

I-2.1. Séparation de matériaux conducteurs et isolants

La séparation de matériaux conducteurs et isolants peut avoir de nombreuses applications [4] : concentration de minerais, recyclage de câbles électriques et de DEEE, purification de produits agricoles... Trois types de séparateurs peuvent être utilisés : le séparateur à plaque, le séparateur à tambour ou encore le séparateur à convoyeur. Ce dernier, principalement utilisé pour les particules fines (sous-millimétriques) ne sera pas détaillé ici.

- **Séparateur électrostatique à plaque :**

Le principe de fonctionnement du séparateur électrostatique à électrode plaque est relativement simple.

Dans ce type de séparateur [12], [81-84], le champ électrique est créé entre une électrode de forme elliptique connectée à un générateur de haute tension continue et une électrode plaque, métallique et reliée à la terre (figure I-16). Le seul mécanisme de charge utilisé pour la séparation est donc l'induction électrostatique.

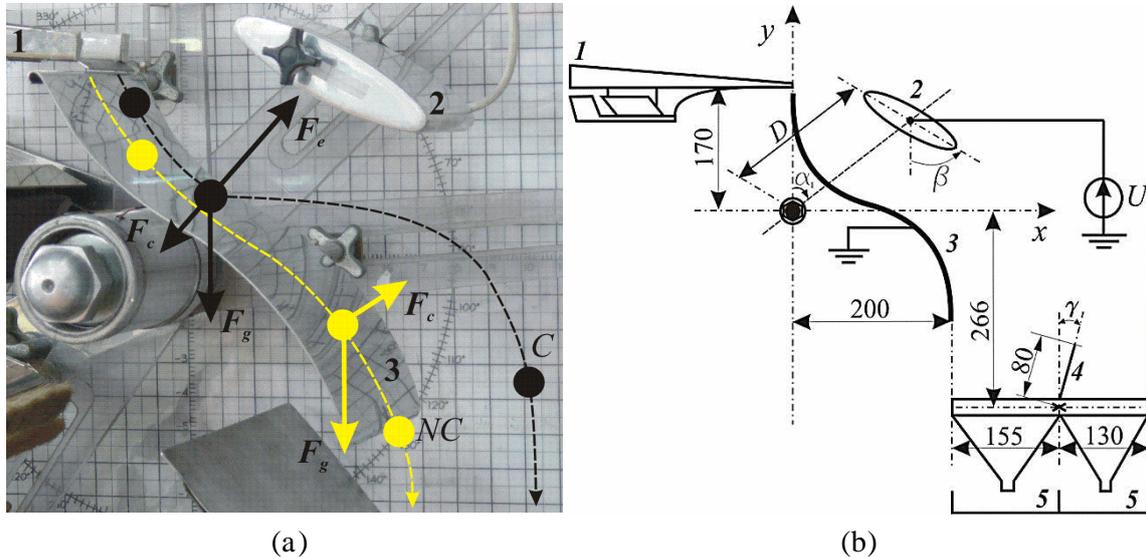


Figure I-16 : Séparateur électrostatique à plaque. (a) Forces agissant sur les particules conductrices (C) et non-conductrices (NC) ; (b) Représentation schématique du système d'électrode utilisé pour la séparation électrostatique de granules issus de DEEE ; (1) Goulotte oscillante ; (2) Electrode statique ; (3) Electrode plaque ; (4) Déflecteur ; (5) Collecteur [85].

Les granules à séparer (plus ou moins bon conducteurs) sont transportés par le vibro-transporteur électromagnétique et déposés sur l'électrode plaque reliée à la terre. Lorsqu'elles arrivent dans la zone de champ électrique intense, les particules conductrices, en contact avec l'électrode reliée à la terre, acquièrent, par induction électrostatique, une charge de signe opposé au potentiel de la haute tension continue. Elles subissent alors une force d'attraction électrique qui les attire vers l'électrode statique reliée à la haute tension et sont ainsi récupérées dans la partie droite du collecteur.

Les particules isolantes glissent le long de l'électrode plaque sans être significativement affectées par le champ électrique. Dans la plupart des cas, la charge acquise par ces particules par effet triboélectrique est négligeable. Ces particules tombent donc sous l'action de leur propre poids dans la partie gauche du collecteur.

Dans la plupart des séparateurs électrostatiques industriels à plaque, les trajectoires des particules conductrices, et donc les quantités et puretés des produits séparés, sont contrôlées en ajustant la valeur de la haute tension appliquée au système d'électrodes, U , et la position des déflecteurs entre les deux compartiments du collecteur (angle γ , figure I-16 (b)). Toutefois, la pureté du produit conducteur est souvent affectée par les trajectoires des produits non-conducteurs qui ne peuvent pas être contrôlées. Certaines de ces particules, à cause d'un faible coefficient de frottement avec l'électrode plaque ou d'une masse trop importante,

accélèrent jusqu'à des vitesses relativement élevées et leur inertie peut les conduire dans le compartiment « conducteur » du collecteur.

Une solution relativement simple à ce problème consiste à soumettre les granules à l'effet d'une décharge couronne pendant leur descente le long de l'électrode plaque [12] (figure I-17). Cette décharge n'affecte pas les particules conductrices mais charge les non-conductrices. Ainsi, la force électrique a tendance à les coller à la surface de l'électrode plaque. De cette façon, les forces de frottement entre les granules et la plaque augmentent et les forces d'inertie diminuent.

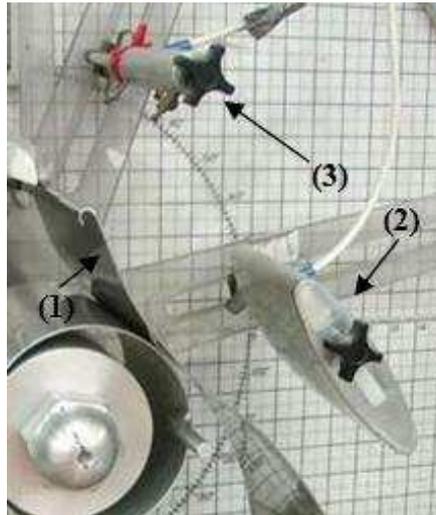


Figure I-17 : Séparateur électrostatique à plaque assisté par une décharge couronne [12]. (1) Electrode plaque en forme de « S » connectée à la terre ; (2) Electrode elliptique et (3) Electrode couronne reliées à la terre.

L'augmentation de la tension améliore l'effet de décharge couronne sur les particules non-conductrices et ainsi leur adhésion à l'électrode plaque pendant leur descente jusqu'au collecteur. Diminuer l'inclinaison de l'électrode plaque ralentit également cette descente et facilite la récupération des particules non-conductrices dans les compartiments qui leur sont dédiés. Augmenter l'inclinaison des déflecteurs (angle γ , figure I-16 (b)) entraîne la récupération d'une quantité plus importante de particules non-conductrices au risque de diminuer sa pureté [86].

L'efficacité de cette solution est illustrée par les résultats d'expériences menées sur un mélange de granules de déchets de câbles électriques composés de cuivre (environ 60 %) et de plastique (environ 35 %). Le reste (moins de 5 %) est considéré comme du produit hybride (i.e. petit morceaux de cuivre enveloppé d'isolant). La méthode des plans d'expériences [61], [87-91] et des algorithmes d'optimisation multi-objectifs fournissent les valeurs optimales des variables de contrôle (valeur de la tension, angle d'inclinaison de l'électrode plaque et des déflecteurs). Le séparateur peut alors trier 73,3 % du produit conducteur et 99,6 % du produit isolant [84].

Toutefois, les séparateurs électrostatiques à plaque sont peu appropriés à la séparation de l'isolant et du cuivre de câbles électriques rigides (figure I-18). En effet, le poids des

particules conductrices issus de câbles électriques rigides est trop important et les forces électrique et centrifuge auxquelles elles sont soumises ne suffisent pas pour les faire décoller de l'électrode plaque.



Figure I-18 : Granules de plastique (a) et de cuivre (b) de déchets de câbles électriques rigides.

Ces séparateurs peuvent également être utilisés pour :

- classer des particules de résistivité et de constante de temps de charge similaires, en fonction de leur rayon,
- éliminer les particules légères des particules lourdes d'un mélange de particules ayant des rayons et des constantes de temps de charge similaires,
- trier des particules ayant des rayons et des résistivités similaires en fonction de leur constante de temps de charge.

Ces trois applications ont été étudiées par différentes équipes de recherche [92-94].

Bien que leur conception soit simple, les séparateurs électrostatiques à plaque sont très peu utilisés dans l'industrie car leur efficacité diminue très vite avec la présence de poussières. En effet, celles-ci se collent aux électrodes, notamment à la plaque. Leur accumulation empêche les particules à séparer de glisser convenablement le long de la plaque jusqu'à les bloquer totalement.

- **Séparateur électrostatique à tambour :**

Un second type de séparateur, beaucoup plus largement utilisé dans l'industrie, est le séparateur à tambour. Dans un séparateur électrostatique à tambour [82], [85], [95-99], (figure I-19), le champ électrique est créé entre deux électrodes, (2) et (3), connectées à un générateur de haute tension continue et l'électrode cylindrique tournante (4), reliée à la terre. La goulotte oscillante (1) dépose le mélange granulaire qui doit être séparé à la surface de l'électrode cylindrique (4). Celle-ci l'introduit dans la zone d'application du champ électrique. 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.

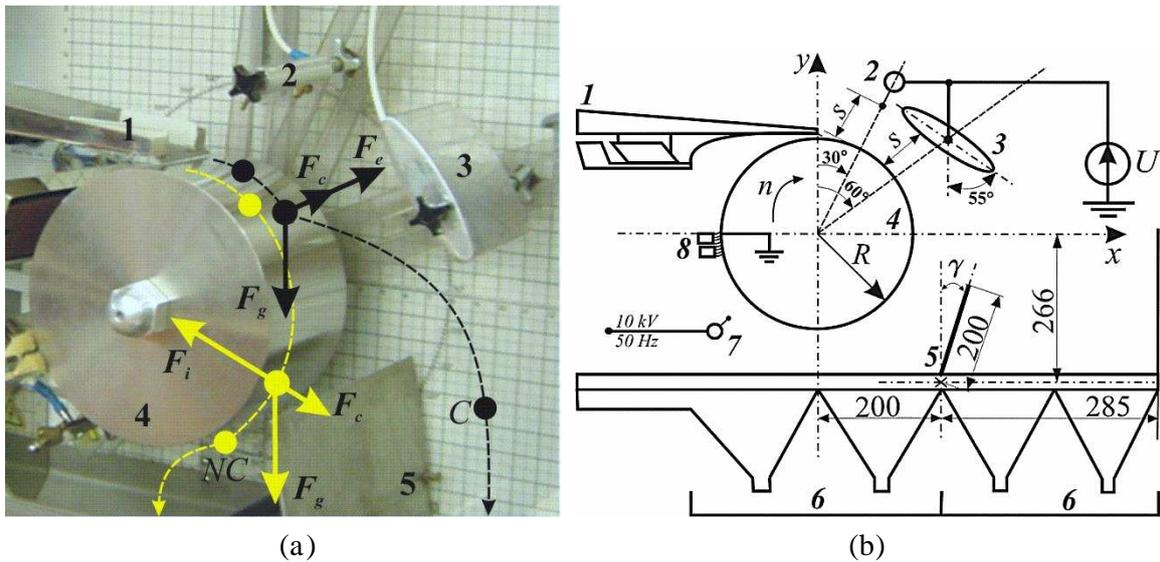


Figure I-19 : Séparateur électrostatique à tambour. (a) Forces agissant sur les particules conductrices (C) et non-conductrices (NC) ; (b) Représentation schématique du système d'électrodes utilisés pour la séparation de déchets ; (1) Goulotte oscillante ; (2) Electrode couronne ; (3) Electrode statique ; (4) Electrode cylindrique tournante ; (5) Déflecteur ; (6) Collecteur [93] ; (7) Electrode couronne de neutralisation ; (8) Balais.

Les particules non-conductrices, chargées par l'effet couronne créée par l'électrode (2), sont collées à la surface du tambour (4) par la force d'image électrique et tournent avec ce dernier. Cette forte adhésion des particules non-conductrices à la surface du tambour s'explique par le fait qu'elles suivent une loi de décharge exponentielle faible [100] et justifie l'utilisation d'une électrode de neutralisation (7) pour faciliter la tâche de la brosse (8) [101].

Le cuivre étant un conducteur, il se charge négativement sous l'influence du flux ionique engendré par l'électrode couronne (2). Cependant, ces charges se dissipent rapidement au contact de l'électrode cylindrique tournante (4) reliée à la terre. Le champ électrique produit par l'électrode statique (3) charge les particules métalliques par induction électrostatique. Les granules non-conducteurs sont repoussés par cette électrode puisqu'ils ont la même polarité alors que les conducteurs sont attirés.

Afin d'obtenir les conditions de charges et les forces électriques en jeu dans ce processus de séparation électrostatique, de nombreuses simulations numériques ont été menées par différentes équipes de recherche. Ces simulations permettent de définir les géométries et positions optimales des électrodes afin de créer un champ électrique permettant une meilleure séparation. Cela a notamment permis de définir l'électrode elliptique qui est actuellement la plus utilisée aussi bien dans des installations de laboratoires que dans des installations industrielles [102], [103].

Les lignes équipotentielles représentées sur la figure I-20 décrivent ce champ électrique [104].

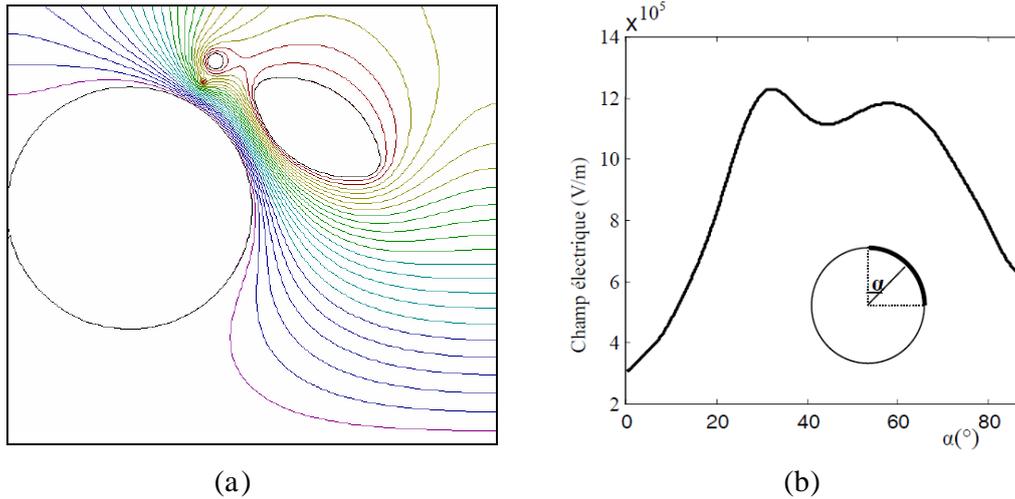


Figure I-20 : (a) Lignes équipotentielles calculées avec le logiciel d'analyse numérique TRICOMP ; (b) Variation du champ électrique sur un quart de la surface du tambour en fonction de l'angle α [104].

Ces simulations ont parfois été accompagnées de simulations de trajectoires de particules conductrices (figures I-21 et I-22) [105], [106] ou isolantes [107].

Ces simulations permettent d'affiner la compréhension des effets des différents facteurs qui peuvent influencer la séparation électrostatique comme, par exemple, la non-homogénéité des formes et tailles des granules qui élargie l'éventail des trajectoires possibles, les arcs électriques qui annulent le champ électrique et donc la séparation pendant quelques instants, ou encore, dans le cas des particules conductrices, leurs impacts contre la ou les électrode(s) haute tension.

Dans le cas de particules isolantes, les simulations numériques permettent de comprendre l'influence de leurs temps de charge et de décharge sur la séparation (figure I-22).

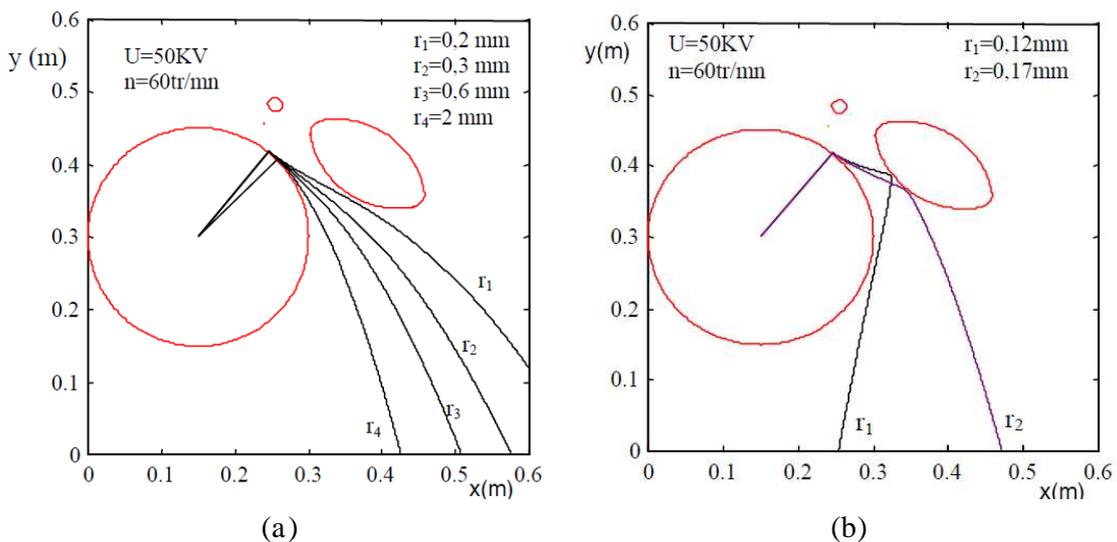


Figure I-21 : (a) Trajectoires d'une particule conductrice pour différentes valeurs de son rayon ; (b) Trajectoires de granules conducteurs impactant l'électrode statique [108].

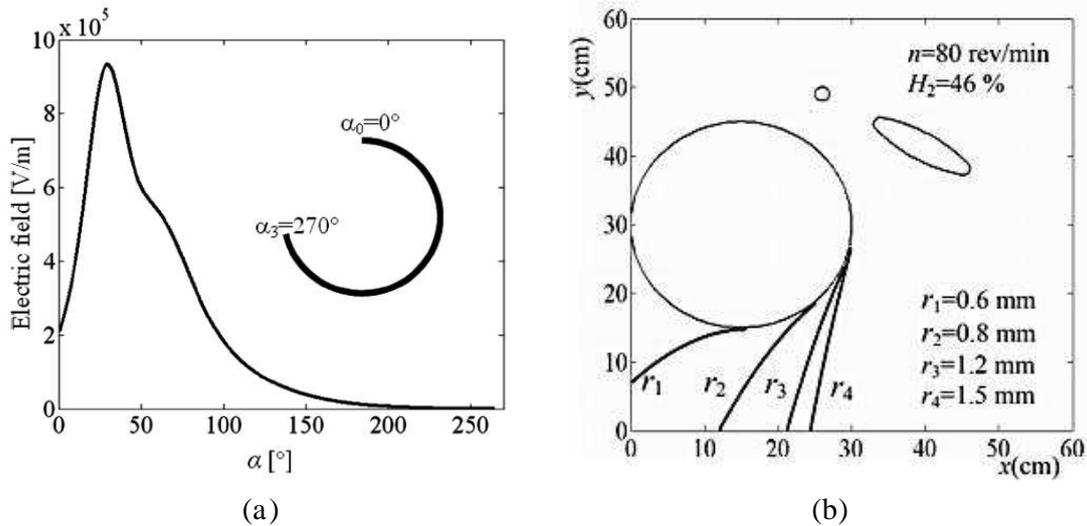


Figure I-22 : (a) Variation du champ électrique à la surface du tambour en fonction de l'angle α (logiciel TRICOMP) ; (b) Trajectoires d'une particule isolante pour différentes valeurs de son rayon [107].

L'action combinée de la décharge couronne et de l'induction électrostatique garantit une meilleure séparation des mélanges isolants – conducteurs. En plus de la configuration du système d'électrodes qui génère la décharge couronne et détermine les forces de champ électrique agissant sur les particules, de nombreux autres facteurs influencent l'efficacité du processus de séparation : vitesse de rotation du tambour, débit de matière, conditions ambiantes [108-111]. Leurs valeurs optimales sont fonctions des caractéristiques des matériaux à traiter : nature, composition, taille, forme... [90], [91], [112], [113].

A des vitesses de rotation, n , élevées, les particules isolantes se détachent plus tôt du tambour et ont plus tendance à être collectée avec les particules métalliques. Augmenter γ , comme montré en figure I-23, peut empêcher les particules non-conductrices d'atterrir dans le compartiment « conducteur ». Toutefois, cela peut aussi interférer avec les trajectoires des particules métalliques et les dévier dans le compartiment non-conducteur. Ces simulations indiquent la nécessité de corrélérer les valeurs des deux variables de contrôle, n et γ , dans le but de trouver le meilleur point de fonctionnement possible du procédé de séparation électrostatique.

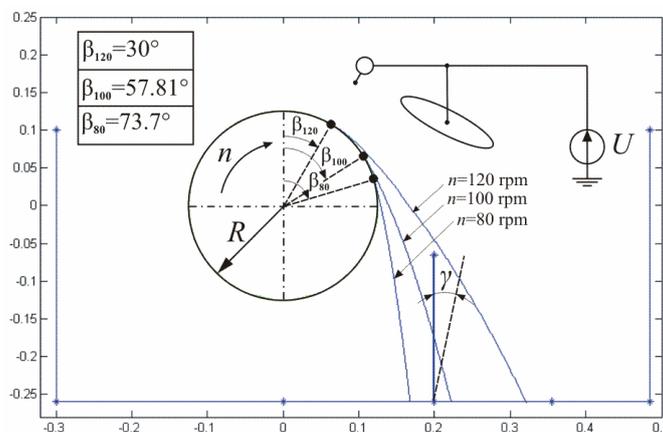


Figure I-23 : Trajectoires simulées dans un séparateur électrostatique à tambour.

Des expériences de séparation électrostatique assistée par décharge couronne ont été menés sur des échantillons de mélange conducteur – isolant issus de déchets de câbles électriques finement broyés afin de rompre le lien mécanique entre l'âme de cuivre et l'isolation en PVC [97]. Chaque échantillon était composé à 62,5 % de cuivre et à 37,5 % de PVC. La taille caractéristique de ces granules (i.e. la longueur des brins de cuivre et le plus grand diamètre des particules de PVC) était inférieure à 5 mm.

Trois produits ont été définis : non-conducteur (PVC), hybride et conducteur (cuivre). Les conditions de charge par effet couronne étaient excellentes pour les granules isolants de petites dimensions. Environ 1 % du PVC n'était pas assez collé à la surface de l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre et était collecté dans le compartiment conducteur. La pureté du cuivre obtenue après un seul passage au sein du séparateur était suffisante pour répondre aux exigences de recyclage (figure I-24). En revanche, deux ou trois passages dans le séparateur étaient nécessaires pour obtenir une pureté et un taux de récupération du PVC convenable.

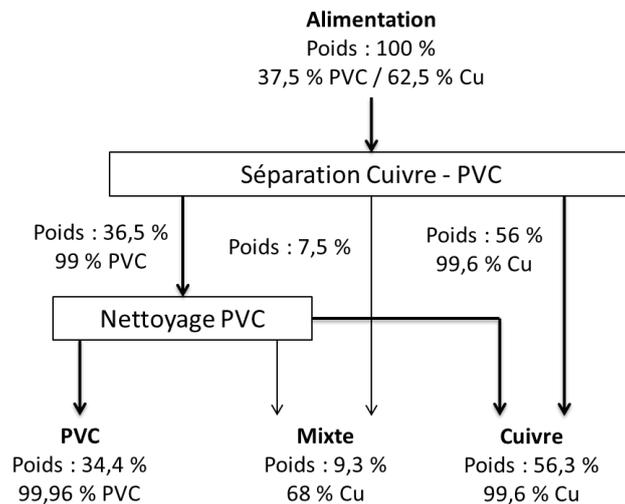


Figure I-24 : Flux de traitement pour le recyclage du cuivre et du PVC issus de granules de DEEE.

Les résultats de ces essais de séparation électrostatique par effet couronne correspondaient avec des données d'expériences précédentes [21], [108]. Ils ont permis de formuler plusieurs recommandations sur les configurations d'électrodes à utiliser pour chaque type de mélange granulaire traité [90] :

1. Cuivre monobrin – PVC. Une électrode couronne permet une bonne séparation. Ajouter une autre électrode, non ionisante, reliée à la haute tension n'affecte pas sensiblement les trajectoires des particules de cuivre. Une seconde électrode couronne peut être utilisée lorsque la taille moyenne des particules dépasse 2 mm, afin d'améliorer les conditions de charge.
2. Aluminium – PVC. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une combinaison d'électrode couronne et d'électrode statique. L'électrode statique, reliée à la haute tension va significativement affecter les trajectoires des particules d'aluminium (leur

masse volumique étant 3,3 fois inférieure à celle du cuivre). Comme dans le cas précédent, deux électrodes couronnes peuvent être utilisées pour traiter de grosses particules.

3. Cuivre multibrin – PVC. Une ou deux électrodes couronnes peuvent être utilisées suivant la taille moyenne des particules.
4. Cuivre multibrin – Polyéthylène (PE). Une séparation efficace est obtenue en utilisant une électrode couronne et une électrode statique elliptique, non-ionisante, connectée à la haute tension. Les particules de polyéthylène, grâce à leur plus importante résistance et leur forme plus plate, sont fortement collées à la surface de l'électrode cylindrique. Une électrode de neutralisation peut être utilisée pour neutraliser les charges acquises par les particules isolantes.

Industriellement, les produits traités par les séparateurs électrostatiques sont de formes et tailles variées mais comportent aussi de nombreux composants. C'est pourquoi, dans le domaine des circuits électroniques [114], par exemple, des séparateurs électrostatiques à tambour à double étage ont été étudiés et construits (figure I-25) [115], [116]. Ces séparateurs ont un meilleur rendement que les séparateurs électrostatique à tambour classiques. En comparaison à un séparateur à tambour classique, ils permettent une augmentation du produit conducteur récupéré de près de 10 %. De plus, le produit mixte qui pose habituellement la question de son retraitement, subie une diminution pouvant atteindre 45 % [115].

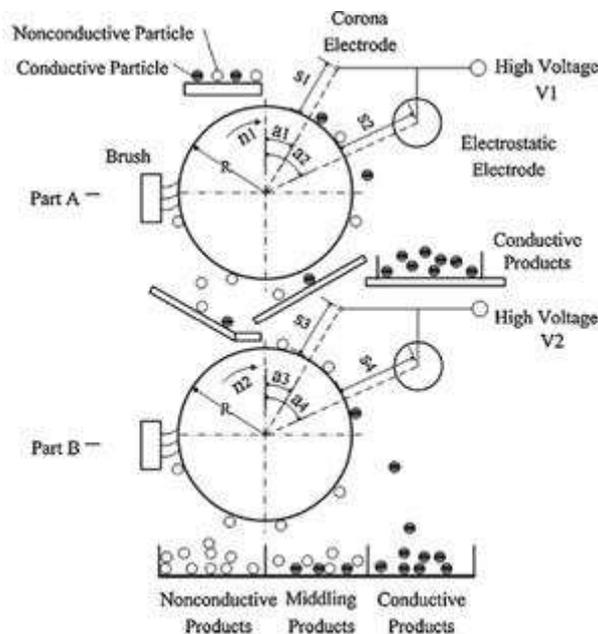


Figure I-25 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour à double étage [115].

Ces séparateurs à double étages permettent de traiter une nouvelle fois le produit mixte, d'améliorer la pureté des produits obtenus mais aussi de réduire la variabilité des résultats de la séparation. De plus, les tailles des particules n'étant pas toujours uniformes dans un processus industriel, le fait d'avoir deux étages permet d'améliorer leur séparation. En effet, si

le premier étage est réglé pour séparer des particules fines, le second pourra être réglé pour traiter des particules plus imposantes [117]. Par exemple, dans ce genre de cas, il a été démontré que la quantité de conducteur récupérée pouvait augmenter de 34 % et celle de mixte diminuer de 73 %.

D'un point de vue industriel, les séparateurs électrostatiques à tambour sont principalement utilisés en complément d'autres systèmes de séparation [118], [119] tels que des poulies magnétiques, tables densimétriques ou encore des séparateurs aérauliques.

Ces autres installations de séparation font un premier tri plus ou moins grossier alors que les séparateurs électrostatiques permettent de récupérer les produits qui pourraient être perdus (figure I-26).

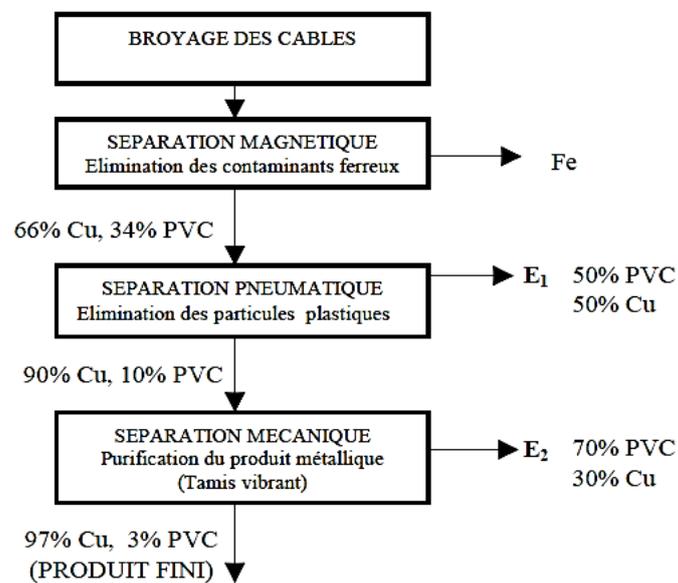


Figure I-26 : Représentation schématique du flux de traitement des déchets de câbles électriques [118].

Enfin, ces installations électrostatiques peuvent être optimisées, la plupart du temps en utilisant la méthode des plans d'expériences [26], [110], [111], [116], [120].

Le marché du recyclage étant de plus en plus important, notamment dans la filière des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE), et les métaux étant une ressource fossile de plus en plus rare, beaucoup d'industries se lancent dans la fabrication de séparateurs électrostatiques capables de séparer des particules conductrices et isolantes [121].

C'est, par exemple, le cas de la société Hamos qui propose un modèle de séparateur KWS et un modèle KRS qui visent à traiter respectivement la séparation sélective du PET de fractions métalliques et le recyclage des DEEE (figure I-27).

Les séparateurs KWS et KRS reposent sur le principe de séparation du séparateur électrostatique à tambour.

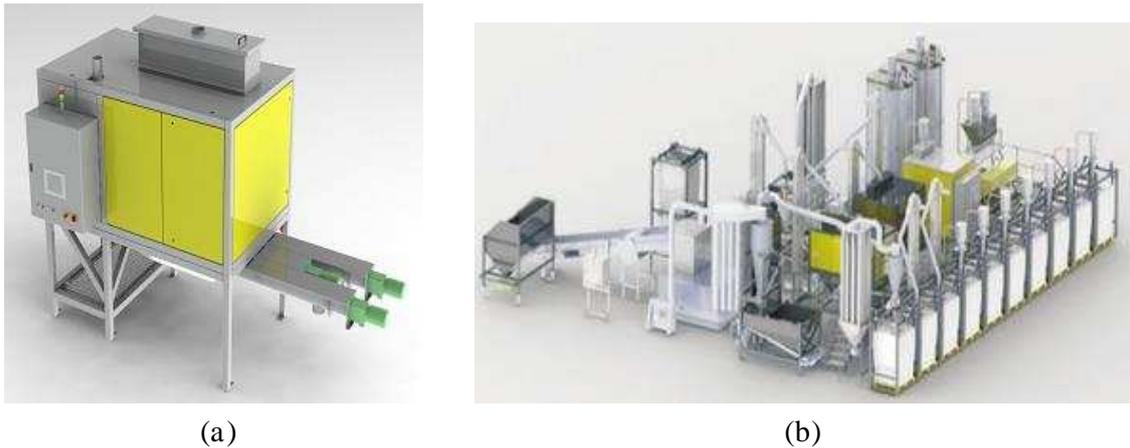


Figure I-27 : Séparateurs électrostatique fabriqués par HAMOS. (a) Modèle KWS ; (b) Modèle KRS.

PhySep, ex-Carpc, propose également des installations permettant la séparation de produit conducteur et non-conducteur. Elles comportent plusieurs séparateurs électrostatiques à tambours placés en série (figure I-28).



Figure I-28 : Illustration d'un séparateur de l'entreprise PhySep.

I-2.2. Séparation de matériaux conducteurs

Peu d'études ont été faites sur la séparation électrostatique de mélanges comportant plusieurs matériaux conducteurs. En effet, ayant des caractéristiques électriques proches, il est difficile de séparer deux conducteurs par voie électrostatique. Toutefois, quelques expériences et simulations numériques ont été effectuées sur le comportement de particules conductrices de tailles sous-millimétrique dans les séparateurs électrostatiques.

Younes et al. [122] ont étudié numériquement la séparation simultanée de particules isolantes, d'aluminium et de cuivre (de tailles sous-millimétriques) par un séparateur se rapprochant du séparateur à plaque (figure I-29).

Avec cette configuration, les auteurs ont pu obtenir expérimentalement 84,9 % de l'aluminium présent dans le mélange initial avec une pureté de 100 % et 91 % du cuivre pur à 96,9 % (figure I-30).

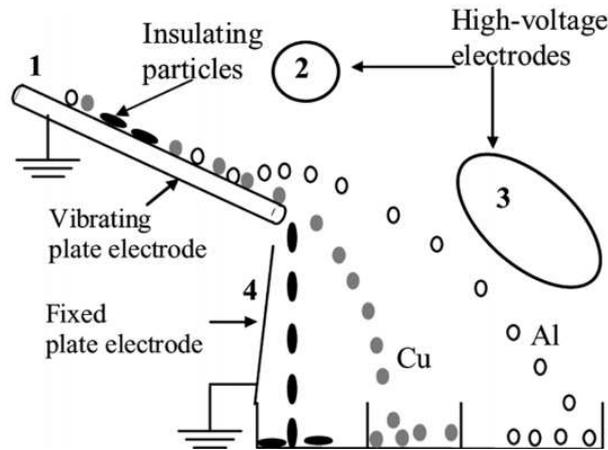


Figure I-29 : Représentation schématique du séparateur électrostatique utilisé par Younes [122]. (1) Plaque vibrante métallique reliée à la terre ; (2) Electrode cylindrique reliée à la haute tension ; (3) Electrode elliptique reliée à la haute tension ; (4) Electrode plaque reliée à la terre.

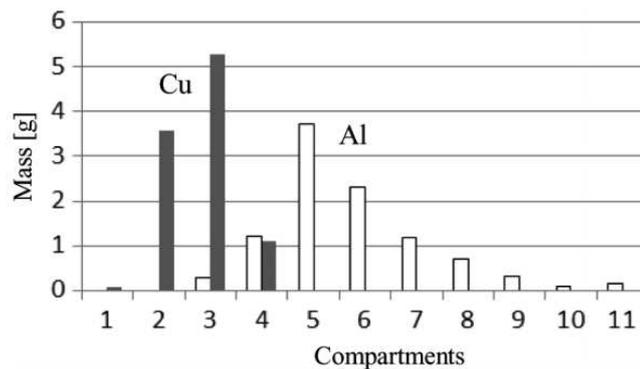


Figure I-30 : Distribution des produits obtenus dans les compartiments du collecteur [122].

I-2.3. Séparation de matériaux isolants

Dans la plupart des applications industrielles, le mélange granulaire de plastiques, obtenu après l'élimination des contaminants métalliques, est déposé dans un dispositif de charge triboélectrique. Les particules ainsi chargées vont ensuite être traitées par un ou plusieurs séparateurs électrostatiques. En dépit du fait que la séparation triboélectrostatique a longtemps été utilisée, son application industrielle à grande échelle est limitée par sa mauvaise efficacité. En effet, le chargement des particules est souvent hétérogène et sensible aux conditions ambiantes.

Toutefois, de multiples installations destinées à la séparation triboélectrostatique des matériaux granulaires plastiques ont été conçues et construites. Le point commun entre ces dispositifs est de réaliser deux opérations successives, le chargement triboélectrique des particules et leur séparation.

• **Séparateur triboélectrostatique à chute libre :**

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 (figure I-31), [5], [11], [87], [123-135]. Les forces électrostatiques qui agissent sur les granules chargés les conduisent vers l'électrode de polarité opposée où ils sont collectés dans des bacs.

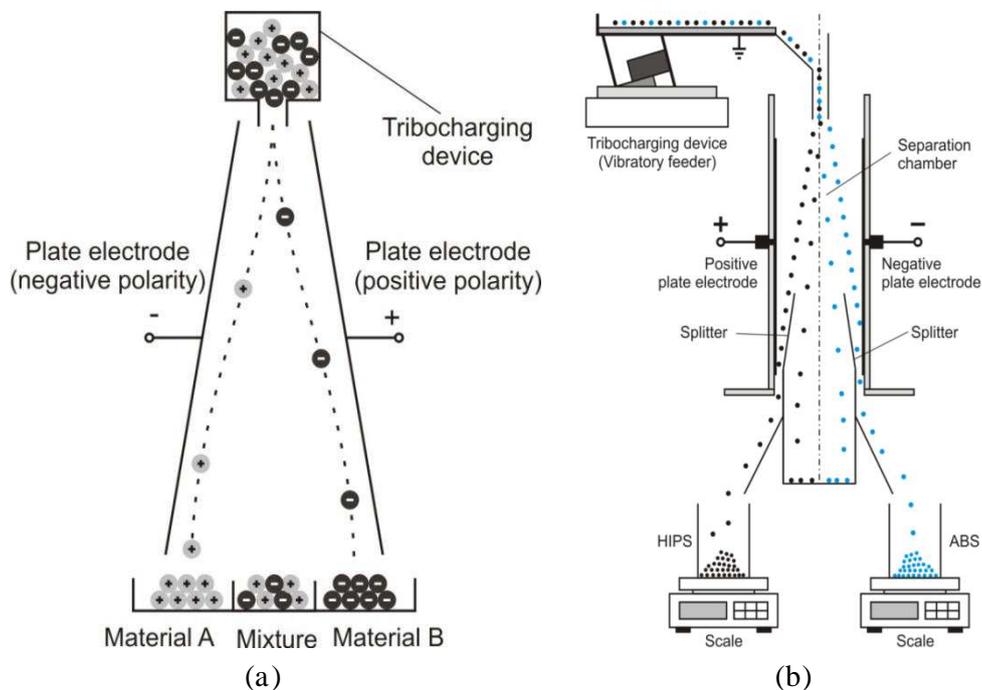


Figure I-31 : (a) Principe du séparateur triboélectrostatique à chute libre ; (b) Cas concret [55].

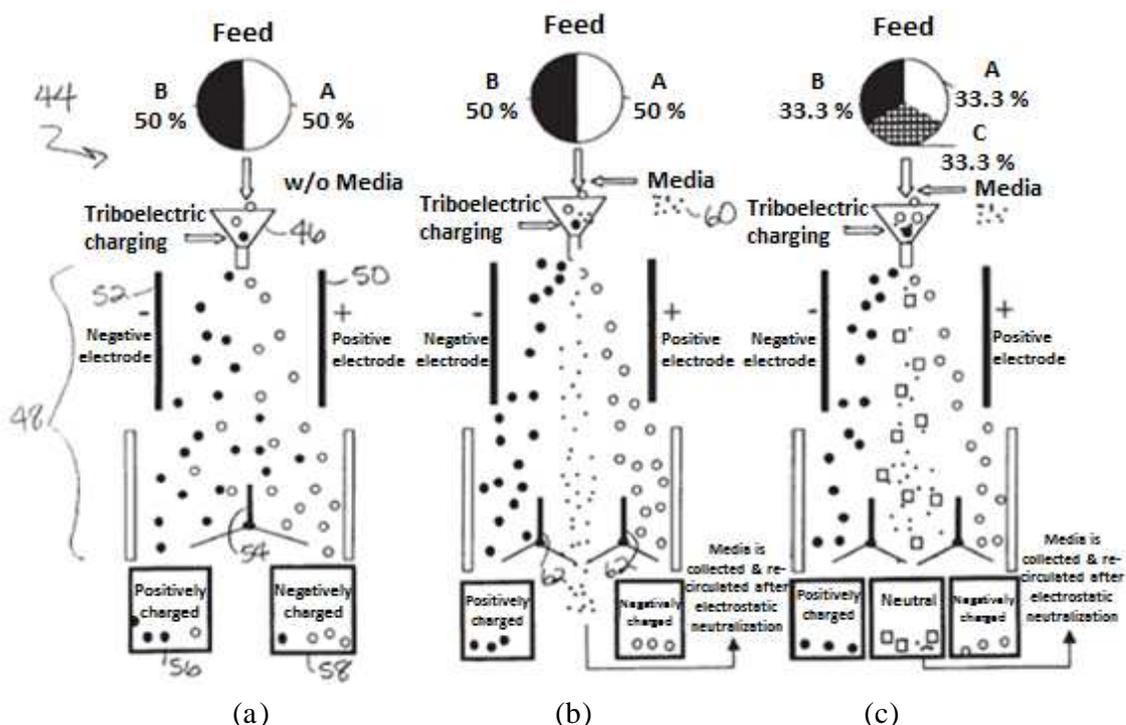


Figure I-32 : Ajout d'un média dans un mélange traité par un séparateur électrostatique à chute libre [136]. (a) Séparation d'un mélange binaire, sans média ; (b) Séparation d'un mélange binaire avec média ; (c) Séparation idéale d'un mélange ternaire avec média.

Beaucoup de brevets ont été déposés sur des installations de séparation à chute libre.

L'un d'entre eux ne concerne pas l'installation en elle-même mais le mélange à traiter. Xiao et al. [136] montrent que l'ajout d'un média dans le mélange au moment de son passage dans un dispositif de charge augmente la quantité de charge acquise par les particules et facilite donc la séparation (figure I-32).

Un autre type de brevet déposé sur un séparateur à chute libre est proposé par Lee [137]. Cette installation (figure I-33) comprend un système de cyclone qui aspire les produits à séparer et les transporte à travers un dispositif de charge (figure I-34), puis jusqu'à un séparateur à chute libre. Ce séparateur sépare les composants du mélange binaire qui y est introduit.

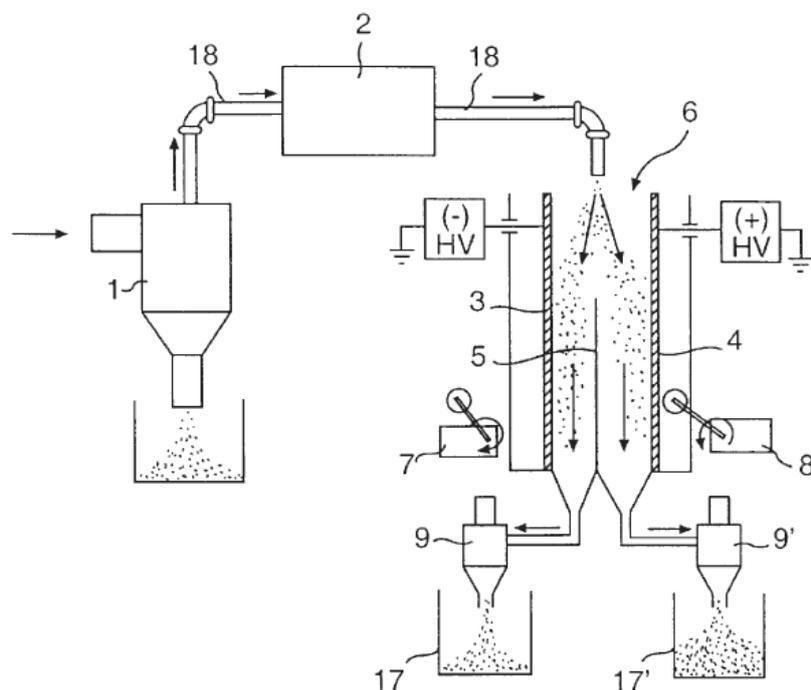


Figure I-33 : Représentation schématique de l'installation proposée par Lee [137]. (1) Cyclone retirant les plus grandes particules (> 125 µm); (2) Dispositif de charge triboélectrique ; (6) Séparateur électrostatique contenant deux plaques de cuivre parallèles (3) et (4) et un déflecteur (5) ; (7) et (8) Marteaux frappant les plaques pour faire tomber les particules collées aux plaques ; (9) et (9') Cyclones ; (17) et (17') Boîtes collectrices.

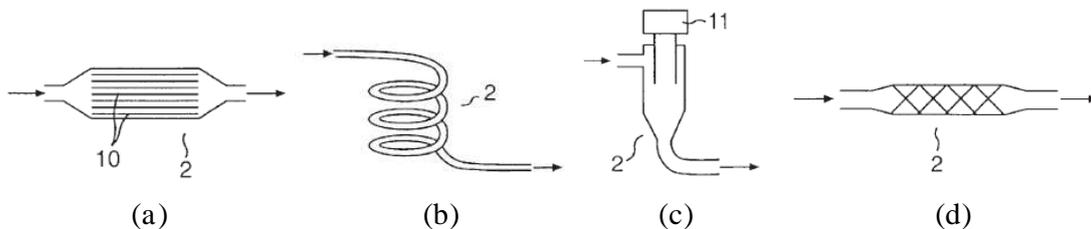


Figure I-34 : Représentation schématique de dispositifs de charge pouvant être utilisés dans l'installation brevetée par Lee [137]. (a) Dispositif en nid d'abeille ; (b) Tube en forme de spirale ; (c) Cyclone ; (d) Plaque en zigzag.

- **Séparateur triboélectrostatique à tambour :**

Dans ce type de séparateur (figure I-35), les particules, préalablement chargées, arrivent sur une électrode cylindrique tournante reliée à la terre sur laquelle elles vont se coller par la force d'image électrique. Un champ électrique est créé entre le tambour et une électrode plaque reliée à la haute tension négative. Les particules chargées positivement, en entrant dans la zone d'application du champ électrique, vont alors être attirées par l'électrode plaque. Leurs trajectoires vont donc se modifier et elles vont atterrir dans le bac numéro 3. Celles chargées négativement vont être repoussées par l'électrode plaque et rester collées sur l'électrode cylindrique. Un balai les décollera afin qu'elles atterrissent dans le bac numéro 1.

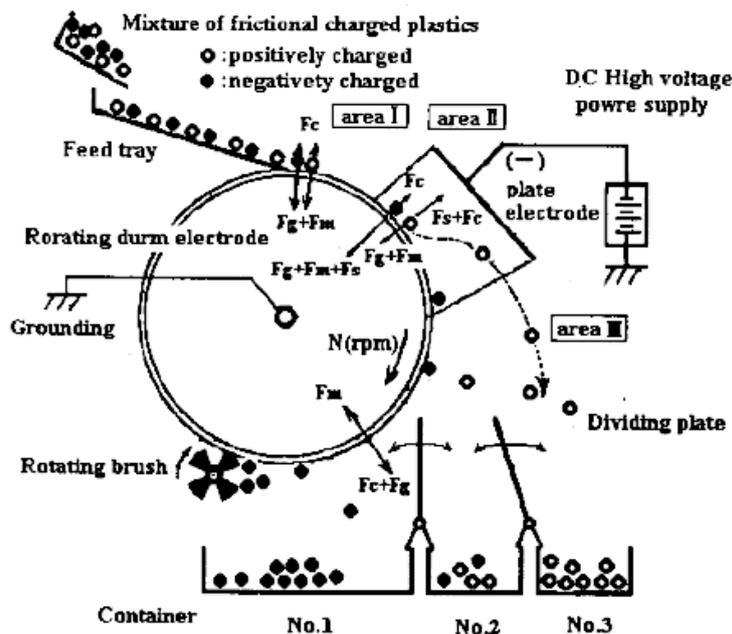


Figure I-35 : Principe de fonctionnement d'un séparateur triboélectrostatique à tambour [138]. F_g : Force de gravité ; F_m : Force d'image électrique ; F_s : Force électrostatique ; F_c : Force centrifuge.

De telles installations permettent d'obtenir des puretés de plastiques récupérés d'environ 99 % [138].

D'autres installations brevetées sont beaucoup plus complexes.

Celle de Fujita et al. [139], en deux modules positionnés en série, permet la séparation d'un mélange de deux composants isolants (figure I-36). Un dispositif de charge quelconque (cyclone, flux d'air, cylindre tournant...) déverse les particules chargées sur un cylindre tournant. Les particules sont alors soumises à un champ électrique créé entre cette électrode et une seconde électrode cylindrique reliée à la haute tension. Les particules, alors chargées de polarités opposées à l'électrode cylindrique, sont alors attirées par cette dernière et sont donc collectées dans un bac prévu à cet effet. Le reste des particules tombe par gravité sur une nouvelle électrode cylindrique tournante et passe dans un nouveau champ électrique. Ainsi, les particules qui n'ont pas été séparées ont une seconde chance de l'être.

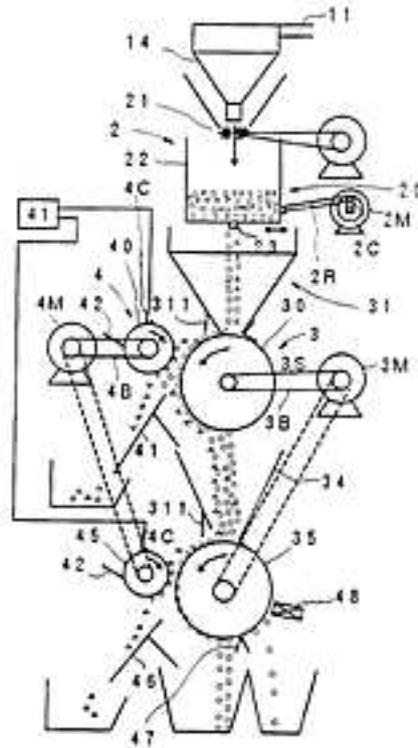


Figure I-36 : Représentation schématique de l'installation proposée par Fujita et al. [139]. (14) Cyclone d'alimentation ; (20) Dispositif de charge par vibrations ; (3) et (35) et (4) et (45) Electrodes cylindriques tournantes respectivement reliée à la terre et à une source de haute tension.

• **Séparateur triboélectrostatique vibrant :**

Ce séparateur triboélectrostatique, peu utilisé, a fait l'objet d'un brevet déposé par Yoon et al. [140] (figure I-37).

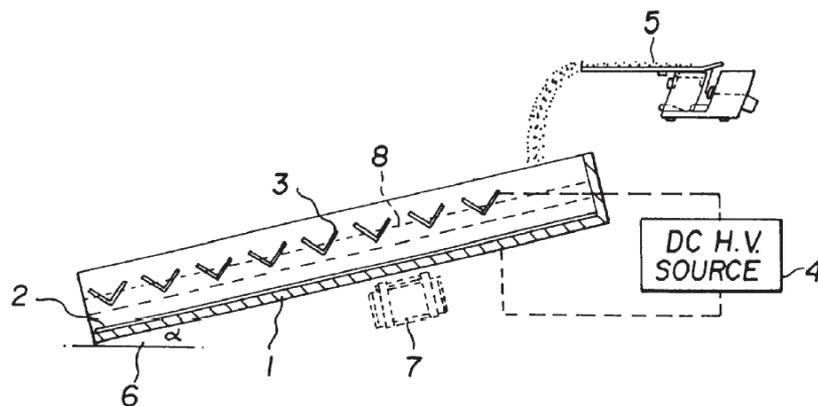


Figure I-37 : Séparateur triboélectrostatique vibrant breveté par Yoon et al. [140]. (2) Electrode plaque vibrante ; (3) Contre-électrode en forme de « V » (4) Source de haute tension continue ; (5) Mélange sous-millimétrique à séparer ; (6) Système de réglage de l'inclinaison ; (7) Vibreur ; (8) Type de particule qui acquière une charge par effet triboélectrique.

Dans ce type de séparateur, les particules chargées par une goulotte vibrante sont déposées sur une plaque, elle aussi vibrante. Cette plaque, ainsi que les collecteurs en forme de « V » qui la surplombe sont reliés à de la haute tension de polarités opposées. Par conséquent, les particules ayant une charge de signe opposée à celle de la plaque vont

descendre le long de celle-ci de par sa vibration. Les particules ayant une charge de même signe que la plaque vont non seulement être repoussées par cette dernière mais vont également être attirées par les collecteurs en « V » et donc y être récupérées (figure I-38).

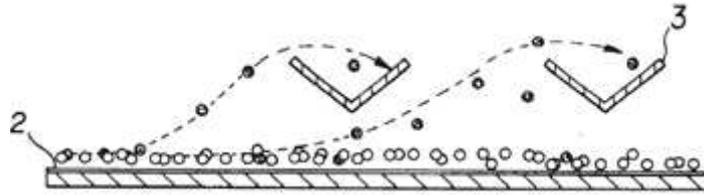


Figure I-38 : Comportement des particules en fonction de leur composition et de leur polarité [140]. (2) Electrode plaque vibrante ; (3) Contre-électrode en forme de « V ».

- **Séparateur tribo-aéro-électrostatique à lit fluidisé :**

Ces installations diffèrent des séparateurs triboélectrostatiques « standards » présentés dans le paragraphe précédent puisqu'elles utilisent simultanément l'effet triboélectrique et les forces de Coulomb et d'image électrique [6], [11], [141-143]. Dans ces séparateurs, le chargement et la séparation sont combinés en une seule opération. Les granules sont chargés et séparés simultanément.

L'avantage majeur de cette solution est que les particules peu chargées ne sont pas obligées de quitter le dispositif de charge tant que la charge acquise n'est pas suffisante pour les attirer vers l'électrode de polarité opposée.

- Séparateur à plaques

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique le plus simple [80], [144-147], décrit en figure I-39 (a), consiste en une chambre rectangulaire avec deux parois verticales, opposées, composées de PMMA. Les deux autres parois sont deux plaques en aluminium, connectées chacune à une source de haute tension continue réglable, de polarité positive ou négative. Une gouttière oscillante introduit le mélange de granules dans une gouttière en haut de la chambre de tribo-électrification. Les granules, chargés par effet triboélectrique dans le lit fluidisé, sont attirés par l'électrode de polarité opposée et sortent de la chambre grâce à deux espaces, situés sous les électrodes, par lesquels ils tombent dans des bacs prévu à cet effet.

Des expériences de séparation tribo-aéro-électrostatique ont été effectuées avec un mélange de Polyamide (PA) et du Polycarbonate (PC) utilisé dans l'industrie plastique. Trois types d'échantillons (masse d'un échantillon : 100 g) ont été préparés avec différentes compositions. Les essais ont été menés sur une durée $t = 60$ s. Le débit de matière traité était de $6 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ et la différence de potentiel entre les deux électrodes $U = 26 \text{ kV}$.

Les résultats (figure I-39 (b)) montrent que le matériau majoritaire du mélange peut être récupéré avec une pureté supérieure à 99 %.

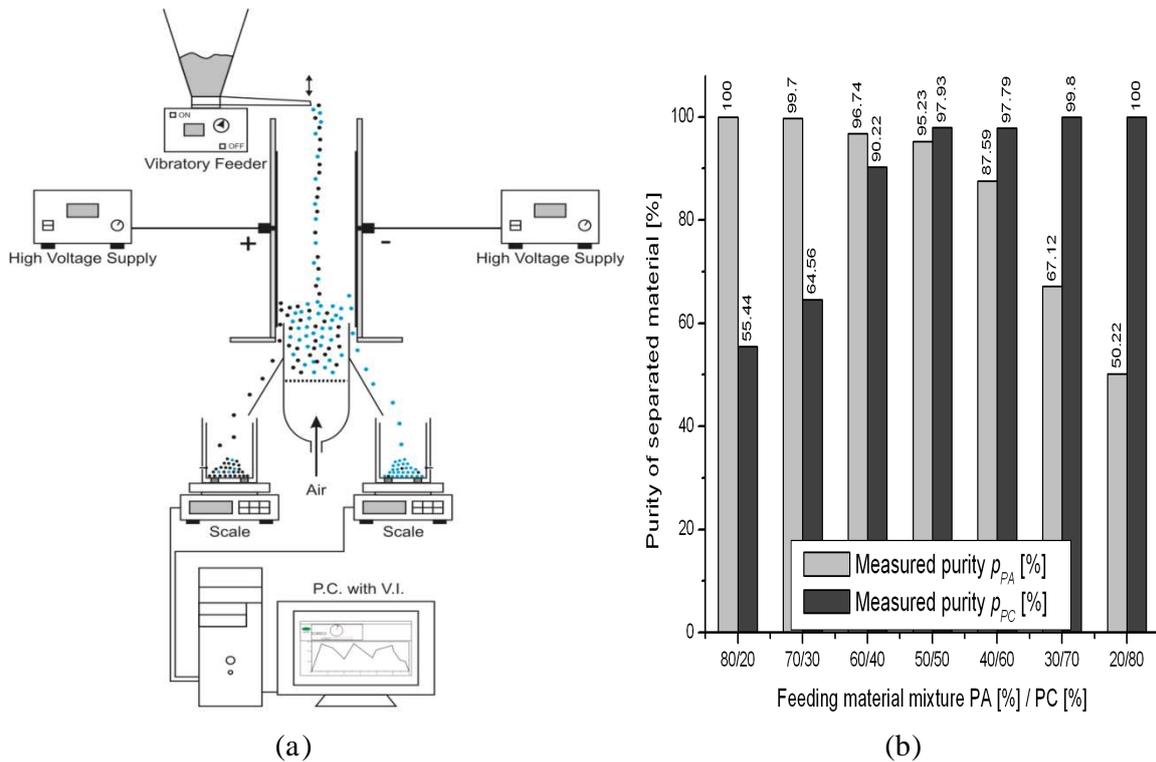


Figure I-39 : (a) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à plaques de laboratoire ; (b) Résultats de séparation de plusieurs mélanges de PA et de PC [80].

Le matériau minoritaire est récupéré à une pureté nettement inférieure. Ces observations peuvent s'expliquer par le fait que le matériau minoritaire charge seulement une partie du matériau majoritaire alors que le reste est collecté grâce à l'autre électrode avec le matériau initialement minoritaire.

○ Séparateurs à disques métalliques tournants

L'aspect général de ce type de séparateur tribo-aéro-électrostatique [148] est présenté sur la figure I-40. Une quantité de matériaux est introduite dans un lit fluidisé généré dans une chambre de séparation ((2) ; 210 x 225 x 180 mm) composée de parois en PMMA transparent. Une turbine de 0,75 kW (7) fournit le débit d'air souhaité. Le lit fluidisé se forme grâce à une plaque poreuse qui distribue uniformément l'air. Les effets électrostatiques dans un lit fluidisé sont dus à des collisions entre les particules elles-mêmes et entre les particules et les parois de la chambre de séparation (2). Il en résulte la tribo-électrification des matériaux [149], [150].

Le champ électrique est généré entre deux disques tournants ((3) ; diamètre : 220 mm ; épaisseur : 2 mm) plongés dans un lit fluidisé et situés à une distance d comprise entre 40 mm et 120 mm l'un de l'autre. Chaque disque est relié à un générateur de haute tension de polarité opposée à l'autre et est entraîné en rotation par un moteur à vitesse variable (1). Les produits sont récupérés dans deux boîtes collectrices (5) placées à l'extérieur de la chambre de séparation.



Figure I-40 : Photographie d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques [151]. (1) Moteurs électriques ; (2) Chambre de séparation ; (3) Electrodes-disques tournants ; (4) Collecteurs ; (5) Cages de Faraday ; (6) Balances électroniques ; (7) Turbine ; (8) Armoire électrique.

Pour chaque expérience, la turbine est mise en route et les matériaux sont donc chargés dans le lit fluidisé. Ensuite, les disques tournants et la haute tension sont mis en marche et la séparation est maintenue jusqu'à ce que la pureté des produits séparés commence à diminuer. Il a été constaté que la pureté des deux produits récupérés augmente puis commence à diminuer après une certaine durée de traitement.

Il n'est pas nécessaire d'utiliser un débit d'air de fluidisation trop important. En effet, quand le débit augmente, les particules vont acquérir une charge triboélectrique plus importante et, par conséquent, l'attraction entre les deux types d'isolants va diminuer l'efficacité de la séparation. Lorsqu'un disque est complètement recouvert d'un type d'isolant, le second isolant va commencer à se coller à celui-ci.

En plus de la force d'image électrique, qui provoque l'attachement des particules sur les disques, une autre force mécanique, la force centrifuge, doit être considérée. Lorsque cette force augmente, proportionnellement à la vitesse de rotation, n , cela provoque le détachement des particules et donc une baisse de l'efficacité de la séparation. Dans un second temps, pour de faibles valeurs de n , les particules ont assez de temps pour couvrir toute la surface des disques provoquant alors l'attachement de particules de charges opposées, diminuant ainsi la pureté des produits récupérés.

Les résultats obtenus sont prometteurs : les mélanges de différents plastiques micronisés sont séparés avec de hauts niveaux de puretés. De premiers essais avec des particules granulaires montrent aussi une bonne efficacité de ce système.

○ Séparateur à convoyeurs

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique breveté par Calin et Dascalescu [6], [152-155], a la particularité que ses électrodes sont deux convoyeurs métalliques liés à des générateurs de haute tension continue (figure I-41). La longueur active d'une électrode (i.e. la distance entre les deux poulies du convoyeur) est de 500 mm. La distance moyenne entre les électrodes dans la zone de lit fluidisé étant de 20 cm, un champ électrique de 2 kV.cm^{-1} est créé lorsque la tension appliquée aux électrodes est de $\pm 20 \text{ kV}$. Les granules chargés dans le lit fluidisé sont attirés par les convoyeurs et collés à la surface de la bande métallique de ces derniers par les forces électriques. La rotation des convoyeurs conduit ces particules jusqu'à des bacs prévus à cet effet. Le débit d'alimentation en matière du système est ajusté pour être égal au débit de produit trié, sortant de l'installation.

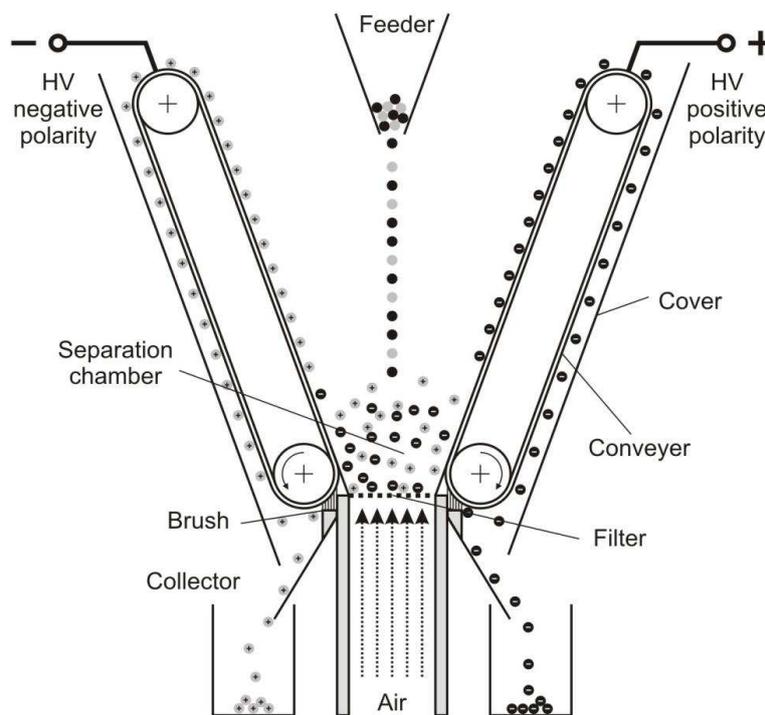


Figure I-41 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à convoyeur pour des mélanges de plastiques granulaires récemment breveté [6], [154].

Tant qu'aucune particule non-chargée ne peut quitter la chambre de séparation, la pureté du produit collecté est proche de 100 %. En revanche, chaque particule reste dans le séparateur le temps pour elle d'acquérir la charge nécessaire pour être collectée par les électrodes. Dans le cas où l'état de surface des granules et où les conditions ambiantes sont adéquates, les particules sont rapidement attirées par les électrodes et l'installation peut traiter un débit de matière important. Dans le cas de conditions de charge défavorables, le débit dépend de la plus longue durée de résidence des particules dans la zone active du séparateur.

○ Séparateur à électrodes cylindriques tournantes

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes est présenté sur les figures I-42 et I-43 et a été conçu dans le laboratoire IRECOM (Algérie). Le

mélange à séparer est introduit dans la chambre de fluidisation qui sert aussi de chambre de séparation. Celle-ci a une section rectangulaire (230×80×70 mm) et ses parois sont en PMMA transparent. Une turbine, d'une puissance nominale de 1,1 kW, permet l'injection de l'air à vitesse variable dans la chambre de fluidisation.

Le champ électrique est généré entre deux électrodes cylindriques tournantes (diamètre : 160 mm, longueur : 300 mm) distantes de 8 cm et situées de part et d'autre de la chambre de séparation. Chaque électrode est connectée à une source de haute tension continue de polarité opposée à la seconde. Leur entrainement à vitesse variable est réalisé par deux moteurs à courant continu. Les produits séparés sont récupérés dans les deux bacs collecteurs placés de chaque côté de la chambre de séparation [123], [143], [156].

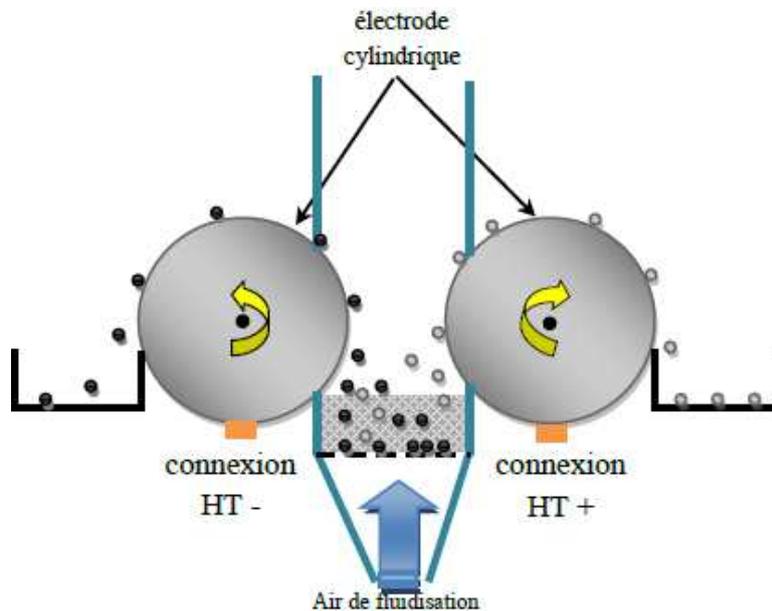


Figure I-42 : Représentation schématique du séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes cylindriques tournantes [156].

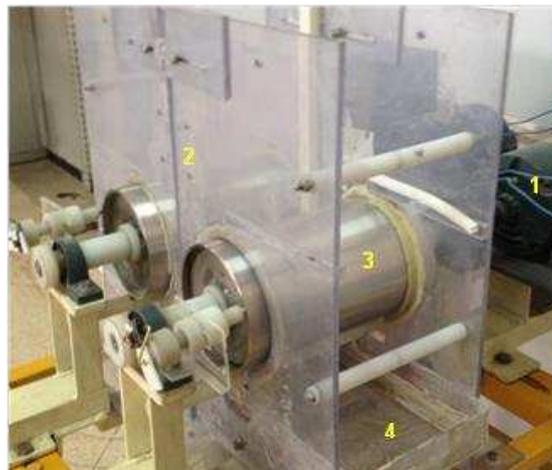


Figure I-43 : Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes cylindrique tournantes. (1) Moteur à courant continu ; (2) Chambre de séparation ; (3) Electrodes cylindriques tournantes ; (4) Bacs collecteurs [156].

Ce type de séparateur a un fonctionnement optimisé comparativement à celui à convoyeurs. En effet, 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. Ainsi, une même particule peut perdre sa charge avant de pouvoir être collectée et va donc se détacher du convoyeur et ainsi retomber dans le lit fluidisé. Ce phénomène impacte donc l'efficacité des séparateurs tribo-aéro-électrostatiques à convoyeurs. L'utilisation de tambours optimise donc ce fonctionnement.

Dans le cas de la séparation de mélanges isolants, là encore, Hamos est un des grands industriels qui partagent ce marché du recyclage des plastiques [121]. Il présente notamment ses gammes RSS et EKS qui permettent le traitement de particules isolantes.

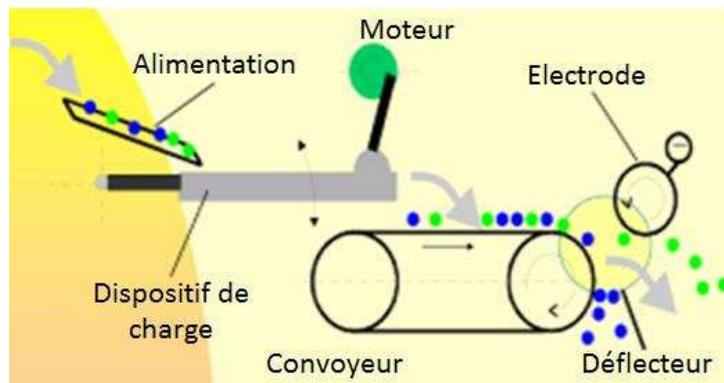


Figure I-44 : Principe de séparation des systèmes HAMOS [121].

Dans leurs procédés (figure I-44), les particules, chargées dans un dispositif de charge vibrant à excentrique, sont déposées sur un convoyeur métallique. Ce dernier les transporte jusqu'à une zone de champ électrique intense créé entre une électrode cylindrique reliée à la haute tension négative et le convoyeur relié à la terre.

Les particules chargées positivement dans le dispositif de charge sont alors attirées par l'électrode cylindrique alors que les particules chargées négativement sont repoussées par cette même électrode. Ainsi, le mélange de particules est séparé en deux fractions distinctes.

Une autre entreprise, Plas-Sep, basée au Canada propose elle aussi une activité de séparation de mélange de matériaux isolants [121]. Cette entreprise fabrique des séparateurs triboélectrostatiques à chute libre qu'elle choisit d'accompagner d'un dispositif de charge à cylindre tournant (figure I-45).

L'effet triboélectrique est un phénomène compliqué, il s'agit de l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux. Plusieurs facteurs peuvent inverser les signes, il semble donc difficile de contrôler un phénomène qui contient cette particularité de l'électricité statique.

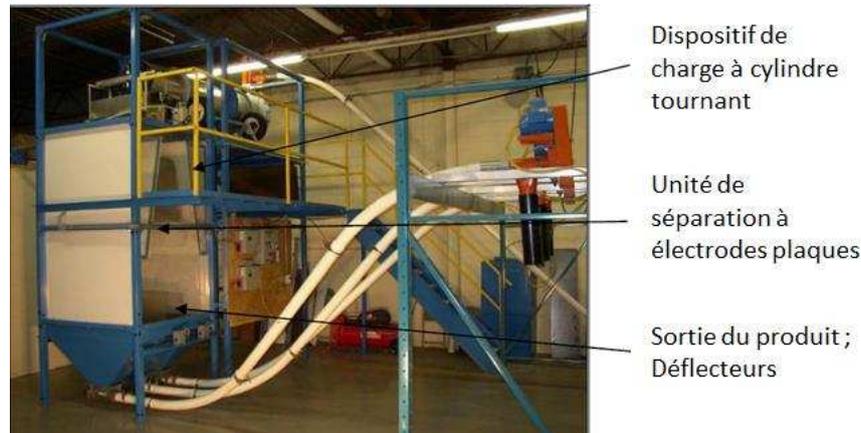


Figure I-45 : Installation de séparation à chute libre proposée par Plas-Sep [121].

Cependant, la séparation électrostatique utilisant ce phénomène représente l'une des meilleures techniques de tri dans le domaine du recyclage des DEEE. Elle se caractérise par une faible consommation d'énergie et permet l'élimination des contaminants métalliques et le tri des plastiques tout en respectant l'environnement, sans additifs chimiques et en voie sèche. Par ailleurs, la pureté élevée des produits obtenus, ainsi que les facilités d'entretien et d'utilisation classent le procédé de séparation électrostatique parmi les plus efficaces.

Les séparateurs tribo-aéro-électrostatiques apportent d'irremplaçables avantages à la séparation électrostatiques de mélanges d'isolants. Ce type d'installation présente en outre l'avantage de combiner simultanément le chargement des particules et leur séparation en régime continu.

I-3. Décharge à Barrière Diélectrique (DBD)

La Décharge à Barrière Diélectrique (DBD), permet notamment le traitement de surface de matériaux isolants par le biais d'une décharge plasma. Un des objectifs de cette thèse est de quantifier la modification de la charge triboélectrique engendrée par une exposition à la DBD. Par conséquent, ce paragraphe vise à décrire quelques notions générales sur les plasmas, la DBD volumique et le traitement de surface par plasma.

I-3.1. Notions générales sur les plasmas

Les plasmas constituent le quatrième état de la matière dans l'échelle des températures et fait suite aux trois états « classiques » : solide, liquide et gazeux. Langmuir et Tonks, en 1923, ont été les premiers à définir le terme de plasma (du grec « matière informe ») pour désigner, dans les tubes à décharges, certaines régions équipotentielles contenant un gaz ionisé électriquement neutre.

Dans des conditions normales, les milieux gazeux ne permettent pas la conduction de l'électricité. Lorsqu'un gaz est soumis à un champ électrique faible, il est considéré comme un isolant parfait car il ne comporte aucune particule chargée libre (électrons ou ions). Les électrons et les ions ne peuvent apparaître que si le gaz est soumis à un champ électrique de

forte intensité, à des températures élevées, à un champ magnétique très intense ou encore à un bombardement de particules.

Un plasma, analogue à un gaz, est constitué de particules chargées, d'ions et d'électrons de sorte que l'ensemble soit globalement neutre.

On peut distinguer les plasmas naturels tels que les étoiles, le vent solaire, l'ionosphère, les aurores boréales ou encore les éclairs, des plasmas artificiels comme les systèmes de découpe plasmas, les écrans de téléviseurs ou encore les propulseurs [157].

Les plasmas peuvent être classés en fonction de plusieurs critères comme la densité électronique (nombre d'électrons libres par unité de volume), le degré d'ionisation (rapport du nombre d'électrons libres et du nombre total de particules), le libre parcours moyen (i.e. la distance moyenne parcourue par une particule chargée entre deux collisions) et la température électronique (température absolue des électrons, en Kelvin).

Deux types de plasmas peuvent alors être différenciés : les plasmas chauds et les plasmas froids.

Dans les plasmas froids, seuls les électrons ont acquis suffisamment d'énergie pour effectuer des réactions. La température des électrons est très supérieure à celle des ions. Les ions sont considérés comme froids car leur température est la même que celle des molécules neutres du gaz environnant. Les plasmas utilisés pour cette étude appartiennent à la catégorie des plasmas froids. Les plasmas chauds se caractérisent par le fait que les ions aient la même énergie que les électrons.

Une décharge électrique peut avoir lieu dans un gaz si celui-ci se trouve entre deux électrodes auxquelles une différence de potentiel conséquente est appliquée. Dans ce cas, le gaz peut s'ioniser et laisser passer un courant. Les décharges dépendent de nombreux paramètres tels que la nature du champ électrique (continu, alternatif ou impulsionnel), la nature et la pression du gaz ou encore des distances caractéristiques (distance inter-électrodes) [158].

De nombreuses configurations sont capables de produire des décharges électriques, ce qui rend difficile leur classement. Il est possible de citer principalement : les décharges directes ou décharges entre surfaces planes et conductrices, les décharges couronnes et les Décharges à Barrière(s) Diélectrique(s) (dont au moins un diélectrique solide est placé entre les électrodes). Dans les gaz à pression atmosphérique, les décharges à barrière diélectrique volumique et surfacique peuvent être distinguées. Les DBD sont de plus en plus utilisées dans diverses applications industrielles telles que le dépôt de couche mince, la génération d'ozone, le contrôle d'écoulement ou encore le traitement de surface...

I-3.2. Décharges à Barrière Diélectrique volumique

Un problème récurrent des décharges à tension continue dans l'air à pression atmosphérique (décharges couronnes par exemple) est la formation d'importantes charges

d'espace qui peuvent conduire à des arcs électriques potentiellement dangereux pour le matériel. Pour limiter leur apparition, une solution consiste à déposer au moins un diélectrique solide entre les deux électrodes, c'est la Décharge à Barrière Diélectrique (ou DBD ; figure I-46).

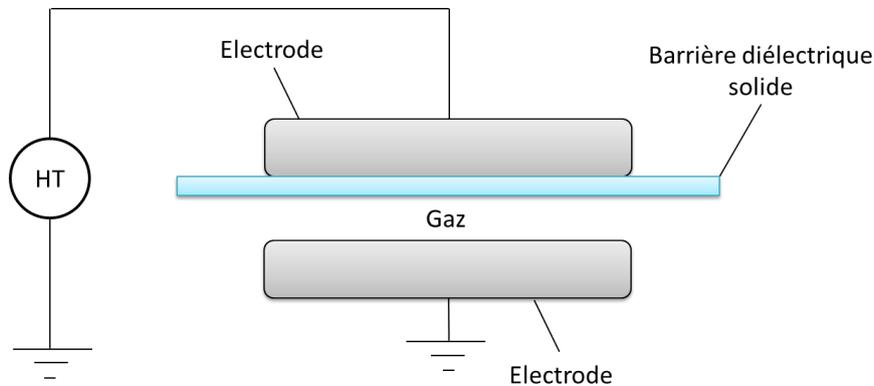


Figure I-46 : Configuration classique d'une DBD volumique.

Lorsqu'une tension suffisamment élevée est appliquée entre les électrodes, le claquage du gaz conduit à la formation d'un canal conducteur, c'est-à-dire à une micro-décharge (figure I-47 (a)). Le schéma électrique équivalent à cette micro-décharge est représenté en figure I-47 (d). Le diélectrique se comporte alors comme l'isolant d'un condensateur C_d , dont les armatures sont d'un côté la décharge et de l'autre l'électrode. V_a est la tension appliquée à l'ensemble de la cellule, V_g celle aux bornes du gaz et V_d celle aux bornes du diélectrique.

Une accumulation de charge sur la surface du diélectrique en vis-à-vis du canal de décharge est induite par le passage du courant, se traduisant par une augmentation de la tension V_d . Si l'augmentation de cette tension pendant le développement de la décharge est supérieure à celle de la tension V_a , elle cause une diminution de la tension V_g appliquée sur le gaz, conduisant ainsi à l'extinction de la décharge. Ainsi, la micro-décharge est stoppée bien avant d'avoir atteint le seuil d'apparition d'arc électrique. Tant que la tension appliquée augmente, des micro-décharges s'amorcent à de nouvelles positions car la présence de charges résiduelles sur le diélectrique diminue localement le champ électrique appliqué sur le gaz (figure I-47 (b)).

Au changement de polarité (tension alternative ; figure I-47 (c)), les charges alors déposées sur la surface du diélectrique favorisent un claquage du gaz sous un champ plus faible.

Le diélectrique sert à limiter le courant transitant dans le canal afin que la décharge ne devienne pas un arc comme cela peut arriver entre deux électrodes métalliques à pression atmosphérique. Le diélectrique tend également à favoriser une répartition uniforme des micro-décharges sur toute sa surface [159].

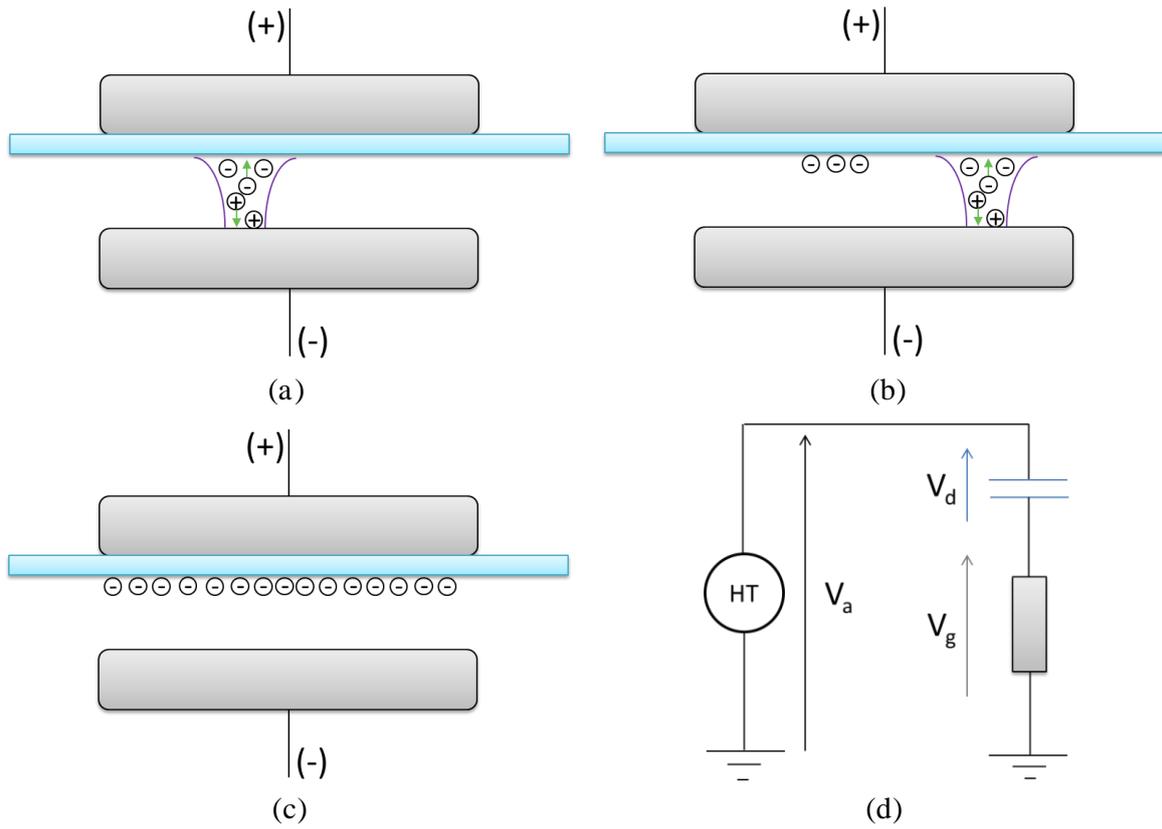


Figure I-47 : Principe de fonctionnement d'une DBD. (a) Etablissement d'une première micro-décharge ; (b) Extinction de la première micro-décharge et amorçage d'une nouvelle ; (c) Changement de polarité appliquée aux électrodes ; (d) Schéma électrique équivalent à une micro-décharge.

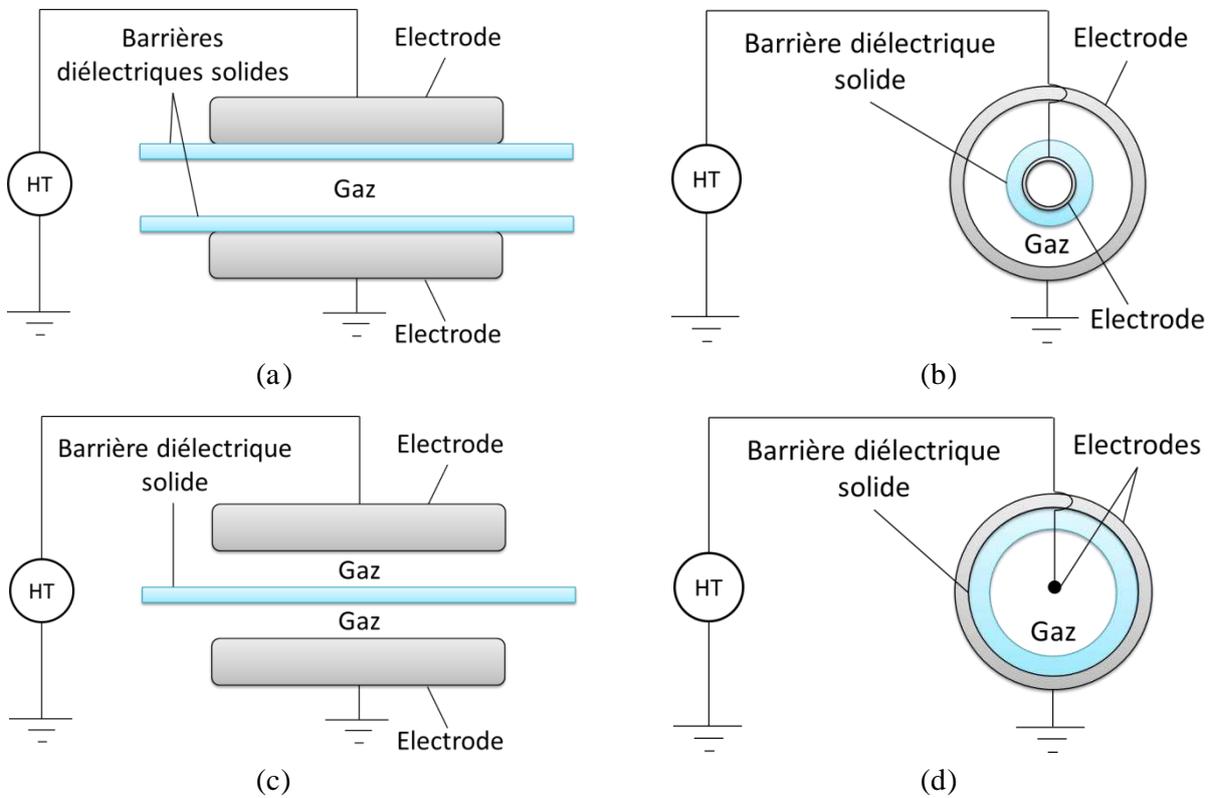


Figure I-48 : Différentes configurations de DBD volumiques. (a) Double barrière diélectrique ; (b) Coaxiale ; (c) Simple barrière sans contact ; (d) Fil-cylindre.

Outre la configuration classique présentée en figure I-46, de nombreuses configurations de DBD existent et sont largement utilisées. En effet, le terme de DBD regroupe toutes les configurations de cellule de décharge pour lesquelles un courant transite entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz et par au moins une couche d'un matériau isolant. Selon l'application visée, deux couches isolantes peuvent être utilisées. Les configurations des électrodes coplanaires et cylindrique typiques sont illustrées sur la figure I-48.

La physique des DBD fait toujours l'objet de nombreux travaux de recherche. Ainsi, les régimes de décharges observés à pression atmosphérique sont principalement le régime filamentaire (de type streamer) ou le régime homogène. Ces régimes dépendent des configurations géométriques, des gaz ou encore du type d'excitation électrique. Les photographies de la figure I-49 montrent différents régimes de décharge dans différent gaz à pression atmosphérique créés dans l'espace inter-électrode d'une DBD volumique en configuration plan – plan avec une excitation AC. Certaines études ont démontré que l'espace inter-électrode ainsi que le matériau du diélectrique constituent des facteurs importants, influençant la transition des deux principaux régimes de décharge sous excitation impulsionnelle [160], [161].

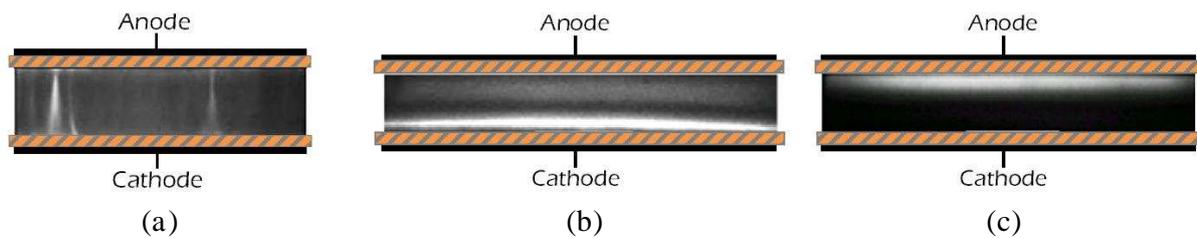


Figure I-49 : Différents régimes de DBD de volume à pression atmosphérique. (a) Régime filamentaire de type streamer [162] ; (b) Régime homogène de type Glow [163] ; (c) Régime homogène de type Townsend [163].

Une décharge filamentaire est, par définition, composée d'une multitude de filaments, initiés par un claquage de type streamer (figure I-49 (a)). Ce régime est caractérisé par l'apparition d'une multitude de streamers se développant indépendamment les uns des autres et conduisant à la formations de micro-décharges.

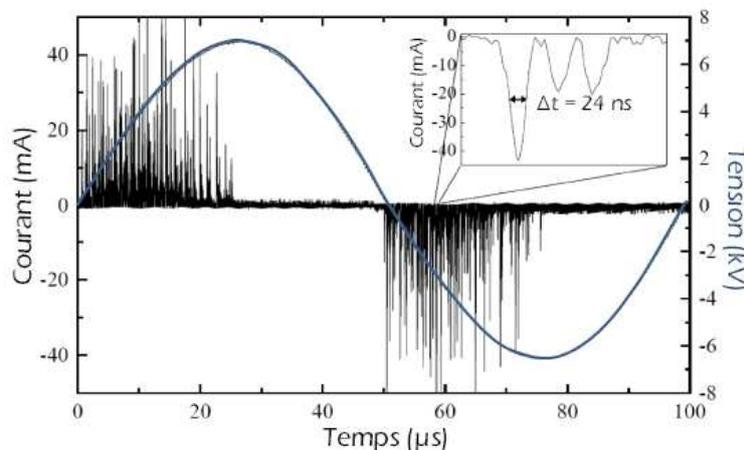


Figure I-50 : Formes d'ondes électriques d'une décharge filamentaire sous excitation AC sinusoïdale à 10 kHz [165].

Chacune de ces décharges induit une impulsion de courant d'une durée moyenne de quelques dizaines de nanosecondes en AC (figure I-50). Comme les micro-décharges se développent indépendamment, le courant est constitué d'une multitude d'impulsions. Ces paquets d'impulsions de courant s'ajoutent à une composante de courant capacitive due à la structure de la décharge et au montage électrique dans son ensemble [164].

En ce qui concerne le régime de décharge homogène, il peut être de type Glow (luminescent) ou de type Townsend.

- **DBD homogène de type Glow :**

Dès 1969, Bartnikas observait, dans une DBD dans l'hélium, un régime différent du régime filamentaire classique [166]. Plus récemment, Okazaki et al. montrèrent l'existence d'un régime homogène à la pression atmosphérique, qu'ils appelèrent « luminescent » [167-169]. Elle se caractérise, en AC, par un seul pic de courant par demi-période. Ceci suggère un développement unique de la décharge dans tout l'espace inter-électrodes (figure I-49 (b)).

La caractéristique courant – tension d'une décharge luminescente (figure I-51), comme celle obtenue dans l'hélium, permet de mettre en évidence qu'une fois la décharge amorcée, la tension appliquée sur le gaz diminue alors que le courant continue à augmenter.

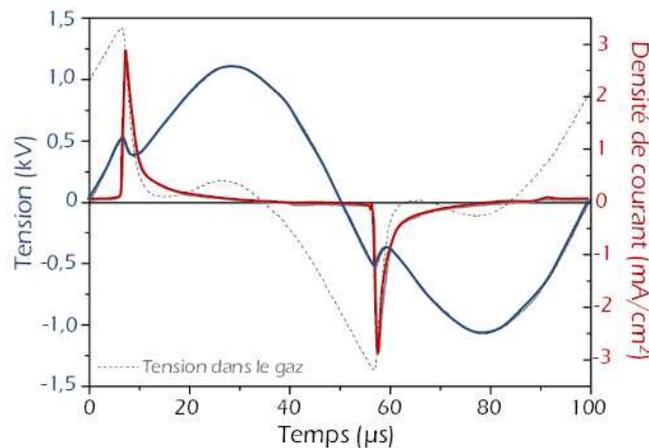


Figure I-51 : Forme d'onde électrique d'une décharge homogène de type Glow à 10 kHz [170].

- **DBD homogène de type Townsend :**

Des travaux similaires à ceux d'Okazaki furent réalisés par Roth et al. [171], [172], ainsi que par Massines et al. [173], [174] montrant l'existence d'un régime homogène à la pression atmosphérique, qu'ils appelèrent « Townsend DBD » [175]. La décharge de type Townsend (figure I-49 (c)) est aussi caractérisée par un seul pic d'intensité par demi-période en AC mais celui-ci est plus étendu (figure I-52). De plus, la tension dans le gaz reste sensiblement constante durant toute la phase de la décharge.

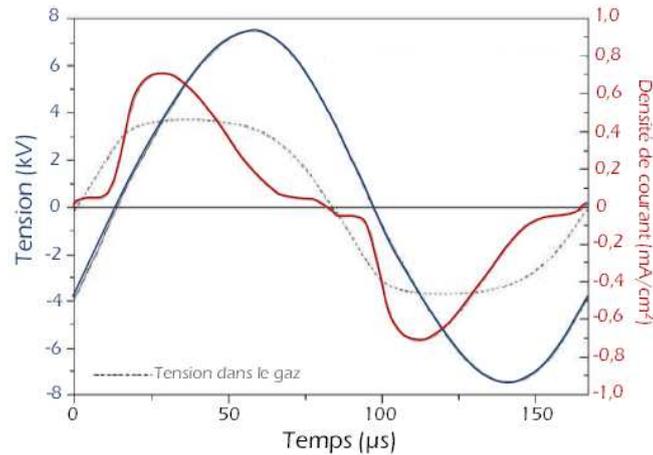


Figure I-52 : Formes d'ondes électriques d'une décharge homogène de type Townsend [170].

I-3.3. Traitement de surface par plasma froid

Les plasmas froids sont très utilisés pour le traitement de surfaces avec comme objectif de conférer de nouvelles propriétés de surface au matériau traité tout en conservant ses propriétés volumiques. En effet, si les espèces énergétiques créées dans le plasma (photons, ions, molécules ou atomes excités) ont assez d'énergie pour casser des liaisons à la surface du matériau, elles n'en ont pas assez pour le pénétrer au-delà de quelques dizaines de nm. De plus, l'impact environnemental des plasmas froids est minime en comparaison des procédés chimiques par voie humide.

A la fin des années 1960, l'industrie de la micro-électronique a cherché à développer les applications des procédés par plasmas notamment au niveau du dépôt de couches minces de matériaux [176] et du décapage/gravure de semi-conducteur et de métaux également appelée ablation pour les polymères tels que les résines photosensibles [177], [178].

Contrairement au dépôt ou à la gravure, où un matériau est respectivement ajouté ou enlevé, la modification, l'activation ou encore la fonctionnalisation de surface influe sur la composition et la structure de quelques couches moléculaires de la surface. L'environnement agit d'abord sur la surface du matériau. C'est pourquoi, il est intéressant d'améliorer ses propriétés de surface telles que sa résistance à la corrosion, sa biocompatibilité ou encore sa dureté. Le traitement par plasma permet également de modifier son énergie de surface et ainsi de les rendre hydrophobes ou hydrophiles en greffant les groupes fonctionnels adéquats.

Dans ce cas, il est possible d'augmenter la mouillabilité, d'améliorer l'adhésion, de modifier la rugosité ou encore d'avoir une meilleure biocompatibilité.

Les interactions plasma – polymères en atmosphère de gaz non polymérisables engendrent des réactions à la surface des dits matériaux. La rupture des liaisons covalentes (coupure des chaînes macromoléculaires) et la formation de radicaux libres se produisent lors du bombardement de la surface des polymères par les espèces énergétiques créées au sein du plasma. Les radicaux libres réagissent avec les espèces actives du plasma. De cette réaction

résulte, à la surface des matériaux, la formation de groupements chimiques fonctionnels dépendant de la nature de la phase gazeuse du plasma (plasma d'oxygène ou d'azote etc.).

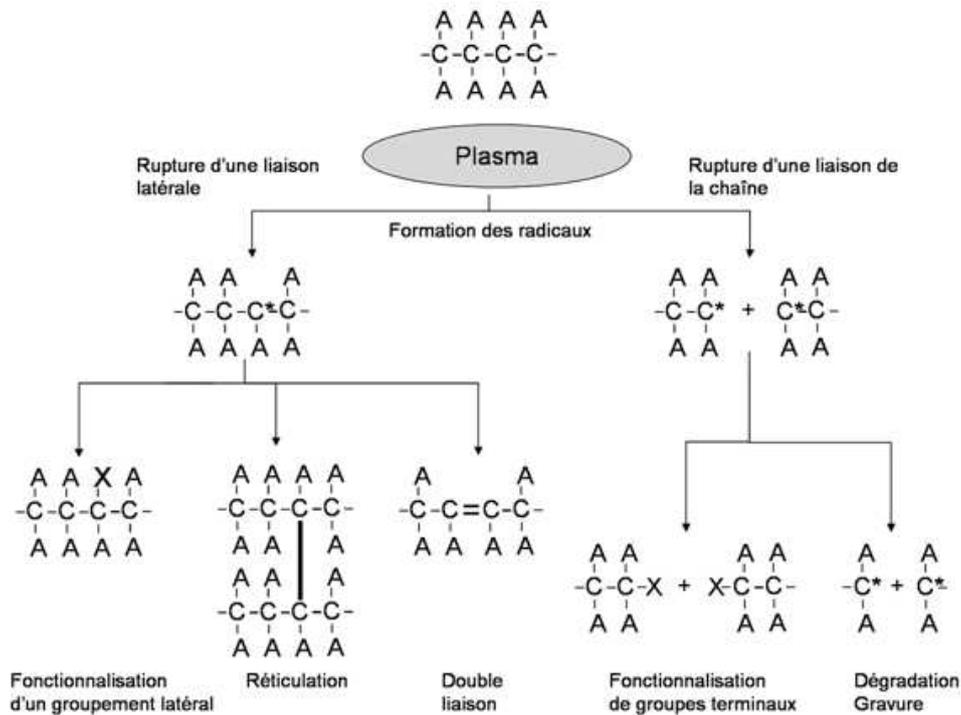


Figure I-53 : Ensemble des réactions possibles lors d'un contact plasma-polymère [179].

La figure I-53 résume l'ensemble des modifications possibles de la surface d'un polymère exposé à ce type de plasma. Les espèces excitées, ionisées ou bien fragmentées interagissent avec la surface du polymère, scindent des liens dans les chaînes polymériques et activent la surface pour permettre le greffage d'espèces ou de groupes fonctionnels en bout de la chaîne du polymère ou sur un groupement latéral [179-182].

Il est possible de distinguer trois effets majeurs du plasma sur la surface des polymères :

- décapage ou ablation légère : le décapage par plasma permet d'éliminer une fine couche de contaminant laissée sur la surface d'un objet lors d'un nettoyage par exemple. L'ablation légère permet aussi d'enlever des couches de faible cohésion. L'adhésion de substrats polymères traités par plasma peut être améliorée par cette méthode. Le décapage de couches superficielles de la surface par plasma peut également la stériliser biologiquement [183-186],

- réticulation ou embranchement : ce phénomène pouvant augmenter la résistance à la chaleur et la résistance à la traction de la surface [179], [187], les réticulations en surface sont souvent utilisées pour améliorer les performances des polymères. Un plasma créé dans un gaz noble (Hélium ou Argon) est nécessaire pour ne pas ajouter de nouvelles fonctionnalités chimiques,

- modification chimique : de nouvelles fonctionnalités chimiques de surface provenant de l'atmosphère gazeuse du plasma sont créées. C'est l'effet le plus souvent reporté d'un traitement plasma sur un polymère dans la littérature. Des plasmas créés dans l'oxygène ou

contenant des espèces azotées sont utilisés pour greffer des fonctions polaires qui permettent d'améliorer l'adhésion, la mouillabilité, la biocompatibilité... (figure I-54) [179], [183], [188].

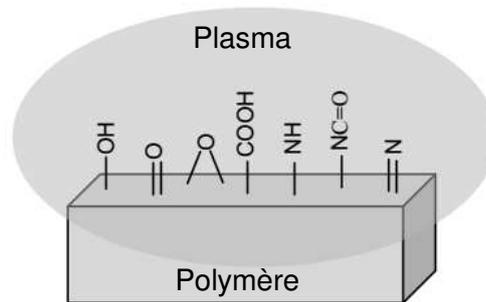


Figure I-54 : Modification chimique de surface par plasma non polymérisant [188-190].

I-4. Conclusions

Une multitude de séparateurs électrostatiques existent et permettent la séparation de mélange conducteur – isolant et isolant – isolant. Peu d'études ont été faites pour la séparation conducteur – conducteur car l'efficacité d'autres installations a été éprouvée. Toutefois, leur adaptation à des conditions industrielles n'est que peu approfondie et se heurte rapidement à des difficultés liées, notamment, à la présence de poussières.

Dans ces séparateurs, trois phénomènes permettant la charge des particules se distinguent : l'induction électrostatique, l'effet couronne et la charge triboélectrique. L'induction électrostatique ainsi que l'effet couronne sont majoritairement utilisés pour les séparations conducteur – isolant et peuvent être utilisés pour la séparation conducteur – conducteur. En revanche, seul l'effet triboélectrique permet la séparation de mélanges isolant – isolant. Bon nombre de dispositifs de charge triboélectrique existent mais peu d'entre eux peuvent convenir à un fonctionnement industriel.

Malgré ce nombre important d'installations de laboratoire permettant la charge et la séparation de particules isolantes, certains mélanges ne peuvent pas être séparés. C'est pourquoi, il est important d'agir sur les propriétés de surface des matériaux en les soumettant à un plasma froid par le biais d'une Décharge à Barrière Diélectrique.

Ces considérations nous ont incités à aborder trois défis distincts :

- la mise au point d'une méthode de séparation électrostatique des mélanges de plusieurs matériaux conducteurs,
- le développement d'un dispositif de charge triboélectrique adapté au fonctionnement continu, en amont d'une installation de séparation électrostatique de mélanges de matériaux isolants,
- l'évaluation de la possibilité d'utiliser la Décharge à Barrière Diélectrique comme moyen d'augmenter l'aptitude de certains matériaux granulaires à se charger par effet triboélectrique.

CHAPITRE II : INSTALLATIONS EXPERIMENTALES ET METHODES D'ANALYSE

La séparation électrostatique de plusieurs types de produits a été étudiée. L'ensemble de ces matières (conductrices et isolantes) est présenté dans le paragraphe II-1.

Pour déterminer l'efficacité du tri électrostatique de ces matériaux, plusieurs types de séparateurs ont été utilisés et sont détaillés dans le paragraphe II-2. Parmi eux, le séparateur électrostatique de laboratoire de la société Carpco Inc., Jacksonville, Floride, a été utilisé pour la séparation des mélanges conducteur – isolant et conducteur – conducteur puisqu'il permet aussi bien un fonctionnement à électrode plaque qu'à tambour. Le séparateur électrostatique à tambour de la société Prodecologia, Rivne, Ukraine, a permis la séparation isolant – isolant. Les essais industriels ont été effectués chez CITF sur les installations PRD et CP100.

Le banc d'essais utilisé pour l'application de la Décharge à Barrière Diélectrique au traitement de surface des particules isolantes dans le but d'augmenter l'efficacité du processus de charge triboélectrique et de faciliter ainsi leur séparation électrostatique est présenté dans le paragraphe II-3.

Les différentes techniques de visualisation par caméra rapide et de mesure de charge utilisées ainsi que la méthode des plans d'expériences permettant la modélisation et l'optimisation des processus de séparation électrostatique sont décrits dans le paragraphe II-4.

II-1. Caractérisation des matériaux

Plusieurs mélanges ont été étudiés : conducteur – isolant, conducteur – conducteur et isolant – isolant. Des expériences sur des particules modèles de câbles électriques ont visé à démontrer la faisabilité de la séparation électrostatique de ces matériaux alors que des essais sur des déchets de câbles réellement déchiquetés dans un broyeur industriel ont mené à un prototype de séparateur industriel. Par ailleurs, les câbles et les DEEE étant de natures diverses, neuf types de plastiques ont fait l'objet d'essais de charge triboélectrique et de séparation électrostatique.

Pour chaque essai, les échantillons ont été pris parmi 1 kg ou 2 kg de matière à l'aide d'un répartiteur permettant de répartir la quantité globale en deux parts égales améliorant ainsi l'homogénéité des échantillons.

II-1.1. Particules « modèles » de déchets de câbles électriques

Les câbles électriques souples sont composés d'une multitude de filaments de cuivre enrobés d'une couche de PVC, qui les isolent électriquement. Ils sont composés, en termes de masse, d'environ 55 % de cuivre et 45 % de PVC. A contrario, les câbles électriques rigides sont composés d'un seul brin de cuivre enrobé d'une couche de PVC. En termes de masse, ils comportent 65 % de cuivre et 35 % de PVC.

Pour une première série d'expériences permettant d'évaluer la faisabilité de la séparation électrostatique, des particules cylindriques, calibrées, de 4 mm de long, provenant de câbles électriques souples et rigides de 0,5 mm² de section, ont été manuellement coupées (figure II-1).

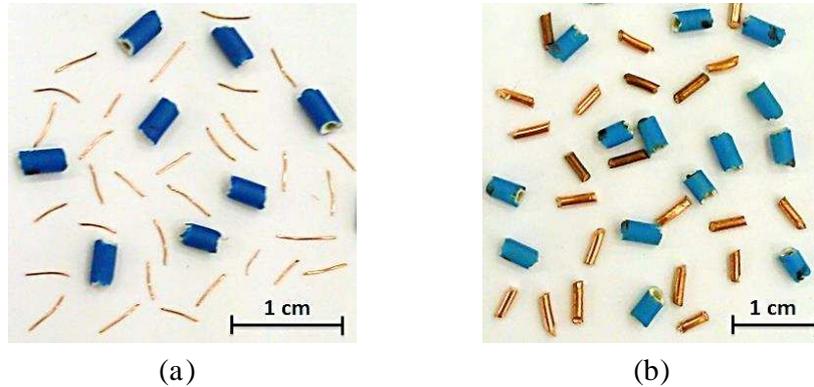


Figure II-1 : Granules calibrés de câbles électriques souples (a) et rigides (b).

Certaines caractéristiques du PVC et du cuivre sont données dans le tableau II-1.

Tableau II-1 : Propriétés physiques du cuivre et du PVC.

Matériau	Cuivre	PVC
Densité (g.cm ⁻³)	8,9	1,38
Température de fusion (°C)	1083,0	180
Résistivité électrique (Ω.m)	1,73.10 ⁻⁸	10 ¹⁴
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	400 à 412	0,2

II-1.2. Déchets de câbles électriques

Pour l'étude de la séparation de mélanges conducteur – isolant, des déchets de câbles électriques ont été déchiquetés par le biais d'un broyeur à couteaux d'une puissance de 3 kW utilisé par la suite pour le prototype industriel. Les particules obtenues sont représentées sur la figure II-2.

Les particules de ces mélanges se caractérisent par une dispersion de leurs tailles (1 mm à 6 mm), de leurs formes et de leurs matières (cuivre, cuivre étamé, aluminium, PVC, PP...). La présence de particules hybrides (c'est-à-dire de petits morceaux de câbles dont le cuivre et l'isolation ne sont pas dissociés) dans ce type de déchets va certainement détériorer la qualité de la séparation. C'est pourquoi, dans l'installation industrielle finale CP100, nous avons choisis un broyeur d'une puissance de 7 kW qui déchiquette plus finement les câbles électriques et évite ainsi la présence de ces particules. De plus, l'entreprise CITF souhaite, avec cette installation, traiter un débit de matière de 100 kg.h⁻¹ ce qui n'est possible qu'avec le broyeur de 7 kW. Les particules isolantes ont une forme rectangulaire (dimensions comprises entre 2 mm et 5 mm).

Pour la séparation de mélanges conducteur – conducteur, du cuivre nu, du cuivre étamé et du feuillard d'aluminium ont été utilisés. Tous trois sont utilisés dans les câbles électriques et participent soit à la conduction de l'électricité (cuivre) soit à la protection contre les champs

électromagnétiques environnants (tresses en cuivre étamé et blindage en aluminium). Ces conducteurs sont largement présents dans les câbles DEEE (câbles informatiques notamment).

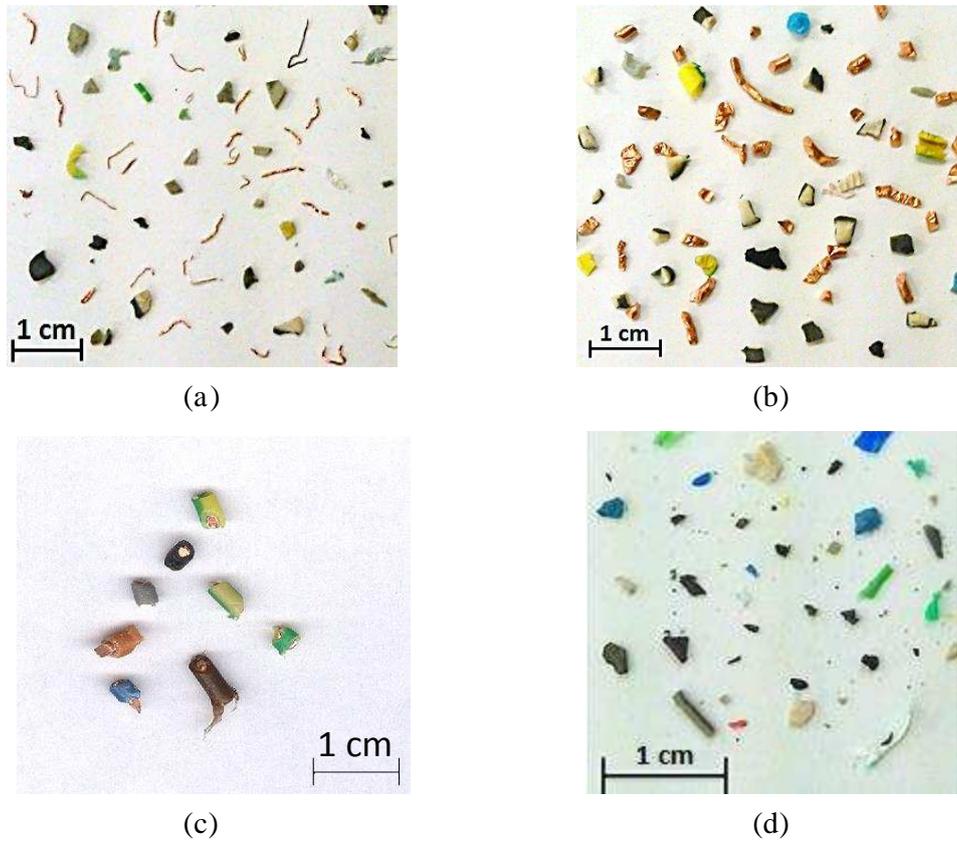


Figure II-2 : Déchets de câbles électriques broyés issus de câbles électriques souples (a) et de câbles électriques rigides (b) ; (c) Particules hybrides (cuivre non dissocié de son enveloppe isolante) ; (d) Particules isolantes de déchets de câbles électriques.

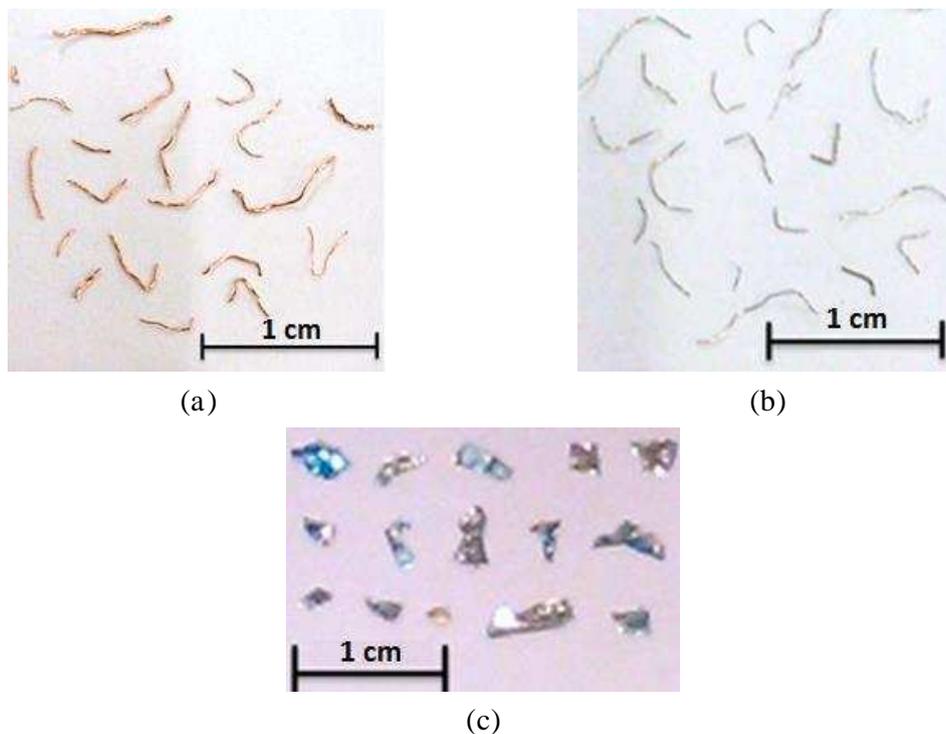


Figure II-3 : Particules de cuivre nu (a), de cuivre étamé (b) et d'aluminium (c) issus de câbles DEEE.

Les particules de cuivre nu (figure II-3 (a)) et celles de cuivre étamé (figure II-3 (b)) sont des cylindres de longueurs comprises entre 2 mm et 6 mm. Toutefois, leurs diamètres diffèrent puisque celui des particules de cuivre étamé est de 0,10 mm alors que celui du cuivre nu est compris entre 0,10 mm et 0,16 mm. L'épaisseur de l'étain est de 10 μm . Un brin de cuivre étamé est donc composé à 64 % de cuivre et à 36 % d'étain.

Les paillettes d'aluminium (figure II-3 (c)), de formes rectangulaires, ont des longueurs caractéristiques comprises entre 2 mm et 6 mm et une épaisseur d'environ 9 μm .

II-1.3. Déchets plastiques issus de DEEE

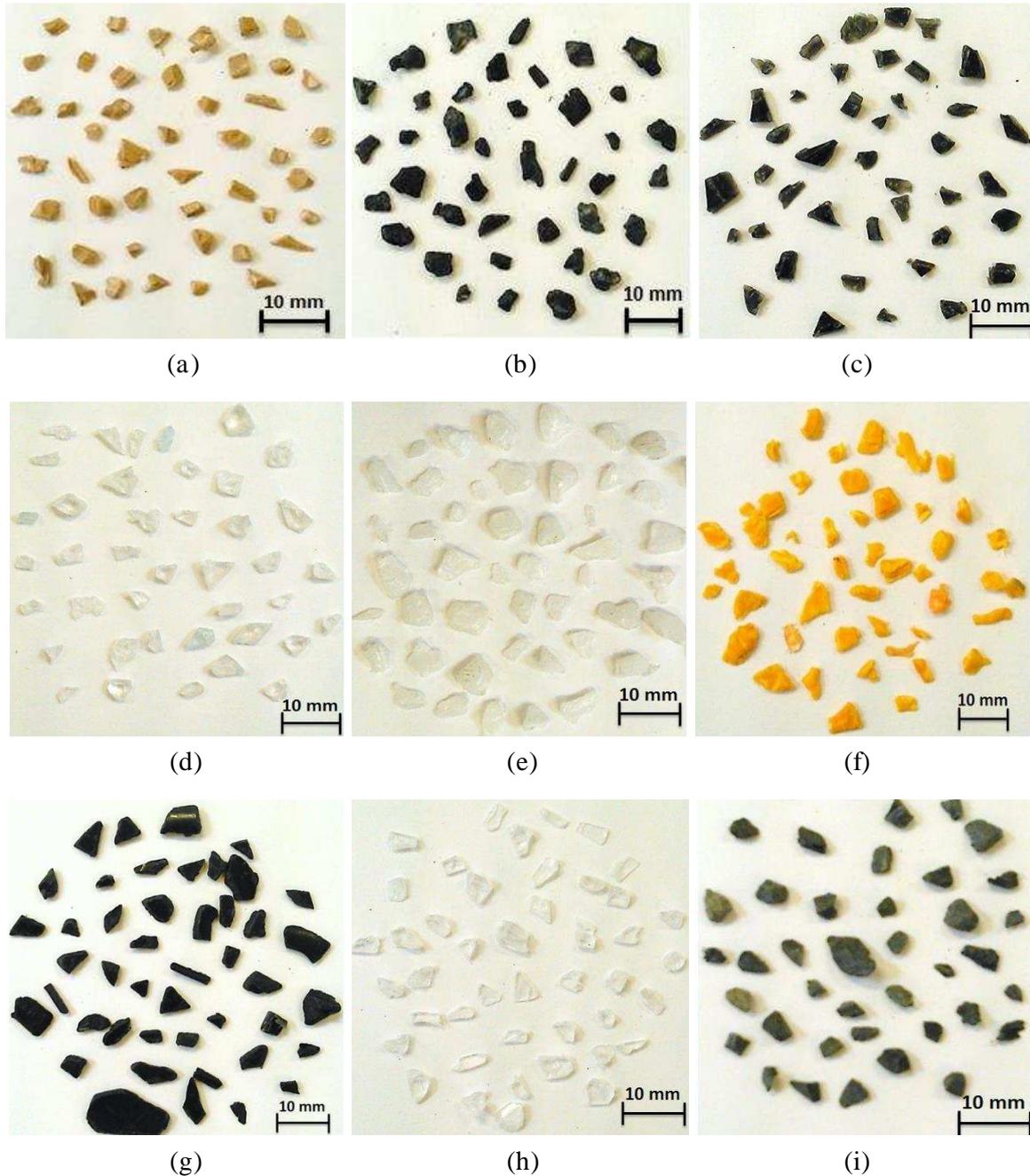


Figure II-4 : Photographie des matières utilisées pour la détermination des séries triboélectriques : (a) ABS, (b) HIPS, (c) PC, (d) PC cristal, (e) PE, (f) PP, (g) PS, (h) PS Cristal et (i) PVC.

Les câbles électriques et les DEEE étant composés d'une multitude de plastiques différents, des essais ont été menés sur la charge et la séparation électrostatique de plusieurs types de polymères (figure II-4) : Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS) (a), « High-Impact Polystyrene » (HIPS) (b), Polycarbonate (PC) (c), PC Cristal (d), Polyéthylène (PE) (e), Polypropylène (PP) (f), Polystyrène (PS) (g), PS Cristal (h) et Polychlorure de vinyle (PVC) (i).

Toutes ces matières ont des tailles et des formes différentes ce qui est représentatif d'un flux industriel. Toutefois, cette diversité pourra jouer sur les résultats de charges et de séparations puisque la charge triboélectrique est un phénomène surfacique.

II-2. Installations de séparation électrostatiques de matériaux granulaires

Afin de séparer les matériaux conducteurs et/ou isolants présentés dans le paragraphe précédent, plusieurs installations ont été nécessaires et sont présentées dans les paragraphes suivants. A l'Institut PPRIME, le séparateur de laboratoire de la société Carpco a été utilisé pour les essais sur les mélanges conducteur – isolant et conducteur – conducteur alors que le séparateur de la société Prodecologia a permis le tri d'isolants. Les expériences de séparation industrielle de mélanges isolant – isolant ont été effectuées en adaptant le prototype PRD.

II-2.1. Installations de séparations de mélanges conducteur – isolant et conducteur – conducteur

Pour la séparation électrostatique de mélanges conducteur – isolant et conducteur – conducteur, le séparateur conçu par la société Carpco a été utilisé lors des essais de laboratoire. Dans l'entreprise CITF, les premiers essais de fonctionnement industriel pour la séparation des déchets de câbles électriques ont été menés sur l'installation prototype PRD qui a elle-même permis la conception et la fabrication de la première machine de série CP100.

- **Séparateur Carpco :**

Le séparateur de marque Carpco, très modulaire, peut fonctionner aussi bien en tant que séparateur à plaque que séparateur à tambour. Lors des essais de séparation de mélanges conducteur – isolant, le séparateur Carpco a été utilisé en fonctionnement à plaque alors que c'est le mode « tambour » qui a été privilégié pour la séparation conducteur – conducteur.

En fonctionnement « plaque » (figure II-5), les particules sont transportées par la goulotte oscillante (1) et déposées en une couche uniforme sur une plaque en forme de « S » reliée à la terre (2). Les particules sont alors soumises à un champ électrique créé entre cette électrode et une électrode elliptique (3) connectée à une source de haute tension continue de polarité réversible (7). Les particules isolantes, non sujette à l'induction électrostatique induite par l'électrode elliptique, chutent le long de la plaque sous l'action de leur propre poids et sont collectées dans la partie gauche du collecteur (4). Les particules conductrices sont attirées par l'électrode elliptique grâce à l'induction électrostatique et leurs trajectoires sont alors différentes des particules isolantes. Ces particules sont récupérées dans la partie droite du collecteur. Les quatre compartiments, dans lesquelles les particules séparées sont

récupérées, sont numérotés de 1 à 4. Le compartiment 1 correspondant au compartiment le plus à droite et le compartiment 4 celui le plus à gauche. Elles sont donc respectivement composées de particules conductrices et isolantes. Les deux compartiments centraux contiennent un produit mixte majoritairement composé de conducteurs pour le 2 et majoritairement composé d'isolants pour le 3.

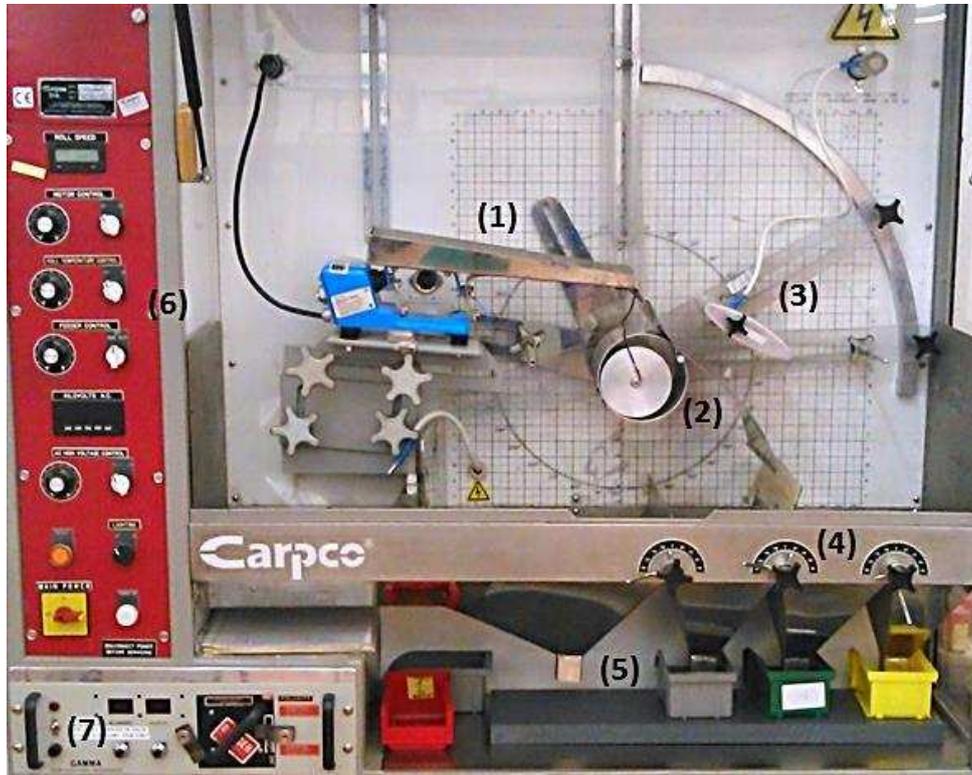


Figure II-5 : Séparateur électrostatique Carpco en fonctionnement « plaque ». (1) Table vibrante ; (2) Electrode plaque en forme de « S » reliée à la terre ; (3) Electrode elliptique reliée à une source de haute tension continue ; (4) Collecteur composé de quatre compartiments et volets de séparation ; (5) Compartiments collecteurs ; (6) Armoire électrique ; (7) Alimentation haute tension DC réversible.

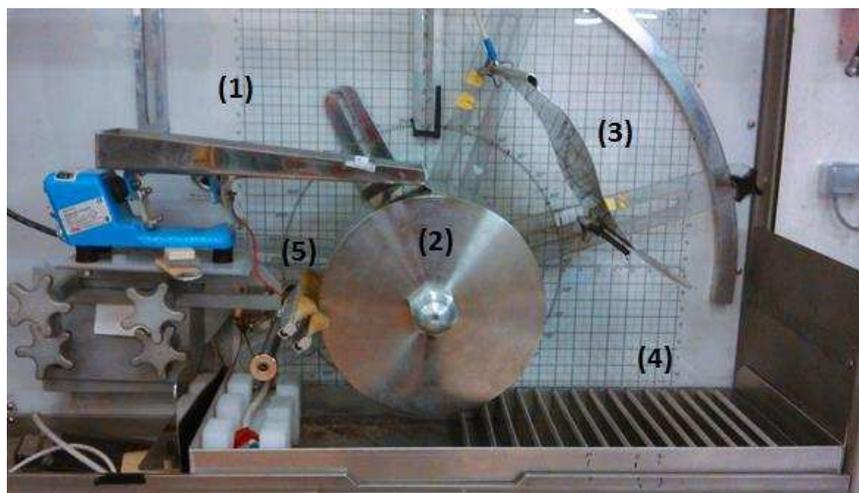


Figure II-6 : Séparateur électrostatique Carpco en fonctionnement « tambour ». (1) Table vibrante ; (2) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (3) Electrode plaque en forme de « S » reliée à une source de haute tension continue ; (4) Collecteur composé de 15 compartiments ; (5) Balais.

Contrairement à la configuration tambour « classique » où une électrode couronne et une électrode elliptique permettent la séparation de mélanges conducteur – isolant, la configuration présentée sur la figure II–6 permet une séparation conducteur – conducteur. En effet, les électrodes couronne et elliptique sont remplacées par une électrode plaque permettant un champ électrique plus étendu et une modification plus importante des trajectoires des différents conducteurs.

Le séparateur Carpco permet le réglage de nombreux éléments. Ainsi, il est possible de régler l'amplitude de vibration de la table vibrante, la vitesse de rotation du tambour s'il est présent, les positions et inclinaisons de toutes les électrodes, l'inclinaison des volets séparant les compartiments du collecteur et la valeur et la polarité de la tension appliquée au système d'électrodes. Enfin, le collecteur peut être composé de quatre ou de seize compartiments selon la finesse des séparations souhaitées.

- **Séparateur industriel PRD :**

Grâce à l'ensemble de ces recherches, nous avons pu mettre en œuvre un prototype de séparateur électrostatique industriel présenté sur la figure II–7. Pour des raisons de rentabilité de l'installation, l'entreprise souhaite pouvoir traiter 100 kg.h^{-1} de déchets de câbles électriques et obtenir au moins 80 % du cuivre avec une pureté supérieure ou égale à 96 %. Avec la même installation, les câbles électriques rigides, souples et DEEE (composé à 28 % de cuivre) ayant une section maximale de 16 mm^2 (30 mm^2 avec l'option pré-broyeur) seront traités.



Figure II-7 : Prototype de séparateur électrostatique industriel PRD (voir Vue 3D présentée en annexe I). (1) Broyeur ; (2) Système d'électrodes ; (3) Armoire électrique avec écran tactile ; (4) Caisses-palettes.

Cette première version est basée sur le modèle du séparateur électrostatique à plaque du laboratoire PPRIME (figure II–10 (a)). Il est composé des éléments suivants :

- un châssis,
- une armoire électrique comprenant les différents éléments électriques tels que les alimentations haute tension et un écran tactile permettant un accès à l'ensemble des réglages du prototype,
- un broyeur permettant de réduire à l'état de granules de 4 mm - 5 mm les câbles électriques,
- deux tables vibrantes permettant un passage cyclique des particules mixtes au sein du séparateur,
- un système d'électrodes plaques et semi-elliptiques,
- une trémie vibrante permettant la récupération des fractions conductrices, isolantes et mixtes. La vibration permet la récupération des particules sans agglomérations de celles-ci,
- un convoyeur à taquets permettant de ramener les particules mixtes sur la deuxième table vibrante,
- deux caisses-palettes de récupération des produits ayant une capacité de 0,6 m³.

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

Lorsque la machine est en fonctionnement (figure II-8), un opérateur introduit manuellement les câbles électriques dans le broyeur (1). Les granules sont alors récupérés sur une première table vibrante (2.a) qui les transporte et les dépose sur une électrode plaque en forme de « S » (3.a).

Une première séparation électrostatique (avec une polarité négative de la haute tension) est alors effectuée et une partie des granules séparés sont récupérés dans les bacs du collecteur. Le produit mixte de la première séparation tombe dans la partie centrale de la trémie vibrante qui emmène les particules jusqu'à un convoyeur à taquets (4). Le convoyeur à taquets transporte les particules jusqu'à une seconde table vibrante (2.b) qui les dépose sur une seconde électrode plaque (3.b).

Une deuxième séparation, cette fois de polarité positive, a lieu, le produit mixte tombant à nouveau dans la trémie vibrante ce qui permet de faire re-circuler les granules tant qu'ils ne sont pas complètement séparés.

Le prototype présente de nombreux réglages permettant la meilleure séparation possible :

- amplitudes de vibration des tables vibrantes afin de garantir un débit maximal et une répartition optimale des granules,
- inclinaisons des électrodes ainsi que des positions horizontales et verticales des électrodes elliptiques,
- tensions et intensités appliquées aux électrodes elliptiques,
- réglages de la position horizontale de la trémie vibrante et des angles d'inclinaison des volets.

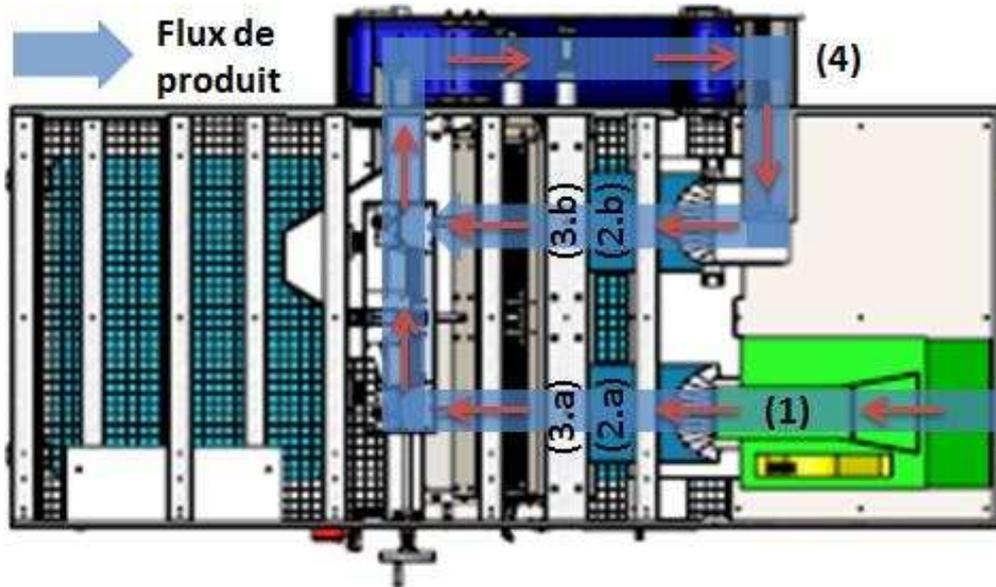


Figure II-8 : Vue de dessus de l'installation PRD. (1) Broyeur ; (2.a) Table vibrante du premier passage ; (2.b) Table vibrante du deuxième passage ; (3.a) Système d'électrodes du premier passage ; (3.b) Système d'électrode du second passage ; (4) Convoyeur remontant le produit mixte.

Le principe de séparation étant basé sur les forces exercées par le champ électrique sur des particules chargées soit par décharge couronne, soit par induction électrostatique, l'humidité joue un rôle important sur la qualité de la séparation. En effet, si une fine couche d'eau se dépose sur les particules plastiques, celles-ci auront tendance à devenir conductrices. Elles seront donc elles aussi attirées par l'électrode haute tension et la séparation sera moins efficace. Autre conséquence de l'humidité, la tension appliquée sur les électrodes doit être limitée à des valeurs inférieures au seuil demandé pour une séparation optimale.



Figure II-9 : Electrodes encrassées après quelques minutes de fonctionnement. (1) Electrode plaque en forme de « S » ; (2) Electrode semi-elliptique.

Toutefois, le fonctionnement du prototype avec un débit de 100 kg.h^{-1} (objectif de l'entreprise) était impossible. En effet, le passage répété des particules granulées sur les électrodes plaques entraîne une déposition importante de poussières sur celles-ci (figure II-9). Cette poussière, créée lors du broyage des câbles, empêche les particules conductrices d'être

en contact parfait avec l'électrode plaque, donc de se charger par induction électrostatique et ainsi d'être attirées par les électrodes elliptiques liées à la haute tension. La séparation électrostatique n'avait donc lieu que pendant quelques minutes. Quelques essais d'aspiration et de soufflage des poussières ont été effectués mais cela ne suffisait pas à rendre fonctionnelle l'installation pendant plusieurs heures.

Cette électrode plaque a donc été remplacée par une électrode cylindrique tournante (figure II-10 (b)). Un balai a également été ajouté pour nettoyer en continu cette électrode. De plus, une électrode couronne a été ajoutée afin d'améliorer encore la qualité de la séparation. En effet, cette électrode charge les particules de plastique de façon à ce qu'elles adhèrent à l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre. Plusieurs types d'électrode couronne ont été testées de manière à ce qu'elle puisse assurer sa fonction tout en étant nettoyée en continue afin d'éviter l'agglomération de poussières qui diminue son efficacité.

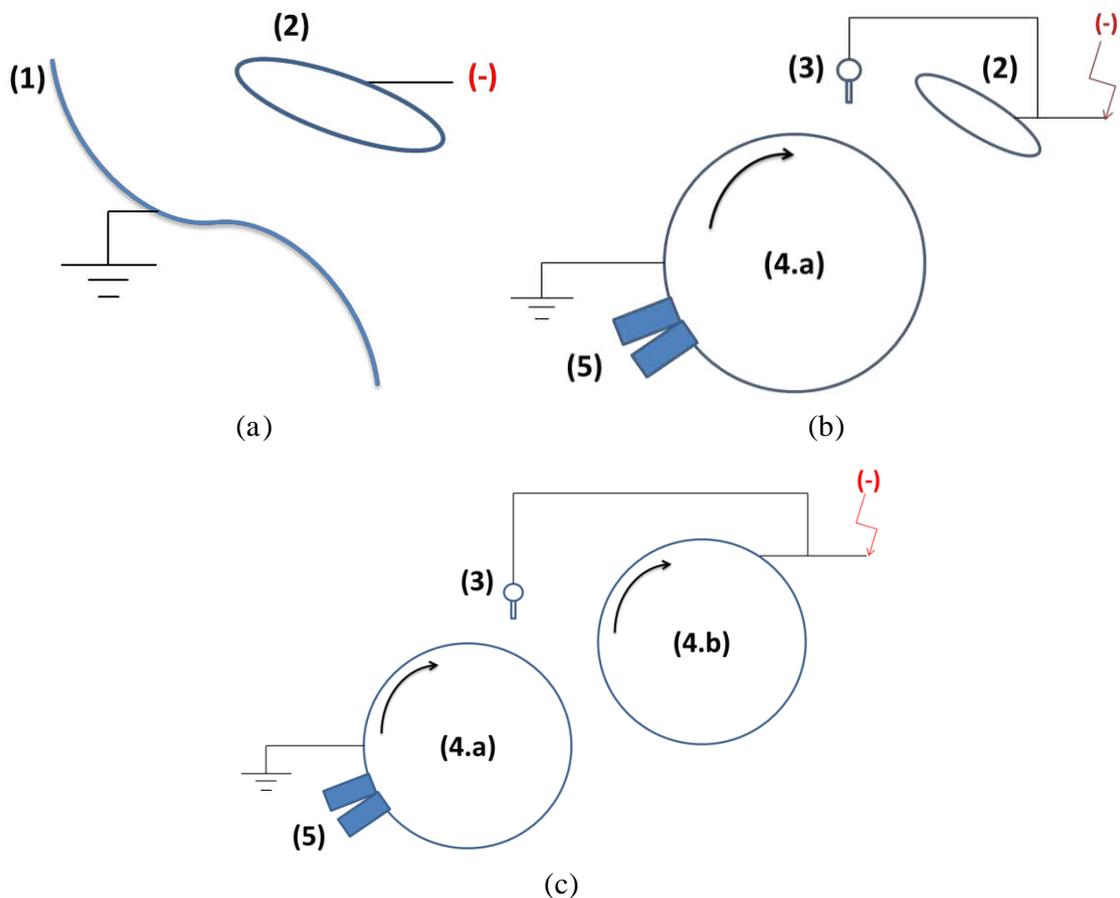


Figure II-10 : Evolution du système d'électrodes de l'installation prototype. (a) Configuration initiale : séparateur à plaque ; (b) Configuration tambour classique ; (c) Configuration tambour industriel. (1) Electrode plaque reliée à la terre ; (2) Electrode elliptique reliée à une source de haute tension ; (3) Electrode couronne reliée à une source de haute tension ; (4.a) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (4.b) Electrode cylindrique tournante reliée à une source de haute tension ; (5) Balais.

De nombreux essais ont été faits avec cette configuration permettant de voir qu'un débit de 100 kg.h^{-1} ne pouvait pas être atteint à cause du broyeur, qui s'est révélé être sous-

dimensionné. Celui-ci pouvant avoir plusieurs grilles de calibration, des essais ont permis de déterminer trois éléments :

- le débit de 100 kg.h^{-1} ne pouvait jamais être atteint, même avec la grille de calibration dont les mailles sont les plus grosses,
- la taille des particules à séparer joue un rôle prépondérant dans la séparation. Plus les particules sont petites, plus il est facile de les séparer.
- la plus petite taille de grille, bien que permettant une bonne séparation, laisse quelques particules hybrides (dont la gaine plastique et le cuivre ne sont pas dissociés). Ces particules, de par leur poids, tombent le plus souvent dans la partie cuivre et diminuent donc sa pureté.

Toutefois, plusieurs fonctionnements sur quelques heures ont permis de faire émerger d'autres problèmes. La poussière s'accumulait aussi sur les électrodes semi-elliptiques et perturbait le champ électrique. Là encore, il a été décidé de remplacer ces électrodes par des électrodes cylindriques tournantes liées à un balai (figure II-10 (c)).

Malgré la vibration de la trémie de récupération, des amas de particules se formaient et empêchaient les particules mixtes d'être déposées sur le convoyeur permettant leur deuxième séparation. Une vis sans fin a été intégrée à la trémie de récupération et la vibration a été retirée pour pallier à ce problème.

Afin d'augmenter le débit traité par le prototype, deux options ont été développées :

- un pré-broyeur équipé d'une trémie et d'un convoyeur,
- un convoyeur équipé d'une poulie magnétique.

L'option « pré-broyeur » permet de charger d'un coup plusieurs dizaines de kilogrammes de câbles dans sa trémie et de les broyer en morceaux de quelques centimètres. Ceci permet de faciliter le travail du broyeur et donc d'augmenter son débit. Le pré-broyeur (figure II-11) a été dimensionné en partenariat avec l'entreprise ECP, spécialiste dans ce domaine.

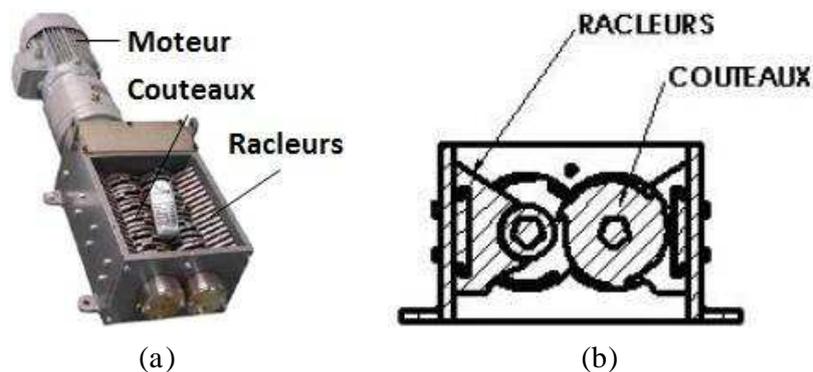


Figure II-11 : Photo (a) et schéma (b) du pré-broyeur de la société ECP.

L'option « Convoyeur + poulie magnétique » (figure II-12) seule permet un chargement plus aisé, par l'opérateur, des câbles et la poulie magnétique permet de retirer du flux de câbles les éléments ferreux (prises électriques, connecteurs...). Ces éléments abîment rapidement les couteaux du broyeur et diminuent ainsi leur durée de vie.

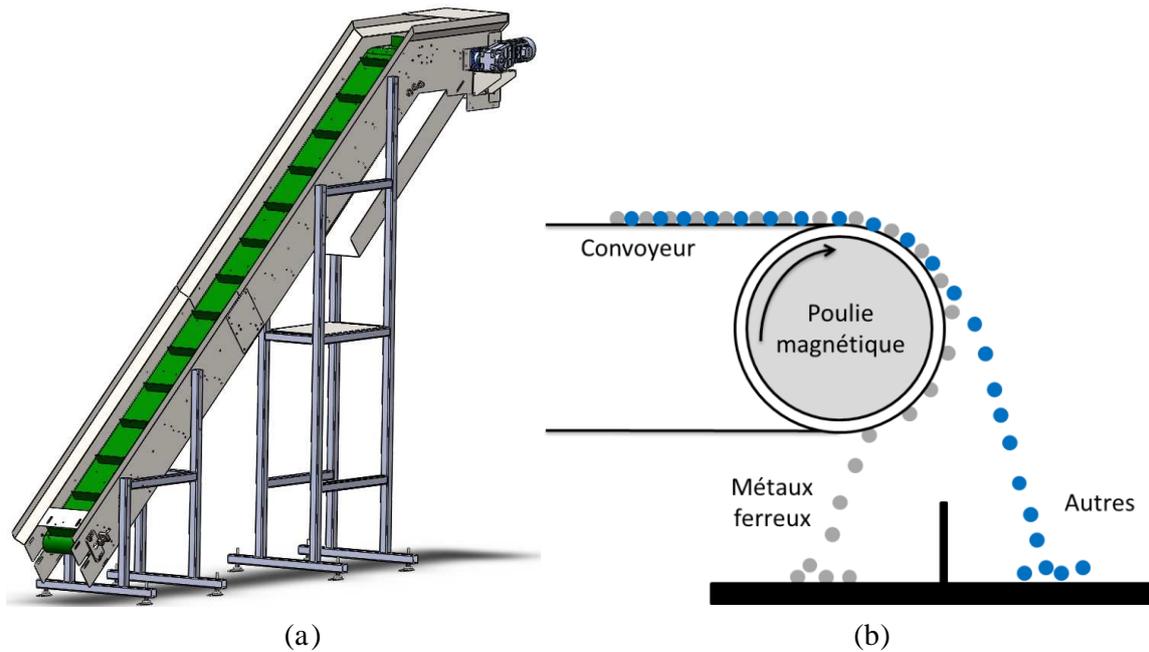


Figure II-12 : (a) Convoyeur ; (b) Poulie magnétique.

La combinaison des deux options est également possible en plaçant le pré-broyeur de façon à ce qu'il dépose le produit sur le convoyeur équipé de la poulie magnétique.

A partir de l'ensemble des essais menés sur le prototype de séparateur électrostatique industriel, une première machine de série a pu être conçue, fabriquée et testée.

- **Séparateur de série CP100 :**

Afin de rendre l'installation plus fonctionnelle et plus compacte, nous avons choisi de ne pas conserver le deuxième passage du produit mixte mais de le refaire passer en continu dans le broyeur par le biais d'une vis sans fin. De cette façon, le produit mixte est traité par le même biais que les câbles entrants et la quantité de particules hybrides est nettement diminuée. Le broyeur (figure II-13) de la CP100 (figure II-14) a été dimensionné pour fournir un débit de $100 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ de produits granulés et que les mailles qui composent sa grille de calibration soient plus petites que celles du prototype pour éviter au maximum les particules hybrides. Pour cela, un partenariat a été développé avec la société Amineau.

Le fonctionnement reste semblable à celui du prototype :

- allumage et mise en route de la machine,
- insertion manuelle des câbles dans le broyeur,
- récupération des granulats par un convoyeur à taquets,
- dépôt des particules sur une table vibrante assurant leur répartition uniforme,
- dépôt des granules sur l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre,
- séparation des granules isolants et conducteurs,
- récupération dans des caisses-palettes des fractions conductrice et isolante et récupération du produit mixte dans une vis sans fin,
- transport, via la vis sans fin, des particules mixtes jusqu'au broyeur.

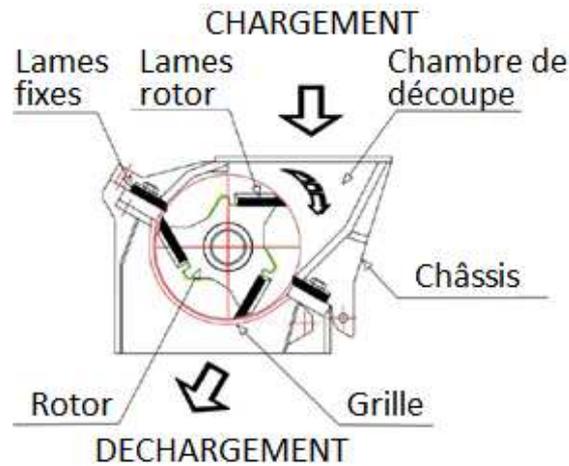


Figure II-13 : Groupe rotor et chambre de coupe du broyeur.

Pour permettre un fonctionnement optimal, un programme informatique a été établi afin de soumettre les deux options au fonctionnement du broyeur propre à la CP100. En effet, lorsque celui-ci reçoit trop de matière à broyer, il s'arrête et ne peut redémarrer qu'après avoir été vidé manuellement. Ceci entraîne une perte de temps considérable pour l'utilisateur. Pour éviter ce problème de bourrage, un capteur d'intensité a été placé. Ce capteur permet de mesurer le courant électrique consommé par le broyeur pendant son fonctionnement. En effet, plus le broyeur est chargé de câbles, plus l'intensité nécessaire à son fonctionnement est grande. Au-delà du seuil d'intensité fixé par le programme, l'ordre est donné aux options de s'arrêter le temps que le broyeur se vide et que l'intensité diminue. Ceci permet un fonctionnement continu de l'installation.

L'humidité est un autre problème auquel nous avons dû être confrontés. En effet, l'humidité avait tendance à être plus présente du fait que le séparateur soit moins ouvert que le prototype. Une Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) a été placée dans le séparateur dans le but de renouveler l'air présent dans la machine et de réguler ainsi son humidité. Ceci permet le fonctionnement de la machine lorsque l'humidité est élevée. En revanche, son utilisation lorsque l'humidité est très élevée n'est pas possible et peut même se révéler dangereuse. En effet, si l'atmosphère est très humide et qu'une pellicule d'eau recouvre les éléments isolants de l'installation, des décharges électriques pourraient se produire à la surface de ceux-ci et entraînerait un risque pour l'utilisateur et pour la machine elle-même. Afin d'éviter ce cas de figure, la tension est mesurée en permanence. En fonctionnement nominal, la tension est fixée à 25 kV. Si l'humidité est suffisamment importante pour provoquer des décharges électriques « parasites » et une chute de tension inférieure à 20 kV, la machine ne démarre pas. De plus, pour cette tension, la séparation n'est pas efficace. Au-delà de 20 kV, l'installation démarre et un voyant permet de savoir si la tension est optimale pour la séparation ou si l'humidité diminue un peu la qualité de la séparation. Un système d'éclairage a également été mis en place à l'intérieur de la machine afin de vérifier le fonctionnement de chaque élément la composant.

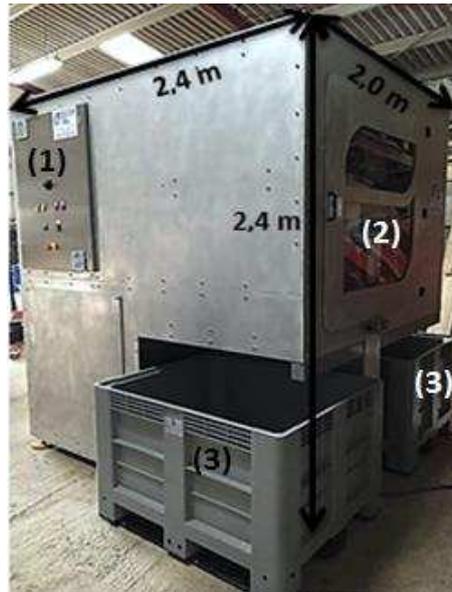


Figure II-14 : Séparateur électrostatique CP100 (Vue 3D en annexe II). (1) Armoire électrique ; (2) Système d'électrodes ; (3) Caisses-palettes.

Les options développées pour le prototype ont pu être adaptées à la CP100 en modifiant simplement la liaison entre la sortie du convoyeur et l'entrée de la CP100.

II-2.2. Installations pour la charge et la séparation de mélanges isolant – isolant

Afin de séparer des mélanges comportant deux isolants différents, deux étapes successives sont nécessaires. Tous d'abord, les particules doivent acquérir une charge par effet triboélectrique. Puis, les particules étant chargées de polarités opposées, un champ électrique permet leur séparation.

- **Dispositif de charge à cylindre(s) tournant(s) :**

Afin de charger les particules isolantes, un dispositif de charge triboélectrique à cylindre(s) tournant(s) a été conçu et construit dans le cadre de cette thèse (figure II-15).

Dans ce dispositif, les particules à charger sont introduites dans un entonnoir (1). Une vanne (2) permet de réguler le débit de particules entrant dans le cylindre creux (3) qui permet leur charge. Ce cylindre est lié à un moteur (4) dont la vitesse de rotation est variable jusqu'à 113 tr.min^{-1} . Deux versions de ce cylindre creux sont disponibles (en PEHD ou en PVC), sa longueur est modulable (200 mm, 400 mm ou 600 mm) et 3 ou 6 ailettes de 10 mm ou 15 mm de hauteur peuvent être fixées à sa paroi intérieure. Son inclinaison peut également être modifiée entre 0° (horizontal) et 45° (5). Des cylindres pleins (6), composés de la même matière que les tubes, peuvent être ajoutés à l'intérieur de ceux-ci et liés à un moteur (7) permettant leur rotation en sens inverse de celui des tubes, jusqu'à 40 tr.min^{-1} . Ceci permet l'augmentation des chocs et frottements entre les particules et le dispositif. Il est ainsi possible d'augmenter la charge acquise par les particules. La régulation du débit de matière sortant du tube s'effectue à l'aide d'une trappe. Lorsque celle-ci est fermée, les particules restent à l'intérieur du dispositif. Cela permet une augmentation de la durée de séjour des particules au

sein du dispositif entraînant ainsi une augmentation de leur charge électrique. Une trémie de sortie (8) empêche la projection des particules et permet leur récupération. Là encore, deux versions de cette trémie existent correspondant aux deux matières des tubes afin de ne pas diminuer la charge des particules.

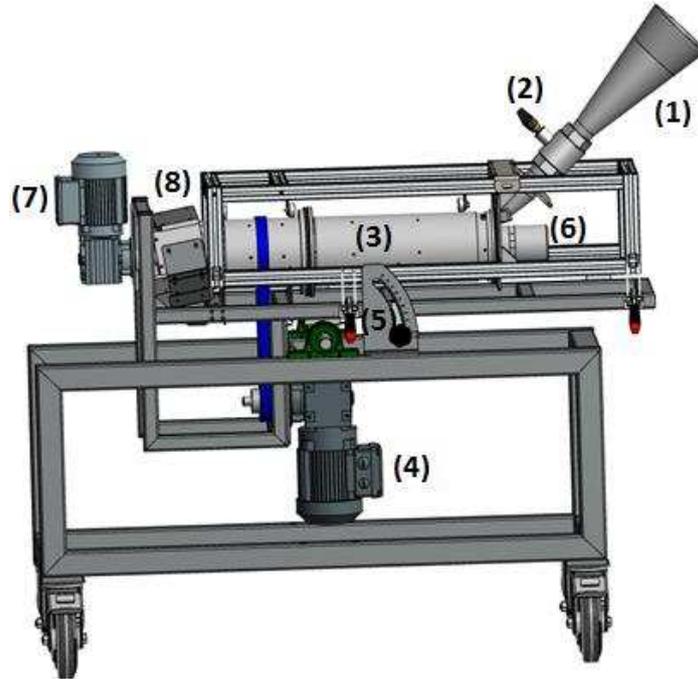


Figure II-15 : Dispositif de charge à cylindre(s) tournant(s). (1) Entonnoir ; (2) Vanne ; (3) Cylindre creux ; (4) Moteur ; (5) Système de réglage de l'inclinaison ; (6) Cylindre plein ; (7) Moteur ; (8) Trémie de sortie.

En sortie de ce dispositif, les particules peuvent aussi bien être récupérées dans une cage de Faraday si l'on souhaite mesurer leur charge que sur une table vibrante pour effectuer leur séparation électrostatique. De plus, ce dispositif est capable de fonctionner aussi bien sur de petites quantités qu'en fonctionnement continu.

- **Dispositif de charge par vibrations :**



Figure II-16 : Dispositif de charge triboélectrique. (1) Boîte en acier inoxydable ($\phi = 160$ mm) ; (2) Dispositif vibrant (Retsch).

Dans ce dispositif de charge (Retsch, modèle AS200 basic ; figure II–16), les particules sont placées dans une boîte en acier inoxydable (1), elle-même déposée sur la plaque vibrante (2) du dispositif. La plaque vibre avec une amplitude de vibration pouvant atteindre 3 mm pendant une durée maximale de 60 min.

- **Séparateur électrostatique Prodecologia :**

Afin de séparer les particules préalablement chargées dans le dispositif de charge à cylindre(s) tournant(s), le séparateur à tambour de la société Prodecologia a été utilisé lors des essais de laboratoire (figure II–17).

Dans ce séparateur, le mélange à séparer est introduit dans la trémie d'alimentation de la table vibrante (1). Cette table vibrante répartie et dépose uniformément les particules chargées sur une électrode cylindrique tournante reliée à la terre (2). Sa vitesse de rotation est comprise entre 35 tr.min⁻¹ et 80 tr.min⁻¹. Une seconde électrode (3), de profil NACA et reliée à une source de haute tension de polarité réversible pouvant atteindre ± 35 kV, crée le champ électrique nécessaire à la séparation des particules. Enfin, les particules séparées sont récupérées dans un collecteur (4) composé de 3 compartiments. Un volet (5), d'inclinaison réglable, est placé entre les deux compartiments les plus à droite afin d'améliorer la pureté des produits obtenus. De plus, un balai (6) permet de décoller de l'électrode cylindrique tournante les particules isolantes dont la charge est suffisamment importante pour que les forces centrifuges et de pesanteur ne suffisent pas à les faire tomber.

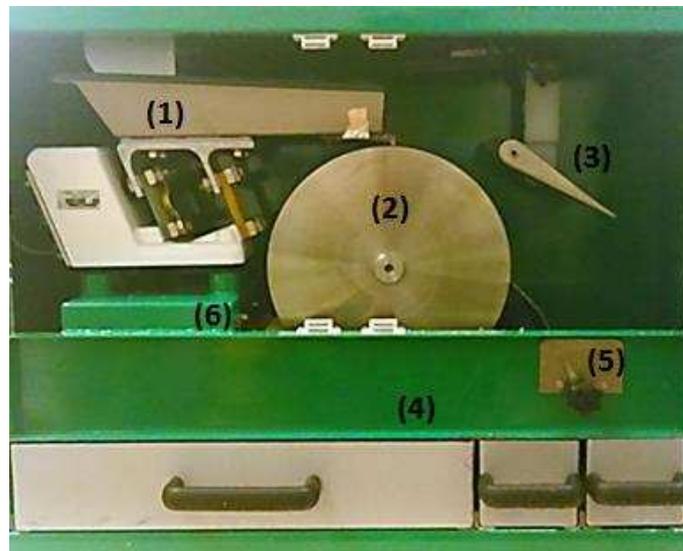


Figure II-17 : Séparateur électrostatique Prodecologia. (1) Table vibrante ; (2) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre; (3) Electrode « NACA » reliée à une source de haute tension réversible ; (4) Collecteur trois compartiments ; (5) Volet ; (6) Balai.

- **Séparateur Industriel PRD :**

Comme pour la séparation des mélanges conducteur – isolant c'est le prototype de séparateur électrostatique industriel développé par CITF, PRD, qui a été utilisé pour les essais de séparation de mélanges isolant – isolant. Toutefois, plusieurs modifications ont été opérées.

Les électrodes couronnes ont été retirées puisque les particules sont dorénavant chargées par effet triboélectrique. De plus, les connections des électrodes cylindriques tournantes ont été modifiées (figure II-18). La polarité de la source de haute tension à laquelle est liée l'électrode supérieure a été inversée, c'est-à-dire qu'elle a été choisie positive et l'électrode inférieure n'a plus été reliée à la terre mais à une source de haute tension de polarité négative. Pour ce faire, elle a été isolée électriquement du moteur qui l'entraîne en rotation et les deux tables vibrantes ont été recouvertes d'isolant pour éviter les arcs électriques. Ainsi, le champ électrique créé entre les deux électrodes est plus intense et la séparation plus efficace.

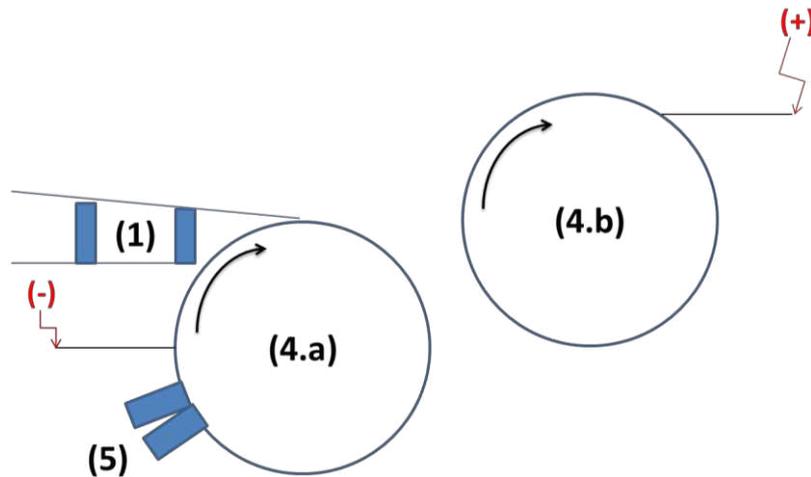


Figure II-18 : Configuration d'électrodes utilisée pour la séparation de mélanges isolant – isolant avec le prototype de séparateur industriel PRD. (1) Table vibrante ; (4.a) Electrode cylindrique tournante inférieure reliée à une source de haute tension négative ; (4.b) Electrode cylindrique tournante supérieure reliée à une source de haute tension positive ; (5) Balais.

II-3. Installation de Décharges à Barrières Diélectriques

Dans le but d'améliorer la séparation électrostatique de certains mélanges isolant – isolant, l'influence d'une décharge à barrière diélectrique sur la charge de telles particules a été étudiée. Afin de soumettre celles-ci à ce type de décharge, le banc d'essai présenté sur la figure II-19 a été utilisé.

7 g de particules (masse maximale pouvant être placée en monocouche entre les électrodes) sont placés dans un support cylindrique en PVC entre deux barrières diélectriques. Celles-ci sont elles-mêmes comprises entre deux électrodes en aluminium de 70 mm de diamètre. L'électrode inférieure est connectée à la terre alors que celle supérieure est reliée à une source de haute tension alternative. Cette tension alternative est créée par un Générateur Basses Fréquences (GBF). Grâce à ce générateur la forme (triangulaire, sinusoïdale ou carré) ainsi que l'amplitude crête-crête (de 0 V à 20 V) et la fréquence du signal peuvent être définis. Afin de conserver une DBD homogène la fréquence maximale appliquée au banc d'essais était de 1000 Hz (figure II-20). Le signal créé par le GBF est ensuite amplifié par un amplificateur de marque Trek avec un coefficient de 3000. Ainsi, lorsque le signal entrant dans l'amplificateur vaut plus ou moins 10 V, le signal sortant vaut plus ou moins 30 kV.

Enfin, un oscilloscope digital permet de visualiser le signal afin de vérifier que le régime de la décharge est homogène.

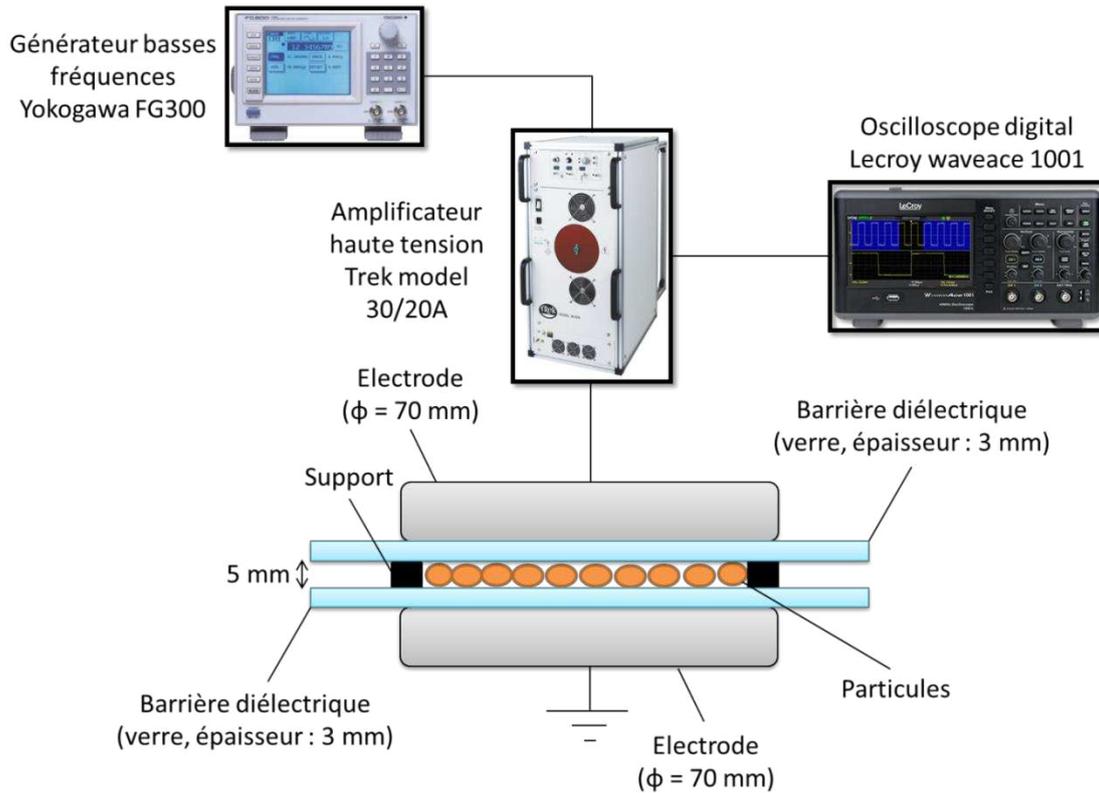


Figure II-19 : Banc de Décharge à Barrière Diélectrique.

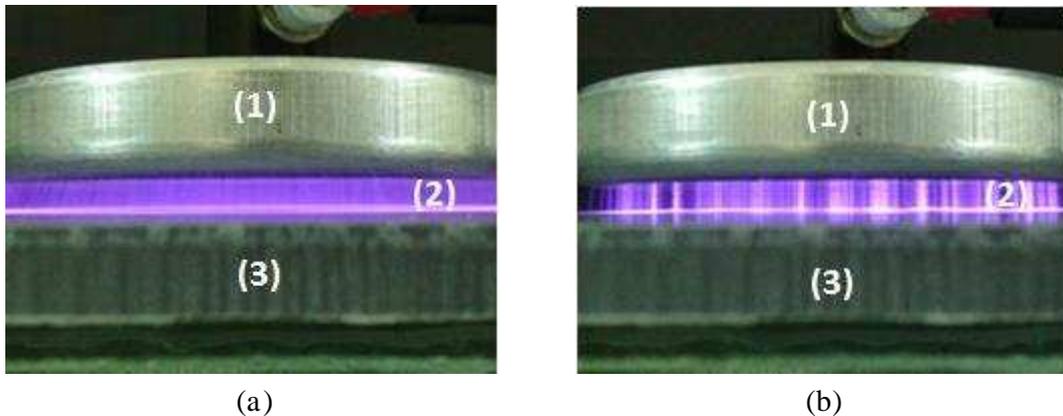


Figure II-20 : Régimes de DBD. (a) Homogène (800 Hz) ; (b) Filamentaire (2500 Hz). (1) Electrode ; (2) Zone de décharge ; (3) Plaque PVC.

II-4. Techniques de mesures et méthode des plans d'expériences

La compréhension du processus de séparation peut s'effectuer à l'aide d'une caméra vidéo rapide alors que l'évaluation des performances des procédés de charge et de séparation électrostatique est mise en œuvre par un système de mesure de charge et de masse des produits séparés. Leur modélisation et leur optimisation sont rendues possibles par la méthodologie des plans d'expériences.

II-4.1. Visualisation des trajectoires des particules par caméra rapide

La charge des particules et le champ électrique auquel elles sont soumises leur donnent différentes trajectoires. La visualisation de ces trajectoires par le biais d'une caméra vidéo rapide est donc nécessaire à la bonne compréhension des résultats de séparation. Par conséquent, une caméra Fastcam APX RS a été utilisée.

Afin d'avoir la luminosité suffisante pour voir les particules, deux spots lumineux de 300 W chacun ont été placés de part et d'autre de la caméra afin d'éviter les ombres notamment créées par les électrodes et les particules elles-mêmes.

Lors des essais (figure II-21), les réglages ont été les suivants :

- fréquence d'acquisition : $1000 \text{ images.s}^{-1}$,
- temps d'obturation : $1/1000 \text{ s}$,
- résolution : $1024 \times 1024 \text{ pixels}$,
- durée d'acquisition : 6,144 secondes.



Figure II-21 : Caméra rapide utilisée pour la visualisation de particules dans un séparateur électrostatique à plaque. (1) Caméra rapide ; (2) Spot lumineux ; (3) Séparateur électrostatique à plaque.

Le logiciel Photron Fastcam Viewer permet l'acquisition des images et leur traitement. Ainsi, il est possible de prendre les coordonnées d'une particule et de suivre son déplacement dans le temps. Il est également possible d'éclaircir les images ou de zoomer sur certaines zones particulièrement intéressantes.

II-4.2. Mesure de la charge électrique de particules isolantes

La mesure de la charge électrique est fortement sensible aux conditions ambiantes. Elle peut être à l'origine de nombreuses erreurs lors du traitement des données. Lors d'une série d'expérience, il est donc primordial de conserver des conditions de température et d'humidité similaires.

La cage de Faraday, souvent constituée de deux cylindres conducteurs concentriques et séparés par un isolant, est le dispositif le plus utilisé pour mesurer la charge électrique. 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-22). La masse peut être mesurée simultanément en utilisant une balance électronique (KERN, modèle PCB 250-3, résolution 0,01 g), connectée au même ordinateur.

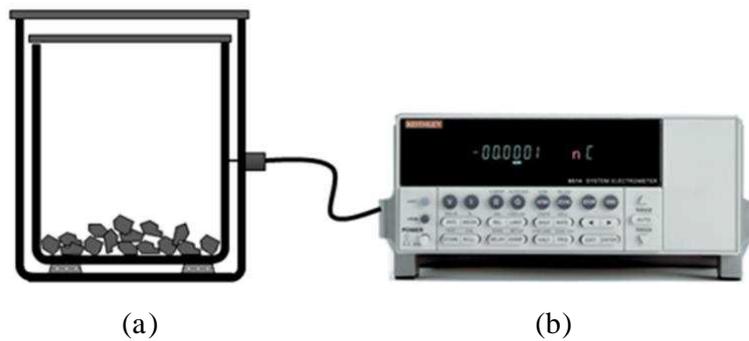


Figure II-22 : Système de mesure de charge. (a) Cage de Faraday ; (b) Electromètre.

II-4.3. Méthode des plans d'expériences

La méthode des plans d'expériences permet d'obtenir un maximum de renseignements sur le fonctionnement d'un processus avec un minimum d'essais. Cette méthode détermine le nombre d'expériences à effectuer afin d'atteindre un objectif prédéterminé et prédit le comportement du processus dans un domaine d'utilisation dépendant de plusieurs facteurs pouvant varier simultanément. De plus, elle permet d'évaluer les effets de ces facteurs et leurs interactions. Dans le domaine industriel, cette méthode a un grand intérêt puisqu'elle permet rapidement de cibler les facteurs influents et d'optimiser le fonctionnement de certains procédés tout en garantissant un nombre d'essais minimal.

En fonction de variables d'entrées contrôlées (notés u_i ; aussi appelés facteurs), le processus fournit des variables de sortie (ou réponses ; notés y_i) (figure II-23).

Une réponse y est donc une fonction de plusieurs variables d'entrées u_i . Le plus souvent, la réponse est exprimée comme un polynôme du premier ou deuxième degré :

$$y = c_{0+} + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ij} u_i^2 \quad (\text{II-1})$$

Pour chaque facteur u_i , une variable centrée réduite est définie :

$$x_i = \frac{(u_i - u_{i0})}{\Delta u_i} = u_i^* \quad (\text{II-2})$$

où :

$$u_{i0} = \frac{(u_{i\max} + u_{i\min})}{2}; \Delta u_i = \frac{(u_{i\max} - u_{i\min})}{2} \quad (\text{II-3})$$

Avec ces notations, la fonction de réponse devient :

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,j} x_i^2 \quad (\text{II-4})$$

où x_i prend la valeur « -1 », pour le niveau inférieur $u_{i\min}$ du facteur, et la valeur « +1 » pour le niveau supérieur du même facteur $u_{i\max}$.

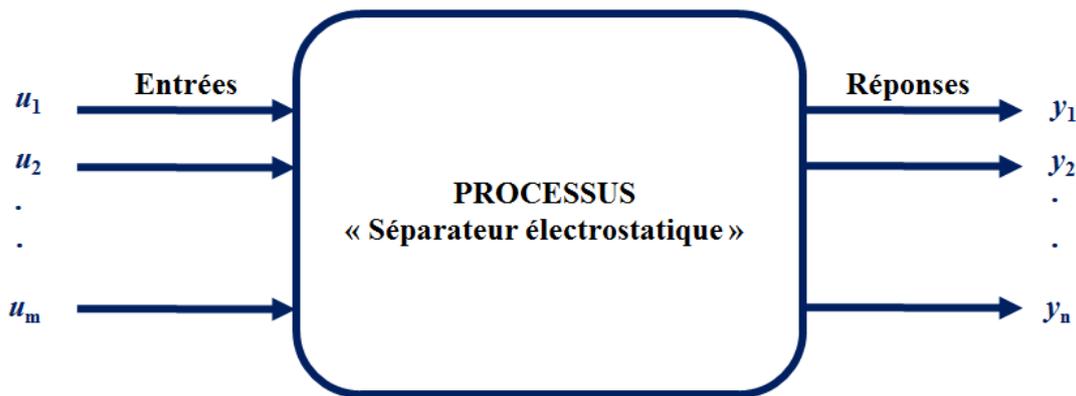


Figure II-23 : Représentation schématique d'un processus.

Un plan factoriel complet permet d'exprimer la réponse par un polynôme de premier degré alors qu'un plan factoriel composite conduit à un modèle polynôme de second degré. Les deux permettent la modélisation et l'optimisation de processus avec plus ou moins de précision.

Les plans d'expériences complets sont les plus simples, c'est pourquoi ils sont aussi les plus utilisés.

Les résultats obtenus grâce à ces plans peuvent être complétés par de nouvelles expériences permettant d'atteindre le degré de précision et d'information recherchés.

Un plan complet comportant l'étude de k facteurs prenant chacun deux niveaux est désigné par la notation 2^k . Le domaine d'étude d'un plan 2^2 peut être représenté comme sur la figure II-24 (a).

La réponse y_i peut alors s'exprimer en fonction des k facteurs comme suit :

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,j,l} x_i x_j x_l + \dots + a_{i,j,\dots,k} x_i x_j \dots x_k \quad (\text{II-5})$$

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

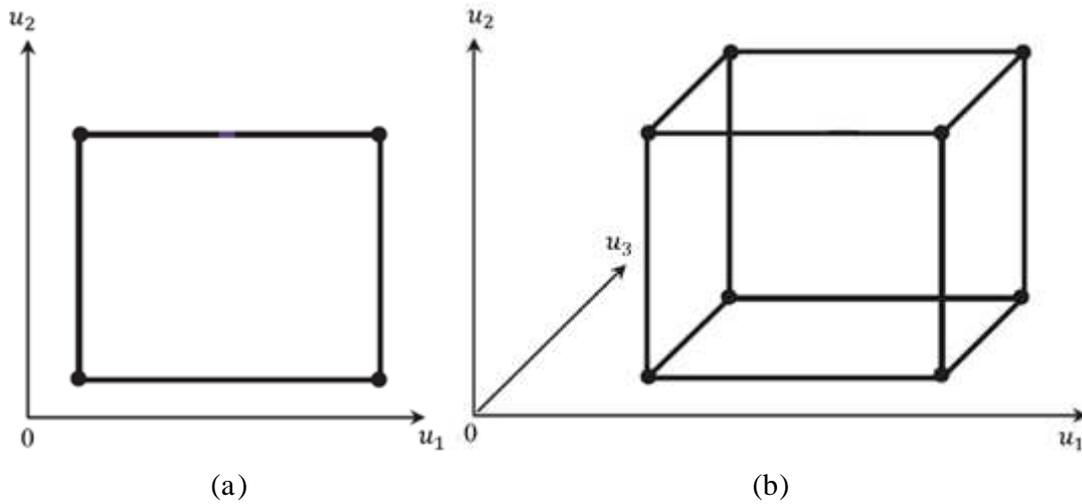


Figure II-24 : Représentation graphique des points de mesure nécessaires à un plan d'expériences complet. (a) Deux facteurs ; (b) Trois facteurs.

L'ensemble de ces points constitue un système au sein duquel on ne fait varier qu'un seul facteur à la fois. Il y a donc $2k$ points en étoile, k étant le nombre des variables du plan d'expériences (figure II-25).

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,i,l} x_i x_j x_l + \dots + a_{i..k} x_{i..} x_k + \sum a_{i,i} x_i^2 \quad (\text{II-6})$$

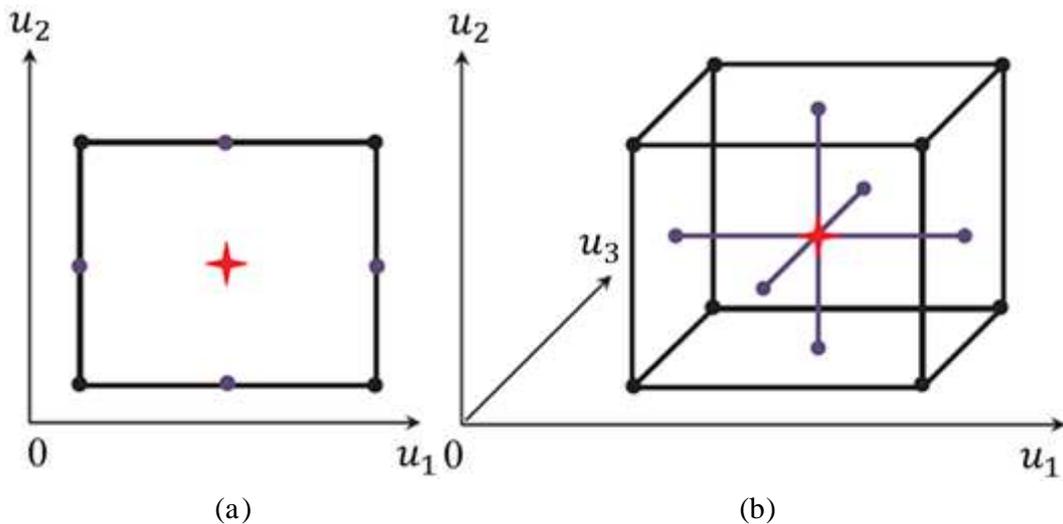


Figure II-25 : Représentation graphique des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences composite. (a) Deux Facteurs ; (b) Trois facteurs.

Le domaine de variation d'un facteur est représenté par un segment, tandis que le point de mesure est marqué par un point. L'étoile marque le centre du domaine total de la variation,

correspondant à la valeur moyenne de chaque facteur. Trois essais sont fait en ce point afin de déterminer l'erreur expérimentale. Le nombre total des essais N , pour k facteurs s'écrit ainsi :

$$N = 2^k + 2.k + 3 \quad (\text{II-7})$$

Le logiciel MODDE 5.0 permet d'optimiser des processus. Pour cela, il suffit d'y indiquer les différents facteurs et réponses ainsi que le type de plan d'expériences. Alors, le logiciel fournit les informations sur les expériences devant être effectuées. Lorsque les résultats de ces expériences sont intégrés au logiciel, celui-ci calcule alors les modèles mathématiques représentant chaque réponse en fonction de tous les facteurs. Ainsi, il peut définir, dans les plages de variation des facteurs, le point de fonctionnement optimal répondant aux objectifs de l'utilisateur, c'est-à-dire les valeurs des facteurs pour lesquelles les réponses du processus sont les plus proches des objectifs.

II-5. Conclusions

Plusieurs matériaux constitutifs des DEEE seront étudiés. Que ce soit des mélanges conducteur – conducteur, conducteur – isolant ou isolant – isolant, leur séparation est nécessaire pour permettre un recyclage optimal.

Pour effectuer ces différentes séparations, plusieurs installations seront utilisées, qu'elles soient de laboratoire ou industrielles. Les installations de laboratoire permettent d'étudier le comportement des mélanges et d'identifier les facteurs impactant la séparation alors que celles industrielles permettent d'évaluer la faisabilité de ces séparations sur de plus grandes quantités de produits et ainsi de voir à quelles difficultés elles sont liées.

Certains mélanges d'isolants sont difficiles à séparer. C'est pourquoi, un banc d'essais dédié à l'application de la DBD sur des particules isolantes servira à déterminer le potentiel effet que peut avoir une telle décharge à pression atmosphérique sur la charge et la séparation de telles particules.

Enfin, des techniques de visualisation des trajectoires ainsi que de mesure des charges permettront respectivement de comprendre le phénomène de séparation et les résultats obtenus. De plus, la méthodologie des plans d'expériences permettra de modéliser et d'optimiser certaines installations de séparation électrostatique dans le but d'améliorer la qualité des produits séparés.

CHAPITRE III : PROCÉDES DE SÉPARATION ÉLECTROSTATIQUE DE MÉLANGES GRANULAIRES CONDUCTEUR – ISOLANT

Le premier objectif de cette thèse a été de déterminer la faisabilité de la séparation électrostatique des matériaux conducteurs et isolants contenus dans des déchets granulaires de câbles électriques. Ceci a permis à la société CITF de construire une installation de séparation électrostatique dédiée au traitement de ces déchets.

Dans un premier temps, la faisabilité de cette séparation a été démontrée sur des mélanges de particules « modèles » de cuivre et de PVC provenant de déchets de câbles électriques souples. Les essais ont été réalisés pour deux configurations d'électrodes d'un séparateur électrostatique à plaque et sont présentés dans le paragraphe III-1.

Ensuite, une comparaison a été effectuée entre les résultats obtenus avec des particules « modèles » et des particules issues de déchets de câbles électriques rigides et souples déchiquetés par un broyeur industriel (paragraphe III-2). Ainsi, la possibilité d'intégrer le séparateur électrostatique dans un flux industriel a été évaluée.

Des recommandations ont pu ainsi être formulées pour la conception d'un prototype de séparateur industriel, construit par la société CITF. Des essais sur ce prototype ont permis de valider et d'améliorer sa conception, afin de construire une première machine de série (paragraphe III-3).

III-1. Comparaison entre deux configurations d'électrodes d'un séparateur électrostatique à plaque [191]

L'application industrielle d'un séparateur électrostatique pose notamment la question de la rationalisation des coûts de l'investissement, de l'exploitation et de la maintenance. Du fait de la simplicité de sa construction, le séparateur électrostatique à plaque semble être le mieux placé pour satisfaire ces critères. En effet, contrairement au séparateur à tambour, peu d'éléments sont nécessaires à son fonctionnement (pas de moteur, de balais...). Toutefois, les géométries des électrodes sont relativement difficiles à réaliser, de même que leur nettoyage. Or, ce nettoyage est primordial dans le cas où le mélange à séparer est issu de déchets comprenant un pourcentage important de particules fines, qui adhèrent aux électrodes. Bien sûr, des systèmes d'aspiration des poussières existent mais sont énergivores et donc à éviter. Dans cette optique, deux configurations du système d'électrodes du séparateur à plaque de la société Carpco Inc. (figure II-5) ont été étudiées.

III-1.1. Procédure expérimentale

Les électrodes elliptiques et en forme de « S » sont difficiles à fabriquer et à nettoyer dans des conditions industrielles. Cette configuration classique, #1 (figure III-1), va servir de

référence à l'étude d'une configuration simplifiée du système d'électrodes, #2 (figure III-2), dans le but de préserver des performances de séparation élevées. Cette configuration consiste en deux électrodes plaques positionnées l'une en face de l'autre. La première joue le rôle de la plaque en forme de « S ». Elle est donc connectée à la terre et a les mêmes dimensions (200 x 320 mm). La seconde plaque métallique est connectée à une source de haute tension et remplace donc l'électrode elliptique. Elle a la même largeur et la même longueur (126 x 150 mm).

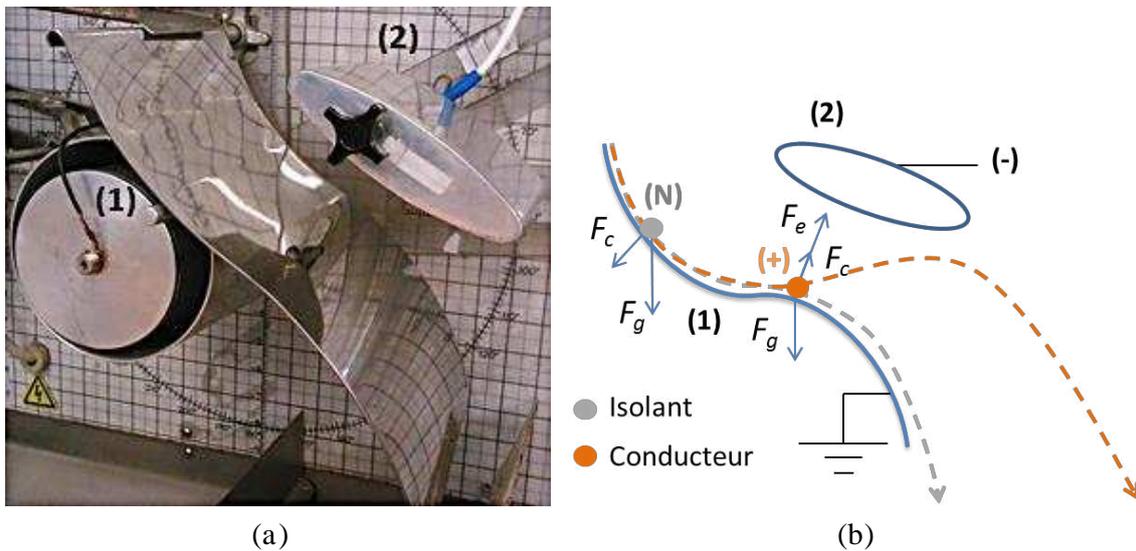


Figure III-1 : Configuration #1. (a) Configuration classique du système d'électrodes d'un modèle de laboratoire du séparateur électrostatique à plaque (Carpco Inc.) ; (b) Représentation schématique des forces agissant sur les particules et leurs trajectoires. (1) Plaque en forme de « S » reliée à la terre ; (2) Electrode elliptique reliée à une source de haute tension de polarité négative.

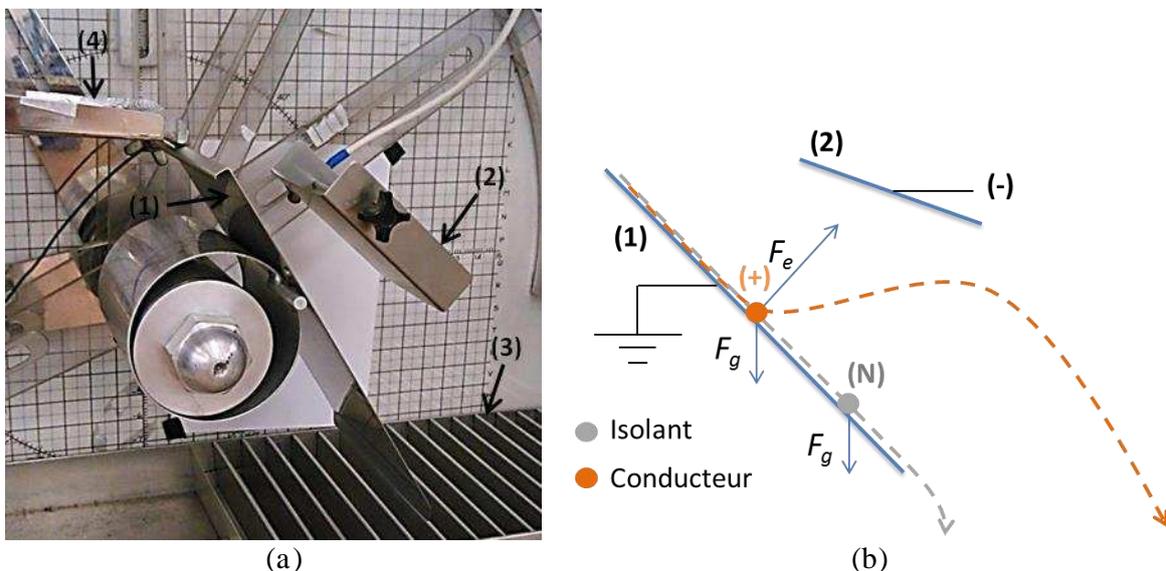


Figure III-2 : Configuration #2. (a) Configuration simplifiée du système d'électrodes d'un modèle de laboratoire du séparateur électrostatique à plaque (Carpco Inc.) ; (b) Représentation schématique des forces agissant sur les particules et leurs trajectoires. (1) Electrode plaque reliée à la terre ; (2) Electrode plaque reliée à une source de haute tension de polarité négative ; (3) Collecteur (16 compartiments) ; (4) Goulotte oscillante.

La comparaison expérimentale entre les deux systèmes d'électrodes est complétée par une analyse numérique du champ électrique, permettant le calcul des trajectoires des particules. Cette étude doit conduire à la formulation de plusieurs recommandations concernant la conception et l'application industrielle de ces configurations d'électrodes.

Lorsqu'elles descendent le long de la plaque en « S » de la configuration classique (#1), les particules conductrices acquièrent, par induction électrostatique, une charge électrique dont le signe est opposé à la polarité de la haute tension. Elles sont alors soumises à trois forces : la force d'attraction électrique (force de Coulomb), F_e , la force de gravité, F_g , et celle centrifuge, F_c . La force électrique, F_e , s'exprime par :

$$F_e = q_{ind}E \quad (III-1)$$

avec E [$V.m^{-1}$], le champ électrique local créé par l'électrode elliptique, et

$$q_{ind} = 0,832Q_m \quad (III-2)$$

où :

$$Q_m = \frac{2\pi^3}{3} \varepsilon_0 R^2 E \quad (III-3)$$

est la charge acquise par induction électrostatique par une particule conductrice supposée sphérique, de rayon R , en contact avec l'électrode plaque connectée à la terre dans un champ électrique uniforme E .

La force électrique devient alors [192] :

$$F_e = 17,2\varepsilon_0 R^2 E^2 \quad (III-4)$$

Les forces de gravité, F_g , et centrifuge, F_c , s'expriment de la même façon quel que soit le type de particule :

$$F_g = mg \quad (III-5)$$

avec m : masse de la particule [g]

et g : constante de gravité ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$).

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (III-6)$$

avec v : Vitesse de la particule [$m.s^{-1}$]

et r : rayon de courbure [m].

Une particule conductrice décolle de la plaque lorsque :

$$F_{gn} < F_e + F_c \quad (III-7)$$

Où F_{gn} correspond à la composante normale de la force de gravité à la surface de la plaque en « S ».

Les particules non-conductrices n'acquièrent pas de charge par induction électrostatique. Elles ne sont donc pas attirées par l'électrode elliptique et tombent selon leur propre poids dans la partie gauche du collecteur.

Dans le cas de la configuration avec les électrodes plaques (#2), les particules sont seulement soumises aux forces électriques et de gravité.

Les expériences ont été menées sur des particules « modèles » de câbles électriques souples (longueur : 4 mm ; section : 0,5 mm² ; figure II-1 (a)). Cette longueur est typique des particules provenant du broyage des déchets de câbles électriques.

Ces câbles sont composés de 55 % de cuivre et de 45 % de PVC en termes de masse. Le mélange alors étudié suit cette répartition.

Les deux configurations d'électrodes sont représentées sur la figure III-3. Pour la configuration d'électrodes incurvées (#1), le centre de l'électrode elliptique est positionné en $x = 0,2$ m et $y = -0,1$ m et ses demi-axes sont $a = 0,075$ m et $b = 0,019$ m (figure III-3 (a)). L'électrode peut tourner autour de ce point central. Pour la configuration plaques (#2), le point fixe de l'électrode haute tension est $x = 0,1$ m et $y = -0,025$ m, correspondant à son extrémité supérieure (figure III-3 (b)). Elle peut tourner autour de ce point.

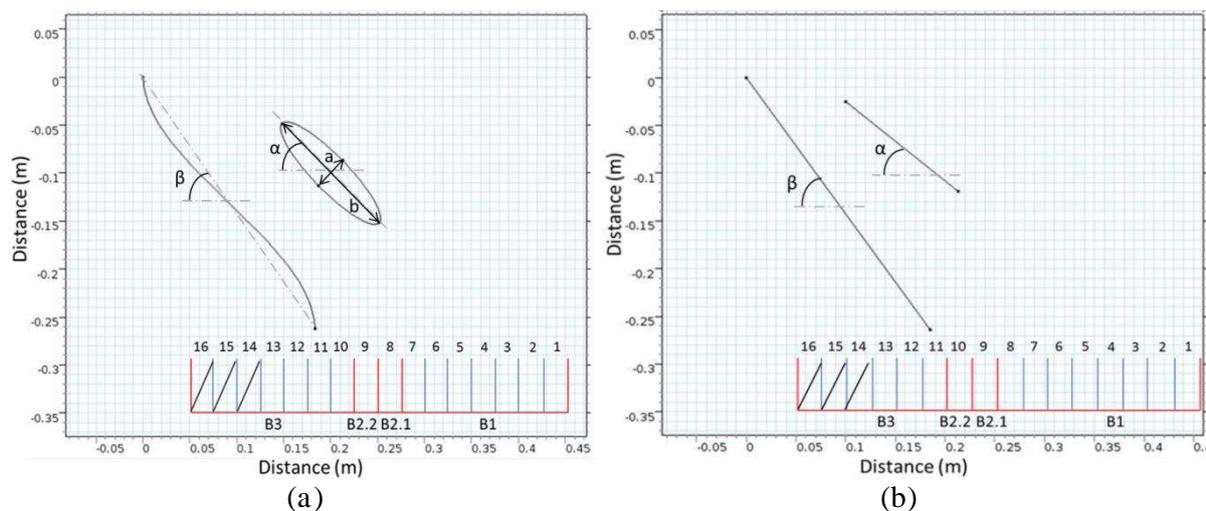


Figure III-3 : Caractéristiques de l'installation. (a) Configuration classique #1 ; (b) Configuration simplifiée #2.

Les compartiments du collecteur, de 25 mm de largeur chacun, sont numérotés, de droite à gauche, de 1 à 16. Ces compartiments sont regroupés en 4 secteurs (figure III-3). Dans le cas de la configuration classique (#1), les compartiments 1 à 7, contenant principalement du cuivre, sont groupés en B1. Les secteurs B2.1 et B2.2 correspondent respectivement aux compartiments 8 et 9. Ils contiennent tous deux un mélange de cuivre et de plastique. Le compartiment 8 collecte une majorité de cuivre et le 9 une majorité de plastique. Cependant, dans la plupart des expériences, la pureté des produits contenus dans ces compartiments est suffisamment élevée pour être considéré pur. Enfin, les compartiments 10 à 16 sont groupés en B3 et contiennent un mélange de plastique et de cuivre qui rebondissent d'autres

compartiments ou après impact avec l'électrode haute tension. Les compartiments 14 à 16 ne sont pas utilisés car aucune particule n'y est récupérée.

Dans le cas de la configuration plaques (#2), le secteur B1 est composé des compartiments 1 à 8. Les secteurs B2.1 et B2.2 correspondent respectivement aux compartiments 9 et 10. Enfin, les compartiments 11 à 14 sont groupés en B3.

L'étude fut menée en utilisant la méthode des plans d'expériences afin de modéliser et d'optimiser le fonctionnement des deux configurations d'électrodes. Parmi les facteurs pouvant influencer sur les résultats de séparation, deux ont été considérés (figure III-3) : l'angle d'inclinaison de l'électrode haute tension (α , °) et la valeur de la tension qui lui est appliquée (U, kV). Pour chaque expérience, 10 g de mélange ont été séparés. Le débit de matière traitée est fixé à 20 g.min⁻¹, assurant une monocouche à la surface de l'électrode plaque et ainsi les meilleures conditions de charge des particules conductrices par induction électrostatique.

L'angle d'inclinaison de l'électrode de terre a été fixé à $\beta = 55^\circ$, défini comme la valeur optimale obtenue par des tests préliminaires effectués avec les deux configurations. Pour des valeurs plus élevées de l'angle d'inclinaison, les particules conductrices atteindront des vitesses trop élevées pour que le champ électrique puisse modifier leurs trajectoires. Pour un angle α donné, l'augmentation de β s'accompagne d'une diminution du champ électrique et ainsi de l'action qu'il exerce sur les granules chargés. Toutefois, de plus faibles inclinaisons ne sont pas réalisables avec la construction actuelle du séparateur.

Tableau III-1 : Plages de variations des facteurs α et U, identiques pour les deux configurations d'électrodes.

Niveau	α (°)	U (kV)
-1	30	20
0	40	25
1	50	30

Le tableau III-1 montre les plages de variations des facteurs (inclinaison α et tension U de l'électrode haute tension). Ces valeurs ont été établies en réalisant une série d'expériences préliminaires. Les valeurs basses, centrales et hautes, de chaque facteur, sont respectivement désignées par les niveaux -1, 0 et 1. Dans ces plages, aucun arc électrique n'apparaît et la séparation donne de bons résultats (la pureté du cuivre est supérieure à 85 %).

Un plan d'expérience composite est utilisé dans cette étude : quatre expériences pour chaque niveau haut et bas de chaque facteur (2²) ; quatre expériences au niveau haut et bas de chaque facteur pour le niveau moyen du second (2*2) ; trois expériences au niveau moyen des deux facteurs permettant une estimation des erreurs expérimentales.

III-1.2. Résultats expérimentaux

Les résultats du plan d'expérience composite mené sur les deux configurations d'électrodes sont donnés dans les tableaux III-2 et III-3. Dans la plupart des cas, le produit collecté dans les secteurs B1 et B2.1 peuvent être regroupés car ils contiennent tous deux du cuivre suffisamment pur. Avec la configuration #1, l'erreur expérimentale est de 11,6 %.

Tableau III-2 : Résultats du plan factoriel composite obtenu avec la configuration classique #1.

		Masses de particules collectées dans les secteurs (g) :											
		B1			B2.1			B2.2			B3		
Tension	Inclinaison	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC
-1	-1	1,05	0,93	0,12	2,39	2,06	0,33	5,33	2,29	3,04	1,16	0,48	0,68
1	-1	2,89	2,79	0,10	2,44	2,07	0,37	2,65	0,53	2,12	1,99	0,33	1,66
-1	1	1,19	1,01	0,18	1,98	1,61	0,37	4,85	3,00	1,85	2,07	0,35	1,72
1	1	2,83	2,64	0,19	2,20	2,02	0,18	2,37	0,55	1,82	2,57	0,31	2,26
-1	0	1,26	1,07	0,16	2,05	1,70	0,35	4,53	2,60	1,93	2,10	0,49	1,61
1	0	2,84	2,68	0,16	2,17	1,90	0,27	2,18	0,70	1,48	2,77	0,42	2,35
0	-1	1,64	1,49	0,15	3,14	2,76	0,38	3,36	1,34	2,02	1,83	0,29	1,54
0	1	2,14	1,91	0,23	2,49	2,24	0,25	2,81	1,24	1,57	2,50	0,35	2,15
0	0	1,93	1,78	0,15	2,48	2,18	0,30	3,30	1,09	2,21	2,30	0,32	1,98
0	0	2,20	2,01	0,19	2,78	2,52	0,26	3,07	0,68	2,39	1,88	0,29	1,59
0	0	2,16	1,88	0,28	2,91	2,58	0,33	2,76	0,69	2,07	2,09	0,61	1,48

Tableau III-3 : Résultats du plan factoriel composite obtenu avec la configuration simplifiée #2.

		Masses de particules collectées dans les secteurs (g) :											
		B1			B2.1			B2.2			B3		
Tension	Inclinaison	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC
-1	-1	0,37	0,27	0,10	0,71	0,47	0,24	8,24	4,49	3,75	0,38	0,12	0,26
1	-1	3,92	3,82	0,10	0,90	0,67	0,23	4,48	0,65	3,83	0,41	0,20	0,21
-1	1	0,22	0,20	0,02	0,62	0,47	0,15	8,70	4,64	4,06	0,26	0,15	0,11
1	1	3,46	3,42	0,04	0,93	0,82	0,11	4,93	0,95	3,98	0,45	0,22	0,23
-1	0	0,29	0,22	0,07	0,59	0,45	0,14	8,27	4,47	3,80	0,46	0,14	0,32
1	0	3,68	3,53	0,15	1,12	0,75	0,37	4,32	0,79	3,53	0,48	0,21	0,27
0	-1	1,94	1,88	0,06	1,22	0,94	0,28	6,03	2,27	3,76	0,42	0,20	0,22
0	1	1,87	1,79	0,08	1,22	1,04	0,18	6,08	2,28	3,80	0,55	0,27	0,28
0	0	1,89	1,79	0,10	1,17	0,94	0,23	6,10	2,36	3,74	0,54	0,27	0,27
0	0	1,99	1,84	0,15	1,17	1,01	0,16	5,98	2,25	3,73	0,59	0,27	0,32
0	0	1,73	1,69	0,04	1,24	1,04	0,20	6,29	2,45	3,84	0,49	0,24	0,25

La récupération REC_{Cu} et la pureté PU_{Cu} du cuivre collecté dans les secteurs B1 et B2.1 sont calculées comme suit :

$$REC_{Cu} = \frac{m_{Cu\ B1} + m_{Cu\ B2.1}}{m_{T\ Cu}} \times 100 \quad (III-8)$$

$$PU_{Cu} = \frac{m_{Cu\ B1} + m_{Cu\ B2.1}}{m_{T\ B1} + m_{T\ B2.1}} \times 100 \quad (III-9)$$

où $m_{Cu\ Bi}$ correspond à la masse de conducteur dans le secteur Bi, $m_{T\ Cu}$ est la masse totale de conducteur dans le mélange initial et $m_{T\ Bi}$ est la masse totale du secteur Bi. Des formules similaires ont été utilisées pour calculer la récupération REC_{PVC} et la pureté PU_{PVC} du produit PVC collecté en B2.2. Les tableaux III-4 et III-5 montrent les résultats obtenus dans les plans d'expériences composites pour chaque configuration d'électrodes. L'erreur expérimentale obtenue avec la configuration simplifiée est de 7,7 %.

L'efficacité (ou le rendement) de la séparation du cuivre est calculée avec la formule :

$$\eta_{Cu} = \left(\frac{m_{Cu\ B1} + m_{Cu\ B2.1}}{m_{T\ Cu}} - \frac{m_{PVC\ B1} + m_{PVC\ B2.1}}{m_{T\ PVC}} \right) \times 100 \quad (III-10)$$

Tableau III-4 : Récupérations et puretés des produits obtenus avec la configuration #1.

Tension	Inclinaison	Secteurs B1 + B2.1 (Cu)		Secteur B3 (Mixte) (%) sur la masse totale	Secteur B2.2 (PVC)	
		REC _{Cu} (%)	PU _{Cu} (%)		REC _{PVC} (%)	PU _{PVC} (%)
-1	-1	51,91	86,92	11,68	72,90	57,04
1	-1	84,94	90,49	19,90	49,88	80,00
-1	1	43,89	82,65	20,52	44,79	38,14
1	1	84,39	92,45	25,78	40,99	76,79
-1	0	47,36	83,73	21,11	47,54	42,60
1	0	80,41	91,74	27,81	34,58	67,89
0	-1	72,28	88,91	18,36	49,39	60,12
0	1	72,30	89,44	25,13	37,38	55,87
0	0	73,74	89,59	22,95	47,63	66,97
0	0	82,36	90,42	18,88	53,95	77,85
0	0	77,43	87,28	20,98	49,76	75,00

Tableau III-5 : Récupérations et puretés des produits obtenus avec la configuration #2.

Tension	Inclinaison	Secteurs B1 + B2.1 (Cu)		Secteur B3 (Mixte) (%) sur la masse totale	Secteur B2.2 (PVC)	
		REC _{Cu} (%)	PU _{Cu} (%)		REC _{PVC} (%)	PU _{PVC} (%)
-1	-1	13,83	67,27	3,80	86,21	45,40
1	-1	84,08	93,15	4,23	87,64	85,68
-1	1	12,27	79,76	2,75	93,55	46,56
1	1	78,37	97,03	5,04	91,28	81,72
-1	0	12,69	72,04	4,62	87,76	45,45
1	0	81,06	88,43	5,26	81,71	81,15
0	-1	53,31	88,13	4,45	87,04	62,25
0	1	52,60	89,84	5,61	87,56	62,19
0	0	50,93	89,22	5,64	86,18	60,91
0	0	53,07	89,62	6,14	85,55	62,27
0	0	50,37	91,92	5,31	88,68	60,86

Le logiciel commercial MODDE 5.0 (Umetrics, Suède) a été utilisé pour exprimer la récupération et la pureté de chaque produit en fonction des valeurs centrées x_i^* des n facteurs x_i , avec $i = 1, \dots, n$, où :

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i} \quad (III-11)$$

$$x_{i0} = \frac{x_{imax} + x_{imin}}{2}; \Delta x = \frac{x_{imax} - x_{imin}}{2} \quad (III-12)$$

$x_{i\max}$ et $x_{i\min}$ étant respectivement la valeur maximale et la valeur minimale du domaine d'expérience de la variable x_i . Dans le cas présent, $n = 2$, et les deux variables centrées sont $x_1^* = U^*$ et $x_2^* = \alpha^*$.

Par exemple, la fonction réponse déterminée par MODDE 5.0 pour la récupération du cuivre est :

$$REC_{Cu} = 51,7168 - 1,33 \times \alpha^* + 34,12 \times U^* + 0,847895 \times \alpha^{*2} - 5,2321 \times U^{*2} - 1,0375 \times \alpha^*U^* \quad (\text{III-13})$$

Les coefficients affectés à chaque facteur démontrent leur influence. Pour la récupération du cuivre (équation III-13), les coefficients affectés à α et à α^2 sont proches de 1. Ce facteur a donc une influence faible sur la récupération du cuivre. A contrario, les coefficients affectés à U sont élevés. La tension a donc une influence importante sur cette réponse.

MODDE 5.0 donne des formules similaires pour PU_{Cu} , REC_{PVC} et PU_{PVC} , mais également pour la masse récupérée dans B3, $Masse_{B3}$. Dans les tableaux III-6 et III-7 sont donnés les valeurs des constantes et des coefficients de U^* , α^* , U^{*2} , α^{*2} et $U^*.\alpha^*$ pour chacune de ces fonctions et pour les deux configurations.

Tableau III-6 : Valeurs des coefficients du modèle de chaque réponse et de R2 et Q2 pour la configuration #1.

	REC_{Cu} (%)	PU_{Cu} (%)	$Masse_{B3}$ (%)	REC_{PVC} (%)	PU_{PVC} (%)
Constante	74,53	88,82	21,7564	48,8693	71,6314
U^*	17,7633	3,56333	3,36333	-6,63	14,4833
α^*	-2,09167	-0,630001	3,74833	-9,50167	-5,39333
U^{*2}	-9,59	-1,47	2,91214	-7,98357	-17,0329
α^{*2}	0,815002	0,970002	-5,30286	11,3414	8,71715
α^*U^*	1,8675	1,5575	-0,74	4,805	3,9225
Q2	0,945	0,795	0,968	0,988	0,908
R2	0,991	0,956	0,99	0,997	0,98

Tableau III-7 : Valeurs des coefficients du modèle de chaque réponse et de R2 et Q2 pour la configuration #2.

	REC_{Cu} (%)	PU_{Cu} (%)	$Masse_{B3}$ (%)	REC_{PVC} (%)	PU_{PVC} (%)
Constante	51,7168	89,6563	5,53895	85,9216	61,2063
U^*	34,12	8,92334	0,525	-2,98166	18,5233
α^*	-1,33	2,34667	0,045	0,0833344	-0,476667
U^{*2}	-5,2321	-8,52579	-0,512368	-0,863948	2,30421
α^{*2}	0,847895	1,2242	-0,992368	1,70104	1,22421
α^*U^*	-1,0375	-3,6525	0,3775	-3,675	-1,28
Q2	0,994	0,913	0,878	0,943	0,988
R2	0,999	0,985	0,977	0,988	0,998

Les indices statistiques R2 (représentant la capacité du modèle à donner des valeurs proches des valeurs vraies) et Q2 (capacité du modèle à prédire la réponse) sont aussi calculés et listés dans les tableaux suscités. Un modèle est considéré comme valable lorsque les valeurs de ces deux indices sont proches de 1.

Les courbes d'iso-valeurs de REC_{Cu} [%] et de PU_{Cu} [%], pour les deux configurations d'électrodes, sont respectivement représentées sur les figures III-4 et III-5. Ces graphiques confirment que la tension U a un important effet aussi bien sur la récupération que sur la pureté du cuivre.

Ce n'est en revanche pas le cas de l'angle d'inclinaison α . Cependant, l'influence de ce facteur est significative sur la récupération du PVC et le pourcentage de produit mixte.

Le point de fonctionnement optimal du procédé est obtenu lorsqu'un maximum de cuivre et de PVC sont récupérés avec des puretés maximales (Max REC_{Cu} , Max PU_{Cu} , Max REC_{PVC} et Max PU_{PVC}), alors que la masse de produit mixte doit être minimale (Min Masse_{B3}).

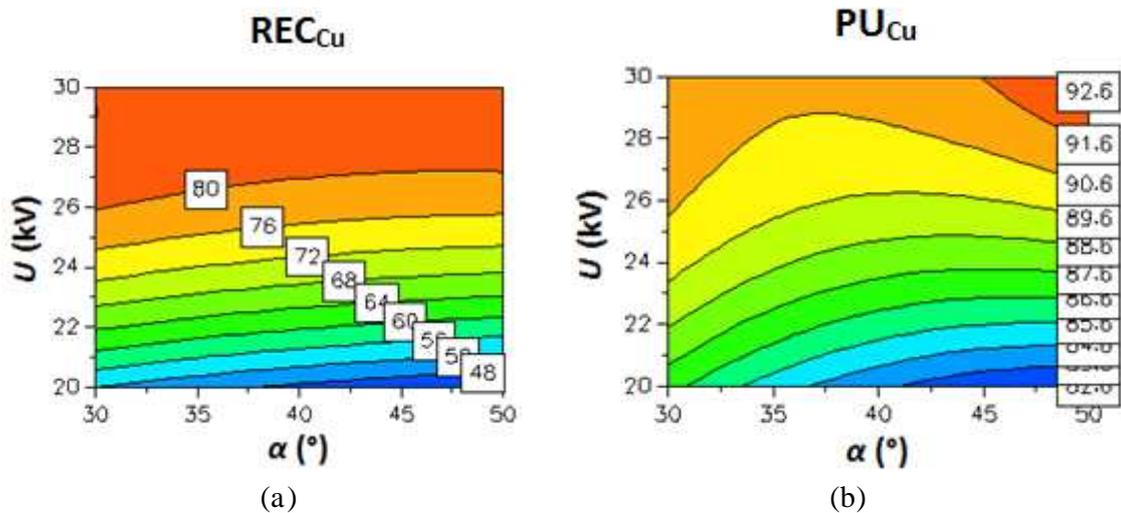


Figure III-4 : Iso-contours de la récupération et de la pureté du produit conducteur en fonction de l'angle d'inclinaison et de la tension pour la configuration classique #1.

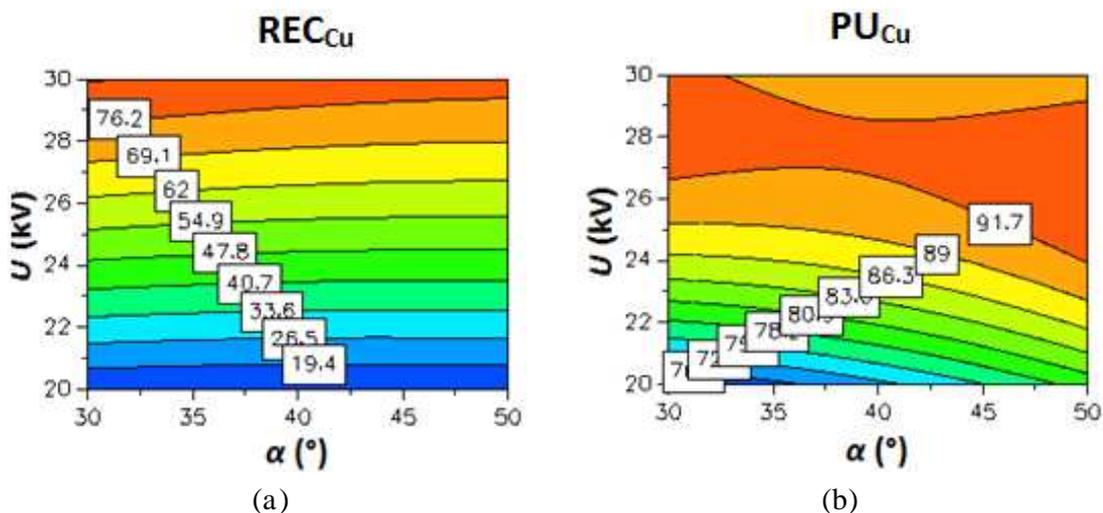


Figure III-5 : Iso-contours de la récupération et de la pureté du produit conducteur en fonction de l'angle d'inclinaison et de la tension pour la configuration simplifiée #2.

MODDE 5.0 facilite le calcul des valeurs optimales des facteurs pour les deux configurations d'électrodes. Ainsi, pour l'électrode elliptique et la plaque en « S » (configuration #1) les valeurs optimales des facteurs sont : $\alpha = 30,00^\circ$ et $U = 26,55$ kV.

Pour la configuration #2 (électrodes plaques), les valeurs optimales des facteurs sont : $\alpha = 30,00^\circ$ et $U = 29,65$ kV.

La proximité des valeurs optimales obtenues avec les limites des plages de variation (notamment α) suggère qu'elles devraient être étendues. Toutefois, la présence d'arcs électriques entre les électrodes dégrade les résultats de séparation et empêche tout essai.

Les résultats des expériences menées pour ces valeurs optimales sont donnés dans les tableaux III-8 et III-9. Pour les deux configurations d'électrodes, les valeurs prédites par le logiciel et celles effectivement obtenues après séparation sont proches ce qui valide bien le modèle utilisé. L'efficacité de la combinaison d'électrodes plaques est de 71,25 % ce qui signifie que 78,63 % de cuivre est récupéré avec une pureté de 89,82 %. Pour la plaque en « S » et l'électrode elliptique, l'efficacité est de 70,35 %. La faible différence entre les deux configurations est due au produit mixte, plus important pour la configuration classique #1.

Même si la récupération du cuivre est légèrement plus élevée dans ce cas, les difficultés de nettoyage liées à la géométrie des électrodes incitent l'utilisateur à préférer les deux électrodes plaques planes.

La répartition des particules de cuivre dans les secteurs B1 et B2.1 ne sont pas identiques pour les deux configurations. Pour les plaques planes, il y a une grande différence de pureté entre ces secteurs. Dans le secteur B1, 64,23 % de cuivre est récupéré avec une pureté de 94,13 % alors que dans B2.1, 14,40 % du cuivre est récupéré pur à 74,58 %.

En fonction des objectifs de l'utilisateur, les deux secteurs peuvent rassemblés ou non. Si une pureté importante est souhaitée, le produit B1 peut être conservé seul alors que si c'est la récupération qui est privilégiée, le produit B2.1 peut y être ajouté. Cependant, pour la configuration classique, la pureté du cuivre est pratiquement la même dans ces deux secteurs (90,9 % dans B1 et 89,28 % dans B2.1). Ainsi, quel que soit l'objectif de l'utilisateur, ces compartiments peuvent être regroupés.

Tableau III-8 : Résultats prédits par le modèle et obtenus expérimentalement au point de fonctionnement optimum pour la configuration classique #1.

	Tension (kV)	Inclinaison (°)	Secteurs B1 + B2.1 (Cu)		Secteur B3 (Mixte) (%) sur la masse totale	Secteur B2.2 (PVC)	
			REC _{Cu} (%)	PU _{Cu} (%)		REC _{PVC} (%)	PU _{PVC} (%)
Modèle	26,55	30,00	81,48	90,90	14,28	65,34	87,38
Réel	26,50	30,00	81,41	89,98	7,19	83,35	86,10

Tableau III-9 : Résultats prédits par le modèle et obtenus expérimentalement au point de fonctionnement optimum pour la configuration simplifiée #2.

	Tension (kV)	Inclinaison (°)	Secteurs B1 + B2.1 (Cu)		Secteur B3 (Mixte) (%) sur la masse totale	Secteur B2.2 (PVC)	
			REC _{Cu} (%)	PU _{Cu} (%)		REC _{PVC} (%)	PU _{PVC} (%)
Modèle	29,65	30,00	82,08	92,85	4,20	87,44	83,33
Réel	29,60	30,00	78,63	89,82	5,10	86,01	80,10

III-1.3. Optimisation du processus et discussion des résultats par modélisation numérique

L'analyse du champ électrique peut faciliter l'interprétation des résultats de séparation électrostatique. Les résultats des simulations effectuées avec les deux configurations d'électrodes grâce au logiciel COMSOL 4.2 sont donnés sur la figure III-6.

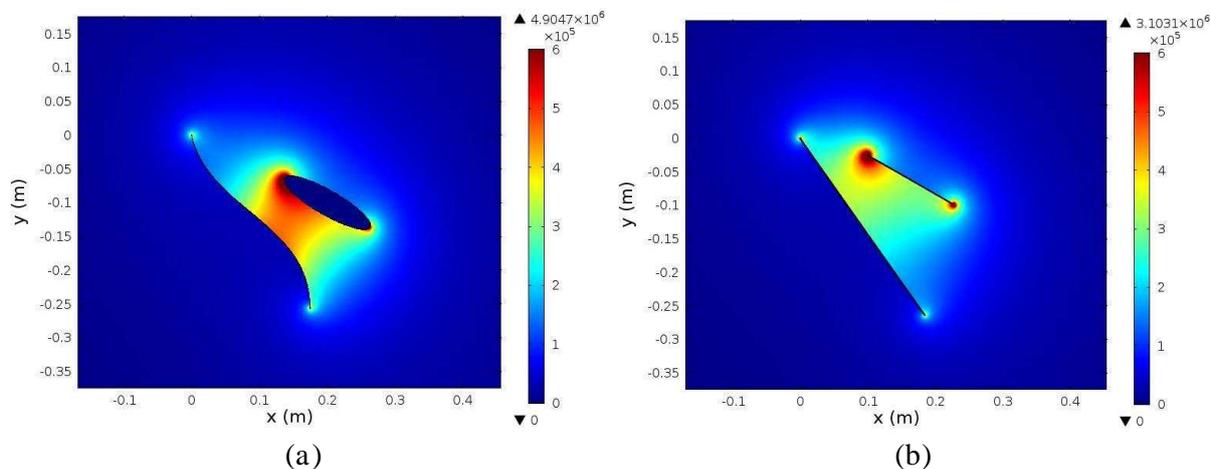


Figure III-6 : Champ électrique entre les électrodes du séparateur à plaque pour une tension appliquée de 30 kV. (a) Configuration classique #1 ; (b) Configuration simplifiée #2.

Dans le cas des électrodes incurvées (figure III-6 (a)), le champ électrique est plus intense à la surface de la partie convexe de la plaque en « S », là où la distance inter-électrode est la plus courte et où la vitesse des particules est la moins importante. L'association de ces deux phénomènes aide grandement au décollement des particules de cuivre mais le champ électrique est moins uniforme qu'avec la configuration utilisant les plaques planes (figure III-6 (b)).

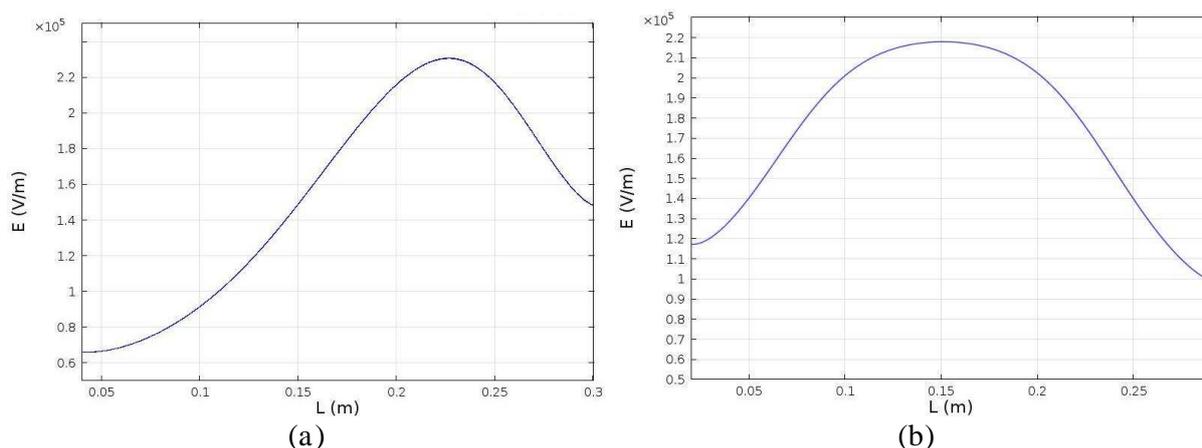


Figure III-7 : Variation du champ électrique le long de la plaque en forme de « S » de la configuration #1 (a) et le long de la plaque plane de la configuration #2 (b).

La figure III-7 montre la variation de l'intensité du champ électrique le long de l'électrode de terre lorsque les électrodes à haute tension leur sont parallèles. Le champ électrique, E , est plus uniforme pour les plaques planes que pour celles incurvées. Un champ maximum de $2,2 \cdot 10^5 \text{ V.m}^{-1}$ est présent au milieu de la plaque liée à la terre. Pour les

électrodes incurvées, le maximum est présent dans sa partie convexe et est légèrement plus élevée : $2,3 \cdot 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$. Les particules conductrices auront donc plus facilement tendance à décoller de l'électrode plaque dans le cas de cette configuration classique.

Les trajectoires des particules conductrices sont simulées par le biais d'un programme décrit en [93] pour chaque configuration d'électrodes (figure III-8). Les simulations ont été effectuées pour une tension $U = 30 \text{ kV}$ et une inclinaison des électrodes haute tension $\alpha = 55^\circ$. La ligne $y = -0,2 \text{ m}$ correspond au fond du collecteur. Avec la plaque en « S » et l'électrode elliptique, les particules conductrices acquièrent des trajectoires plus longues et sont collectées en $x = 0,36 \text{ m}$. Pour les électrodes planes, elles sont récupérées en $x = 0,3 \text{ m}$. Cette différence en faveur de la configuration classique peut expliquer les meilleurs résultats de séparation.

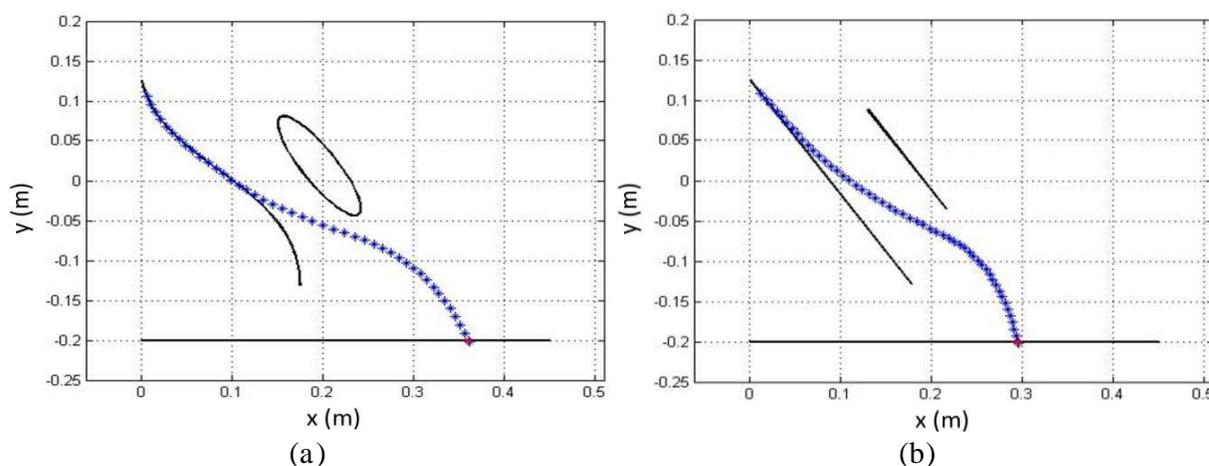


Figure III-8 : Simulation numérique de la trajectoire d'une particule de cuivre. (a) Configuration classique #1 ; (b) Configuration simplifiée #2.

Il est aussi important de prendre en considération l'inertie des particules qui glissent le long de l'électrode plaque. L'électrode plaque plane permet aux particules d'acquérir une vitesse plus importante, une accélération constante et des trajectoires plus rectilignes. La plaque en « S » permet une diminution de la vitesse des particules dans sa partie convexe, là où le champ électrique est le plus intense. De plus, la force centrifuge F_c , tend à les faire décoller à cette position. Ces phénomènes combinés peuvent faciliter la séparation électrostatique et expliquer les meilleurs résultats obtenus pour la configuration classique #1.

Plus d'études peuvent être effectués en utilisant d'autres configurations d'électrodes telles qu'une électrode plaque connectée à la haute tension en combinaison avec une électrode en forme de « S » connectée à la terre.

III-2. Etude de l'influence des tailles et des formes des particules. Comparaison entre des particules « modèles » et réelles [193]

La première partie de l'étude a permis de démontrer que de meilleurs résultats de séparation sont obtenus dans le cas de la configuration classique du séparateur électrostatique à plaque comprenant une électrode plaque en forme de « S » reliée à la terre et une électrode

elliptique reliée à une source de haute tension. Toutefois, les essais ont été effectués sur des particules « modèles » de câbles électriques souples de dimensions et de formes constantes. Or, un flux industriel se caractérise notamment par la diversité des formes et tailles des particules, due à leur prétraitement notamment par un broyeur industriel. De plus, des câbles électriques rigides composent également un tel flux.

Il est donc maintenant question de comparer les résultats de séparation obtenus avec des particules « modèles » et des particules déchiquetées par un broyeur industriel, traitées par un séparateur électrostatique à plaque.

III-2.1. Procédure expérimentale

Les expériences ont été effectuées sur le séparateur électrostatique à plaque de la société Carpco Inc. comme pour l'étude précédente, en utilisant la configuration classique du système d'électrodes (figure III-1) et un collecteur comportant 16 compartiments (figure III-3 (a)). Là encore, ces compartiments sont numérotés, de droite à gauche, de 1 à 16 et sont groupés en 4 secteurs. Le premier, B1, correspond aux compartiments 1 à 7 et servira principalement à collecter des particules de cuivre. Les secteurs B2.1 et B2.2 correspondent respectivement aux compartiments 8 et 9, dans lesquels sont collectés un mélange de plastique et de cuivre (le premier contient majoritairement du cuivre et le second du plastique). Ces deux compartiments sont traités séparément car, dans certains cas, les produits collectés peuvent être considérés comme purs. Le produit récupéré dans le secteur B3 (compartiments 10 à 13) est majoritairement composé de particules hybrides ainsi que d'un mélange mixte de particules de cuivre et de plastique qui rebondissent d'autres compartiments. Enfin, les compartiments 14 à 16 ne contiennent aucune particule.

Quatre séries d'expériences ont été effectuées sur deux types de déchets de câbles électriques. Ainsi, deux séries d'expériences ont été menées sur des granules de câbles électriques souples (ou multibrin) et deux autres séries ont porté sur des granules de câbles électriques rigides (ou monobrin). Pour chaque type de câble, des particules « modèles » (longueur : 4 mm ; section : 0,5 mm² ; figure II-1) et des particules obtenues par un broyeur industriel (figure II-2) ont été comparées. Les particules de ce second mélange se caractérisent par une dispersion de leurs tailles (1 mm à 4 mm), de leurs formes et des sections des câbles desquels elles sont issues.

Par la suite, les échantillons seront numérotés **#1**, **#2**, **#3** et **#4** et correspondent respectivement aux particules « modèles » et granulées de câbles électriques souples et aux particules « modèles » et granulées de câbles électrique rigides.

La présence de particules hybrides (c'est-à-dire de petits morceaux de câbles dont le cuivre et l'isolation ne sont pas dissociés) dans le mélange réel va certainement détériorer la qualité de la séparation. L'isolation empêche le contact entre le cuivre et l'électrode plaque et ainsi son chargement par induction électrostatique. Ces granules non chargés ne sont pas récupérés dans les mêmes compartiments que ceux de cuivre chargés par induction. En

revanche, ils ne seront pas non plus récupérés dans les mêmes compartiments que la majorité des plastiques car ils sont trop lourds. Ainsi, ils seront récupérés avec le produit mixte qui contient aussi des particules de cuivre déviées après impact avec l'électrode haute tension.

Pour chaque expérience, 10 g de mélange ont été traités avec un débit de $100 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, qui assure une monocouche de particules à la surface de l'électrode plaque. Pour les déchets de câbles électriques souples, chaque mélange était composé de 55 % de cuivre et 45 % de PVC. Pour les déchets de câbles électriques rigides, chaque échantillon était composé 65 % de cuivre et 35 % de plastiques en mélange.

Afin d'obtenir le point de fonctionnement optimum du séparateur pour les 4 échantillons de produit, la méthode des plans d'expériences a été utilisée en prenant en compte deux facteurs :

- l'angle d'inclinaison de l'électrode elliptique (α , °),
- la valeur de la haute tension appliquée à l'électrode elliptique (U, kV).

L'angle d'inclinaison de l'électrode plaque (β , °) est fixé à 55° qui a été défini comme sa valeur optimale lors d'une série d'expériences préliminaires (figure III-3 (a)).

Cette série d'expériences préliminaires a permis d'établir les plages de variation des deux facteurs, présentées dans les tableaux III-10 et III-11.

Tableau III-10 : Plages de variation des facteurs utilisées lors des essais sur les échantillons de mélanges de câbles électriques souples #1 et #2.

Niveau	α (°)	U (kV)
-1	30	20
0	40	25
1	50	30

Tableau III-11 : Plages de variation des facteurs utilisées lors des essais sur les échantillons de mélanges de câbles électriques rigides #3 et #4.

Niveau	α (°)	U (kV)
-1	30	30
0	40	35
1	50	40

La plage de variation de la tension n'est pas la même pour les deux types de câbles. Dans le cas des câbles rigides, les particules de cuivre ont des volumes plus importants (diamètres plus gros) et sont plus lourdes que celles des câbles souples, c'est pourquoi il est nécessaire d'avoir un champ électrique plus intense.

III-2.2. Application aux déchets de câbles électrique souples

A partir de ces plages de variation, un plan factoriel composite comportant 11 expériences a été effectué avec les échantillons #1 (tableau III-12) et #2 (tableau III-13). Pour l'échantillon #1, l'erreur expérimentale était de 11,6 % alors que pour l'échantillon #2 elle était de 7,9 %. Les différences de formes entre les particules expliquent ces résultats.

Chapitre III : Procédés de séparation électrostatique de mélanges granulaires conducteur – isolant

Dans toutes ces expériences, peu de particules de PVC ont été collectées dans les secteurs B1 et B2.1. Ainsi, les masses collectées dans ces secteurs peuvent être regroupées pour représenter le produit cuivre. Sa récupération, sa pureté ainsi que celles du produit isolant et le rendement de la séparation ont été calculés comme précédemment (équations III-8, III-9 et III-10).

Tableau III-12 : Résultats du plan factoriel composite mené sur les particules « modèles » de câbles électriques souples (#1).

		Masses de particules collectées dans les secteurs (g) :											
		B1			B2.1			B2.2			B3		
Tension	Inclinaison	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC
-1	-1	1,05	0,93	0,12	2,39	2,06	0,33	5,33	2,29	3,04	1,16	0,48	0,68
1	-1	2,88	2,78	0,10	2,44	2,07	0,37	2,65	0,53	2,12	1,99	0,33	1,66
-1	1	1,20	1,01	0,19	1,98	1,61	0,37	4,85	3,00	1,85	2,07	0,35	1,72
1	1	2,81	2,63	0,18	2,20	2,02	0,18	2,37	0,55	1,82	2,57	0,31	2,26
-1	0	1,25	1,08	0,17	2,05	1,70	0,35	4,53	2,60	1,93	2,10	0,49	1,61
1	0	2,88	2,70	0,18	2,17	1,90	0,27	2,18	0,70	1,48	2,77	0,42	2,35
0	-1	1,64	1,49	0,15	3,14	2,76	0,38	3,36	1,34	2,02	1,83	0,29	1,54
0	1	2,14	1,91	0,23	2,49	2,24	0,25	2,81	1,24	1,57	2,50	0,35	2,15
0	0	1,93	1,78	0,15	2,48	2,18	0,30	3,30	1,09	2,21	2,30	0,32	1,98
0	0	2,20	2,01	0,19	2,78	2,52	0,26	3,07	0,68	2,39	1,88	0,29	1,59
0	0	2,16	1,88	0,28	2,91	2,58	0,33	2,76	0,69	2,07	2,09	0,61	1,48

Tableau III-13 : Résultats du plan factoriel composite mené sur les particules broyées de câbles électriques souples (#2).

		Masses de particules collectées dans les secteurs (g) :											
		B1			B2.1			B2.2			B3		
Tension	Inclinaison	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC
-1	-1	0,87	0,72	0,15	2,17	1,83	0,34	6,17	2,44	3,73	0,79	0,61	0,18
1	-1	2,79	2,64	0,15	3,00	2,50	0,50	3,82	0,26	3,56	0,39	0,20	0,19
-1	1	1,09	0,86	0,23	1,82	1,46	0,36	6,41	2,82	3,59	0,68	0,46	0,22
1	1	2,82	2,68	0,14	2,76	2,43	0,33	3,99	0,29	3,70	0,43	0,20	0,23
-1	0	1,09	0,90	0,19	2,48	2,09	0,39	5,80	2,13	3,67	0,63	0,48	0,15
1	0	2,80	2,54	0,25	2,82	2,55	0,27	3,88	0,27	3,61	0,51	0,24	0,27
0	-1	1,93	1,68	0,25	2,83	2,57	0,26	4,61	0,94	3,67	0,63	0,41	0,22
0	1	2,05	1,75	0,30	2,97	2,61	0,36	4,28	0,83	3,45	0,70	0,41	0,29
0	0	1,80	1,63	0,17	2,91	2,58	0,33	4,62	0,98	3,64	0,67	0,41	0,26
0	0	1,79	1,69	0,10	2,93	2,51	0,42	4,63	0,97	3,76	0,55	0,43	0,12
0	0	1,90	1,71	0,19	3,04	2,72	0,32	4,42	0,73	3,69	0,64	0,44	0,20

Les tableaux III-14 et III-15 présentent respectivement les résultats obtenus, en termes de récupérations et de puretés, pour les particules « modèles » et broyées de câbles électriques souples. Par le biais du logiciel MODDE 5.0, les réponses REC_{Cu} , Pu_{Cu} , REC_{PVC} , Pu_{PVC} , ainsi

que pour la quantité de produit mixte collectée dans le secteur B3, Masse_{B3}, peuvent être prédites à l'intérieur des plages de variation.

Tableau III-14 : Récupérations et puretés obtenues avec les particules « modèles » de câbles électriques souples (#1).

Tension	Inclinaison	Secteurs B1 + B2.1 (Cu)		Secteur B3 (Mixte) (%) sur la masse totale	Secteur B2.2 (PVC)	
		REC _{Cu} (%)	PU _{Cu} (%)		REC _{PVC} (%)	PU _{PVC} (%)
-1	-1	51,91	86,92	11,68	72,90	57,04
1	-1	84,94	90,49	19,90	49,88	80,00
-1	1	43,89	82,65	20,52	44,79	38,14
1	1	84,39	92,45	25,78	40,99	76,79
-1	0	47,36	83,73	21,11	47,54	42,60
1	0	80,41	91,74	27,81	34,58	67,89
0	-1	72,28	88,91	18,36	49,39	60,12
0	1	72,30	89,44	25,13	37,38	55,87
0	0	73,74	89,59	22,95	47,63	66,97
0	0	82,36	90,42	18,88	53,95	77,85
0	0	77,43	87,28	20,98	49,76	75,00

Tableau III-15 : Récupérations et puretés obtenues avec les particules broyées de câbles électriques souples (#2).

Tension	Inclinaison	Secteurs B1 + B2.1 (Cu)		Secteur B3 (Mixte) (%) sur la masse totale	Secteur B2.2 (PVC)	
		REC _{Cu} (%)	PU _{Cu} (%)		REC _{Cu} (%)	PU _{Cu} (%)
-1	-1	45,54	83,88	8,02	84,77	60,75
1	-1	91,79	88,32	4,00	80,91	94,43
-1	1	41,43	80,00	6,91	81,59	56,09
1	1	91,25	91,25	4,45	84,09	96,35
-1	0	49,39	83,75	8,46	83,41	58,84
1	0	90,89	90,57	5,20	82,05	93,52
0	-1	75,89	89,10	6,31	83,41	80,13
0	1	77,86	88,68	6,10	83,41	80,99
0	0	75,18	89,19	6,73	82,73	79,65
0	0	75,00	88,61	5,62	85,45	80,69
0	0	79,11	89,31	6,51	83,86	84,44

Les valeurs des coefficients du terme libre ainsi que de U^* , α^* , U^{*2} , α^{*2} , et $U^*\alpha^*$ pour chacune des fonctions mathématiques ainsi que les index R2 et Q2 sont données dans les tableaux III-16 et III-17, respectivement pour les granules « modèles » et broyées.

Chapitre III : Procédés de séparation électrostatique de mélanges granulaires
conducteur – isolant

Tableau III-16 : Valeurs des coefficients du modèle de chaque réponse et de R2 et Q2 pour les particules
« modèles » de câbles électriques souples (#1).

	REC_{Cu} (%)	PU_{Cu} (%)	$Masse_{B3}$ (%)	REC_{PVC} (%)	PU_{PVC} (%)
Constante	74,53	88,82	21,76	48,87	71,63
U^*	17,76	3,56	3,36	-6,63	14,48
α^*	-2,09	-0,63	3,75	-9,50	-5,39
U^2	-9,59	-1,47	2,91	-7,98	-17,03
α^2	0,81	0,97	-5,30	11,34	8,72
α^*U^*	1,87	1,56	-0,74	4,80	3,92
Q2	0,945	0,795	0,967	0,988	0,908
R2	0,991	0,956	0,990	0,997	0,980

Tableau III-17 : Valeurs des coefficients du modèle de chaque réponse et de R2 et Q2 pour les particules
broyées de câbles électriques souples (#2).

	REC_{Cu} (%)	PU_{Cu} (%)	$Masse_{B3}$ (%)	REC_{PVC} (%)	PU_{PVC} (%)
Constante	77,82	89,52	6,78	83,29	81,41
U^*	22,92	3,75	-1,62	-0,45	18,10
α^*	-0,45	-0,23	-0,14	-4,56E-06	-0,31
U^2	-8,36	-2,63	-0,11	-0,56	-4,60
α^2	-1,62	-0,89	-0,74	0,11	-0,22
α^*U^*	0,89	1,70	0,39	1,59	1,64
Q2	0,921	0,938	0,925	0,748	0,959
R2	0,991	0,993	0,988	0,939	0,991

Les courbes d'iso-valeurs de $Masse_{B3}$ [%], REC_{PVC} [%] et PU_{PVC} [%] des particules « modèles » sont représentées sur la figure III-9. Ainsi, l'angle d'inclinaison α a un effet négligeable sur la récupération du cuivre mais influence fortement la récupération du PVC. La tension U a un effet positif sur la récupération et la pureté du cuivre. Des courbes et des conclusions similaires peuvent également être faites pour les granules broyés.

MODDE 5.0 permet aux utilisateurs de déterminer le point de fonctionnement optimum du procédé, c'est-à-dire celui où le maximum de cuivre et de PVC sont récupérés, avec une pureté maximale (Max REC_{Cu} , Max PU_{Cu} , Max REC_{PVC} et Max PU_{PVC}), alors que la masse de produit mixte doit être minimale (Min $Masse_{B3}$).

Les coordonnées du point de fonctionnement optimum dans le cas de particules « modèles » de câbles électriques souples sont : $\alpha = 30^\circ$, $U = 26,55$ kV.

Pour les granules broyés de câbles électriques souples, les valeurs optimales des variables de contrôle sont : $\alpha = 50^\circ$, $U = 30$ kV.

Le point de fonctionnement optimum est différent pour les granules « modèles » et broyés. Les tableaux III-18 et III-19 présentent les quantités de produit récupérées dans chaque secteur pour le point de fonctionnement optimum de chaque type de particules.

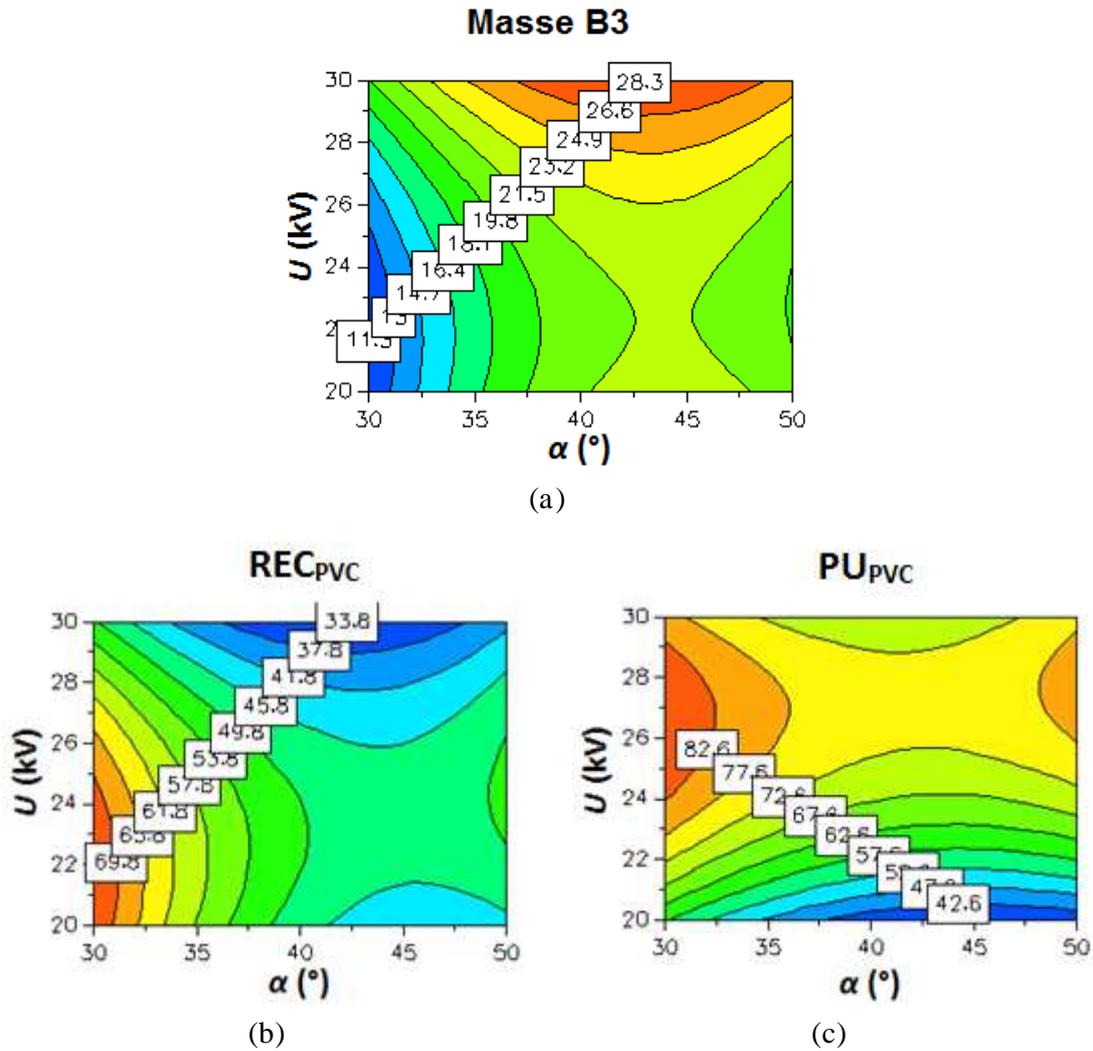


Figure III-9 : Iso-contours en fonction de la tension et de l'angle d'inclinaison pour l'échantillon #1. (a) Masse de produit mixte ; (b) Récupération du PVC ; (c) Pureté du PVC récupéré.

Tableau III-18 : Résultats prédits par le modèle et obtenus expérimentalement au point de fonctionnement optimum avec les particules « modèles » de câbles électriques souples (#1).

	Tension (kV)	Inclinaison (°)	Secteurs B1 + B2.1 (Cu)		Secteur B3 (Mixte) (%) sur la masse totale	Secteur B2.2 (PVC)	
			REC _{Cu} (%)	PU _{Cu} (%)		REC _{PVC} (%)	PU _{PVC} (%)
Modèle	26,55	30,00	81,48	90,90	14,28	65,34	87,38
Réel	26,50	30,00	81,41	89,98	11,07	76,51	87,14

Tableau III-19 : Résultats prédits par le modèle et obtenus expérimentalement au point de fonctionnement optimum avec les particules broyées de câbles électriques souples (#2).

	Tension (kV)	Inclinaison (°)	Secteurs B1 + B2.1 (Cu)		Secteur B3 (Mixte) (%) sur la masse totale	Secteur B2.2 (PVC)	
			REC _{Cu} (%)	PU _{Cu} (%)		REC _{PVC} (%)	PU _{PVC} (%)
Modèle	30,00	50,00	91,21	91,22	4,55	83,98	96,02
Réel	30,00	50,00	86,98	93,00	5,20	86,83	90,01

Pour les granules « modèles » et broyés de câbles électriques souples, les résultats expérimentaux correspondent aux résultats prédits par MODDE 5.0. Cela valide donc le modèle établi par le logiciel.

Le rendement de la séparation du cuivre (équation III-10) est respectivement de 70,35 % et 78,57 %, pour les particules « modèles » et broyées. La différence entre ces rendements est due à plusieurs facteurs. La raison principale est que les granules broyés ont des tailles hétérogènes. Beaucoup de granules ont des dimensions inférieures à ceux « modèles » et sont donc plus facilement déviés par le champ électrique. Un autre facteur est que les particules isolantes acquièrent une charge, par effet triboélectrique, durant leur broyage alors que les particules coupées manuellement restent neutres. Malgré que le broyage et la séparation aient été effectués à quelques jours d'intervalle, cette charge résiduelle peut influencer les trajectoires des particules. Dans le cas présent, la charge résiduelle a un effet positif sur la séparation : les particules de PVC sont chargées négativement et sont repoussées par la haute tension, elle aussi négative, appliquée à l'électrode elliptique. C'est pourquoi, pour les granules broyés, la pureté du cuivre est supérieure à celle obtenue avec les particules « modèles ».

La forme des deux types de granules de PVC peut aussi expliquer leurs différents comportements. Les particules « modèles », cylindriques, acquièrent une vitesse plus élevée que celles broyées, plates, lorsqu'elles glissent le long de l'électrode plaque. La vitesse initiale, plus élevée, des particules « modèles » au moment de leur détachement de l'électrode plaque peut les conduire dans les secteurs B1 ou B2.1 et ainsi diminuer la pureté des particules de cuivre récupérées.

Au regard de la pureté du cuivre, les résultats des expériences sont meilleurs que la cible initiale de 90 % avec une récupération de 80 %. Les produits « modèles » répondent juste à cet objectif mais les résultats obtenus avec les particules broyées sont significativement meilleurs. Cette observation confirme que les formes et tailles des particules sont très importantes pour l'efficacité de la séparation de ce type de produit.

III-2.3. Application aux déchets de câbles électriques rigides

Deux plans d'expériences composites de 11 expériences chacun ont été effectués, pour les granules « modèles » et broyés de déchets de câbles électriques rigides. Les résultats expérimentaux obtenus pour les deux classes de mélanges granulaires sont présentés dans les tableaux III-20 et III-21. Les puretés et les récupérations calculées du cuivre et de l'isolant sont listées dans les tableaux III-22 et III-23.

De part ces résultats, le logiciel MODDE 5.0 a pu déterminer les coefficients des modèles de régression qui décrivent les réponses du processus de séparation en fonction des deux facteurs de contrôle α et U (tableaux III-24 et III-25). L'erreur expérimentale obtenue avec l'échantillon #3 était de 18,7 % à cause de la deuxième expérience effectuée pour les valeurs centrales des facteurs. Nous l'avons donc retirée du modèle pour baisser l'erreur à 10,7 %.

Chapitre III : Procédés de séparation électrostatique de mélanges granulaires conducteur – isolant

Tableau III-20 : Résultats du plan factoriel composite mené sur les particules « modèles » de câbles électriques rigides (#3).

		Masses de particules collectées dans les secteurs (g) :											
		B1			B2.1			B2.2			B3		
Tension	Inclinaison	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC
-1	-1	1,04	0,76	0,28	3,53	3,22	0,31	4,27	2,09	2,18	1,07	0,50	0,57
1	-1	1,16	0,73	0,43	5,10	4,73	0,37	3,27	0,88	2,39	0,44	0,20	0,24
-1	1	1,22	0,74	0,48	3,31	3,03	0,28	4,62	2,50	2,12	0,77	0,48	0,29
1	1	1,41	0,98	0,43	4,68	4,50	0,18	2,97	0,66	2,31	0,87	0,41	0,46
-1	0	0,76	0,52	0,24	4,26	3,83	0,33	3,82	1,40	2,42	0,90	0,52	0,38
1	0	1,24	0,85	0,29	4,22	4,04	0,18	3,63	1,42	2,21	0,85	0,19	0,66
0	-1	1,10	0,61	0,49	4,00	3,67	0,33	3,81	1,79	2,02	1,04	0,51	0,53
0	1	1,05	0,69	0,36	3,13	2,82	0,31	4,51	2,68	1,83	1,30	0,39	0,91
0	0	1,04	0,83	0,21	3,82	3,61	0,21	4,24	1,59	2,65	0,78	0,52	0,26
0	0	0,60	0,37	0,23	5,06	4,63	0,43	3,57	1,03	2,54	0,64	0,49	0,15
0	0	1,02	0,65	0,37	4,31	4,11	0,20	3,78	1,47	2,31	0,79	0,31	0,48

Tableau III-21 : Résultats du plan factoriel composite mené sur les particules broyées de câbles électriques rigides (#4).

		Masses de particules collectées dans les secteurs (g) :											
		B1			B2.1			B2.2			B3		
Tension	Inclinaison	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC	Total	Cu	PVC
-1	-1	0,94	0,70	0,24	4,59	3,74	0,85	2,83	1,34	1,49	1,60	0,42	1,18
1	-1	0,77	0,63	0,14	4,49	4,11	0,38	2,61	1,08	1,53	2,11	0,39	1,72
-1	1	1,12	0,87	0,25	3,26	2,95	0,31	3,81	1,69	2,02	1,76	0,57	1,19
1	1	1,20	0,91	0,29	4,28	3,84	0,44	2,37	0,95	1,42	2,13	0,48	1,65
-1	0	0,82	0,68	0,14	3,91	3,31	0,60	3,44	1,54	1,30	1,81	0,64	1,17
1	0	0,98	0,73	0,25	4,76	4,31	0,45	2,13	0,83	1,30	2,01	0,26	1,75
0	-1	0,85	0,68	0,17	4,30	3,95	0,35	3,08	1,35	1,73	1,68	0,16	1,52
0	1	0,83	0,63	0,20	5,71	5,05	0,66	2,25	0,41	1,84	1,21	0,15	1,06
0	0	1,04	0,85	0,19	4,96	4,29	0,67	2,11	0,63	1,48	1,80	0,38	1,42
0	0	0,91	0,73	0,18	4,52	3,92	0,60	2,62	1,01	1,61	1,87	0,50	1,37
0	0	0,81	0,53	0,28	4,73	4,43	0,30	2,54	0,67	1,87	1,80	0,50	1,30

Tableau III-22 : Récupérations et puretés obtenues avec les particules « modèles » de câbles électriques rigides (#3).

Tension	Inclinaison	Secteurs B1 + B2.1 (Cu)		Secteur B3 (Mixte) (%) sur la masse totale	Secteur B2.2 (PVC)	
		REC_{Cu} (%)	PU_{Cu} (%)		REC_{PVC} (%)	PU_{PVC} (%)
-1	-1	60,58	86,71	10,75	65,27	50,82
1	-1	83,49	86,8	4,40	69,68	72,87
-1	1	55,85	82,68	7,92	66,88	45,89
1	1	70,66	89,84	8,93	68,34	63,52
-1	0	69,38	87,53	9,34	71,81	62,69
1	0	89,23	92,06	6,75	75,17	78,71
0	-1	65,05	83,92	8,68	59,94	52,47
0	1	53,34	83,77	9,03	60,67	40,76
0	0	67,79	88,8	8,22	69,58	62,06
0	0	76,69	88,41	8,53	68,82	65,75
0	0	72,78	88,64	7,76	68,75	61,11

Chapitre III : Procédés de séparation électrostatique de mélanges granulaires
conducteur – isolant

Tableau III-23 : Récupérations et puretés obtenues avec les particules broyées de câbles électriques rigides (#4).

Tension	Inclinaison	Secteurs B1 + B2.1 (Cu)		Secteur B3 (Mixte) (%) sur la masse totale	Secteur B2.2 (PVC)	
		REC _{Cu} (%)	PU _{Cu} (%)		REC _{PVC} (%)	PU _{PVC} (%)
-1	-1	70,61	83,00	16,35	39,63	30,46
1	-1	76,33	89,77	20,96	40,58	57,95
-1	1	62,83	85,46	17,55	53,58	53,16
1	1	88,86	86,05	17,49	37,37	59,92
-1	0	64,67	84,18	18,34	40,5	38,12
1	0	82,22	87,65	20,36	34,67	60,47
0	-1	75,41	85,56	17,92	45,89	60,17
0	1	82,03	84,59	17,14	48,94	81,06
0	0	78,58	85,67	18,26	39,36	70,48
0	0	75,49	85,64	18,93	42,82	68,45
0	0	77,91	85,69	18,34	40,87	73,91

Tableau III-24 : Valeurs des coefficients du modèle de chaque réponse et de R2 et Q2 pour les particules « modèles » de câbles électriques rigides (#3).

	REC _{Cu} (%)	PU _{Cu} (%)	Masse _{B3} (%)	REC _{PVC} (%)	PU _{PVC} (%)
Constante	72,0905	88,3042	8,32368	68,4611	62,1453
U*	9,595	1,96334	-1,32167	1,53834	9,28334
α*	-4,87833	-0,190001	0,341667	0,166667	-4,33167
U²	7,70869	1,95948	-0,50921	5,91237	9,79684
α²	-12,4013	-3,99053	0,300789	-7,27263	-14,2882
α*U*	-2,02499	1,7675	1,84	-0,737498	-1,105
Q2	0,902	0,84	0,858	0,82	0,834
R2	0,963	0,978	0,972	0,972	0,974

Tableau III-25 : Valeurs des coefficients du modèle de chaque réponse et de R2 et Q2 pour les particules broyées de câbles électriques rigides (#4).

	REC _{Cu} (%)	PU _{Cu} (%)	Masse _{B3} (%)	REC _{PVC} (%)	PU _{PVC} (%)
Constante	77,3647	85,5095	18,5695	41,2679	70,65
U*	8,21667	1,805	1,095	-3,515	9,43333
α*	1,895	-0,371665	-0,508333	2,29833	7,59333
U²	-3,97684	0,641319	0,691316	-4,05974	-20,91
α²	1,29816	-0,198693	-1,12869	5,77026	0,409996
α*U*	5,0775	-1,545	-1,1675	-4,29	-5,1825
Q2	0,857	0,906	0,917	0,836	0,823
R2	0,979	0,987	0,979	0,966	0,977

Avec l'échantillon #4, l'erreur expérimentale était de 11,3 %. Les courbes d'iso-valeurs de REC_{Cu} [%], PU_{Cu} [%], Masse_{B3} [%], REC_{PVC} [%] et PU_{PVC} [%] pour le processus de séparation électrostatique des granules « modèles » de câbles rigides sont données en figure

III-10. Les courbes de la figure III-10 (a) et (b) montrent que l'angle d'inclinaison a un effet significatif sur la récupération et la pureté du cuivre. Le champ électrique est plus intense à la surface de l'électrode plaque quand $\alpha = 40^\circ$. Ce facteur influence également la récupération du PVC (figure III-10 (d)). De même que pour le câble électrique souple, la tension a un fort effet positif sur la récupération et la pureté du cuivre. Les courbes d'iso-valeurs obtenues dans le cas des particules broyées de câbles électriques rigides sont légèrement différentes mais les conclusions sont similaires à celles obtenues avec les granules « modèles ».

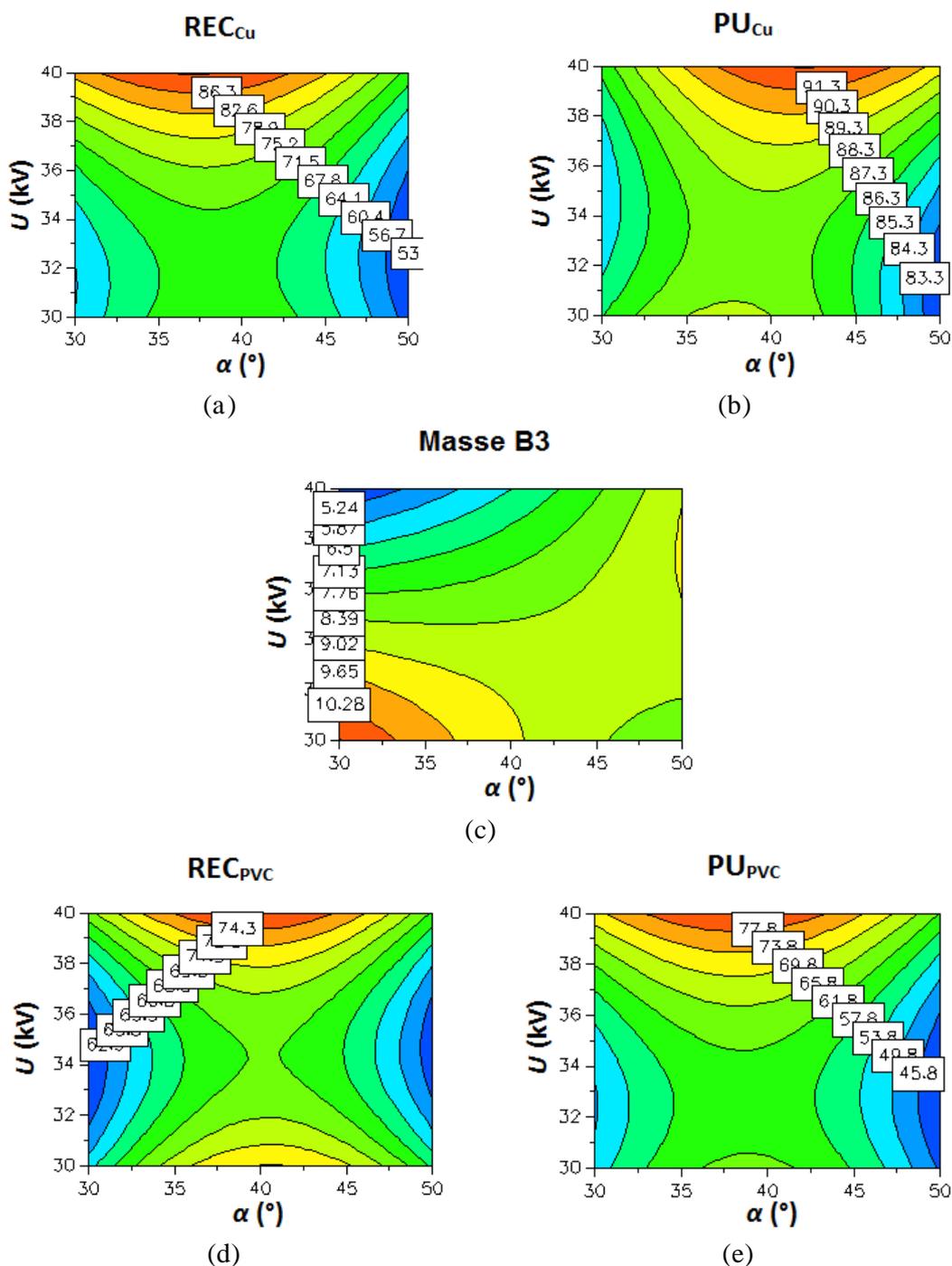


Figure III-10 : Iso-contours des produits en fonction de la tension et de l'angle d'inclinaison pour l'échantillon #3. (a) Récupération du cuivre ; (b) Pureté du cuivre récupéré ; (c) Masse de produit mixte ; (d) Récupération du PVC ; (e) Pureté du PVC récupéré.

Les coordonnées du point de fonctionnement optimal dans le cas des particules « modèles » de câbles électriques rigides sont : $\alpha = 38^\circ$, $U = 40$ kV. Pour les granules broyés de câbles électriques rigides, les valeurs optimales des deux variables de contrôle du processus de séparation sont : $\alpha = 50^\circ$, $U = 36$ kV. Les expériences à ces points de fonctionnement optimum donnent les résultats présentés dans les tableaux III-26 et III-27.

Tableau III-26 : Résultats prédits par le modèle et obtenus expérimentalement au point de fonctionnement optimum avec l'échantillon #3.

	Tension (kV)	Inclinaison ($^\circ$)	Secteurs B1 + B2.1 (Cu)		Secteur B3 (Mixte) (%) sur la masse totale	Secteur B2.2 (PVC)	
			REC_{Cu} (%)	PU_{Cu} (%)		REC_{PVC} (%)	PU_{PVC} (%)
Modèle	40,00	38,08	90,26	91,78	6,09	75,75	81,74
Réel	40,00	38,08	86,16	89,31	6,58	70,18	81,43

Tableau III-27 : Résultats prédits par le modèle et obtenus expérimentalement au point de fonctionnement optimum avec l'échantillon #4.

	Tension (kV)	Inclinaison ($^\circ$)	Secteurs B1 + B2.1 (Cu)		Secteur B3 (Mixte) (%) sur la masse totale	Secteur B2.2 (PVC)	
			REC_{Cu} (%)	PU_{Cu} (%)		REC_{PVC} (%)	PU_{PVC} (%)
Modèle	36,00	50,00	83,06	85,02	16,95	47,61	78,67
Réel	36,00	50,00	87,44	87,51	17,02	42,03	73,35

Le rendement de la séparation du cuivre des deux types de granules est similaire (environ 67 %) et les résultats prédits et expérimentaux sont proches. Dans les deux cas, la récupération du cuivre est supérieure à 85 %. Cependant, sa pureté est légèrement inférieure à 90 %. La séparation du cuivre de câbles électriques rigides nécessite de hautes valeurs de tension. Le banc de test utilisé pour faire les expériences est limité à 40 kV mais il peut être supposé que de plus hautes valeurs de la tension donneront de meilleurs résultats de séparation.

Dans le cas du traitement de granules broyés de câbles électriques rigides, il est possible d'augmenter la récupération du PVC et sa pureté en ajoutant B2.2 au secteur B3 (tableau III-28). Dans ce cas, la récupération du PVC est de 80,41 % et sa pureté est de 78,80 %, ce qui est meilleur que les résultats obtenus avec des granules « modèles ». De plus, aucun produit mixte ne reste. La forme cylindrique des particules « modèles » de PVC leur permet d'atteindre de plus hautes vitesses lorsqu'elles glissent le long de la plaque en « S ». Elles sont ainsi collectées en B2.2. Les particules de PVC broyées, plates, ont une vitesse moins élevée et tombent donc dans B3. Ceci explique en partie la différence de comportement entre les particules « modèles » et celles broyées.

Tableau III-28 : Récupérations et puretés détaillées du PVC au point de fonctionnement optimal pour l'échantillon #4.

	REC_{PVC} (%)	PU_{PVC} (%)
Secteur B3	38,38	84,78
Secteurs B2.2 + B3	80,41	78,80

III-3. Application industrielle

Une fois les essais validés en laboratoire, une phase industrielle a été démarrée.

A partir des résultats des essais de laboratoire effectués sur les particules issues de déchets de câbles électriques souples broyés, des essais ont été faits sur un prototype de séparateur industriel, PRD, fabriqué par la société CITF. En reprenant exactement les mêmes réglages qu'obtenus lors des essais de laboratoire ($\alpha = 50^\circ$, $U = 30$ kV, $\beta = 55^\circ$), le prototype permettait de récupérer en un passage 50 % du cuivre avec une pureté supérieure à 96 % alors que 66 % du plastique était récupéré avec une pureté supérieure à 98,5 %. Devant ce faible taux de récupération du cuivre, des dizaines d'essais ont été faits sur l'ensemble des réglages de l'installation afin de voir si cette récupération pouvait être améliorée.

Ces essais ont très vite permis de voir que la poussière issue du broyage des câbles posait énormément de problèmes. En effet, les quantités traitées au niveau industriel étant beaucoup plus importantes qu'au laboratoire, les poussières s'accumulaient au niveau des deux électrodes (figure III-11). Cette poussière empêche le contact direct des particules sur l'électrode plaque reliée à la terre et diminue l'intensité du champ électrique. Ainsi, les particules conductrices n'acquiescent pas une charge de polarité opposée au signe de la haute tension et ne sont donc pas attirées par l'électrode elliptique. La séparation n'a donc pas lieu.

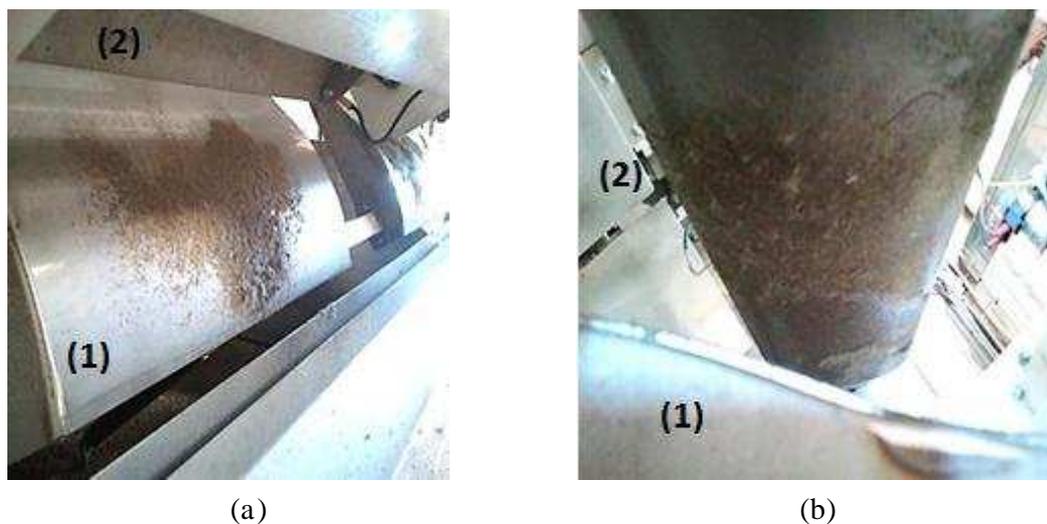


Figure III-11 : (a) Encrassement de l'électrode plaque ; (b) Encrassement de l'électrode elliptique. (1) Electrode plaque ; (2) Electrode elliptique.

Pour parer à cet encrassement, l'électrode plaque a été remplacée par une électrode cylindrique tournante et une électrode couronne dual a été ajoutée afin de correspondre à une configuration « tambour » classique (figure III-12). Certains résultats obtenus avec cette configuration, sans électrode couronne, pour voir l'effet de la vitesse de rotation sur la récupération des produits conducteur et isolant sont donnés dans le tableau III-29. On peut y voir que plus la vitesse de rotation est élevée, plus la quantité de conducteur récupérée augmente. Ainsi, pour une valeur de 35 tr.min^{-1} , 98 % de l'isolant est récupéré dans le bac qui lui est dédié.

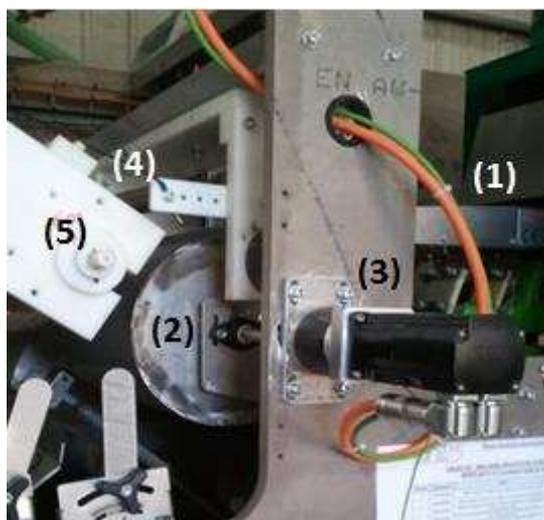


Figure III-12 : Mise en place d'une électrode cylindrique, du moteur permettant sa rotation et d'un balai. (1) Table vibrante ; (2) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (3) Moteur ; (4) Electrode couronne ; (5) Electrode elliptique.

Tableau III-29 : Exemple d'essais effectués avec la configuration présentée en Figure III-12 sans électrode couronne permettant de voir l'influence de la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique sur les récupérations de produits conducteur et isolant.

Paramètres	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Matière	Conducteur (DEEE)	Conducteur (DEEE)	Conducteur (DEEE)	Isolant
Humidité (% HR)	45	45	45	45
Table vibrante (%)	70	70	70	70
Tension (polarité) électrode elliptique (kV)	25 (-)	25 (-)	25 (-)	25 (-)
Vitesse de rotation électrode cylindrique (tr/min)	15	30	35	35
Inclinaison électrode elliptique (°)	45	45	45	45
Résultats	41 % du Cuivre initial récupéré.	54 % du conducteur initial récupéré.	59 % du conducteur initial récupéré.	98 % de l'isolant est récupéré dans le bac qui lui est dédié.

Cette configuration a permis d'augmenter la durée de fonctionnement de l'installation mais l'encrassement de l'électrode elliptique détériorait quand même la séparation au bout d'un certain temps. C'est pourquoi, cette électrode fut également remplacée par une électrode cylindrique tournante. L'installation étant un prototype, il est important de garder la possibilité de régler la hauteur et la position horizontale de l'électrode haute tension. Leur mise en rotation et l'ajout d'un balai sur chaque électrode a permis de les nettoyer en continu. De plus, il est possible de régler la vitesse de rotation des électrodes entre 0 tr.min⁻¹ et 100 tr.min⁻¹.

Les premiers essais avec cette nouvelle configuration utilisant deux électrodes cylindriques tournantes ont permis de constater qu'un fonctionnement en continu sur de longues durées était possible (tableau III-30).

Chapitre III : Procédés de séparation électrostatique de mélanges granulaires conducteur – isolant

Tableau III-30 : Exemples d'essais réalisés avec la configuration utilisant deux électrodes cylindrique tournantes et une électrode couronne.

Paramètres	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Typologie de câble (Mono, multi...)	Cuivre (multibrin)	Câbles monobrin	Câbles multibrin	Isolant
Masse initiale (g)	100	100	50	100
Table vibrante (%) Photo 1 repère A	70	70	70	70
Vitesse de rotation électrode de terre (tr/min)	30	30	30	40
Tension électrode haute tension (kV)	20	20	20	20
Vitesse de rotation électrode haute tension (tr/min)	0	0	0	0
Inclinaison électrode couronne (°)	70	70	70	70
Résultat	88 % du cuivre et 7 % de l'isolant est récupéré dans le bac de cuivre.	95 % du cuivre est récupéré dans le bac de cuivre.	80 % du cuivre est récupéré dans le bac de cuivre.	33 % de l'isolant vont en retraitement et 67 % tombent dans le bac dédié.

En sortie de table vibrante, afin d'éviter que les particules rebondissent sur l'électrode reliée à la terre, une équerre a été placée. Ainsi, les particules rebondissent sur l'équerre et sont délicatement posée sur l'électrode liée à la terre. Toutefois, une équerre longue et peu rigide avait été mise en place. Ainsi, la vibration de la table, en se répercutant sur l'équerre, faisait rebondir les particules et les empêchaient de se déposer convenablement sur l'électrode. Lors du remplacement de l'électrode plaque par une électrode cylindrique tournante, l'équerre située en bout de table vibrante a été remplacée par une nouvelle équerre plus rigide et moins longue (figure III–13). Celle-ci vibre moins et dépose convenablement les particules.



Figure III-13 : (a) Equerre initiale ; (b) Nouvelle équerre placée en bout de table vibrante. (1) Table vibrante ; (2) Equerre ; (3) Electrode cylindrique tournante ; (4) Electrode couronne.

Plusieurs essais ont été menés afin de voir quel type d'électrode couronne pouvait être utilisée. En effet, l'électrode couronne à fil (du même type que celle de la figure I-3 (b)) s'encrasse rapidement et il est difficile de trouver une solution permettant son nettoyage en continu. De plus, des problèmes d'encrassement sont apparus au niveau des équerres placées en sortie des tables vibrantes. En effet, le bombardement ionique créé par l'électrode couronne plaquait les particules sur cette équerre, les empêchant ainsi d'avancer et d'être déposées sur l'électrode de cylindrique.

Les essais ont été menés avec les électrodes couronnes suivantes.

- Tige filetée (Ø 8 mm ; figure III-14) :

Lors de ces essais, nous avons pu retrouver l'effet couronne avec la même efficacité de séparation que l'électrode couronne à fil. Toutefois, sa zone d'application est plus étendue qu'avec une électrode couronne dual. Le problème majeur était le nettoyage de cette tige.

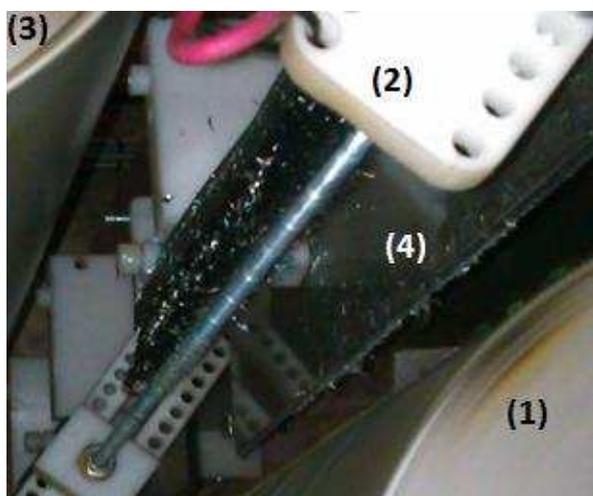


Figure III-14 : Tige filetée de 8 mm de diamètre. (1) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (2) Tige filetée ; (3) Electrode cylindrique reliée à la haute tension ; (4) Ecran isolant.

- Tige filetée (Ø 16 mm) :

Après les essais avec la tige de 8 mm, nous avons voulu essayer une tige de diamètre plus important, mais ceci a entraîné une augmentation de la tension nécessaire pour l'apparition de la décharge couronne. Ainsi, les résultats étaient moins bons. Nous avons également essayé de mettre cette tige en rotation afin de la nettoyer plus facilement, à l'aide d'un balai, et de voir si cela perturbait la séparation électrostatique. Il a été constaté que la séparation électrostatique n'était pas affectée par cette mise en rotation.

Nous avons donc décidé de reproduire cette mise en rotation à l'aide d'un système poulies/courroie transmettant la rotation de l'électrode haute tension pour la tige filetée de 8 mm de diamètre. Un pallier métallique permet d'amener la haute tension à l'électrode couronne tout en permettant sa mise en rotation (figure III-15).

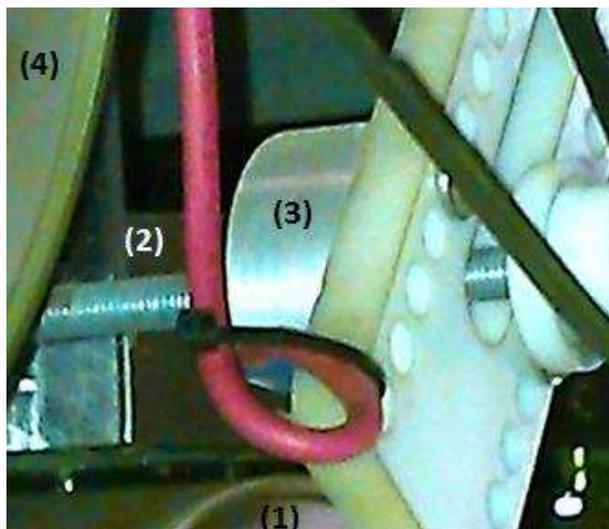


Figure III-15 : Pallier métallique permettant la mise en rotation et la transmission de la tension. (1) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (2) Tige filetée ; (3) Pallier ; (4) Electrode cylindrique tournante reliée à la haute tension.

La mise en place de cette électrode couronne, par son effet plus étendu, n'a pas solutionné le problème de l'équerre placée en sortie de table vibrante puisque les particules avaient toujours tendance à y adhérer. Toutefois, nous avons pu la retirer puisque le bombardement ionique créé par l'électrode a permis la diminution de l'amplitude des rebonds des particules. En revanche, un phénomène d'encrassement est apparu sur les tables vibrantes à cause de cette décharge couronne plus étendue.

Afin de pallier à ce problème d'encrassement des tables vibrantes, un écran en isolant rigide a été placé entre la tige filetée et les tables (figure III-14).

Cette modification empêche les poussières de s'accumuler en sortie de table vibrante. En revanche, ces dernières s'accumulent sur l'écran lorsque la tension est appliquée aux électrodes couronne et haute tension. Lorsque la tension est de 0 V ou que trop de poussière s'accumule sur l'écran, les poussières tombent sur l'électrode reliée à la terre et sont récupérées dans le bac de plastique. Il est donc possible de laisser l'installation fonctionner ainsi.

Au final, avec cette nouvelle configuration d'électrode (figure II-10 (c)), il était possible de récupérer environ 90 % du cuivre avec une pureté de 99 % en un seul passage des particules au sein du séparateur.

III-4. Conclusions

En laboratoire, la séparation électrostatique par le biais d'un séparateur à plaque donne de bons résultats quels que soient les matières à séparer.

La séparation de particules « modèles » de câbles électriques souples avec la configuration d'électrodes utilisant la plaque en « S » et l'électrode elliptique donne de meilleurs résultats que ceux obtenus avec les électrodes plaques planes en termes de

récupération du cuivre (81,41 % contre 78,63 %) et de pureté (89,98 % contre 89,82 %). La pureté du cuivre est similaire dans les deux cas, c'est donc sa récupération qui guide le choix de la configuration d'électrodes optimale pour l'application industrielle.

Les particules de PVC broyées portent une charge électrique qui affecte leur comportement au sein du séparateur. Cette charge résiduelle peut être un avantage si sa polarité est connue afin de contrôler leurs trajectoires en connectant l'électrode haute tension à une source de même polarité que celle des particules. Sinon, il est important d'utiliser une décharge couronne alternative dans le but de neutraliser cette charge résiduelle en amont de la séparation.

L'efficacité de la séparation électrostatique dépend de la taille et de la forme des granules. Des particules petites et plates peuvent être plus facilement contrôlées par les forces mécaniques et électriques dans un séparateur électrostatique à plaque.

L'humidité ambiante peut détériorer les résultats de séparation si elle est trop élevée. Les particules humides de plastique se comportent comme des conducteurs et sont collectées avec le cuivre, ce qui peut largement détériorer sa pureté.

La méthode des plans d'expériences est un outil utile pour la modélisation et l'optimisation des procédés de séparation de différents types de déchets de câbles électriques.

Différents points de fonctionnement optimaux ont été déterminés pour les particules provenant de câbles électriques souples et rigides. Un traitement séparé de ces deux classes de particules est recommandé. Les essais menés en ces points confirment les prédictions des modèles mathématiques.

Toutefois, le séparateur électrostatique à plaque n'est pas adapté au traitement de grandes quantités de déchets de câbles électriques. En effet, la présence de poussières dans le mélange détériore rapidement et de manière très importante la séparation. Même un fonctionnement tambour classique ne permet pas un fonctionnement sur 100 kg.h^{-1} puisque la poussière se dépose sur l'électrode elliptique et diminue ainsi le champ électrique créé.

Afin de permettre ce type de séparation, les électrodes plaques et elliptiques doivent toutes deux être remplacées par des électrodes cylindriques tournantes. L'électrode couronne de type dual ne peut pas non plus être utilisée à cause de la poussière mais une tige filetée est une solution de remplacement viable. Avec cette configuration originale, l'installation PRD (tout comme l'installation CP100) est capable de récupérer environ 90 % du cuivre présent dans le mélange initial avec une pureté de 99 % en un seul passage. Ces données sont conformes aux objectifs ciblés par CITF.

CHAPITRE IV : PROCÉDES DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MELANGES GRANULAIRES CONDUCTEUR – CONDUCTEUR

L'étude présentée dans le chapitre III a permis la construction et la validation fonctionnelle de deux séparateurs, l'un prototype, l'autre de série. Ces séparateurs sont capables de trier des composants de déchets de câbles électriques. Ainsi, en sortie de ces installations, deux produits distincts sont disponibles : d'un côté les conducteurs, de l'autre les isolants. La revalorisation de ces conducteurs, majoritairement du cuivre, s'effectue selon leurs niveaux de pureté. Pour permettre aux clients potentiels de revendre leurs produits séparés au meilleur prix, nous avons choisis de mener une étude de laboratoire sur la séparation électrostatique des différents conducteurs récupérés en mélange. Cette étude s'est concentrée sur l'utilisation d'un séparateur électrostatique à tambour puisque c'est la configuration qui a été définie par CITF comme la plus adaptable à un fonctionnement industriel.

L'objectif final de ce chapitre est de définir la (les) configuration(s) d'électrodes capable(s) de traiter différents mélanges de conducteurs.

Le paragraphe IV-1 vise à décrire un programme de calcul numérique des trajectoires des particules conductrices dans un séparateur électrostatique à tambour. Le but de ce programme est de déterminer la faisabilité des séparations.

Par la suite, deux cas spécifiques ont été étudiés numériquement et expérimentalement. Les conducteurs récupérés en sortie des installations industrielles sont composés de brins de cuivre nu et de cuivre étamé, ainsi que de feuilles d'aluminium issus des blindages des câbles. Ainsi, les séparations d'un mélange cuivre nu – cuivre étamé (paragraphe IV-2) et d'un mélange cuivre (nu et étamé) – aluminium (paragraphe IV-3) ont été étudiées.

La séparation de mélanges conducteur – conducteur entraîne une étape supplémentaire au recyclage des déchets de câbles électriques. Afin de limiter le nombre et le coût des installations permettant le recyclage de ces câbles, une étude de faisabilité a été faite sur la séparation simultanée d'un mélange cuivre – aluminium – isolants et sera présentée dans le paragraphe IV-4.

IV-1. Programme de calcul numérique des trajectoires

Afin de déterminer la faisabilité de certaines séparations de mélanges conducteur – conducteur, un programme numérique a été élaboré en utilisant COMSOL 4.2 et MATLAB. Le premier a servi à la définition de la géométrie du système d'électrodes et au calcul du champ électrique. Le second a permis la modélisation des trajectoires à partir de la géométrie et du champ électrique calculé par COMSOL.

La cinématique des particules dans ce type de séparateur a une influence significative sur les résultats de la séparation (les taux de récupération et de pureté des produits séparés).

Bien que notre modélisation soit bidimensionnelle, nous prenons en compte la forme volumique des particules. Ainsi, la simulation du mouvement des particules a été élaboré sur la base de plusieurs hypothèses [105], [106]: (1) les particules sont des cylindres ou des sphères parfaitement conductrices de rayon r_p et de masse volumique ρ ; (2) les particules se chargent instantanément par induction électrostatique, à leurs valeurs maximales données par la formule de Félici [194] ; (3) la distance entre deux particules est trop importante pour qu'elles interagissent ; (4) l'espace est homogène et isotrope de permittivité ε ; (5) les effets triboélectriques sont négligeables.

Trois forces affectent les trajectoires des particules [98] (figure IV-1) :

- la force d'attraction électrique (de Coulomb), F_e , qui s'exprime, dans le cas d'une particule cylindrique de cuivre avant et après détachement de l'électrode cylindrique tournante [194] :

$$\begin{cases} F_e = 0,715Q_d E & \text{avant détachement} \\ F_e = Q_d E & \text{après détachement} \\ Q_d = 2\pi r_p l \varepsilon E(x_0, y_0) \end{cases} \quad (IV-1)$$

Dans le cas d'une particule sphérique d'aluminium [194] :

$$\begin{cases} F_e = 0,832Q_d E & \text{avant détachement} \\ F_e = Q_d E & \text{après détachement} \\ Q_d = \frac{2}{3}\pi r_p^2 \varepsilon E(x_0, y_0) \end{cases} \quad (IV-2)$$

où Q_d [C] est la charge de la particule, E [$V.m^{-1}$] est l'intensité du champ électrique, r_p [m] est le rayon de la particule, l [m] sa longueur (pour une particule cylindrique) et ε [$F.m^{-1}$] la permittivité électrique de l'air. L'expression de la force électrique avant détachement inclut l'effet de la force d'image électrique. Après détachement, la force d'image électrique est négligée [98],

- la force de gravité, F_g , sur une particule de masse m [kg] :

$$F_g = mg = \begin{cases} \pi r_p^2 l \rho_{Cu} g & \text{pour le cuivre} \\ \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_{Al} g & \text{pour l'aluminium} \end{cases} \quad (IV-3)$$

où ρ_{Cu} et ρ_{Al} [$kg.m^{-3}$] sont respectivement la masse volumique du cuivre et de l'aluminium et g est la constante gravitationnelle ($9,81 m.s^{-2}$),

- enfin, la force centrifuge due à la rotation de l'électrode cylindrique de vitesse angulaire ω [$rad.s^{-1}$], F_c :

$$F_c = m\omega^2 R = \begin{cases} \pi r_p^2 l \rho_{Cu} \omega^2 R & \text{pour le cuivre} \\ \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_{Al} \omega^2 R & \text{pour l'aluminium} \end{cases} \quad (IV-4)$$

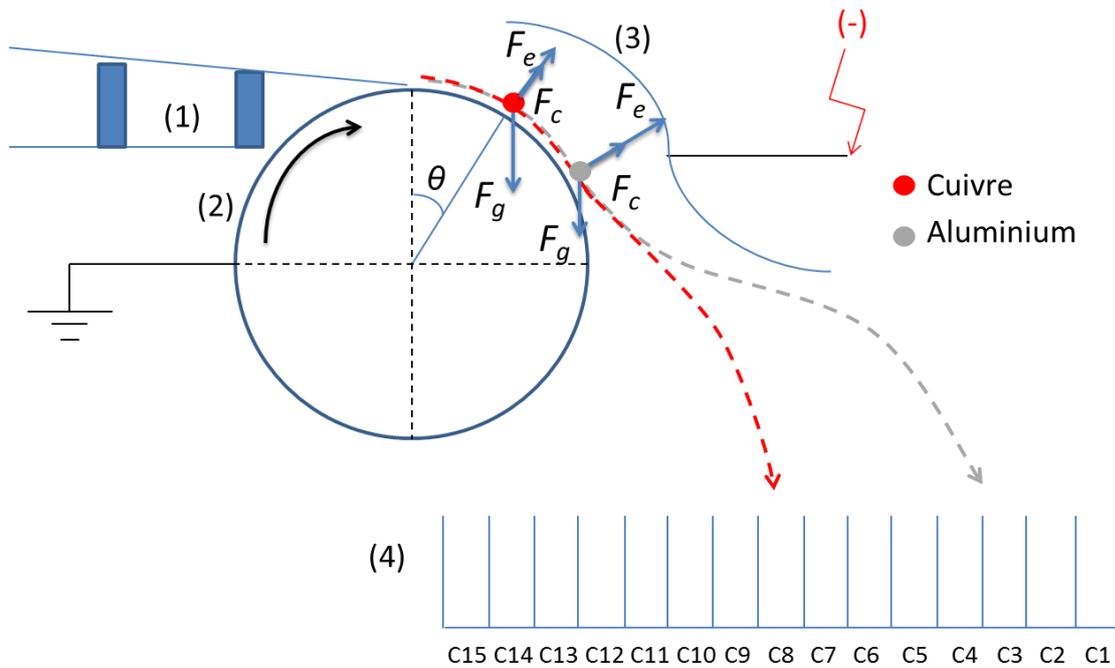


Figure IV-1 : Forces agissant sur les particules conductrices dans un séparateur électrostatique à tambour. (1) Goulotte vibrante ;(2) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (3) Electrode plaque en forme de « S » inversée reliée à une source de haute tension ; (4) Collecteur (15 compartiments).

• **Simulation des charges et forces sur les particules d'aluminium :**

Il n'existe pas de formules permettant de connaître la charge (et donc la force électrique) d'une particule plate d'aluminium affectée par un champ électrique. Une simple expérience a dû être menée (figure IV-2). Une électrode plaque, horizontale et reliée à la terre (1) a été placée en face d'une seconde électrode plaque, horizontale également mais reliée à la haute tension (2). La distance d entre celles-ci étant de 50 mm, un échantillon de particules d'aluminium (3) a été placé sur la plaque reliée à la terre et se charge ainsi par induction.

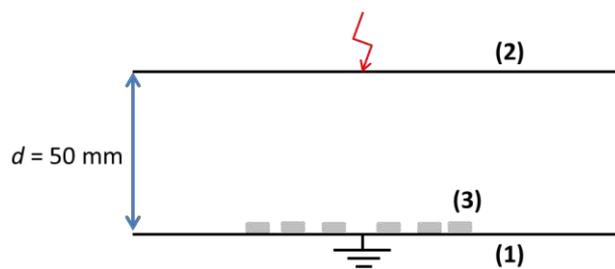


Figure IV-2 : Montage servant à la détermination de la tension de décollement de particules d'aluminium. (1) Electrode plaque reliée à la terre ; (2) Electrode reliée à une source de haute tension ; (3) Particules d'aluminium.

La tension appliquée à la plaque haute tension a progressivement été augmentée de 0,1 kV.s^{-1} jusqu'à ce que les particules décollent de la plaque de terre. La tension de détachement U_{dexp} a été mesurée par un voltmètre électrostatique et le champ électrique en découlant $E_{\text{dexp}} = U_{\text{dexp}}/d$ a été calculé. En introduisant cette valeur dans la formule de la force de champ électrique nécessaire au détachement (IV-5) [194] :

$$E_d = 0,493 \sqrt{\left(\frac{r_p \rho_{Al} g}{\varepsilon}\right)} \quad (IV-5)$$

il est possible de déterminer le rayon d'une sphère équivalente d'aluminium ayant le même comportement au détachement qu'une véritable particule d'aluminium.

La tension moyenne de détachement U_{dexp} , lue sur un voltmètre électrostatique, était de 10,3 kV ($\pm 0,6$ kV). En intégrant dans (IV-5) la valeur correspondante du champ électrique de détachement $E_{dexp} = U_{dexp}/d = 206 \text{ kV.m}^{-1}$, il est possible de calculer un rayon équivalent d'une sphère d'aluminium $r_p = 0,058 \text{ mm}$. Cette valeur a été utilisée dans les simulations présentées ci-après. Afin de vérifier cette méthode de détermination du rayon r_p , l'expérience a également été effectuée sur des particules de cuivre de formes cylindriques. Dans le cas de particules sphériques de cuivre de rayon $r_p = 0,04 \text{ mm}$, la valeur de la tension de détachement obtenue expérimentalement U_{dexp} était de 21,1 kV (20,5-22 kV) alors que la valeur théorique U_{dnum} était de 21,2 kV. Ainsi, le modèle numérique donne des valeurs proches des valeurs réelles.

- **Simulation des trajectoires des particules conductrices :**

Dans un premier temps, la distribution du champ électrique dans la zone active du séparateur a été calculée par le logiciel COMSOL Multi-Physics 4.2. Ce champ électrique a été utilisé dans un programme MATLAB pour déterminer l'angle de détachement $\theta = \theta_d$ (c'est-à-dire l'angle entre l'axe vertical et la surface du cylindre tournant pour lequel la particule décolle ; figure IV-1) et les trajectoires des particules dans l'air, après leur détachement. Une méthode différentielle fut utilisée pour le calcul des trajectoires.

Une particule prend un temps dt pour se déplacer du point de coordonnées (x_i, y_i) au point (x_{i+1}, y_{i+1}) avec une accélération $a(x_i, y_i)$ et une vitesse $V(x_i, y_i)$. Le pas de temps dt est fixé à $dt = 0,0001 \text{ s}$.

Une particule se détache de l'électrode cylindrique tournante quand la condition suivante est vérifiée :

$$F_g \times \cos(\theta_d) = F_e + F_c \quad (IV-6)$$

$$\cos(\theta_d) = \frac{F_e + F_c}{F_g} \quad (IV-7)$$

La vitesse et l'accélération initiales peuvent être calculées à partir de :

$$V_x(x_0, y_0) = \omega R \cos(\theta_d) \quad (IV-8)$$

$$V_y(x_0, y_0) = -\omega R \sin(\theta_d) \quad (IV-9)$$

$$a_x(x_0, y_0) = \frac{(-6\pi\eta r_p V_x(x_0, y_0) + Q_d E_x(x_0, y_0))}{m} \quad (IV-10)$$

$$a_y(x_0, y_0) = \frac{(6\pi\eta r_p V_y(x_0, y_0) + Q_d E_y(x_0, y_0))}{m} - g \quad (IV-11)$$

La position de la particule est :

$$x_{i+1} = x_i + V_x(x_i, y_i)dt + 0,5a_x(x_i, y_i)dt^2 \quad (IV-12)$$

$$y_{i+1} = y_i + V_y(x_i, y_i)dt + 0,5a_y(x_i, y_i)dt^2 \quad (IV-13)$$

où :

$$V_x(x_i, y_i) = V_x(x_{i-1}, y_{i-1}) + a_x(x_{i+1}, y_{i+1})dt \quad (IV-14)$$

$$V_y(x_i, y_i) = V_y(x_{i-1}, y_{i-1}) + a_y(x_{i+1}, y_{i+1})dt \quad (IV-15)$$

$$a_x(x_i, y_i) = \frac{(-6\pi\eta r_p V_x(x_{i-1}, y_{i-1}) + Q_d E_x(x_{i-1}, y_{i-1}))}{m} \quad (IV-16)$$

$$a_y(x_i, y_i) = \frac{(6\pi\eta r_p V_y(x_{i-1}, y_{i-1}) + Q_d E_y(x_{i-1}, y_{i-1}))}{m} - g \quad (IV-17)$$

où V_x et V_y sont respectivement les composantes suivant x et y de la vitesse, a_x et a_y sont celles de l'accélération et $\eta = 1,81 \times 10^{-5}$ N.s.m⁻² désigne le coefficient de trainée de la particule dans l'air.

• **Impact entre une particule et l'électrode plaque ou le cylindre tournant :**

Lorsqu'une particule impacte une électrode, les directions des vecteurs vitesses et accélérations, ainsi que la force électrique changent. L'amplitude de la charge acquise, Q, d'une particule conductrice change de signe au contact d'une électrode. La valeur de la charge acquise dépend de l'intensité du champ électrique au point d'impact. Toutefois, afin de simplifier le modèle numérique, nous avons considéré que la valeur de la charge ne change pas $Q = Q_d$ mais que la force d'attraction électrique devient une force de répulsion :

$$F_{exi} = -F_{exi-1} \quad (IV-18)$$

$$F_{eyi} = -F_{eyi-1} \quad (IV-19)$$

Deux hypothèses basées sur un impact élastique sont prises en compte : (1) la valeur de la vitesse après impact (vitesse réfléchie) est égale à celle avant impact (vitesse incidente) ; (2) l'angle incident γ_1 est égal à l'angle réfléchi γ_2 . Les forces de frottement et d'adhésion n'ont pas été prises en considération.

Les valeurs du vecteur vitesse avant impact se notent V_x et V_y respectivement suivant l'axe x et y, celles après impact V'_x et V'_y et la position de l'impact (X, Y).

Lorsqu'une particule impacte la plaque en « S », sa vitesse réfléchie est déterminée par :

$$V'_x = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \cos(-2|\gamma_1| + |\gamma_2|) \quad (IV-20)$$

$$V'_y = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \sin(-2|\gamma_1| + |\gamma_2|) \quad (IV-21)$$

où :

$$\gamma_1 = \tan^{-1} \left(\frac{dY}{dX} \right) \quad (IV-22)$$

$$\gamma_2 = \tan^{-1} \left(\frac{V_y}{V_x} \right) \quad (IV-23)$$

De plus, des conditions de Dirichlet ont été appliquées aux bords du domaine de calcul (figure IV-3).

Grâce à ce programme numérique, plusieurs simulations de séparation ont été effectuées. Pour chaque simulation, trois facteurs ont été étudiés (figure IV-3).

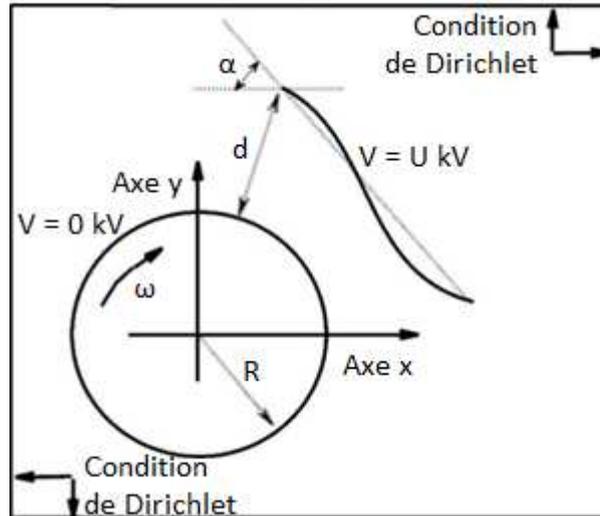


Figure IV-3 : Géométrie étudiée et conditions aux limites.

Ces facteurs sont la valeur de la haute tension appliquée à l'électrode, U [kV], l'angle d'inclinaison de l'électrode haute tension, α [°], et la distance entre le début de la plaque et la surface de l'électrode cylindrique, d [m].

IV-2. Application à la séparation cuivre – cuivre étamé [195]

L'objectif de ce paragraphe est d'évaluer la capacité de trois configurations d'électrodes à augmenter le contenu en cuivre d'un produit contenant du cuivre nu et étamé issus de déchets de câbles électriques. Les visualisations numériques et expérimentales des trajectoires des particules aideront à l'interprétation des résultats.

IV-2.1. Procédure expérimentale

Le mélange granulaire de cette étude est un produit conducteur récupéré après la séparation électrostatique de déchets de câbles électriques. Le mélange est composé de $m_{T\text{Cu-n}} = 45,8$ % de brins de cuivre nu (figure II-3 (a)) et de $m_{T\text{Cu-e}} = 54,2$ % de brins de cuivre étamé (figure II-3 (b)). Ainsi, le contenu en cuivre dans le mélange initial est de 82,6 %, calculé grâce à la formule :

$$Cu_{Total} = \frac{m_{T\text{Cu-n}} + k_{Cu-e} m_{T\text{Cu-e}}}{m_{Total}} \times 100 \quad (IV-24)$$

où $k_{Cu-e} = 0,68$ correspond au contenu en cuivre des brins de cuivre étamé, estimé pour une valeur moyenne d'épaisseur d'étain $t = 10 \mu\text{m}$ et du diamètre d'un brin de cuivre étamé de $0,118 \text{ mm}$ et m_{Total} est la masse totale du mélange à séparer.

Des expériences ont été faites sur un séparateur électrostatique à tambour (CARPCO, Inc.) avec de nouvelles configurations d'électrodes (figure IV-4). Dans ce type de séparateur, une table vibrante (1) transporte le mélange de particules à la surface d'une électrode cylindrique reliée à la terre (2) tournant à une vitesse de 40 tr.min^{-1} . Un champ électrique est créé entre ce tambour tournant et une électrode statique (3), reliée à une source de haute tension négative. Sous l'effet de ce champ électrique, les particules conductrices acquièrent, par induction électrostatique, une charge de polarité opposée à celle de la haute tension appliquée à l'électrode. Si la force électrique alors exercée sur les particules est suffisamment importante, les particules seront attirées par l'électrode statique, décolleront de l'électrode cylindrique et auront différentes trajectoires suivant leurs densités, formes, tailles... Elles seront récupérées dans le collecteur (4) qui se compose de 15 compartiments.

Trois configurations d'électrodes ont été étudiées (figure IV-4).

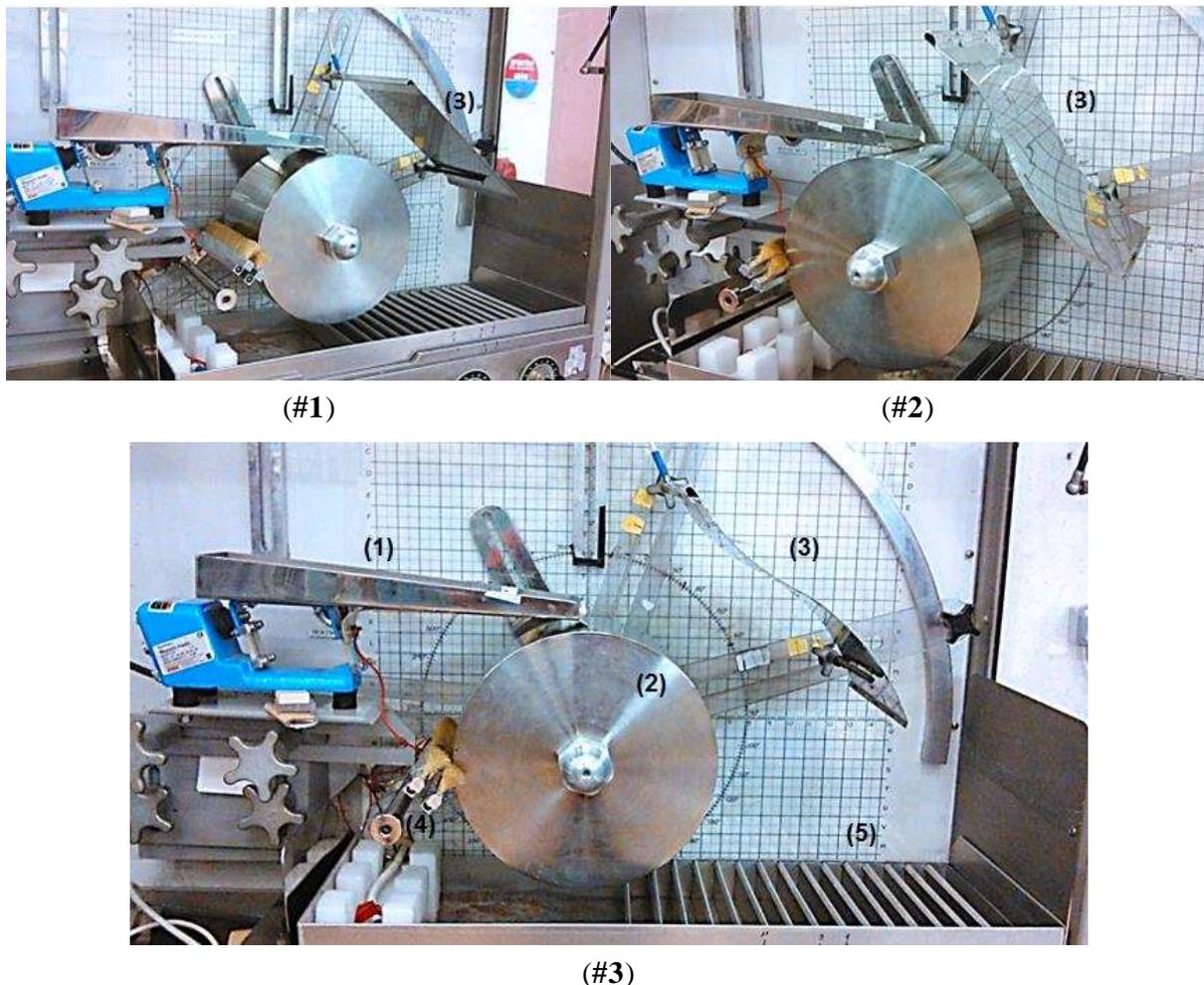


Figure IV-4 : Séparateur électrostatique de laboratoire (Carpco Inc.). (1) Table vibrante ; (2) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (3) Electrode plaque *reliée à l'alimentation haute tension* ((#1) Plaque plane ; (#2) Plaque en « S » inversée ; (#3) Plaque en « S ») ; (4) Balais ; (5) Collecteur à 15 compartiments.

Dans la configuration #1, une plaque plane a été connectée à l'alimentation haute tension. Une plaque en forme de « S » a été utilisée dans les configurations #2 et #3.

Un plan d'expérience factoriel a été effectué afin d'évaluer les effets de trois facteurs (figure IV-3) :

- l'inclinaison de l'électrode statique reliée à la haute tension (α , [°]),
- la valeur de la haute tension appliquée à cette électrode (U, [kV]),
- la distance entre la surface de l'électrode cylindrique et l'électrode statique (d, [mm]).

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. L'influence de l'angle α est plus complexe : il modifie la distribution du champ électrique dans l'espace inter-électrodes, afin de maximiser la force électrique à l'endroit même d'où décollent les particules de l'électrode cylindrique tournante.

Deux réponses ont été considérées dans cette étude :

- le taux de récupération du cuivre nu (REC_{Cu-n} , [%]),
- le taux de récupération du cuivre étamé (REC_{Cu-e} , [%]).

Les particules récupérées dans chaque compartiment correspondent à un des trois produits suivants : « produit cuivre étamé », « produit mixte » ou « produit cuivre nu ». Le « produit cuivre étamé » correspond à un mélange composé à au moins 65 % de cuivre étamé. Le « produit mixte » possède la même composition que le mélange initial (45,8 % de cuivre nu et 54,2 % de cuivre étamé) et le « produit cuivre nu » est au moins composé à 50 % de cuivre nu.

Des tests préliminaires ont été faits afin d'établir les plages de variation des trois facteurs (tableau IV-1). A l'intérieur de ces plages de variation, aucun arc électrique n'apparaît et le mélange est correctement séparé.

Une caméra rapide a été utilisée pour visualiser les trajectoires des particules et les comparer aux simulations numériques.

Tableau IV-1 : Plages de variation des facteurs.

Niveau	α (°)	U (kV)	d (mm)
-1	30	-15	100
0	40	-20	125
1	50	-25	150

IV-2.2. Estimation des résultats par simulation numérique

Le champ électrique dans la zone active de chaque configuration d'électrodes a été calculé grâce au logiciel COMSOL 4.2 (figure IV-5).

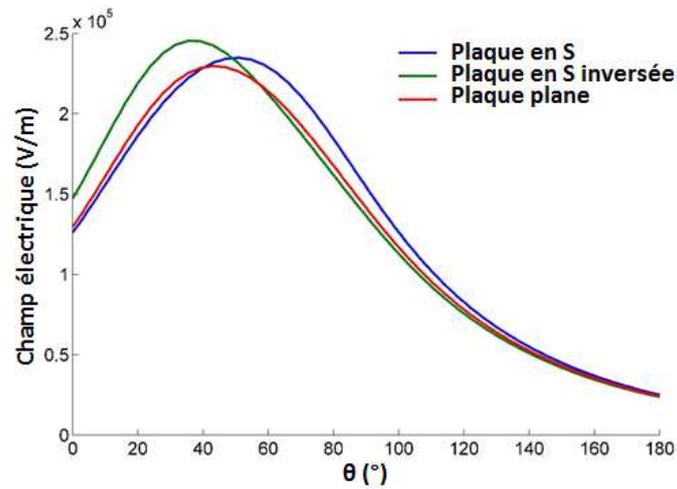


Figure IV-5 : Répartition du champ électrique le long de la surface de l'électrode cylindrique reliée à la terre pour $\alpha = 40^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 125$ mm.

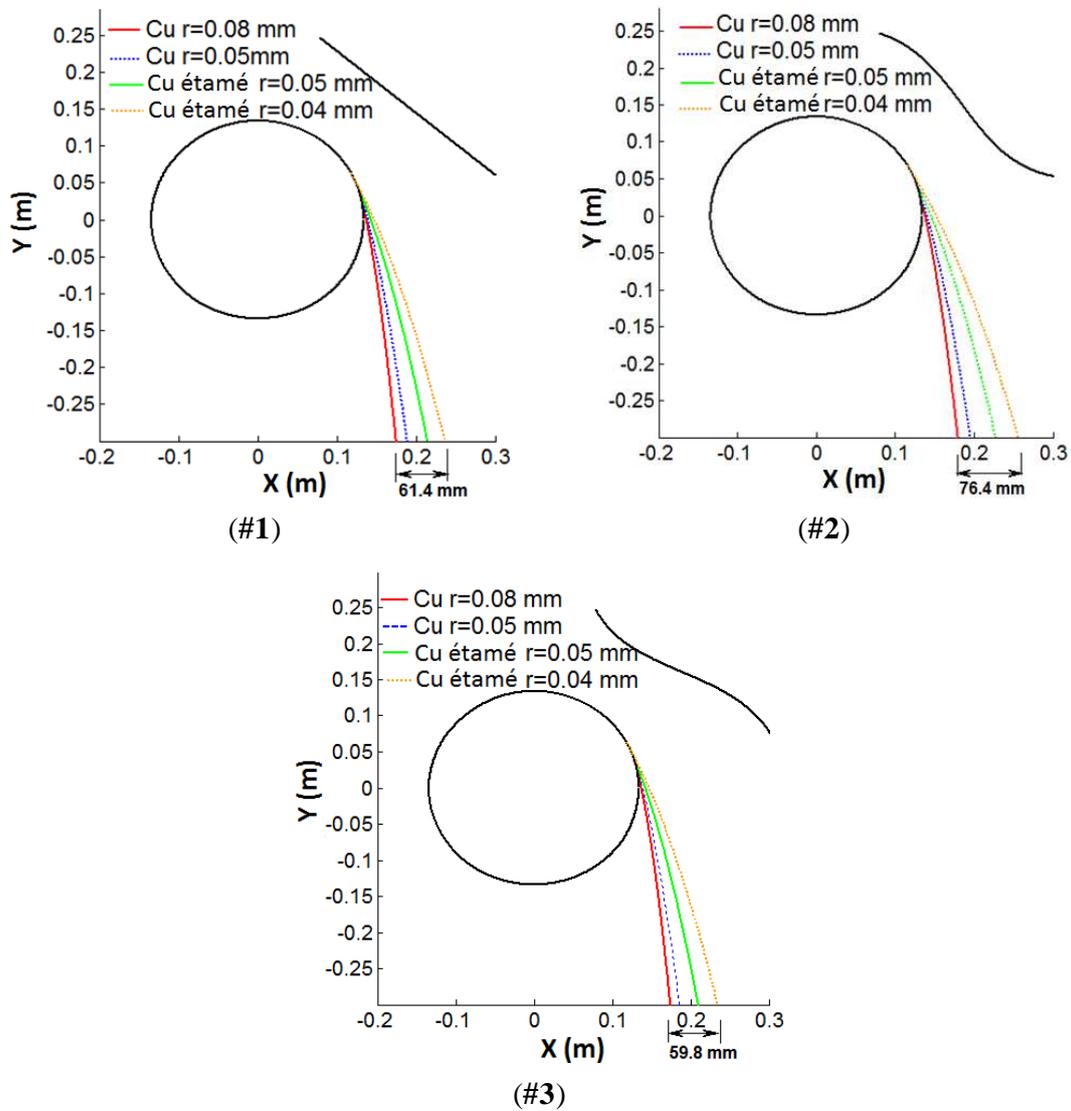


Figure IV-6 : Simulations numériques des trajectoires des particules pour chaque configuration, obtenues avec MATLAB, pour $\alpha = 40^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 125$ mm.

Les courbes montrent que le champ électrique n'est pas uniformément réparti à la surface de l'électrode cylindrique. Une modification de la forme de l'électrode haute tension, de sa taille ou de sa position modifie l'intensité du champ électrique et ainsi de la force électrique appliquée aux particules. Le maximum du champ électrique, pour la configuration #1, est plus faible que pour les deux autres configurations, ce qui signifie que la séparation sera certainement moins efficace. Pour les configurations #2 et #3, les valeurs maximales du champ électrique ne sont pas aux mêmes positions, θ , à la surface de l'électrode cylindrique (figure IV-1). Ceci pourrait changer les résultats de séparation car l'angle de détachement, θ_d , des particules ne sera pas le même.

Les simulations numériques des trajectoires des particules (figure IV-6) montrent que la plaque en « S » inversée (#2) devrait donner les meilleurs résultats de séparation. En effet, pour cette configuration, la différence de trajectoire entre les particules de cuivre nu et étamé est maximisée.

IV-2.3. Résultats expérimentaux

Pour les 9 expériences menées pour chaque configuration d'électrodes (trois expériences pour chaque niveau haut, moyen et bas de chaque facteur au niveau moyen des deux autres), le débit a été fixé à $4,5 \text{ kg.h}^{-1}$ et l'échantillon de mélange à séparer à 50 g. L'humidité relative était comprise entre 57,4 % et 59,2 % et la température entre $18,8^\circ\text{C}$ et $19,4^\circ\text{C}$. Les résultats de ces expériences sont présentés dans les tableaux IV-2, IV-3 et IV-4. Les cellules en gris clair sont considérées comme du « produit cuivre étamé » et celles en orange comme du « produit cuivre nu ». Les cellules hachurées correspondent au « produit mixte ».

Tableau IV-2 : Résultats du plan d'expériences factoriel pour la configuration #1.

Tension	Inclinaison	Distance	Masse de particules collectées dans les compartiments (g)													Masse Cu _n (g)	Masse Cu _e (g)		
			C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3			C2	C1
-1	0	0	0,186	0,250	0,417	0,855	3,147	37,396	4,558	1,530	0,709	0,345	0,202	0,091	0,053	0,017	0,015	42,251	2,962
1	0	0	0,407	0,527	0,786	1,096	1,728	5,907	12,665	5,888	4,708	3,379	2,524	2,108	1,979	2,119	3,351	35,371	9,557
0	-1	0	0,288	0,319	0,664	1,097	2,699	25,779	8,853	3,463	2,231	1,370	0,885	0,601	0,418	0,313	0,313	38,428	6,131
0	1	0	0,340	0,434	0,686	1,070	1,870	8,470	13,877	6,220	4,490	3,249	2,473	0,873	1,462	1,262	1,665	35,997	5,262
0	0	-1	0,372	0,477	0,728	1,040	2,172	12,643	12,041	5,491	3,726	2,694	2,035	1,629	1,246	1,148	1,738	33,387	7,796
0	0	1	0,268	0,355	0,633	1,143	2,687	22,587	10,210	4,247	2,653	1,612	1,054	0,712	0,504	0,391	0,315	37,883	7,241
0	0	0	0,357	0,475	0,760	1,394	2,700	16,299	12,658	4,851	3,173	1,983	1,369	1,045	0,770	0,588	0,816	34,286	6,571
0	0	0	0,322	0,394	0,746	1,276	2,809	17,533	11,765	4,655	3,314	2,054	1,335	0,968	0,696	0,569	0,750	34,523	6,372
0	0	0	0,330	0,418	0,742	1,334	2,801	19,299	10,602	4,669	3,128	1,844	1,260	0,887	0,695	0,539	0,650	35,196	5,875

Tableau IV-3 : Résultats du plan d'expériences factoriel pour la configuration #2.

Tension	Inclinaison	Distance	Masse de particules collectées dans les compartiments (g)													Masse Cu _n (g)	Masse Cu _e (g)		
			C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3			C2	C1
-1	0	0	0,219	0,364	0,584	1,247	2,926	25,354	11,334	3,325	1,968	1,045	0,645	0,302	0,221	0,098	0,083	30,694	7,687
1	0	0	0,714	0,838	0,981	1,396	1,893	3,529	9,839	5,779	4,806	3,580	3,066	2,530	2,377	2,688	4,844	20,424	12,439
0	-1	0	0,340	0,447	0,703	1,439	3,268	22,743	10,091	3,807	2,151	1,335	0,977	1,085	0,437	0,351	0,405	32,834	6,741
0	1	0	0,714	0,763	0,968	1,518	1,840	3,780	11,125	6,969	4,887	3,831	3,322	2,802	2,187	1,931	2,238	22,981	12,480
0	0	-1	0,663	0,777	0,974	1,363	2,166	4,508	11,104	6,192	4,985	3,401	2,837	2,596	2,059	2,013	3,548	30,190	10,216
0	0	1	0,305	0,415	0,789	1,767	4,317	20,692	10,980	4,167	2,208	1,408	0,933	0,647	0,396	0,260	0,289	28,285	10,308
0	0	0	0,335	0,402	0,576	1,145	2,172	10,875	15,359	5,532	3,571	2,519	1,772	1,352	1,132	1,020	1,532	31,766	10,64
0	0	0	0,362	0,432	0,622	1,188	2,026	11,601	14,732	5,371	3,531	2,583	1,882	1,335	1,067	0,984	1,629	31,704	10,896
0	0	0	0,428	0,443	0,776	1,456	2,702	11,633	12,465	5,304	3,600	2,734	1,955	1,506	1,316	1,175	1,707	29,402	12,040

Chapitre IV : Procédés de séparation électrostatique de mélanges granulaires
conducteur – conducteur

Tableau IV-4 : Résultats du plan d'expériences factoriel pour la configuration #3.

Tension	Inclinaison	Distance	Masse de particules collectées dans les compartiments (g)														Masse Cu _n (g)	Masse Cu _e (g)	
			C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2			C1
-1	0	0	0,402	0,436	0,720	1,387	4,991	32,902	4,761	0,160	0,793	0,438	0,261	0,153	0,075	0,033	0,007	40,838	1,920
1	0	0	0,406	0,468	0,680	0,994	1,929	6,380	11,560	5,473	4,378	3,731	2,944	2,303	2,077	2,059	3,209	22,417	12,592
0	-1	0	0,294	0,449	0,839	1,212	2,751	21,462	12,845	3,695	2,083	1,351	0,854	0,566	0,407	0,290	0,289	39,852	5,840
0	1	0	0,323	0,389	0,577	0,935	1,881	6,172	17,932	6,906	4,217	2,853	2,205	1,656	1,222	0,990	1,065	28,209	7,138
0	0	-1	0,398	0,424	0,663	1,076	2,071	8,263	13,486	6,278	4,255	3,277	2,587	1,846	1,391	1,249	2,017	32,659	9,090
0	0	1	0,318	0,368	0,662	1,242	3,802	30,811	6,382	2,365	1,272	0,749	0,489	0,299	0,187	0,105	0,075	37,203	5,541
0	0	0	0,394	0,540	0,831	1,217	3,442	21,153	10,191	3,817	2,382	1,623	1,121	0,746	0,522	0,400	0,455	27,577	11,066
0	0	0	0,306	0,409	0,633	1,193	3,819	25,546	7,754	3,299	2,116	1,331	0,945	0,622	0,452	0,400	0,466	31,906	9,631
0	0	0	0,400	0,453	0,725	1,181	3,626	24,733	8,656	3,158	1,980	1,304	0,940	0,605	0,464	0,377	0,425	31,118	9,253

Les erreurs expérimentales pour les configurations #1, #2 et #3 sont respectivement de 4,1 %, 6,1 % et 7,0 %. Ces erreurs sont notamment dues aux différences de configurations d'électrodes, aux échantillons utilisés lors des essais ou encore à la précision de la balance. Les compartiments collecteurs peuvent contenir différents produits suivant les valeurs des facteurs. Par exemple, le huitième compartiment (C8), en configuration #1 contient du « produit cuivre étamé » pour des niveaux de facteurs (-1, 0, 0), du « produit mixte » pour (0, -1, 0) et du « produit cuivre nu » pour (1, 0, 0). Le facteur principal est la valeur de la haute tension. Lorsque cette valeur est basse (niveau -1 correspondant à -15 kV), seul du cuivre étamé est attiré et récupéré dans le huitième compartiment. Si la tension augmente (niveau 0 : -20 kV), une certaine quantité de cuivre nu est attiré. Le produit devient alors mixte. Enfin, si la tension est suffisamment élevée (+1 : -25 kV), la plupart du cuivre étamé est collecté dans les compartiments C1 à C4 et seul le cuivre nu est récupéré dans le compartiment C8.

Ces études montrent que la configuration #1, avec la plaque plane connectée à l'alimentation haute tension, n'est pas efficace pour effectuer une telle séparation. La masse de « produit cuivre nu » n'est pas cohérente avec le mélange initial. En effet, pour 50 g de mélange, 22,9 g de cuivre nu est présent, or le « produit cuivre nu » pèse au moins 33 g dans chaque expérience. Ainsi, au moins 10,1 g de cuivre étamé est aussi présent dans ce produit en considérant que l'ensemble du cuivre nu soit récupéré ce qui n'est pas le cas. La simulation du champ électrique dans cette configuration montre qu'il n'est pas assez intense pour attirer les particules de cuivre étamé. Ainsi, cette configuration n'a pas été retenue pour le reste de l'étude.

Pour les configurations #2 et #3, une partie du cuivre étamé est récupéré dans les compartiments C11 à C15. Les plus petites particules sont fortement attirées et impactent la plaque en « S » et rebondissent dans ces compartiments. Ceci peut diminuer la pureté du « produit cuivre nu ».

Dans ces configurations, le champ électrique est plus intense et donne de meilleurs résultats de séparation. Conformément aux résultats des plans d'expériences factoriels, pour chaque configuration, il existe des valeurs des facteurs pour lesquels la pureté et le taux de récupération du « produit cuivre nu » sont optimaux. La meilleure pureté du « produit cuivre nu » correspond à un maximum de récupération du « produit cuivre étamé » (figure IV-7).

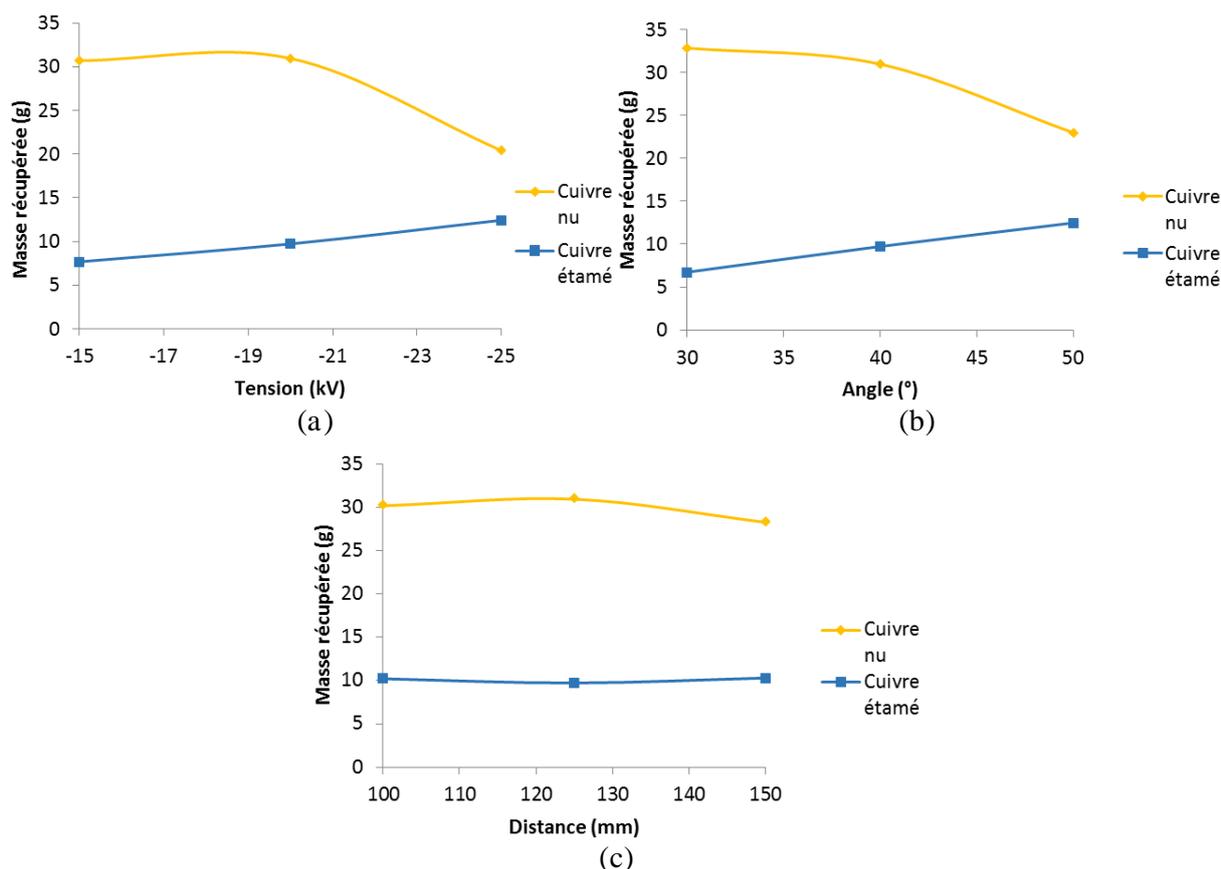


Figure IV-7 : Evolution, pour la configuration #2, du taux de récupération du produit cuivre nu et étamé en fonction de la valeur de la haute tension U (a), de l'angle d'inclinaison de l'électrode haute tension α (b) et de la distance entre les deux électrodes d (c).

D'après la figure IV-7 (a), la quantité de « produit cuivre nu » diminue avec l'augmentation de la tension alors que celle de « produit cuivre étamé » augmente. L'inclinaison de l'électrode haute tension a plus d'influence sur le « produit cuivre nu » que sur celui de cuivre étamé (figure IV-7 (b)). Une augmentation de la distance inter-électrode entre 125 mm et 150 mm dégrade la séparation électrostatique (figure IV-7 (c)). La quantité de « produit cuivre étamé » augmente et celle de « produit cuivre nu » diminue. Ainsi, le champ électrique n'est pas assez intense pour attirer les particules de cuivre étamé. Elles sont donc récupérées avec celles de cuivre nu.

Pour la configuration #2, les valeurs optimales des facteurs sont : $\alpha = 50^\circ$, $U = -25$ kV et $d = 150$ mm. Pour la configuration #3 : $\alpha = 40^\circ$, $U = -25$ kV et $d = 125$ mm.

Afin de valider les conclusions des simulations numériques des trajectoires, deux expériences ont été menées pour ces valeurs de facteurs (tableau IV-5). Lorsque la plaque en « S » inversée a été utilisée (#2), les secteurs de compartiments B1 et B4 (composés respectivement des compartiments C1 à C4 et C11 à C15) ont collecté du « produit cuivre étamé », B2 (compartiments C5 et C6) contenait du « produit mixte » et B3 (compartiments C7 à C10) du « produit cuivre nu ».

Chapitre IV : Procédés de séparation électrostatique de mélanges granulaires conducteur – conducteur

Pour la plaque en « S » (#3), cinq secteurs ont été formés. Les secteurs B1 (compartiments C1 à C4) et B5 (compartiments C11 à C15) contenaient du « produit cuivre étamé » alors que le secteur B3 (compartiments C8 et C9) était composé de « produit cuivre nu ». Le « produit mixte » étant collecté dans B2 et B4 correspondant respectivement aux compartiments C5 à C7 et C10.

Tableau IV-5 : Résultats de séparation pour les valeurs optimales des facteurs pour chaque configuration d'électrodes.

Configuration #2																	
			Masse collectée dans B4 (g)					Masse collectée dans B3 (g)				Masse collectée dans B2 (g)		Masse collectée dans B1 (g)			
U (kV)	α (°)	d (mm)	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
-25	50	150	1,0	1,1	1,3	1,5	1,8	3,2	9,4	5,6	4,3	3,8	3,4	2,9	2,6	2,7	4,6
Total (g)			6,8					4,3	15,0		3,2	7,1		12,7			
Contenu en cuivre (%)			77,15					84,29	85,60		84,16	82,18		79,62			

Configuration #3																		
			Masse collectée dans B5 (g)					B4 (g)	Masse collectée dans B3 (g)			Masse collectée dans B2 (g)			Masse collectée dans B1 (g)			
U (kV)	α (°)	d (mm)	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
-25	40	125	0,4	0,5	0,7	1,1	1,7	3,2	13,4	7,3	5,4	3,8	2,9	2,0	1,7	1,7	3,0	
Total (g)			4,4					3,2	20,7			12,1			8,4			
Contenu en cuivre (%)			78,75					81,50	85,44			81,63			78,94			

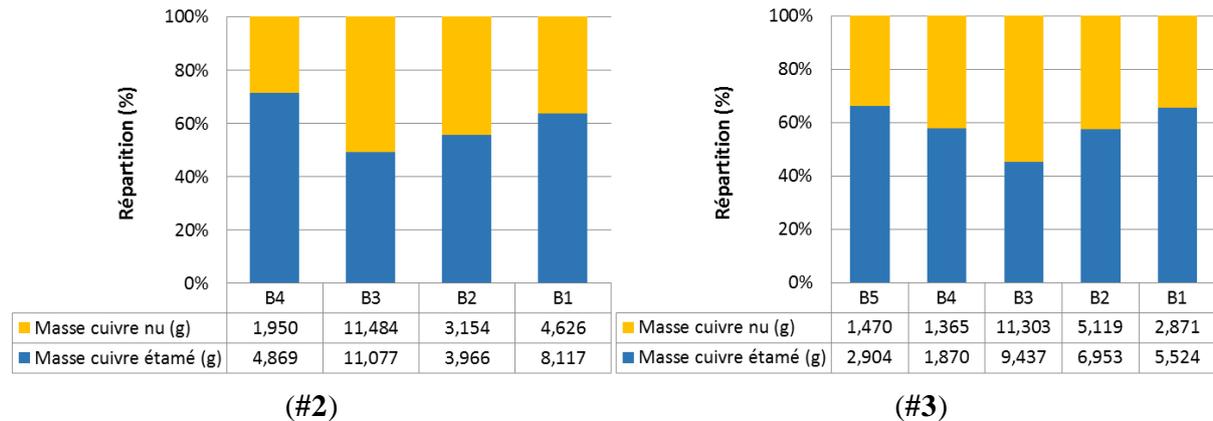


Figure IV-8 : Répartition des produits cuivre nu et étamé dans chaque secteur pour les deux configurations.

Pour ces tests, les masses de cuivre nu et étamé dans chaque secteur ont été mesurées afin de comparer les deux configurations (figure IV-8). Les taux de récupération et de pureté du « produit cuivre nu » ont été calculés comme suit :

$$Rec_{Cu-n Bi} = \frac{m_{Cu-n Bi}}{m_{T Cu-n}} \times 100 \quad (IV-25)$$

$$Pur_{Cu-n Bi} = \frac{m_{Cu-n Bi}}{m_{T Bi}} \times 100 \quad (IV-26)$$

où $m_{Cu-n Bi}$ correspond à la masse de cuivre nu mesurée dans le secteur Bi, $m_{T Cu-n}$ est la masse de cuivre nu totale dans tous les secteurs et $m_{T Bi}$ est la masse totale du secteur Bi.

Pour la configuration #2 (plaque en « S » inversée), 55,4 % du cuivre nu contenu dans le mélange initial est récupéré en B3 (équation IV-25). Avec le cuivre nu représentant 50,9 % de la masse de produit collecté dans B3, le contenu en cuivre de ce produit est de 84,3 % :

$$\begin{aligned}
 Cu_{B3} &= \frac{m_{Cu-n B3} + k_{Cu-e} m_{Cue B3}}{m_{B3}} \times 100 \\
 &= \frac{11,484 + 0,68 \times 11,077}{22,561} \times 100 \quad (IV-27) \\
 &= 84,3 \%
 \end{aligned}$$

Pour la plaque en « S » (configuration #3), les particules de cuivre nu représentent 54,5 % de la masse de B3 mais moins de cuivre nu (51 %) est récupéré par rapport à la configuration #2. Le produit cuivre étamé est aussi moins important (31,6 %) car beaucoup de produit est mixte. En effet, toujours pour la configuration #3, le « produit mixte » représente 31,4 % du produit total alors qu'elle représente 14,5 % pour la configuration #2. Par conséquent, cette dernière donne les meilleurs résultats de séparation. Le « produit cuivre nu » obtenu en utilisant la configuration avec la plaque en « S » inversée contient 84,3 % de cuivre. Une augmentation de 2,5 % est donc constatée par rapport au contenu en cuivre du mélange initial.

IV-2.4. Discussion des résultats par visualisation des trajectoires

D'autres expériences ont été effectuées dans le but d'augmenter le contenu en cuivre du « produit cuivre nu ».

Le produit collecté en B3 a été retraité deux fois par le séparateur (tableau IV-6) et cela permet de récupérer 18,4 % avec un contenu en cuivre de 88,3 %. Cette valeur sous-estime largement le contenu en cuivre des produits obtenus puisque l'épaisseur de la couche d'étain est le plus souvent inférieure à la valeur supposée (10 µm).

Tableau IV-6 : Retraitement du produit cuivre nu.

Premier passage																	
			Masse collectée dans B4 (g)					Masse collectée dans B3 (g)				Masse collectée dans B2 (g)		Masse collectée dans B1 (g)			
U (kV)	α (°)	d (mm)	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
-25	50	150	2,028	2,268	2,606	3,032	3,704	6,432	18,740	11,276	8,674	7,540	6,700	5,708	5,182	5,354	9,242
Total (g)			13,638					8,674	30,016	6,432	14,240	25,486					
Contenu en cuivre (%)			77,15					84,29	85,60	84,16	82,18	79,62					
Deuxième passage de B3																	
			Masse collectée dans B4 (g)					Masse collectée dans B3 (g)				Masse collectée dans B2 (g)		Masse collectée dans B1 (g)			
U (kV)	α (°)	d (mm)	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
-25	50	150	0,668	0,713	0,821	1,148	1,601	2,911	8,385	4,825	3,674	2,860	2,321	2,124	1,715	1,640	2,671
Total (g)			4,951					3,674	13,210	2,911	5,181	8,150					
Contenu en cuivre (%)			81,73					86,08	87,97	86,56	85,47	83,52					
Troisième passage de B3																	
			Masse collectée dans B4 (g)					Masse collectée dans B3 (g)				Masse collectée dans B2 (g)		Masse collectée dans B1 (g)			
U (kV)	α (°)	d (mm)	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
-25	50	150	0,176	0,169	0,200	0,284	0,464	1,281	6,126	3,059	2,164	1,485	1,182	0,884	0,622	0,568	0,847
Total (g)			1,293					2,164	9,185	1,281	2,667	2,921					
Contenu en cuivre (%)			82,97					88,26	88,26	88,53	86,41	84,83					

La quantité finalement récupérée de « produit cuivre nu » n'est pas très importante mais elle peut être augmentée dans le cas d'une installation industrielle (figure IV-9). En effet, si trois modules de séparations sont positionnés en série, la plupart des autres secteurs de compartiments peuvent être retraités. La figure IV-9 montre une façon de traiter ces produits qui pourrait donner de bons résultats. Ainsi, seul le « produit cuivre étamé » (B1.1 et B4.1) résultant de la première séparation ne serait pas à nouveau traité. En revanche, environ 70 % de tout le cuivre (B2.1 et B3.1) serait retraité.

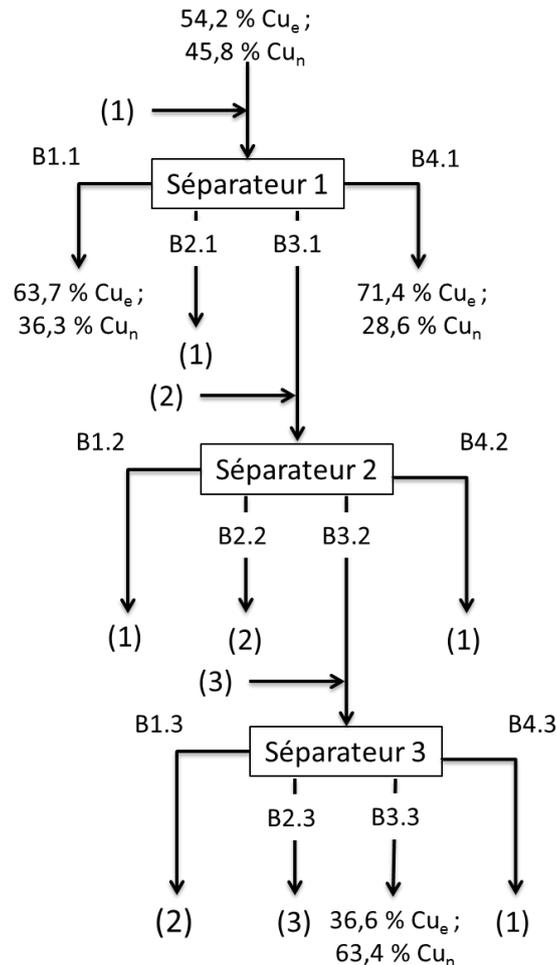


Figure IV-9 : Flux de produit supposé dans une potentielle application industrielle.

Il est difficile d'obtenir un contenu en cuivre plus élevé dans le « produit cuivre nu ». En effet, les caractéristiques des particules de cuivre nu et étamé sont proches. La masse volumique du cuivre nu est de 8960 kg.m^{-3} alors que celle, équivalente, du cuivre étamé est de 8430 kg.m^{-3} . De plus, le rayon des particules de cuivre étamé est inférieur à celui des particules de cuivre nu. Ceci signifie que le rapport entre les forces électrique et mécanique est plus important, ainsi les particules de cuivre étamé se détachent plus facilement que les autres. C'est pourquoi la séparation est possible.

Les trajectoires des particules de cuivre nu et étamé simulées numériquement (figure IV-10) sont suffisamment différentes pour présumer une bonne séparation. Selon ce modèle

numérique, aucune particule n'impacte la plaque en « S » inversée ce qui est infirmé par les observations expérimentales.

Les mesures effectuées avec une caméra rapide (figure IV–11) permettent d'évaluer la qualité de ces simulations et d'expliquer la pureté inférieure à celle attendue. Les trajectoires de cuivre étamé 1 et celles du cuivre nu, présentées sur la figure IV–12, confirment que les deux types de particules peuvent être correctement séparés.

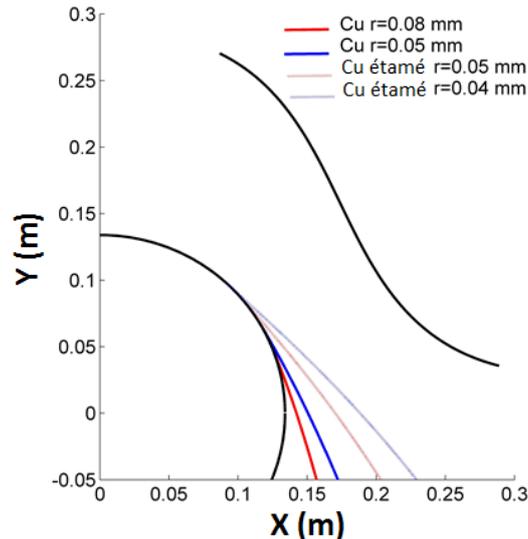


Figure IV-10 : Simulation numérique des trajectoires des deux types de particules pour la configuration #2 avec $\alpha = 50$; $U = -25$ kV et $d = 150$ mm.

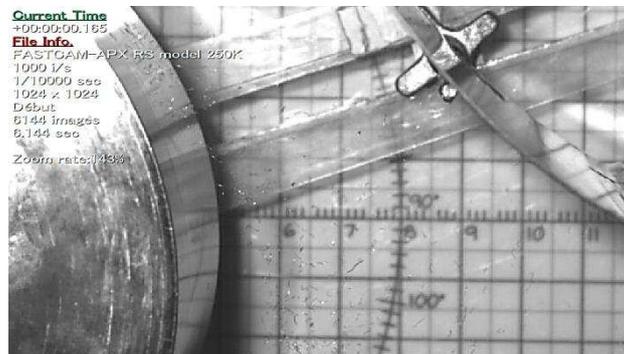


Figure IV-11 : Image de la position des particules au sein du séparateur, obtenue par la caméra rapide.

Cependant, la caméra rapide montre également que certaines particules de cuivre étamé (les plus petites : trajectoires 2 et 3 de la figure IV–12) sont attirées par l'électrode haute tension et entrent en contact avec celle-ci. Ces particules rebondissent et peuvent alors être récupérées avec le « produit cuivre nu » ou dans les compartiments C11 à C15. Ceci explique pourquoi la pureté du cuivre nu n'est pas aussi élevée qu'attendue et pourquoi une quantité non négligeable du cuivre étamé est récupérée dans les derniers compartiments. Cela prouve la nécessité de la validation expérimentale des modèles numériques.

Cette étude a permis de démontrer que la configuration #2, utilisant la plaque en forme de « S » inversée comme électrode haute tension, donne les meilleurs résultats de séparation d'un mélange cuivre nu – cuivre étamé.

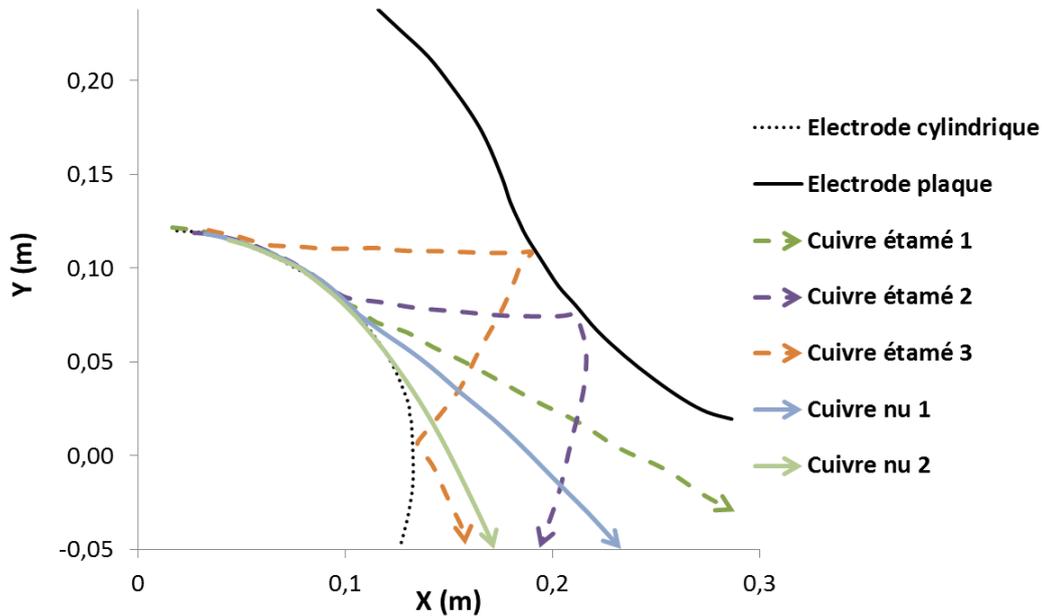


Figure IV-12 : Visualisation des trajectoires par analyse des images obtenues par la caméra rapide, pour $\alpha = 50^\circ$, $U = -25$ kV et $d = 150$ mm.

IV-3. Application à la séparation cuivre – aluminium [196]

La séparation du mélange cuivre nu – cuivre étamé, présentée en IV-2, est plus efficace pour la configuration utilisant une plaque en forme de « S » inversée. Ici, l'objectif de l'étude est de confirmer ces résultats sur un mélange cuivre – aluminium et d'améliorer cette configuration en y ajoutant une trappe.

IV-3.1. Procédure expérimentale

L'objet de cette étude est un mélange granulaire de métaux composé à 95 % de cuivre nu (figure II-3 (a)) et étamé (figure II-3 (b)) et à 5 % d'aluminium (figure II-3 (c)). Ce type de produit est obtenu dans des déchets de câbles électriques préalablement broyés et dont la fraction isolante a été retirée par séparation électrostatique. Pendant cette étude, l'humidité relative était comprise entre 52,3 % et 56,1 % et la température entre 19,5°C et 21,1°C.

Un séparateur électrostatique à tambour (CARPCO, Inc.) a été utilisé (figure IV-4 (#2)). Comme vu dans le paragraphe IV-2, la configuration utilisant la plaque en forme de « S » inversée et une vitesse de rotation de l'électrode cylindrique de 40 tr.min⁻¹ est celle qui permet la meilleure séparation électrostatique du mélange cuivre nu – cuivre étamé. C'est pourquoi, cette configuration a été choisie pour cette étude.

Pour chaque expérience, la récupération et la pureté du cuivre dans chaque compartiment C_i ont été calculés :

$$Rec_{Cu Ci} = \frac{m_{Cu Ci}}{m_{T Cu}} \times 100 \quad (IV-28)$$

$$Pur_{Cu Ci} = \frac{m_{Cu Ci}}{m_{T Ci}} \times 100 \quad (IV-29)$$

où $m_{Cu\ C_i}$ correspond à la masse de cuivre collecté dans le compartiment C_i , $m_{T\ Cu}$ est la masse totale de cuivre dans tous les compartiments et $m_{T\ C_i}$ est la masse totale du compartiment C_i . Des formules similaires ont été utilisées pour le calcul de la récupération et de la pureté de l'aluminium.

Une étude numérique a été effectuée pour déterminer quelle configuration donne les meilleurs résultats de séparation. Afin de vérifier ces résultats, une expérience a été menée dans le cas optimal et les trajectoires des particules ont été visualisées grâce à une caméra rapide.

Grâce au programme numérique, une étude de séparation a été effectuée pour les trois facteurs : α [°], U [kV] et d [mm] (figure IV-3) dont les plages de variation sont présentées dans le tableau IV-7.

Tableau IV-7 : Plages de variation des facteurs.

Niveau	α (°)	U (kV)	d (mm)
-1	30	-10	100
0	40	-15	125
1	50	-20	150

Ces valeurs ont été choisies de manière à éviter tout arc électrique en maintenant une bonne séparation. A partir de ces plages, 15 expériences ont été numériquement effectuées :

- 8 expériences pour chaque valeur haute et basse des facteurs (2^3),
- 6 expériences pour chaque valeur haute et basse de chaque facteur au niveau moyen des deux autres (2×3),
- 1 expérience au niveau moyen des trois facteurs.

Pour chaque expérience, les trajectoires ont été calculées pour chaque type et chaque taille de particule. Cela permet de calculer la coordonnée suivant x pour laquelle la particule coupe la droite $y = -0,180$ m qui correspond à la partie supérieure des compartiments du collecteur. La distance D entre la coordonnée x de la plus grande particule de cuivre (rayon : 0,08 mm) et la plus petite particule d'aluminium (rayon : 0,5 mm) est considéré comme la réponse du procédé. Généralement, plus cette distance est grande, meilleure est la séparation.

IV-3.2. Résultats et comparaison avec les trajectoires réelles

Les simulations permettent de visualiser les trajectoires des particules (figure IV-13) et la distance D. Pour certaines configurations, le champ électrique est tellement intense que les particules d'aluminium impactent la plaque. Ces configurations sont alors systématiquement mises de côté, car les particules d'aluminium peuvent alors être récupérées dans les mêmes compartiments que le cuivre.

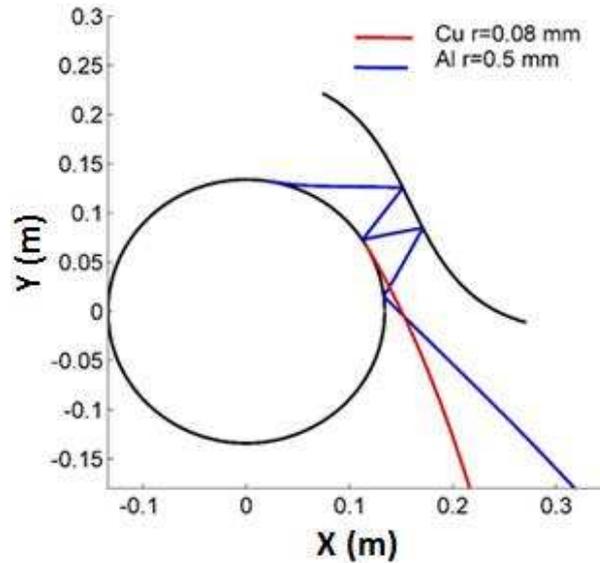


Figure IV-13 : Simulation numérique des trajectoires de particules pour $\alpha = 50^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.

Le tableau IV-8 montre les résultats de toutes les simulations numériques. D'après ces résultats, la séparation électrostatique devrait être meilleure pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm, car la distance entre les particules de cuivre et d'aluminium, D , est la plus importante avec 0,6119 m.

Tableau IV-8 : Résultats de l'étude numérique.

U (kV)	α ($^\circ$)	d (mm)	D (m)	Impact
10	30	100	0,2179	Non
10	30	150	0,1780	Non
10	50	100	0,3798	Non
10	50	150	0,2442	Non
20	30	100	0,6119	Non
20	30	150	0,3850	Non
20	50	100	0,3237	Oui
20	50	150	0,3147	Oui
10	40	125	0,2258	Non
20	40	125	0,5829	Non
15	30	125	0,3052	Non
15	50	125	0,3915	Oui
15	40	100	0,4919	Non
15	40	150	0,3042	Non
15	40	125	0,3775	Non

La figure IV-14 montre un zoom de la simulation numérique pour la configuration optimale. Il semble que la séparation sera très bonne et que les plus petites particules d'aluminium passeront très proche de la plaque en « S » sans la toucher. Trois expériences ont été faites pour cette configuration afin de voir les trajectoires réelles des particules et également de mesurer les résultats de séparation.

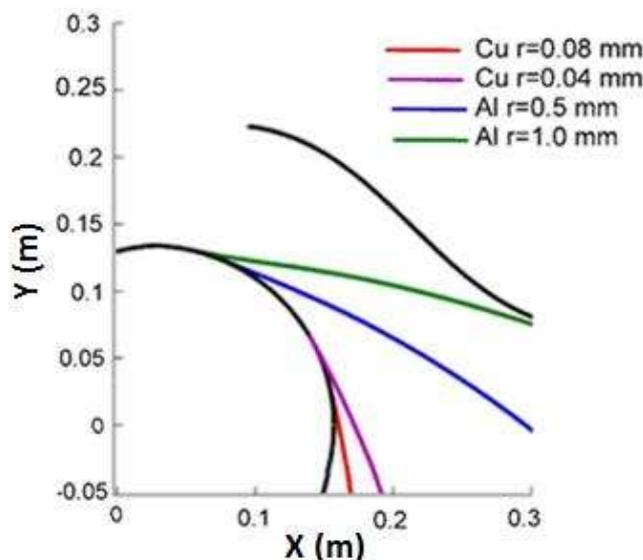


Figure IV-14 : Zoom des trajectoires simulées des particules pour la configuration optimale : $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.

Les résultats des simulations numériques correspondent aux données expérimentales, malgré le fait que l'influence des interactions entre particules et les différences de résistance électrique entre les particules et l'électrode cylindrique soient négligées. Cette dernière peut être causée par des différences d'épaisseur des feuilles d'aluminium ou par des polluants de surface (poussières...). Cela isole quelque peu l'aluminium du cylindre tournant et peut donc modifier son point de détachement. De plus, la force de trainée appliquée aux particules d'aluminium est sous-estimée puisque les particules sont supposées sphériques. Cependant, malgré ces limites, le modèle a le mérite de montrer l'effet des collisions particule – électrode. Cela va également permettre d'évaluer la forme d'une trappe fixée sur l'électrode plaque.

Lors des expériences, l'erreur expérimentale était de 5,7 % due aux différents paramètres régissant les essais (échantillons, précision des instruments de mesures, impacts des particules sur les électrodes, opérateur...).

La figure IV-15 décrit la distribution de chaque type de particule dans les 15 compartiments du collecteur. Les quantités maximales de cuivre et d'aluminium sont mesurées dans différents compartiments ce qui signifie qu'une séparation a lieu. En effet, un maximum d'aluminium est récupéré dans le compartiment C7 (13,6 % de l'aluminium total) alors que celui de cuivre est dans le compartiment C9 (38,6 %).

L'aluminium est plus réparti dans les différents compartiments alors que 62,2 % du cuivre est récupéré dans les compartiments C9 et C10, avec une pureté de 98,7 %. Afin de récupérer de plus grandes quantités de cuivre et d'améliorer la pureté de l'aluminium, les produits collectés dans les autres compartiments peuvent être rassemblés et passés une nouvelle fois dans le séparateur. La distribution de l'aluminium permet de supposer que certaines particules entrent en collision avec la plaque en « S » et rebondissent dans les compartiments de cuivre.

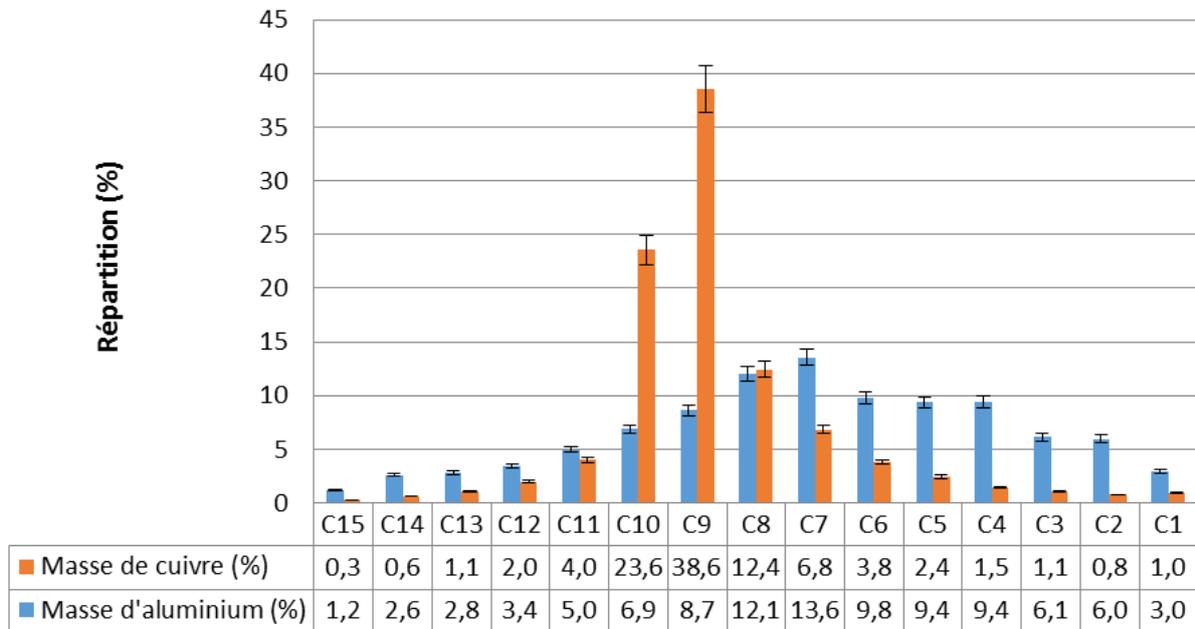


Figure IV-15 : Distribution des particules dans les 15 compartiments du collecteur pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.

Une caméra rapide Photron APX RS et le logiciel Photron Fastcam Viewer ont été utilisés pour visualiser et analyser les trajectoires des particules. Les trajectoires de deux particules d'aluminium (1) et (2) et la zone dans laquelle les particules de cuivre se déplacent (3) sont présentés sur la figure IV–16 pour différents instants. La particule d'aluminium (1) impacte l'électrode plaque entre les images (c) et (d) et est récupérée avec le cuivre alors que la particule (2) est simplement attirée par la plaque sans contact avec celle-ci. L'analyse des images obtenues permet de tracer, sur un graphique, certaines de ces trajectoires (figure IV–17).

La figure IV–17 montre une différence importante entre les trajectoires des particules de cuivre et celles d'aluminium. Les trajectoires obtenues par la caméra montrent aussi que quelques particules d'aluminium impactent la plaque en « S » ce qui n'est pas prédit par le modèle numérique. Cela est probablement dû aux hypothèses émises lors de son élaboration. Parmi elles, les particules ne sont pas des sphères mais de fines feuilles, leur comportement n'est sûrement pas le même. En effet, le rapport surface/masse est plus grand dans le cas d'une particule rectangulaire que dans celui d'une particule sphérique. Ainsi, les particules rectangulaires sont plus facilement attirées par l'électrode haute tension.

De plus, beaucoup de particules sont séparées en même temps et leurs interactions ne sont prises en compte dans le modèle numérique tout comme les forces d'adhésions des particules sur l'électrode cylindrique. Les différentes erreurs expérimentales (position de la caméra, prise des coordonnées des particules...) peuvent aussi expliquer les différences entre trajectoires simulées et expérimentales.

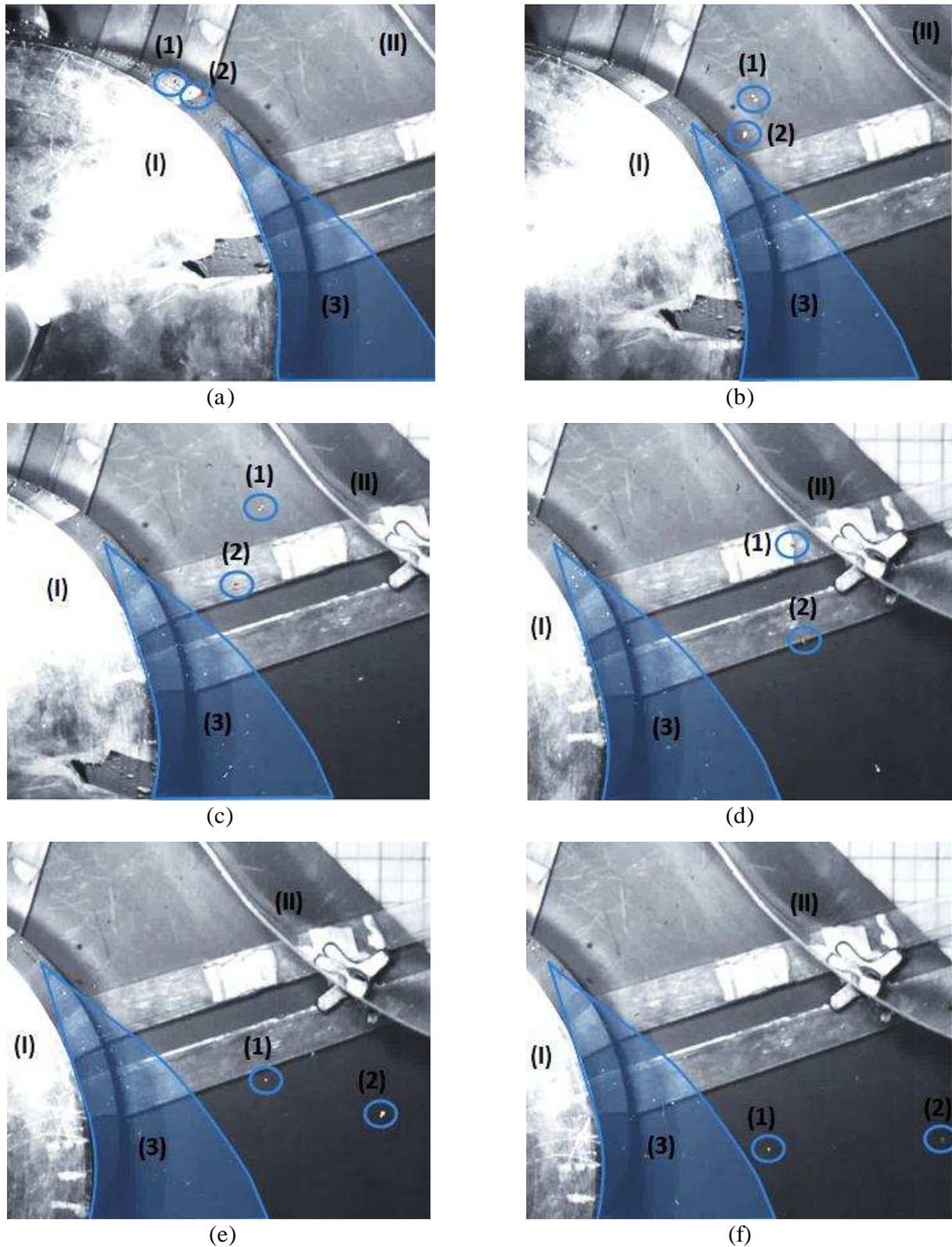


Figure IV-16 : Trajectoires des particules visualisées par la caméra rapide à différents instants. (I) Electrode cylindrique tournante ; (II) Electrode plaque en « S » inversée ; (1) Particule d'aluminium impactant l'électrode plaque ; (2) Particule d'aluminium sans impact ; (3) Zone de déplacement des particules de cuivre.

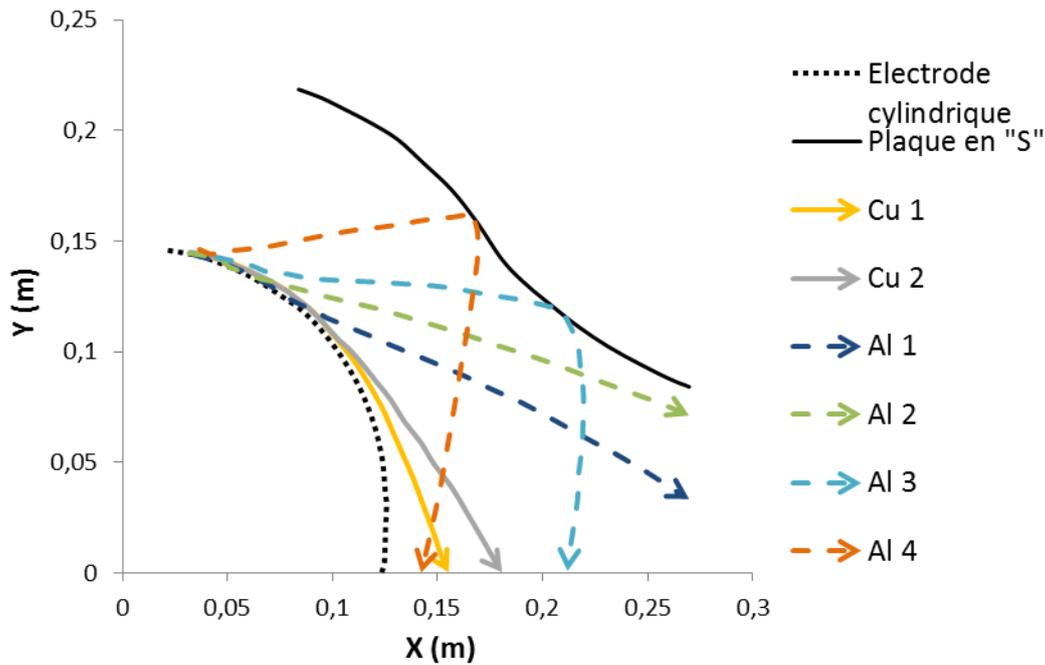


Figure IV-17 : Trajectoires des particules, pour la plaque en « S » inversée, obtenues par la caméra rapide pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.

Néanmoins, l'analyse de ces trajectoires nous a suggéré une solution pour améliorer les résultats de séparation : ajouter une trappe métallique cylindrique de 40 mm de diamètre au milieu de la plaque (figure IV-18). Cela devrait aider la récupération des particules d'aluminium en évitant leurs impacts avec la plaque en « S » et en récupérant celles qui l'impactent.

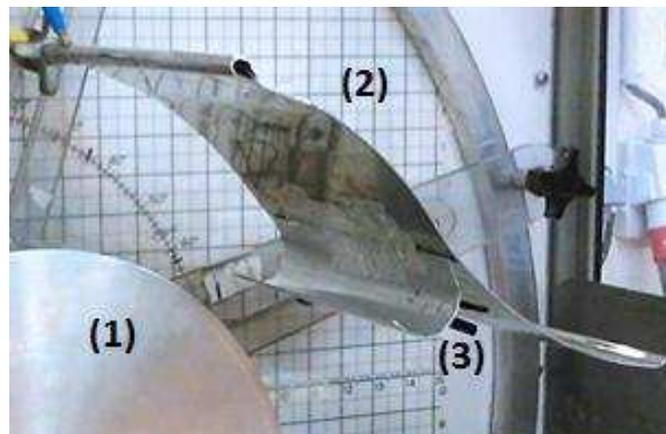


Figure IV-18 : Ajout d'une trappe métallique à la configuration d'électrodes. (1) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (2) Electrode plaque en forme de « S » reliée à la haute tension ; (3) Trappe métallique fixée à l'électrode plaque.

Une simulation numérique du champ électrique et des trajectoires des particules ont été effectuées avec la présence de la trappe métallique (figures IV-19 et IV-20). Comme le montre la figure IV-19, le champ électrique est plus intense dans le cas où la trappe est présente.

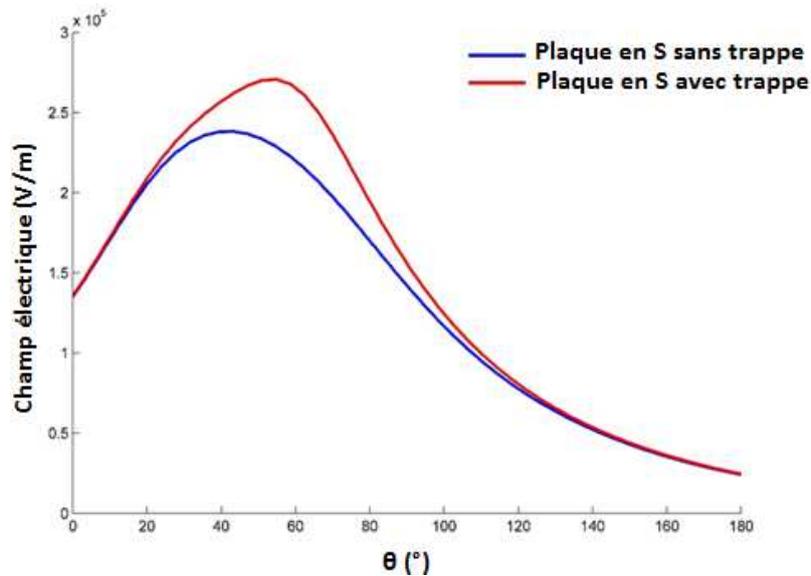


Figure IV-19 : Répartition du champ électrique le long de l'électrode cylindrique reliée à la terre avec et sans trappe métallique pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.

Avec la trappe métallique, le champ électrique est plus intense, les particules conductrices seront donc plus attirées et celles de cuivre seront donc récupérées dans les compartiments C1 à C7. Ainsi, la récupération du cuivre va diminuer dans les compartiments C9 et C10.

La figure IV-20 montre bien que la trappe et la distorsion du champ électrique qu'elle cause, ont un effet sur les trajectoires des deux types de particules. Les plus petites particules de cuivre sont plus attirées par l'électrode haute tension et les plus petites particules d'aluminium sont collectées dans la trappe.

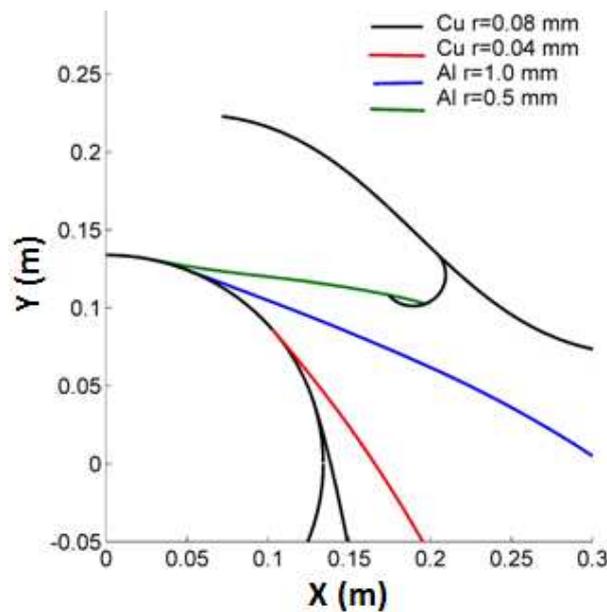


Figure IV-20 : Trajectoires simulées des particules avec la trappe métallique pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.

La figure IV–21 montre la répartition des particules de cuivre et d’aluminium dans les différents compartiments du collecteur lorsque cette trappe est fixée sur la plaque en « S » pour la configuration optimale.

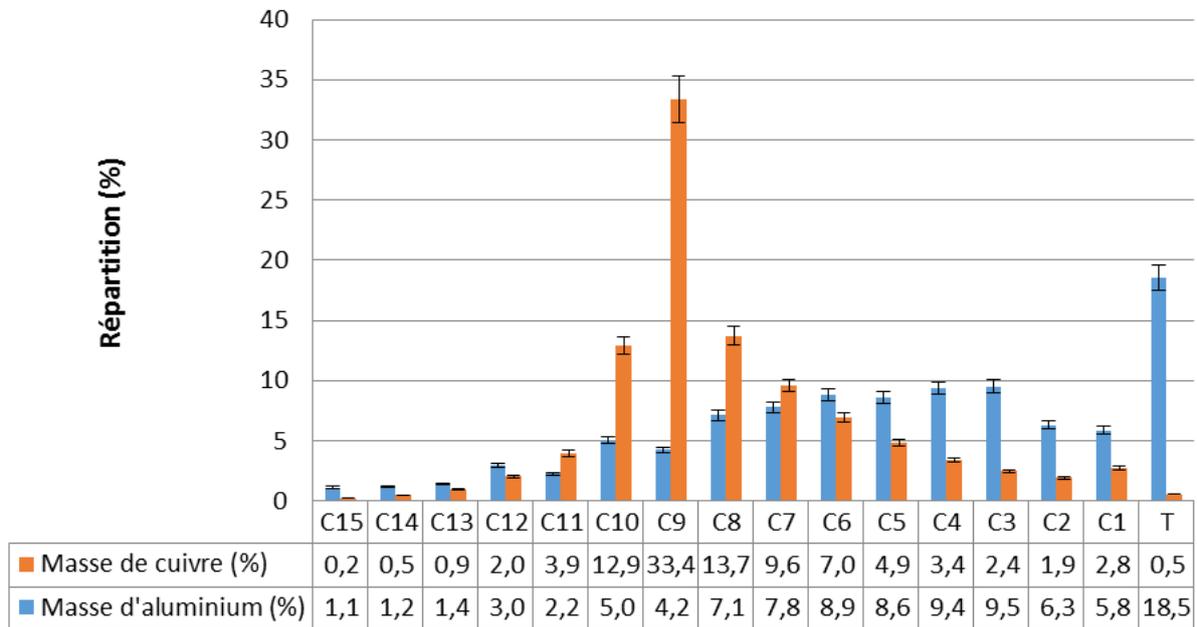


Figure IV-21 : Distribution des particules dans les 15 compartiments du collecteur pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm avec la trappe métallique.

La trappe métallique capture une grande quantité d’aluminium (18,5 %). Cela diminue la quantité d’aluminium présente dans les compartiments cuivre et améliore donc sa pureté. Ainsi, dans les compartiments C9 et C10, la pureté du cuivre est de 98,9 %. Cependant, sa récupération diminue (46,3 %). Sans trappe, seuls les compartiments C9 et C10 (qui récupèrent 62,2 % du cuivre) ont une pureté de cuivre supérieure ou égale à 97 %. Toutefois, avec la trappe métallique, les compartiments C8 à C11 ont ce taux de pureté. Ces compartiments représentent 63,9 % de l’ensemble du cuivre mais sa pureté diminue à 98,5 %.

Dans le cas de la trappe métallique, les quantités de cuivre récupérées dans les compartiments C1 à C7 augmentent, ce qui correspond aux prédictions faites par le modèle numérique.

Comme le montre la figure IV–22, les particules de cuivre sont plus attirées par l’électrode haute tension même si une différence entre leurs trajectoires et celles des plus grandes particules d’aluminium persiste.

La quantité d’aluminium reste la même dans les compartiments C11 à C15. En effet, certaines particules peuvent impacter la trappe et rebondir dans ces compartiments.

Afin d’éviter la modification du champ électrique due à la trappe métallique, quelques expériences ont été effectuées avec une trappe en plastique placée au même endroit que la trappe métallique. Cependant, son diamètre était de 45 mm, seul diamètre disponible se rapprochant le plus des 40 mm de la trappe métallique.

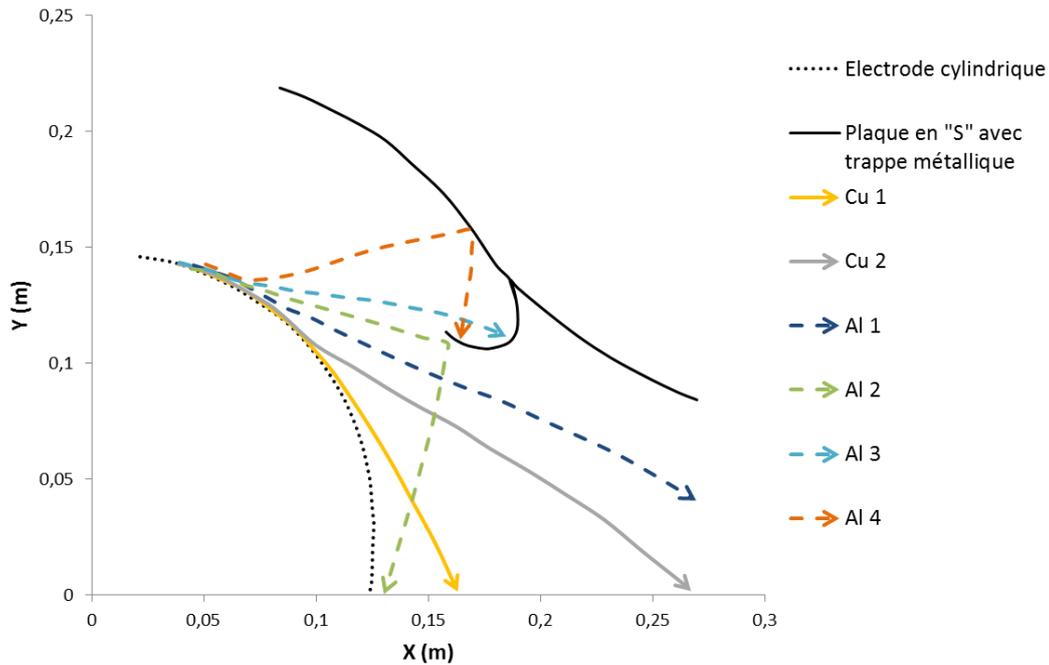


Figure IV-22 : Trajectoires des particules, pour la plaque en « S » et la trappe métallique, obtenues par la caméra rapide pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.

Comme présenté sur la figure IV-23, la récupération du cuivre dans les compartiments C9 et C10 est de 54,4 % et sa pureté est de 99,3 %. Ainsi, les taux de pureté et de récupération du cuivre sont meilleurs qu'avec la trappe métallique. Ici, le compartiment C8 a une pureté supérieure à 97 %. S'il est ajouté aux compartiments C9 et C10, la récupération augmente jusqu'à 68,4 % avec une pureté moyenne de 98,9 %. Ces résultats sont meilleurs qu'avec la trappe métallique ou sans aucune trappe. De plus, 21,3 % de l'aluminium est récupéré dans la trappe plastique avec une pureté de 73,7 %.

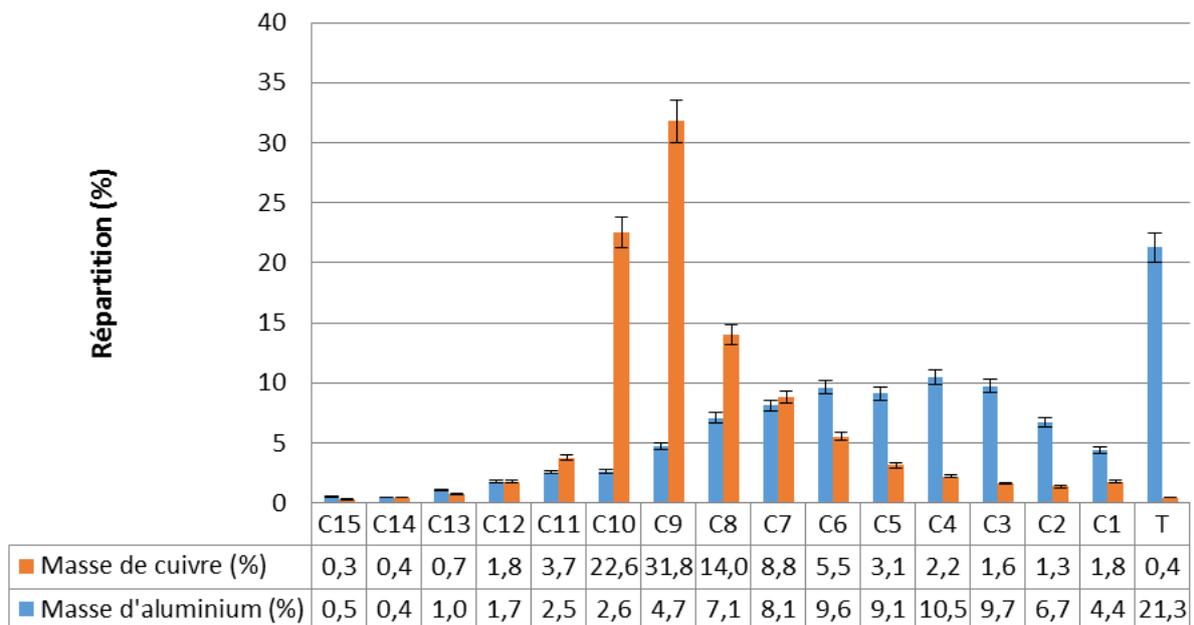


Figure IV-23 : Distribution des particules dans les 15 compartiments du collecteur pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm avec la trappe plastique.

Les trajectoires expérimentales montrent quelques différences par rapport à la présence de la trappe métallique (figure IV–24). Les trajectoires des particules de cuivre sont similaires à celles sans trappe. Pour les particules d'aluminium, la principale différence est lorsqu'elles impactent la trappe. Lorsqu'une particule conductrice impacte la trappe métallique, elle se charge au même potentiel électrique que celle-ci et est immédiatement repoussée dans la direction normale à la surface de la trappe. Ainsi, sa trajectoire change significativement et elle est récupérée dans les compartiments prévus pour le cuivre. Si la trappe est isolante, la particule garde sa charge initiale et son angle de réflexion est égal à celui incident. Toutefois, la force d'attraction électrique qui s'y applique ne change pas et la particule continue à être attirée par l'électrode haute tension. Ceci facilite donc la séparation électrostatique.

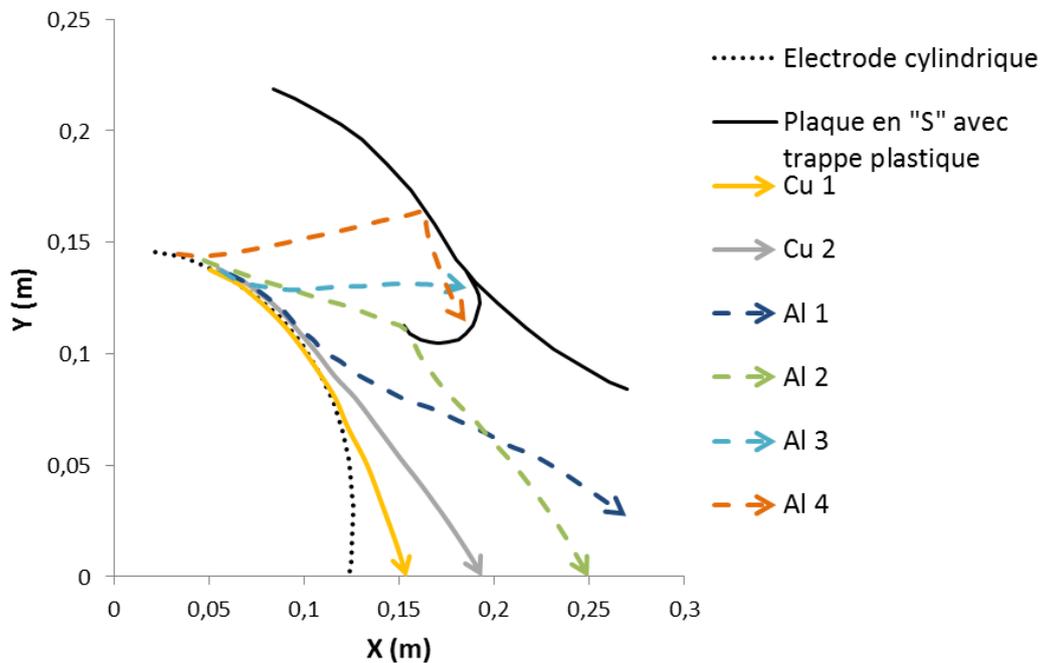


Figure IV-24 : Trajectoires des particules avec la plaque en « S » et la trappe plastique, obtenues par la caméra rapide pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.

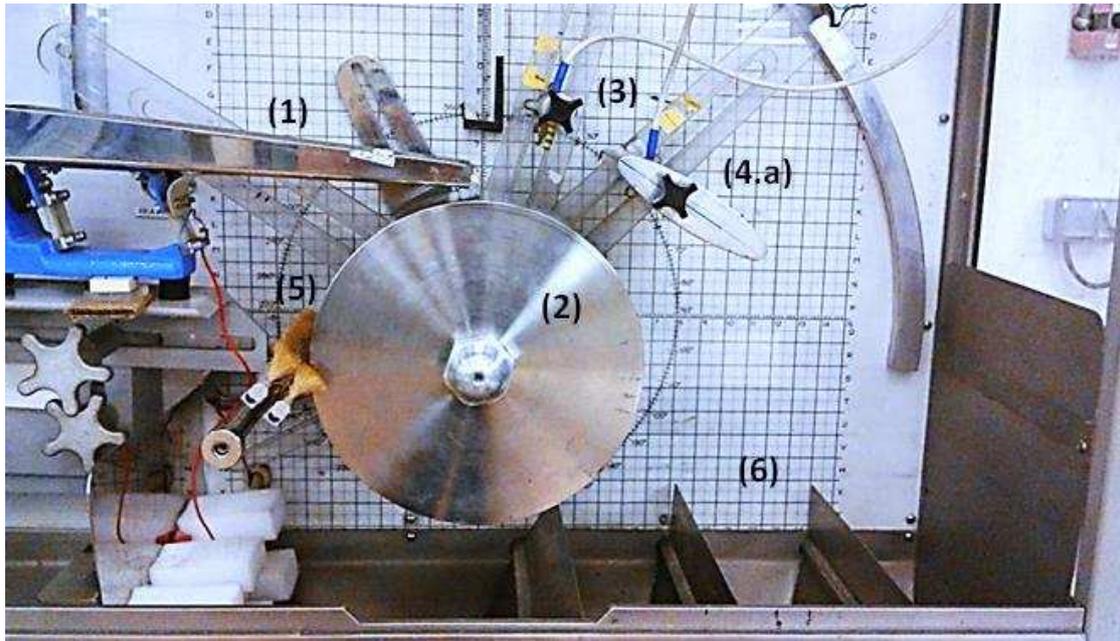
IV-4. Application à la séparation cuivre – aluminium – isolants [197]

L'objectif de ce travail est de démontrer qu'un séparateur électrostatique à tambour peut être utilisé aussi bien pour la séparation simultanée d'un mélange de deux conducteurs et d'isolants afin d'obtenir une installation unique qui puisse permettre une telle séparation.

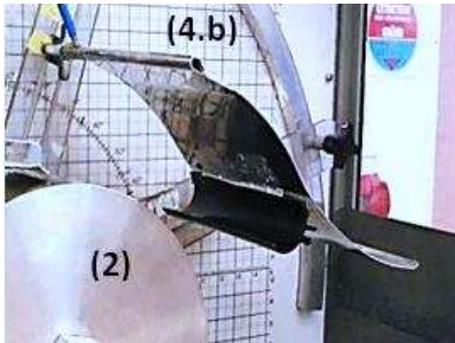
IV-4.1. Procédure expérimentale

Le mélange à séparer est composé de 72 % d'isolants (figure II–2 (d)), de 26,6 % de cuivre nu (figure II–3 (a)) et étamé (figure II–3 (b)) et de 1,4 % d'aluminium (figure II–3 (c)). Cette répartition correspond à la composition réelle de câbles électriques de DEEE. Ici, l'objectif principal est d'obtenir la plus haute pureté du cuivre possible.

Afin de séparer ce mélange, trois configurations d'électrodes ont été étudiées sur le séparateur électrostatique à tambour (figure IV–25). Pour chaque configuration, la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique était de $40 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ et le collecteur avait 4 compartiments.



(a)



(b)



(c)

Figure IV-25 : Séparateur électrostatique de laboratoire. (a) Configuration d'électrode classique (#1) : (1) Goulotte oscillante ; (2) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (3) Electrode couronne et (4.a) Electrode elliptique reliée à une source de haute tension négative ; (5) Balais ; (6) Collecteur (4 compartiments) ; (b) Configuration #2 : (4.b) Plaque en « S » inversée avec trappe plastique ; (c) Configuration #3 : (4.c) Plaque en « S » inversée avec trappe plastique et effet couronne.

La configuration #1 (figure IV–25 (a)) correspond à la configuration d'électrode la plus commune des séparateurs électrostatiques à tambour. Le cylindre métallique de l'électrode couronne de type dual (3) concentre l'effet couronne dans un secteur bien défini de l'électrode cylindrique (2) afin d'augmenter les conditions de charge des particules non-conductrices. Ensuite, une électrode elliptique (4.a) crée l'induction électrostatique nécessaire au détachement des particules conductrices de l'électrode de terre (2).

La configuration #2 (figure IV–25 (b)) est la même que celle présentée dans le paragraphe IV-3 et donne de bons résultats de séparation d'un mélange aluminium – cuivre. Une plaque en forme de « S » inversée est connectée à la source de haute tension. Une trappe en plastique, fixée à cette électrode, permet de récupérer une grande partie de l'aluminium alors que les particules de cuivre sont attirées plus légèrement.

La troisième configuration #3 (figure IV-25 (c)) est une combinaison des configurations #1 et #2. En effet, un fil de cuivre, permettant une décharge couronne, est attaché par le biais de deux supports métalliques au tout début de la plaque en « S » connectée à la source de haute tension de la configuration #2. Ainsi, le champ électrique a une zone d'application plus large qu'avec la configuration #1 et l'effet couronne est conservé.

Chaque expérience a été effectuée sur 50 g de mélange avec une vitesse de rotation de l'électrode cylindrique fixée à 40 tr.min⁻¹. L'humidité relative était comprise entre 61,1 % et 63,5 % et la température entre 18,5°C et 19°C. Pour toutes les configurations, l'erreur expérimentale était de 7,4 %.

IV-4.2. Comparaison des résultats obtenus avec trois configurations d'électrodes haute tension

- Configuration #1 :

Avec cette configuration, une tension de 18 kV a été utilisée pour mener les expériences. Une valeur de la tension plus élevée attire trop fortement les particules d'aluminium, elles impactent ainsi les électrodes haute tension et diminuent ainsi l'efficacité de la séparation. Toutefois, cette valeur permet de créer un effet couronne efficace, ce qui n'est pas le cas avec une tension moins élevée.

La figure IV-26 montre les résultats expérimentaux de cette séparation. Quasiment toutes les particules isolantes contenues dans le mélange initial sont récupérées dans les compartiments C3 et C4 ce qui signifie que la séparation conducteur – isolant est correcte. Cependant, la majorité de ces particules est collectée dans C3, ce qui implique qu'elles ne sont pas suffisamment chargées par la décharge couronne pour être récupérées dans C4. Ceci s'explique par la valeur limitée de la haute tension qui détermine l'efficacité de la charge.

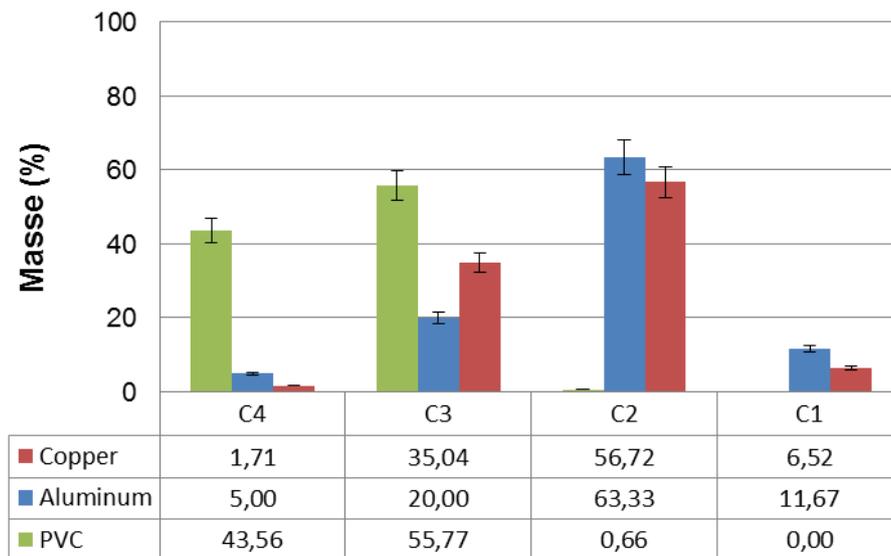


Figure IV-26 : Distribution des particules dans les 4 compartiments du collecteur pour la configuration #1.

56,7 % du cuivre est récupéré dans C2. Cette récupération est relativement faible car l'attraction électrique est faible. De plus, sa pureté est de 91,9 % notamment car 63,3 % de

l'aluminium initialement présent dans le mélange est également collecté dans ce compartiment.

Malgré cette faible valeur de tension, quelques particules d'aluminium impactent les électrodes liées à la haute tension et sont ainsi déviées vers les compartiments C3 et C4.

- **Configuration #2 :**

Cette configuration donnait de bons résultats pour la séparation électrostatique d'un mélange cuivre – aluminium. La tension appliquée était de 20 kV. Il a été prouvé que cette tension est optimale pour cette configuration.

Ainsi, 25,3 % des particules d'aluminium sont collectées dans la trappe plastique (figure IV-27). Le taux de récupération de l'aluminium dépasse 46 % en considérant également le produit dans C1. En l'absence de décharge couronne, les particules d'isolants tombent principalement dans C3, qui contient aussi la majorité des particules de cuivre (54,5 %). Les taux de récupération et de pureté du cuivre dans C2 sont faibles (respectivement 28 % et 88,4 %).

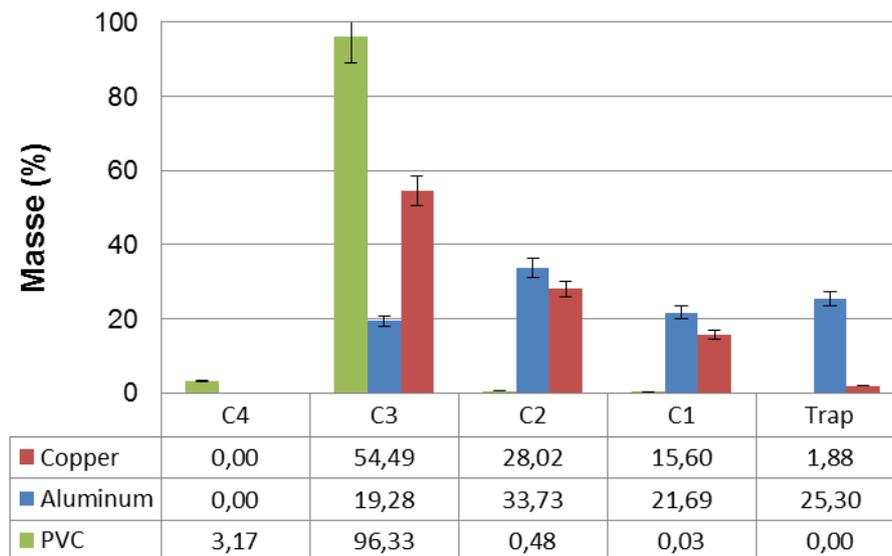


Figure IV-27 : Distribution des particules dans les 4 compartiments du collecteur pour la configuration #2.

Dans cette configuration, la séparation cuivre – aluminium est satisfaisante (seulement 33,7 % de l'aluminium est récupéré dans C2, ce qui représente une amélioration de 100 % par rapport à la configuration #1) mais l'absence de décharge couronne diminue significativement l'efficacité de la séparation conducteur – isolant.

- **Configuration #3 :**

Conformément aux essais précédents : (1) le tri des particules isolantes impose l'utilisation d'une décharge couronne, comme pour la configuration #1 ; (2) le tri des particules d'aluminium est facilité par un champ électrique étendu produit par la plaque en « S » inversée et sa trappe, comme pour la configuration #2. La configuration #3 espère combiner les avantages des deux autres configurations en utilisant simultanément un effet

couronne (par le biais d'un fil de cuivre) et un champ électrique étendu grâce à la plaque en « S » inversée. La tension appliquée lors de ces expériences a été la même que pour la configuration #1, c'est-à-dire 18 kV.

La figure IV-28 montre la répartition des particules dans chaque compartiment du collecteur. La plupart des particules isolantes (73,9 %) sont récupérées en C4. La présence de la plaque, qui génère un champ électrique étendu, augmente l'effet d'adhésion de ces particules sur l'électrode cylindrique tournante. Seulement 12,9 % de l'aluminium est capturé par la trappe ce qui est plus faible qu'avec la configuration #2. Ceci est dû à la présence du fil créant l'effet couronne. Dans C1 et C2, 80,9 % du cuivre est récupéré avec une pureté de 92,9 %. Cette configuration donne les meilleurs résultats de séparation malgré que 60 % de l'aluminium reste présent avec le cuivre.

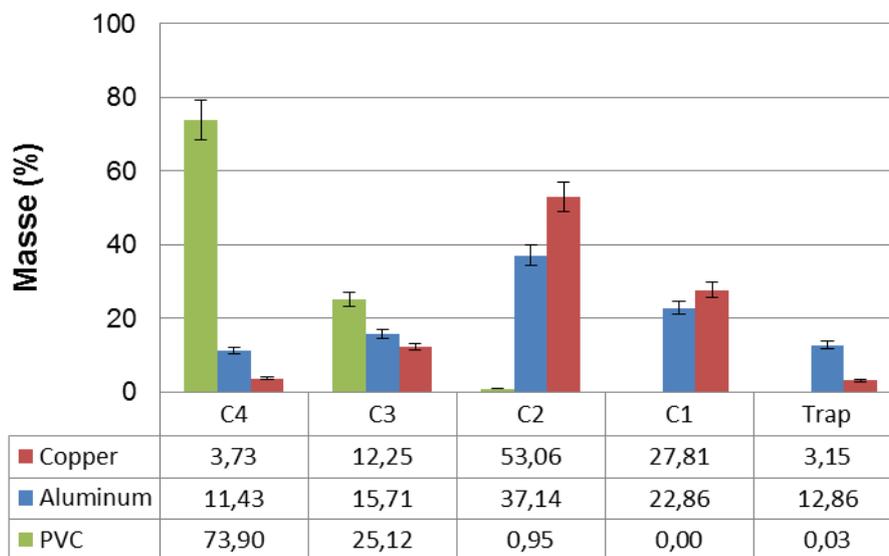


Figure IV-28 : Distribution des particules dans les 4 compartiments du collecteur pour la configuration #3.

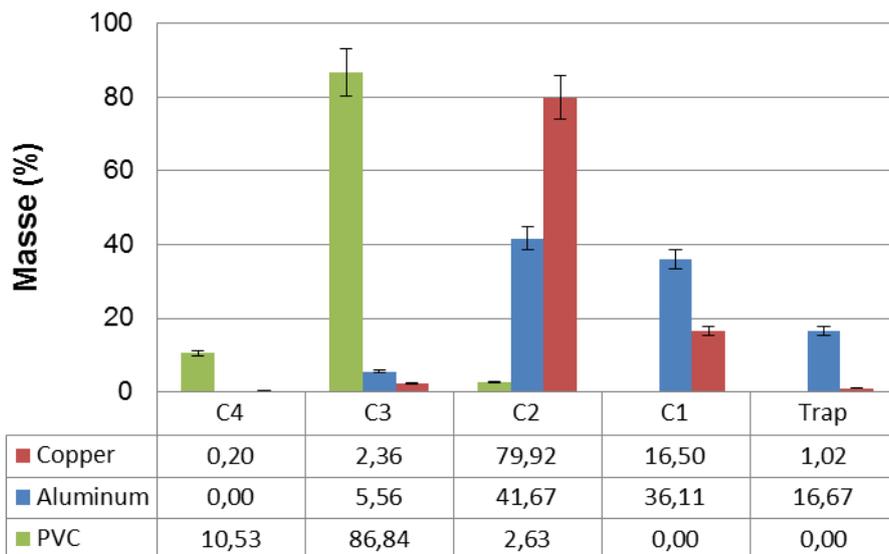


Figure IV-29 : Distribution des particules dans les 4 compartiments du collecteur après traitement des compartiments C1 et C2 issus d'une première séparation avec la configuration #3.

Afin d'augmenter la pureté du cuivre, le fil « couronne » a été retiré et le produit contenu dans C1 et C2 a été retraité en utilisant la configuration #2, qui est la plus efficace pour la séparation d'un mélange conducteur – conducteur (figure IV-29). Ainsi, 16,7 % de l'aluminium présent dans ce nouveau mélange a été collecté dans la trappe et 36,1 % dans C1.

64,6 % du cuivre présent dans le mélange initial (avant tout traitement) est récupéré dans C2 avec une pureté de 98 %. Ainsi, 75 % de l'aluminium et quasiment toutes les particules isolantes (99,97 %) ont été séparées.

Actuellement, pour des raisons financières et commerciales, l'entreprise CITF ne souhaite pas modifier le prototype PRD pour tester ce type de séparation.

IV-5. Conclusions

La corrélation entre les simulations numériques et les observations expérimentales des trajectoires des particules est efficace pour simuler ces procédés de séparation électrostatiques et évaluer la faisabilité de la séparation de certains mélanges.

D'autres études sont nécessaires pour améliorer le modèle numérique afin de le faire correspondre totalement aux résultats expérimentaux. La distribution de tailles des particules, leurs formes (notamment pour les particules d'aluminium) et la configuration du collecteur peuvent être ajoutées au modèle numérique. Cela permettrait de prédire les masses de chaque type de particules dans chaque compartiment du collecteur et de réduire le travail expérimental nécessaire à l'optimisation des procédés de séparation électrostatiques.

L'analyse statistique des trajectoires des particules visualisées par caméra rapide nécessite d'être approfondie afin de pouvoir déterminer quantitativement l'influence des rebonds des particules contre les électrodes.

La séparation électrostatique d'un mélange de particules de cuivre nu et étamé est difficile à cause de leurs caractéristiques similaires. Trois géométries d'électrodes ont été testées et mènent aux conclusions suivantes :

- l'utilisation de la plaque en « S » inversée donne les meilleurs résultats de séparation et permet de récupérer 55,4 % du cuivre nu dans un produit ayant un contenu en cuivre supérieur à 85 %,
- de bons résultats de séparation sont espérés en utilisant une stratégie à trois modules de séparation en série afin de traiter plusieurs fois le « produit cuivre nu » pour améliorer sa pureté et sa récupération.

L'aluminium et le cuivre, deux métaux présents dans beaucoup de déchets de câbles électriques, peuvent être séparés par un séparateur électrostatique à tambour utilisant une plaque en « S » inversée avec de très hauts degrés de pureté.

- une trappe métallique fixée à l'électrode haute tension augmente la pureté du cuivre séparé. Cependant, la modification du champ électrique résultant de sa présence diminue sa récupération,

- la trappe plastique fixée à la plaque ne modifie pas le champ électrique. Ainsi, la pureté du cuivre augmente (98,9 %) sans modifier sa récupération (68,4 %). De plus, 21,3 % de l'aluminium est récupéré dans cette trappe avec une pureté de 73,7 %. Les autres compartiments peuvent être traités une nouvelle fois pour encore améliorer les résultats de séparation.

Pour le mélange cuivre – aluminium – isolants :

- une décharge couronne doit être utilisée pour charger les particules isolantes afin qu'elles adhèrent à l'électrode cylindrique tournante,

- un champ électrique étendu comme celui généré par la plaque en « S » inversée est nécessaire pour séparer l'aluminium du reste du mélange,

- un compromis doit être fait entre deux phénomènes opposés : la haute tension appliquée au système d'électrode doit être suffisamment importante pour générer la décharge couronne nécessaire au chargement des particules isolantes mais dans certaines limites afin que seules les particules d'aluminium soient attirées dans la trappe et dans C1,

- la récupération des trois constituants du mélange considéré dans cette étude est encore améliorée par une séparation en deux temps. Ainsi, il est possible d'obtenir un cuivre pur à 98 %.

CHAPITRE V : PROCÉDES DE CHARGE ELECTRIQUE ET DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MELANGES GRANULAIRES ISOLANT – ISOLANT

Les déchets d'équipements électriques et électroniques sont composés de nombreux conducteurs mais aussi de plusieurs isolants. La séparation électrostatique de ces isolants nécessite leur chargement triboélectrique. Plus la charge des particules est élevée, plus la séparation électrostatique sera efficace. Il est donc nécessaire de développer des dispositifs de charge triboélectrique performants. Un tel dispositif a été conçu et construit par la société CITF.

Une étude de laboratoire a été faite sur la charge et la séparation de particules isolantes. Cela a permis à la société CITF de modifier son installation prototype PRD afin de le rendre opérationnel pour de tels mélanges.

Dans un premier temps, le dispositif de charge à cylindre tournant conçu et construit par CITF a été caractérisé en laboratoire afin d'obtenir les meilleures conditions de charge possibles. De plus, deux séries triboélectriques (une pour chaque type de tube) ont été faites sur neuf matières différentes dans le but d'appréhender au mieux les séparations électrostatiques de certaines combinaisons de ces polymères. Cette étude est décrite dans le paragraphe V-1.

Les expériences de séparation électrostatique, effectuées sur une installation de laboratoire fournie par la société Prodecologia, sont présentées dans le paragraphe V-2. L'influence de chaque type de cylindre du dispositif de charge ainsi que les deux polarités de la tension appliquée à l'électrode de profil NACA (profil d'aile d'avion) du séparateur ont été étudiés.

Enfin, une application industrielle a pu être effectuée sur l'installation prototype PRD (paragraphe V-3) mettant en évidence l'influence de la tension appliquée au système d'électrodes sur la récupération et la pureté des produits de séparation.

V-1. Dispositif de charge à cylindre tournant

Dans un premier temps, l'étude s'est portée uniquement sur le dispositif de charge afin de définir sa configuration optimale, c'est-à-dire celle pour laquelle la charge acquise par les particules est la plus élevée.

A partir de cette configuration, deux séries triboélectriques ont été établies pour chaque matière des cylindres.

V-1.1. Optimisation de la charge acquise

Plusieurs facteurs peuvent influencer la charge acquise par les particules isolantes dans le dispositif de charge à cylindre tournant (décrit au paragraphe II-2.2 ; figure II–15). Parmi ces facteurs, nous comptons : son inclinaison et sa vitesse de rotation ainsi que la présence du cylindre intérieur et de deux jeux d'ailettes de hauteurs différentes (10 mm et 15 mm). Enfin, tous les éléments (cylindres intérieur et extérieur et ailettes) sont disponibles en deux matières : PEHD et PVC, en 2 longueurs : 200 mm et 400 mm et peuvent être combinés en un seul élément de 600 mm de long. 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. L'influence de la longueur du dispositif aurait mérité une étude même s'il est rationnel de considérer que plus le dispositif est long, plus la charge acquise par des particules le traversant est élevée puisque leur temps de parcours et le nombre d'impacts seront plus grands.

- **Influence de l'angle d'inclinaison et de la vitesse de rotation du cylindre extérieur :**

Dans un premier temps, nous avons cherché à déterminer les valeurs optimales de l'angle d'inclinaison du dispositif de charge et de la vitesse de rotation de son cylindre extérieur. Pour ce faire, nous avons utilisé les cylindres en PVC de 600 mm ainsi que quatre ailettes de 10 mm de haut correspondantes. Le cylindre intérieur avait une vitesse de rotation de 40 tr.min^{-1} (valeur maximale fournie par le dispositif). L'influence de la variation de l'angle d'inclinaison, α , entre 1° et 11° et celle de la vitesse de rotation, ω , entre 20 tr.min^{-1} et 100 tr.min^{-1} ont été étudiés sur la charge de 100 g de particules de HIPS (figure II–4 (b)).

Lors des expériences effectuées sur le dispositif de charge, l'erreur expérimentale était très faible (1,3 %) assurant ainsi une bonne répétabilité des résultats.

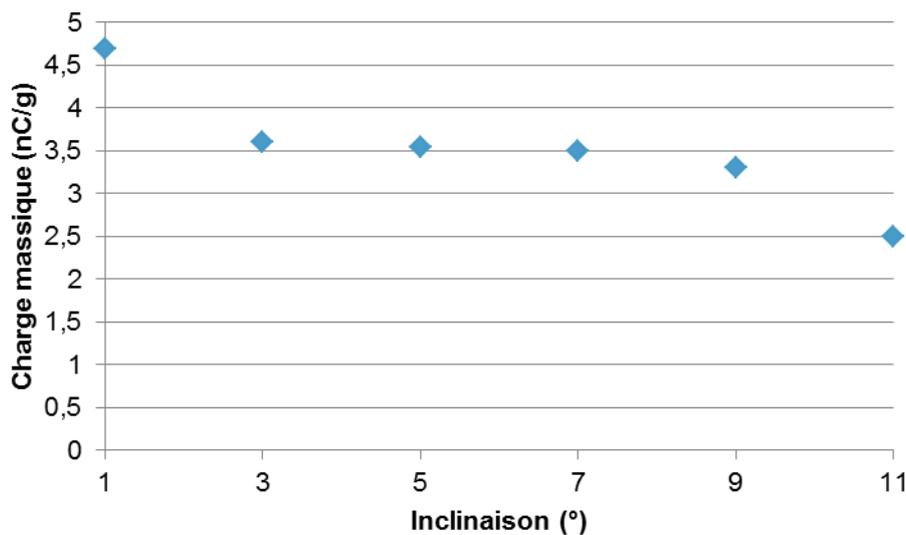


Figure V-1 : Evolution de la charge massique de particules de HIPS en fonction de l'inclinaison du dispositif de charge pour une vitesse de rotation du cylindre extérieur de 60 tr.min^{-1} .

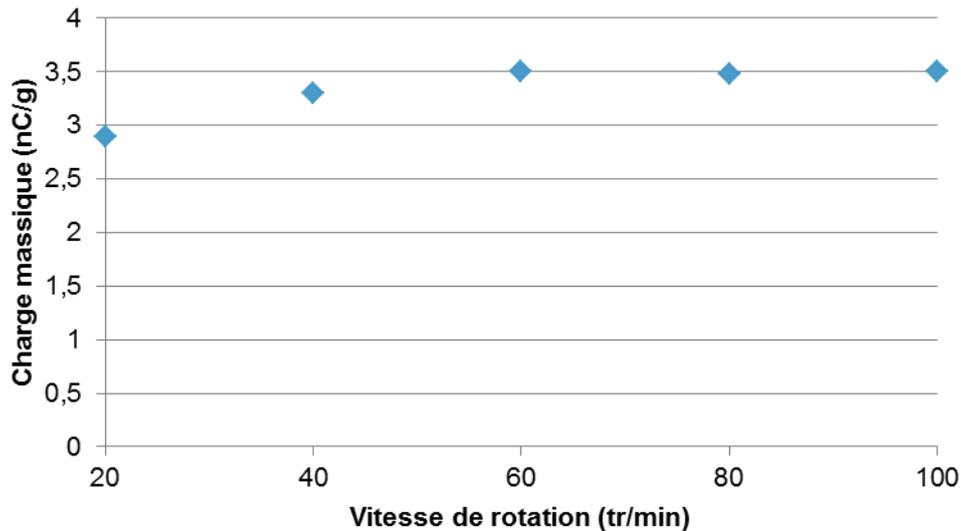


Figure V-2 : Evolution de la charge massique de particules de HIPS en fonction de la vitesse de rotation du cylindre extérieur pour un angle d'inclinaison de 5°.

Les résultats (figure V-1) montrent que plus l'inclinaison est faible, plus la charge acquise par les particules de HIPS est grande. En effet, lorsque l'inclinaison est faible, le temps de séjour des particules au sein du dispositif est plus long ce qui augmente le nombre d'impacts et la durée des frottements qui servent au transfert de charges. Lorsque l'inclinaison est très faible (inférieure ou égale à 3°), la charge est élevée (jusqu'à 470 nC pour 100 g à 1°) mais certaines particules ne parviennent pas à descendre le long du dispositif et sont éjectées en partie arrière entraînant ainsi des pertes de matière. Toutefois, entre 3° et 7° la charge semble être constante. Aussi, pour la suite de l'étude, l'inclinaison du dispositif a été fixée à 5°; valeur centrale de ce seuil pour lequel toutes les particules descendent correctement à l'intérieur du dispositif.

La charge augmente avec la vitesse de rotation du cylindre extérieur jusqu'à atteindre un seuil à partir de 60 tr.min⁻¹ (figure V-2). Au-delà de cette valeur la charge reste relativement constante. Ainsi, une vitesse de rotation de 80 tr.min⁻¹ a été conservée pour la suite de l'étude.

- **Influence du nombre et de la hauteur des ailettes et de la présence du cylindre intérieur :**

Une fois les valeurs optimales de l'inclinaison et de la vitesse de rotation du cylindre extérieur définies, une étude sur les ailettes et la présence du cylindre intérieur a été menée.

Ici, 100 g de particules de PE (figure II-4 (e)) ont été introduites dans le dispositif. Le tube utilisé était en PEHD et sa longueur était de 600 mm. La vitesse de rotation du tube était de 80 tr.min⁻¹ et celle du cylindre intérieur, lorsqu'il était présent, est à son maximum possible (environ 40 tr.min⁻¹). L'inclinaison du dispositif était de 5°. Les facteurs étudiés étaient alors le nombre d'ailettes placées à l'intérieur du tube, leur hauteur et la présence du cylindre intérieur. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau V-1.

L'erreur expérimentale obtenue lors de ces essais était de 2,2 %.

Chapitre V : Procédés de charge électrique et de séparation électrostatique de mélanges
granulaires isolant – isolant

Tableau V-1 : Influence du nombre et de la hauteur des ailettes et de la présence du cylindre intérieur sur la charge acquise par des particules de PE.

Cylindre intérieur (Oui/Non)	Ailettes (0/3/6) x hauteur (mm)	Q (nC)	RH (%)	T (°C)
Non	0	-48,5	57,8	22
		-49,4	57,8	22
		-49,7	57,7	22
	3 x 15	-71,8	58,3	21,9
		-72,4	58,3	21,9
		-75,5	58,3	21,9
	6 x 15	-107,8	58,8	21,6
		-108,1	58,7	21,6
		-100,2	58,8	21,6
Oui	0	-49,4	57,7	22
		-47	57,6	22
		-46,8	57,6	22
	3 x 15	-88,3	58,2	21,9
		-90,3	58,1	21,9
		-81,7	58	21,9
	6 x 15	-131	58,8	21,7
		-123,6	58,7	21,7
		-127,2	58,7	21,7
Oui	6 x 10	-68,9	53,8	22,7
		-66	53,6	22,7
		-68,5	53,5	22,7
Non	6 x 10	-64,3	53,4	22,7
		-65,6	53,4	22,7
		-65,9	53,4	22,7

Le premier constat de cette étude est que les résultats obtenus sur ce dispositif de charge sont fiables. En effet, trois essais confirment que l'étendue des mesures reste faible pour une même configuration.

La charge acquise par 100 g de particules de PE dans ce dispositif, sans ailettes et sans cylindre intérieur, est d'environ -49,2 nC. L'ajout du cylindre intérieur n'a aucun effet puisque les particules ne l'impactent pas si aucune ailette n'est présente. Lorsque les ailettes de 15 mm sont placées à l'intérieur du tube, on remarque que la charge augmente avec le nombre d'ailettes. En effet, le nombre d'impacts augmente entre les particules et le dispositif lorsque les ailettes sont nombreuses. De plus, lorsque ces ailettes sont en place, la présence du cylindre intérieur augmente encore la charge, les particules étant projetées contre celui-ci.

En revanche, la présence d'ailettes de 10 mm n'a que peu d'effet sur la charge des particules de PE. Certes, leur nombre augmente légèrement la charge acquise mais leur hauteur ne permet pas aux particules d'entrer fermement en contact avec le cylindre intérieur.

Ainsi, leur charge est quasiment identique avec ou sans cylindre intérieur et est environ deux fois moins élevée qu'avec les six ailettes de 15 mm. Notons ici que cette hauteur de 15 mm est limitée par les diamètres des cylindres intérieur et extérieur et par la taille des particules.

Ainsi, cette étude a pu démontrer l'efficacité du dispositif à transmettre une charge à des particules de PE. La présence de 6 ailettes de 15 mm de hauteur et du cylindre intérieur entraîne une charge maximale. Toutefois, dans cette configuration, il arrive que le tube extérieur se bloque et que la courroie patine empêchant alors le fonctionnement du dispositif.

Pour la suite de l'étude, le dispositif de charge possèdera 6 ailettes de 15 mm mais aucun cylindre intérieur ne sera présent pour éviter ce phénomène.

V-1.2. Séries triboélectriques

Le second objectif de cette étude était de déterminer la série triboélectrique correspondante à chaque tube (PEHD et PVC). Des essais ont donc été faits dans la configuration optimale du dispositif avec plusieurs types de particules (figure II-4) : ABS (a), HIPS (b), PC (c), PC Cristal (d), PE (e), PP (f), PS (g), PS Cristal (h) et PVC (i).

Pour chaque matière, au moins deux essais ont été effectués afin de déterminer une valeur moyenne. Dans certains cas, un troisième essai a pu être fait afin de conforter les résultats. Ainsi, l'erreur maximale obtenue lors des essais était de 21,2 % pour le PS Cristal avec le tube en PVC. Pour tous les autres essais, l'erreur ne dépassait pas 7 %. Avec le tube en PEHD, l'humidité relative était comprise entre 56,8 % et 57,3 % et la température entre 23,9°C et 24,2°C lors des essais. Avec celui en PVC, l'humidité était comprise entre 45,8 % et 50,8 % et la température entre 23,9°C et 24,9°C.

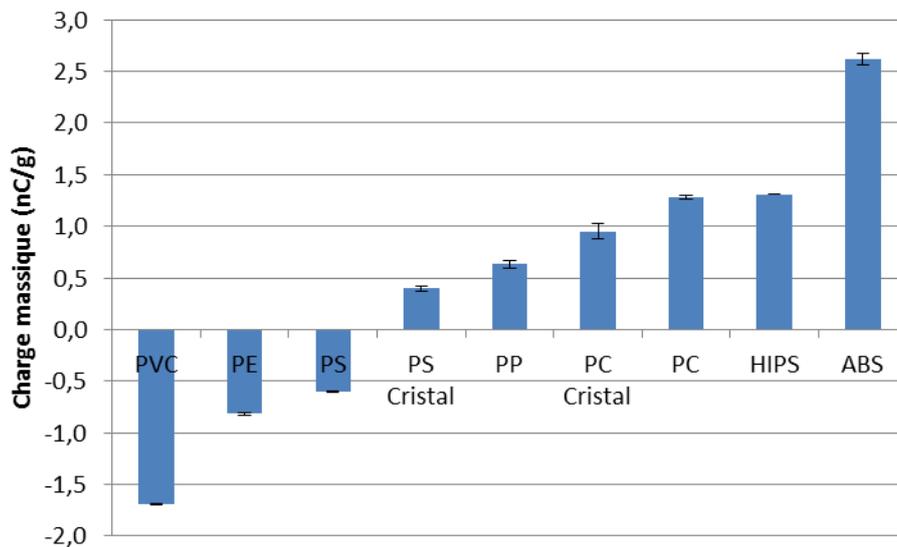


Figure V-3 : Charge massique acquise par différents types de particules grâce au dispositif de charge équipé du tube en PEHD.

Avec le tube en PEHD, seules trois matières se chargent négativement (figure V-3) : le PVC, le PE et le PS. Les 6 autres se chargent positivement. La charge la plus élevée est celle de l'ABS avec une charge moyenne positive de 261,2 nC pour 100 g.

Avec le tube en PVC (figure V-4), les charges acquises par les particules sont plus élevées et du même signe sauf dans le cas du PP où la polarité change et devient négative. La charge maximale positive est toujours obtenue par l'ABS (612,9 nC) alors que celle négative est acquise par les particules de PVC (-373,1 nC). Le PS Cristal acquiert toujours une charge faible malgré le changement de tube.

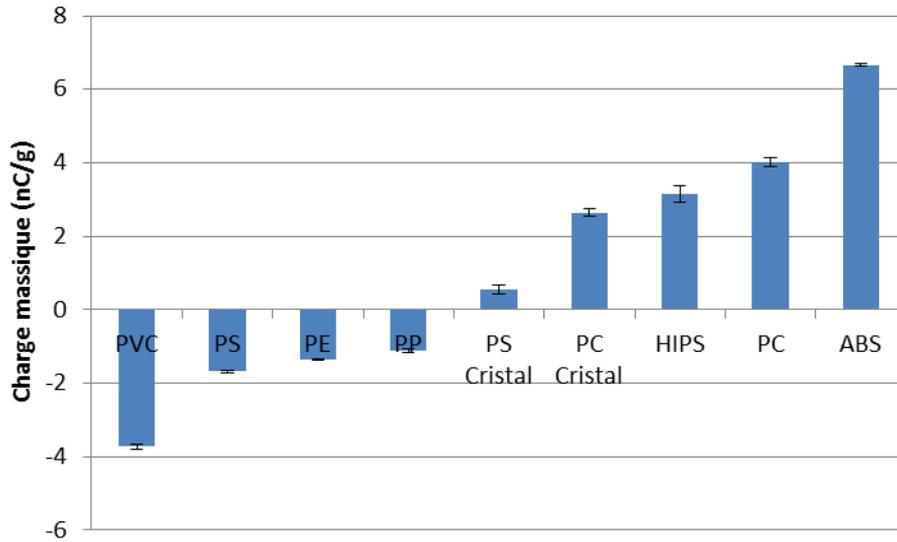


Figure V-4 : Charge massique acquise par différents types de particules grâce au dispositif de charge équipé du tube en PVC.

Il est intéressant de noter que, pour les deux tubes, le PS se charge négativement alors que le PS cristal, qui est de même nature, se charge positivement. De plus, la matière correspondante au cylindre se charge négativement. En effet, dans la littérature, il a souvent été démontré que dans un mélange de particules de tailles différentes, les particules les plus petites ont tendance à se charger négativement. Ici, le cylindre a le rôle d'une grande (très grande) particule.

Les séries triboélectriques se présentent comme suit (figure V-5) :

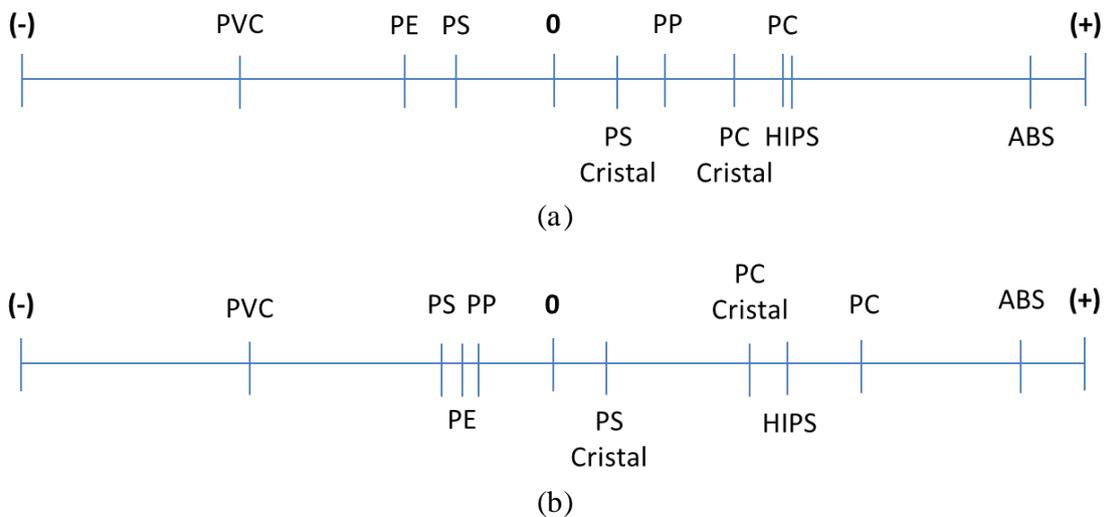


Figure V-5 : Séries triboélectriques obtenues pour le tube en PEHD (a) et en PVC (b).

V-2. Application à la séparation de mélanges isolant – isolant

Une fois les séries triboélectriques déterminées pour chaque type de cylindre, des expériences de séparation ont été menées afin de voir le comportement du dispositif de charge en présence simultanée de deux matières et d'étudier la faisabilité de certaines séparations par son utilisation.

V-2.1. Procédure expérimentale

La séparation des matières chargées par le dispositif de charge s'est effectuée avec le séparateur de laboratoire de la société ukrainienne Prodecologia. Dans ce séparateur (figure V-6), les particules chargées tombent sur une table vibrante (1) qui répartie les particules uniformément et les dépose en monocouche à la surface d'un cylindre tournant relié à la terre (2). Les particules traversent alors un champ électrique créé entre celui-ci et une électrode de profil NACA, symétrique dans le sens de sa longueur (3). Cette électrode est connectée à une source de haute tension continue réversible. Les particules chargées de manière opposées à la tension appliquée sont alors attirées par l'électrode « NACA », celles chargées de la même polarité sont repoussées. Les particules ainsi séparées sont récupérées dans les compartiments du collecteur (5). Un volet déflecteur dont l'inclinaison est variable est présent entre les deux compartiments principaux, C1 et C2. Sauf cas exceptionnel, le produit récupéré dans C3 n'est issu que de rebonds des particules. Dans les essais suivants, ce compartiment sera considéré comme étant composé à 50 % de chaque type de particule composant le mélange à séparer.

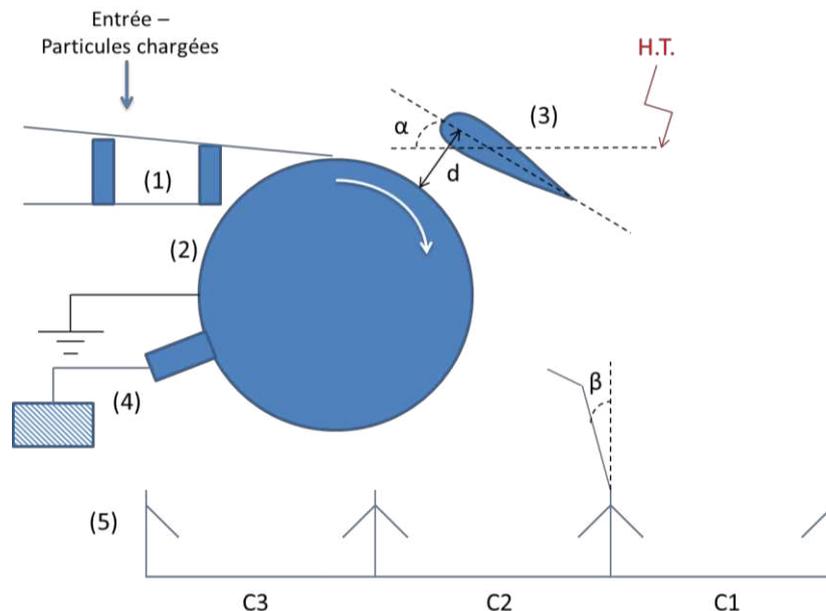


Figure V-6 : Séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante de la société Prodecologia. (1) Table vibrante ; (2) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (3) Electrode « NACA » reliée à une source de haute tension réversible ; (4) Balai ; (5) Collecteur (3 compartiments).

Pour tous les résultats ci-après, la distance entre l'électrode « NACA » et l'électrode de terre, d , était de 100 mm et son angle d'inclinaison, α , de 34° par rapport à l'horizontale. La vitesse de rotation de l'électrode cylindrique tournante était de 40 tr.min^{-1} , l'angle d'inclinaison du déflecteur, β , de 13° par rapport à la verticale et l'amplitude de vibration de

la table vibrante de 40 %. Des essais préliminaires ont montrés que de tels réglages donnent de bons résultats de séparation tout en évitant la présence d'arc électrique entre les deux électrodes et la présence d'impact entre les particules et l'électrode « NACA ».

Les essais ont été faits sur 6 mélanges de 100 g composés à parts égales de PE – PP, PP – HIPS, PE – PVC, PE – HIPS, PP – PVC et PVC – HIPS. Ces matières ont été choisies car elles font partie des plus utilisées dans le domaine industriel.

La tension appliquée à l'électrode « NACA » était de ± 35 kV (polarité positive ou négative). L'influence de la polarité de la tension va jouer sur les résultats de séparation en attirant l'un ou l'autre type de particule selon son positionnement dans la série triboélectrique.

Chaque mélange a été chargé dans le dispositif de charge à cylindre tournant avec l'un des deux types de tube (PEHD et PVC), en utilisant sa configuration optimale définie au paragraphe V-1.1, a été récupéré dans un bac isolant puis a tout de suite été déposé dans la trémie de la table vibrante du séparateur déjà en fonctionnement. Ainsi, les pertes de charge ont été limitées. L'erreur moyenne obtenue lors des essais de séparation était de 6,6 %.

Les conditions d'humidités et de températures lors des essais sont listées dans le tableau V-2.

Tableau V-2 : Conditions d'humidités et de températures pour les différents essais de séparation.

	Tube PEHD		Tube PVC	
	Polarité positive	Polarité négative	Polarité positive	Polarité négative
RH_{\min} (%)	61,6	66,4	62,0	64,7
RH_{\max} (%)	65,5	68,1	64,2	65,9
T_{\min} (°C)	21,8	21,1	24,4	22,7
T_{\max} (°C)	22,9	21,9	24,8	22,9

V-2.2. Résultats obtenus avec le tube en PEHD

- **Polarité positive de la haute tension :**

La figure V-7 montre les résultats obtenus pour chaque mélange avec une tension appliquée à l'électrode « NACA » de 35 kV.

Pour tous les mélanges, la pureté du produit récupéré dans le compartiment C1 est supérieure à 80 %. La pureté de celui récupéré dans le compartiment C2 est supérieure à 70 %. Le mélange PVC – HIPS est celui qui se sépare le mieux (figure V-8) puisque 98,6 % du PVC est récupéré dans le compartiment C1 pur à 99,6 % (figure V-7 (a)), alors que 94,6 % du HIPS est récupéré dans le compartiment C2 avec une pureté de 98,9 %.

Cette très bonne séparation s'explique par la série triboélectrique (figure V-3). En effet, les deux types de particules acquièrent une charge élevée avec des polarités opposées (-169,5 nC pour le PVC et +131 nC pour le HIPS) en contact avec le tube en PEHD.

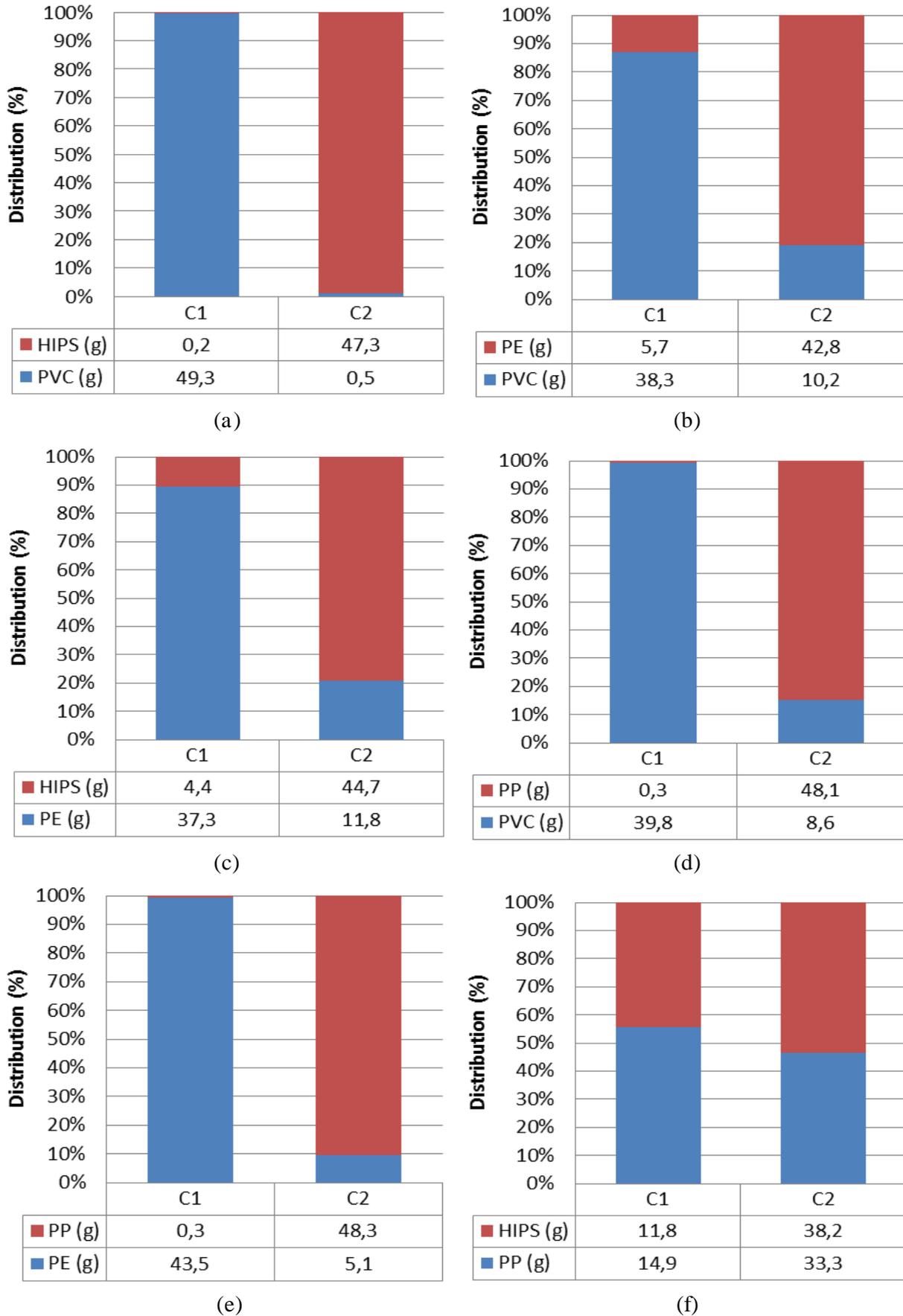


Figure V-7 : Distribution des particules dans les compartiments du collecteur pour le mélange (a) PVC-HIPS ; (b) PE-PVC ; (c) PE-HIPS ; (d) PP-PVC ; (e) PE-PP et (f) PP-HIPS.



Figure V-8 : Résultats de séparation du mélange PVC - HIPS.

De même, le mélange PE – PP (figure V–7 (e)) donne de bons résultats de séparation. Le PE récupéré est pur à 99,3 % et le PP à 90,5 %. En effet, ces deux composants se chargent de manières opposées mais avec des valeurs relativement faibles (-81,8 nC pour le PE et +63,2 nC pour le PP).

Dans le cas du mélange PE – HIPS (figure V–7 (c)), une part importante de PE n'est pas collecté dans C1 ce qui diminue la pureté du HIPS dans C2. Il est possible de changer la polarité de la haute tension appliquée à l'électrode « NACA » afin d'attirer le HIPS qui acquiert naturellement une charge plus élevée (en valeur absolue) que le PE.

Lorsque les deux types de particules composant le mélange se chargent avec la même polarité au contact du tube du dispositif de charge en PEHD, comme c'est le cas pour les mélanges PE – PVC (tous deux négatifs ; figure V–7 (b)) et PP – HIPS (tous deux positifs ; figure V–7 (f)), la séparation s'avère plus difficile.

En effet, si les deux types de particules sont chargés négativement, ils sont tous deux attirés par l'électrode « NACA ». Seules les différences de niveaux de charge et de densité entre les deux type de particules permet d'attirer l'un plus fortement que l'autre. C'est pourquoi, dans le cas du mélange PE – PVC (figure V–7 (b)), le PVC, ayant une charge plus élevée, est majoritairement collecté dans le compartiment C1.

En ce qui concerne le mélange PP – HIPS, ce sont les particules les moins chargées qui sont récupérées dans le compartiment C1 car elles sont moins repoussées par l'électrode haute tension. Toutefois, la quantité de particules collectée dans ce compartiment est faible et les produits collectés dans les deux compartiments sont mixtes.

• **Polarité négative de la haute tension :**

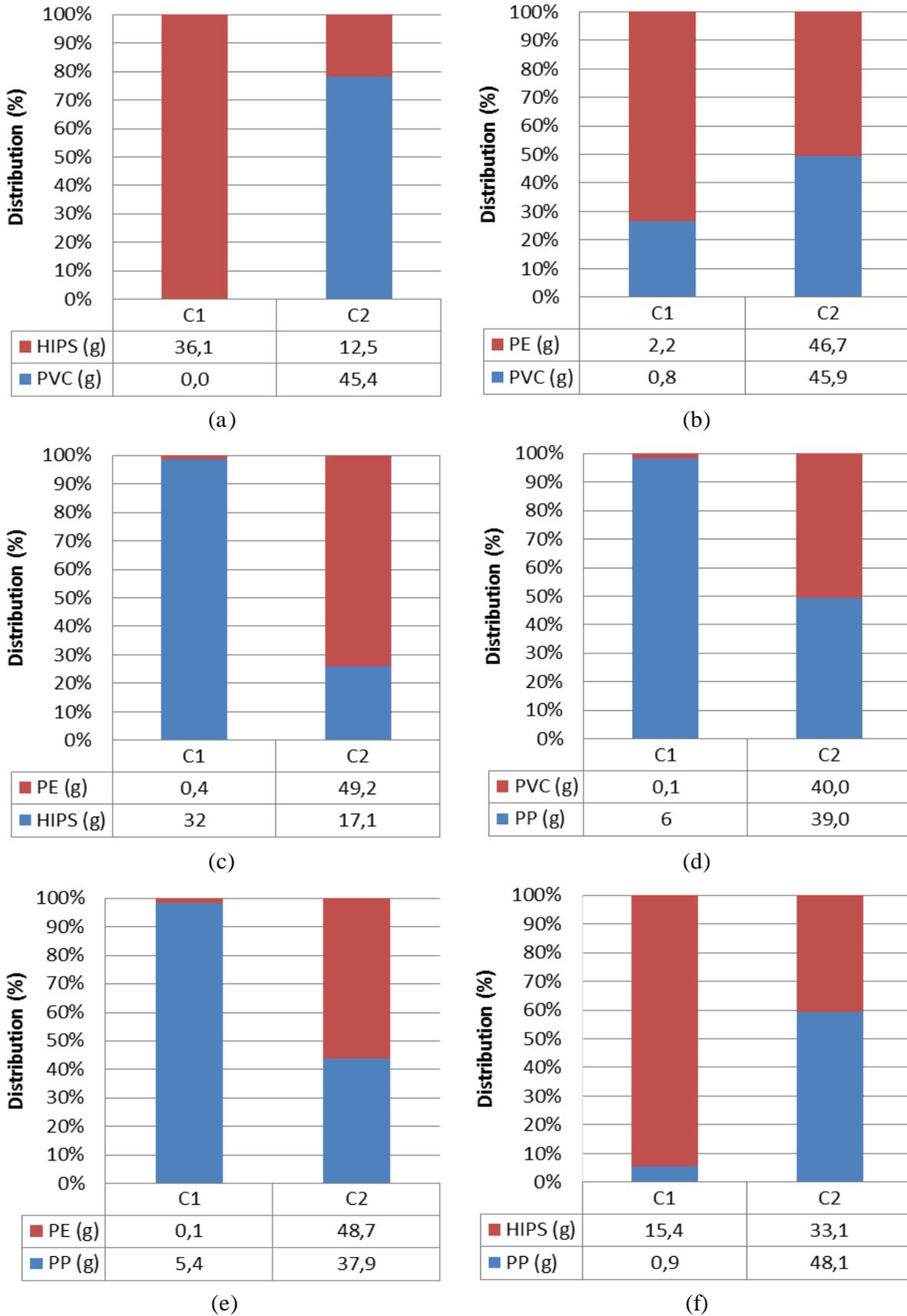


Figure V-9 : Distribution des particules dans les compartiments du collecteur pour les mélanges (a) PVC-HIPS, (b) PE-PVC ; (c) PE-HIPS ; (d) PP-PVC ; (e) PE-PP et (f) PP-HIPS.

Afin d'avoir les meilleurs résultats de séparation possible, la polarité de la haute tension appliquée à l'électrode « NACA » a été inversée et donc négative. De cette façon, pour les essais suivants les particules chargées positivement seront attirées par l'électrode et collectées dans le compartiment C1. Les essais effectués pour une tension de -35 kV ont donné les résultats présentés en figure V-9.

Pour tous les mélanges, la pureté du produit récupéré dans C1 est très élevée (supérieure ou égale à 95 %) sauf dans le cas du mélange PE – PVC (figure V-9 (b)). En effet, ces deux matières se chargent négativement au contact du tube en PEHD. Elles sont donc toutes deux repoussées par l'électrode haute tension. La quantité de produit récupérée dans le compartiment C1 est donc très faible (3 g). Le PE, se chargeant moins bien que le PVC, représente la majorité de ce compartiment.

Le principal défaut de l'utilisation d'une polarité négative est que dans de nombreux cas, la quantité de matière récupérée dans C1 est faible. En effet, soit les deux matières se chargent négativement (PE et PVC) soit leur charge est trop faible pour qu'elles soient attirées par l'électrode haute tension (PP). Par conséquent, le produit collecté dans C2 a une faible pureté. Seul le HIPS est suffisamment chargé pour être séparé, sa pureté atteint même 100 % dans le cas du mélange PVC – HIPS (figure V-9 (a)).

Le mélange PP – HIPS (étant le mélange donnant les moins bons résultats de séparation en polarité positive) donne de meilleurs résultats (figure V-9 (f)) dans le cas d'une polarité négative en termes de pureté (environ 95 % contre 55,8 % pour le même tube en polarité positive). En revanche, son taux de récupération n'est que de 31 %.

Avec le tube en PEHD, de bons résultats de séparation sont obtenus si la polarité de la tension appliquée à l'électrode « NACA » est positive. La polarité négative donne de bons résultats de puretés dans C1 mais avec de faibles récupérations ce qui oblige à traiter de nouveau le produit récupéré dans C2.

V-2.3. Résultats obtenus avec le tube en PVC

Afin de comparer les résultats de séparations obtenus avec le tube en PEHD et de savoir quel tube est le plus adéquat à la séparation des différents mélanges, les mêmes expériences ont été effectuées avec le tube en PVC du dispositif de charge pour une tension positive et négative appliquée au système d'électrodes.

- **Polarité positive de la haute tension :**

Dans le cas d'une polarité positive de la tension, le mélange PVC – HIPS se sépare là encore de manière très efficace puisque 94,7 % du PVC est récupéré pur à 99,8 % et 95,2 % du HIPS est obtenu avec une pureté de 94,9 % (figure V-10 (a)). Ceci s'explique par la bonne position des deux matériaux dans la série triboélectrique (figure V-5 (b)). En effet, le PVC se charge négativement et le HIPS positivement. De plus, tous deux acquièrent des niveaux de charge élevés (figure V-4).

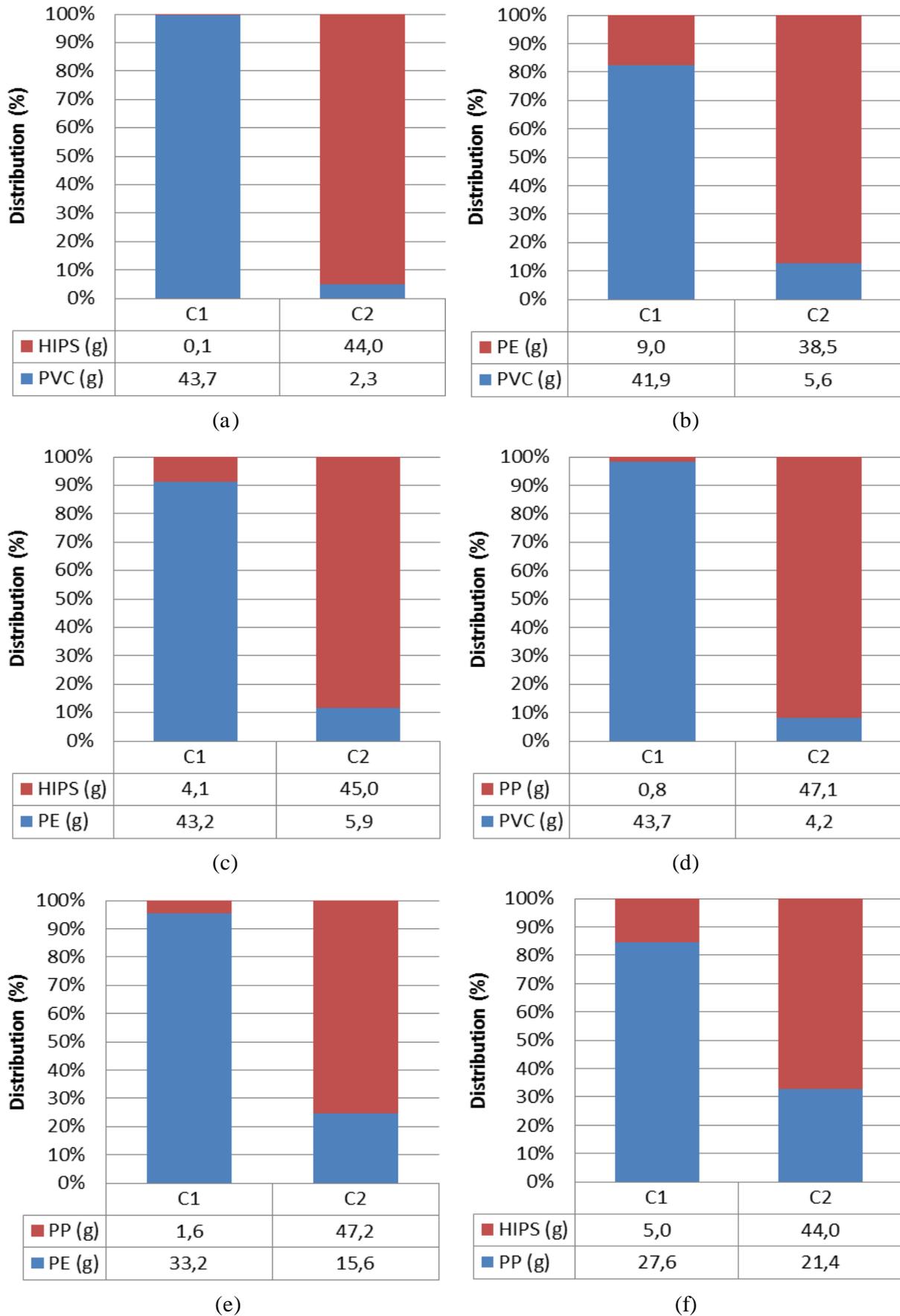


Figure V-10 : Distribution des particules dans les compartiments du collecteur pour les mélanges (a) PVC-HIPS ; (b) PE-PVC ; (c) PE-HIPS ; (d) PP-PVC ; (e) PE-PP et (f) PP-HIPS.

En revanche, la séparation d'un mélange de PE et de PVC (figure V-10 (b)), s'avère moins efficace puisque les deux matières se chargent négativement au contact du tube en PVC.

Toutefois, le mélange PP – PVC, dont les matières se chargent toutes deux négativement, se sépare relativement bien (figure V-10 (d)). En effet, la charge du PP est plus faible que celle du PVC et est donc moins facilement attiré par l'électrode haute tension ce qui améliore la séparation. Ainsi, le PVC est attiré sans pour autant être souillé par le PP.

Le mélange PP – PE est lui aussi un mélange dont les deux composants se chargent négativement. Pourtant, sa séparation est encore différente (figure V-10 (e)). En effet, les deux matières se chargent faiblement et le PE est celui qui se charge le mieux et qui est donc le plus fortement attiré. Ainsi, bien que son taux de récupération soit faible (67,5 %), sa pureté reste élevée (95,4 %). Le PP récupéré dans le compartiment C2 n'a pas une bonne pureté à cause des particules de PE insuffisamment chargées pour être récupérées dans le compartiment C1.

Par conséquent, afin de séparer correctement deux matières se chargeant de même polarité, il est nécessaire que l'une des deux matières ait une charge faible par rapport à l'autre. Ainsi, en utilisant une valeur de tension adaptée, il sera possible d'attirer un type de particules sans pour autant affecter le second.

Deux autres mélanges posent problème bien que leurs composants se chargent de manières opposées : PE – HIPS (figure V-10 (c)) et PP – HIPS (figure V-10 (f)). Au regard de la série triboélectrique (figure V-5 (b)), le HIPS se charge positivement et de manière importante (314,9 nC) et le PP et le PE se chargent négativement mais de façon plus faible (respectivement -111,1 nC et -135,4 nC). Pour rappel, la polarité de la haute tension est positive, on cherche donc à attirer le PE ou le PP c'est-à-dire les matériaux se chargeant le moins bien. Ici, une polarité négative de la haute tension permettrait donc d'attirer le HIPS et donc d'améliorer la séparation.

- **Polarité négative de la haute tension :**

Des essais sur les mêmes mélanges mais avec une tension de -35 kV ont été effectués et sont présentés sur la figure V-11.

Là encore, la quantité de produit attirée par l'électrode haute tension est faible dans la majorité des cas (exception faite des mélanges PVC – HIPS (figure V-11 (a)) et PE – HIPS (figure V-11 (c))) puisque seul le HIPS se charge négativement au contact du cylindre en PVC.

De manière générale, les produits collectés sont proches de ceux obtenus avec le tube en PEHD pour la même polarité.

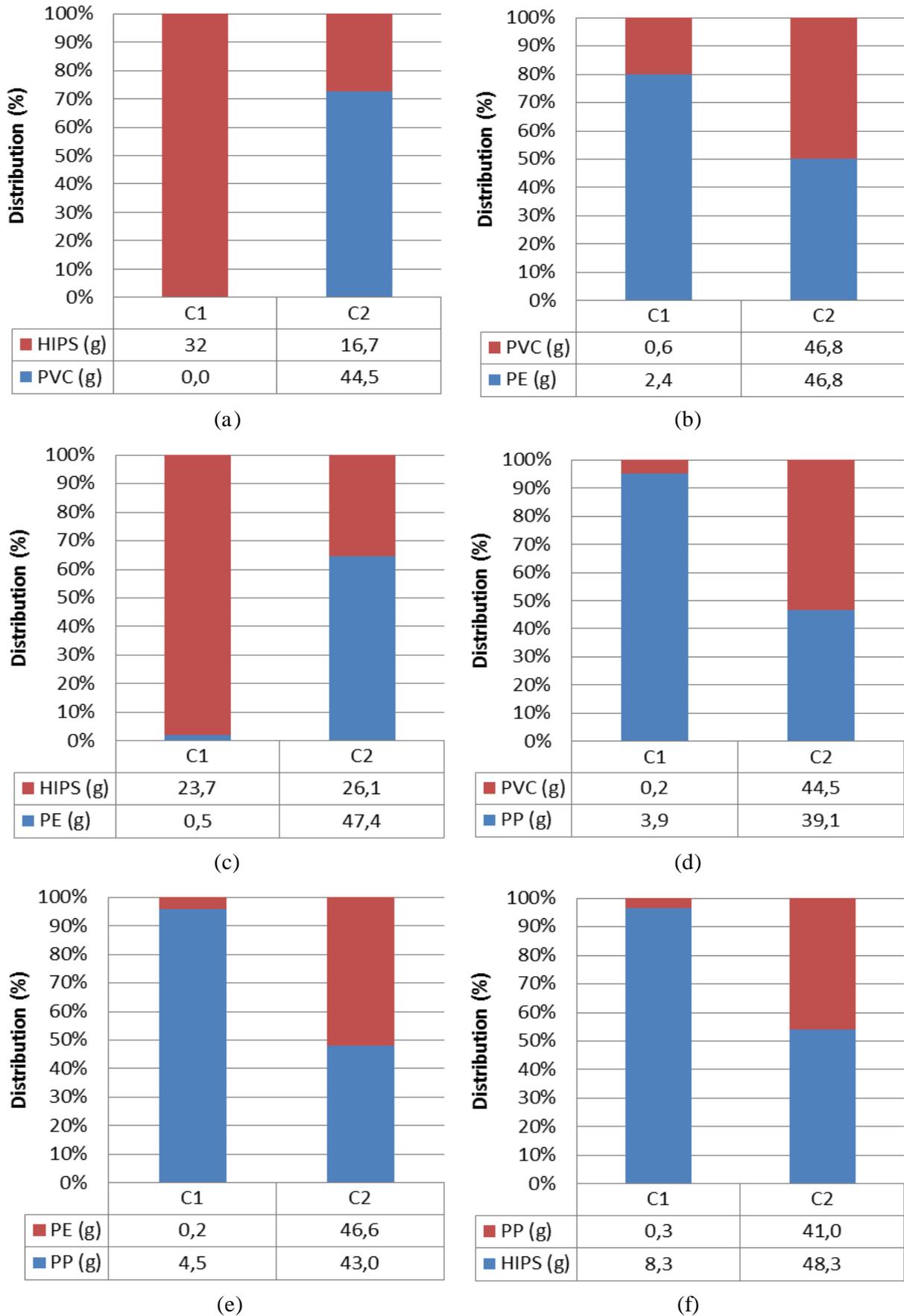


Figure V-11 : Distribution des particules dans les compartiments du collecteur pour les mélanges (a) PVC-HIPS ; (b) PE-PVC ; (c) PE-HIPS ; (d) PP-PVC ; (e) PE-PP et (f) PP-HIPS.

V-3. Application industrielle

Des essais ont été effectués avec l'installation prototype PRD utilisant les deux électrodes cylindriques tournantes reliées à deux sources de haute tension de polarité opposées (figure II-18).

Les particules ont été chargées par le dispositif de charge à cylindre tournant utilisant le tube en PVC et la configuration optimale obtenue au paragraphe V-1 (figure V-12). Par la suite, les particules sont déposées sur la table vibrante du deuxième passage de PRD qui les transportent jusqu'au système d'électrodes.

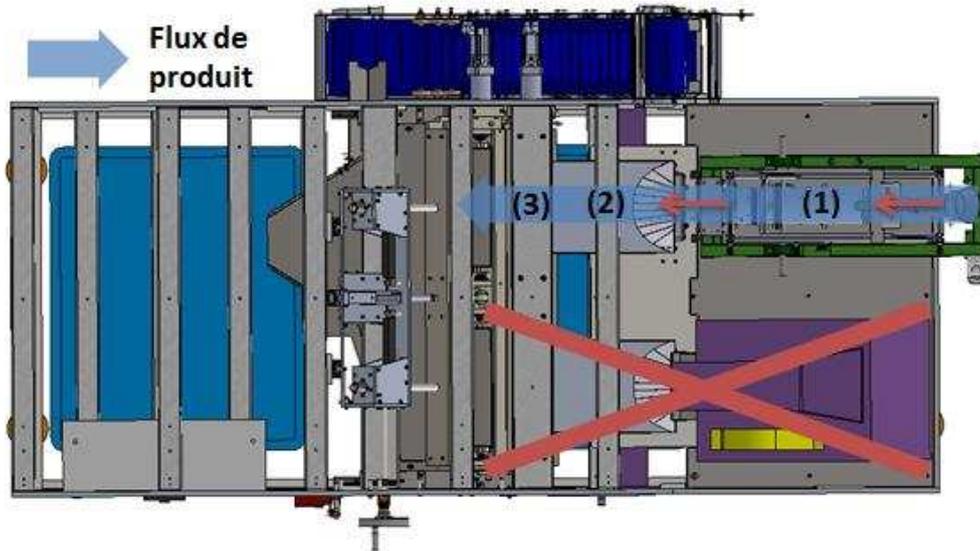


Figure V-12 : Vue de dessus de l'installation PRD modifiée pour le tri des plastique. (1) Dispositif de charge à cylindre tournant ; (2) Table vibrante ; (3) Système d'électrodes.

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe V-2, la séparation électrostatique de mélanges d'isolants donne de meilleurs résultats lorsque ce sont les particules chargées négativement qui sont attirées et celles chargées positivement qui sont repoussées.

L'électrode inférieure était donc connectée à une source négative de tension alors que l'électrode supérieure était connectée à une source positive. Ainsi, l'amplitude de tension entre les deux électrodes, U_{Amp} , a été calculée de la manière suivante :

$$U_{Amp} = U_{Esup} - U_{Einf} \quad (V-1)$$

où U_{Esup} est la tension positive appliquée à l'électrode supérieure et U_{Einf} est la tension négative appliquée à l'électrode inférieure.

L'installation prototype permet la distinction de trois produits par le biais de deux volets (figure V-13 (4) et (5)) : les deux isolants séparés et le mixte. A terme, le mixte sera traité en continu afin d'améliorer la pureté des produits récupérés.

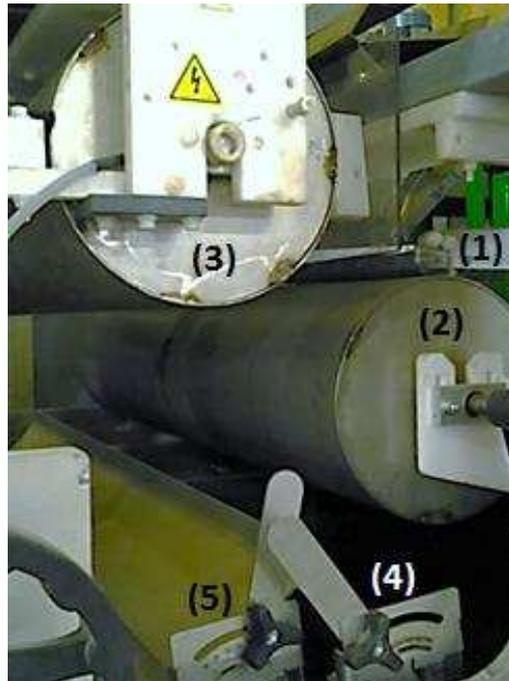


Figure V-13 : Installation prototype PRD. (1) Table vibrante ; (2) Electrode cylindrique tournante reliée à une source de haute tension négative ; (3) Electrode cylindrique tournante reliée à une source de haute tension positive ; (4) Réglage de l'inclinaison du volet séparant les compartiments mixte et C2 ; (5) Réglage de l'inclinaison du volet séparant les compartiments C1 et mixte.

Dans le paragraphe V-2, nous avons vu que, dans la majorité des cas, le produit récupéré dans C1 a une pureté plus élevée que celui récupéré dans C2. La difficulté majeure est donc d'obtenir une pureté et une récupération élevées des produits récupérés dans C2.

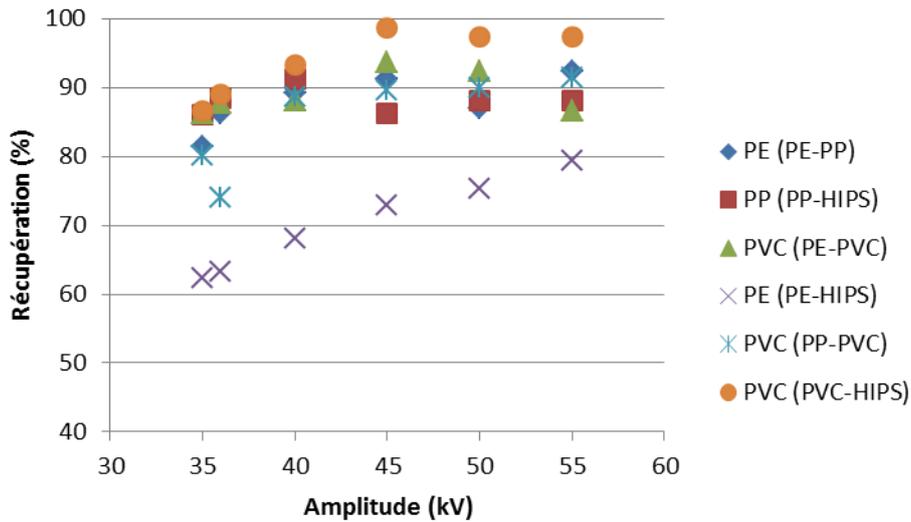
Le principal objectif de cette étude est donc de définir les conditions pour lesquelles le produit récupéré dans C2 aura une pureté et une récupération élevée. Ici, le volet séparant C1 du compartiment mixte a été accolé à celui séparant C2 et le mixte. De cette façon, le mixte n'est pas pris en compte mais est collecté avec C1.

Par la suite, les puretés et récupérations des produits récupérés dans C1 seront améliorées en jouant sur les réglages du volet séparant le compartiment mixte du compartiment C1.

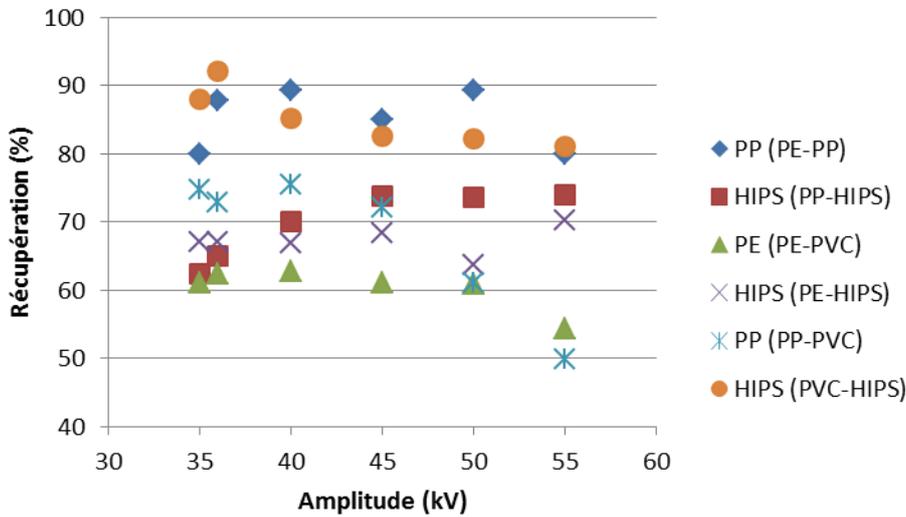
Les mêmes mélanges que dans le paragraphe V-2 ont été utilisés : PE – PP, PP – HIPS, PE – PVC, PE – HIPS, PP – PVC et PVC – HIPS.

L'influence du potentiel de tension présent entre les électrodes (entre 35 kV et 55 kV) sur la séparation électrostatique de ces mélanges a été étudiée. Les récupérations et les puretés des produits majoritairement collectés dans C1 et C2 en fonction de la tension appliquée au système d'électrodes peuvent être examinées sur les figures V-14 et V-15. Lors de ces expériences, l'erreur était de 5,4 %.

Dans C1 (figure V-14 (a)), la récupération du produit attiré augmente avec la tension jusqu'à saturation aux alentours de 45 kV sauf dans le cas du PE issu du mélange PE – HIPS où sa récupération continue d'augmenter au-delà de cette valeur.



(a)

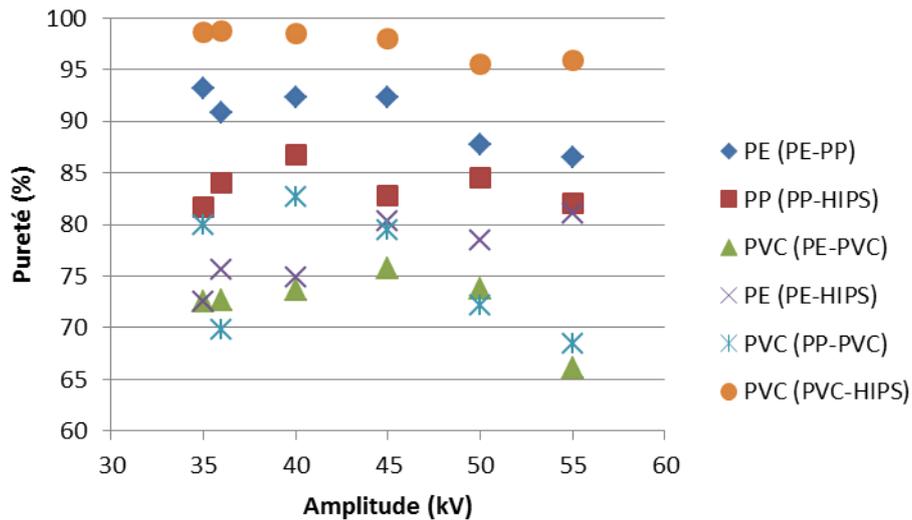


(b)

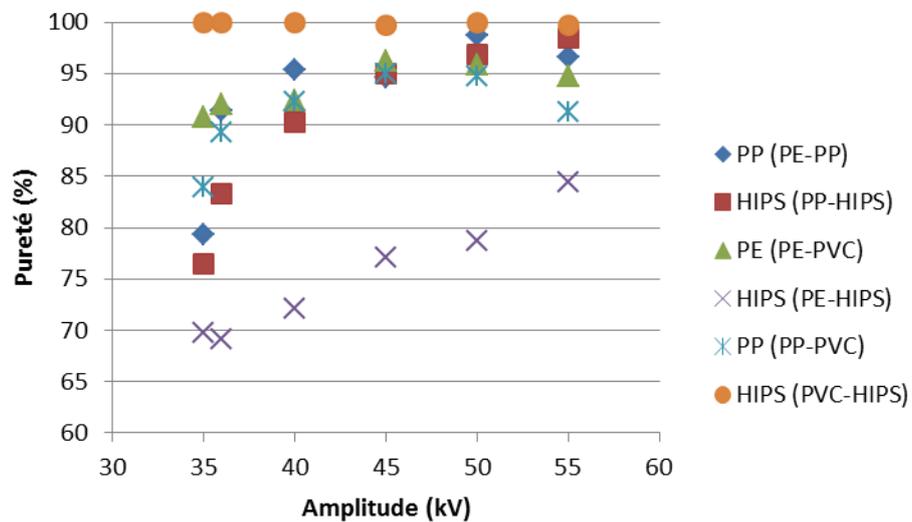
Figure V-14 : Récupération des produits en fonction de l'amplitude de tension entre les deux électrodes pour le produit majoritaire de chaque mélange dans C1 (a) et dans C2 (b).

Pour la majorité des mélanges, il est possible de récupérer environ 90 % de la matière se chargeant négativement. Il est même possible de récupérer 98,6 % du PVC présent dans le mélange PVC – HIPS.

En revanche, dans C2 (figure V-14 (b)), la récupération reste stable, voir diminue, lorsque la tension appliquée au système d'électrodes augmente. Une explication serait que certaines micro-décharges se produisent à la surface de l'électrode inférieure sur laquelle les particules tombent. Ainsi, lorsque la tension appliquée à cette électrode est suffisamment élevée, un léger bombardement ionique chargerait les particules négativement et diminuerait donc la charge initialement positive des particules collectées dans C2 voir l'inverserait. De plus, cela améliorerait la charge des particules négatives qui sont attirées par l'électrode supérieure.



(a)



(b)

Figure V-15 : Pureté des produits en fonction de l'amplitude de tension entre les deux électrodes pour le produit majoritaire de chaque mélange dans C1 (a) et dans C2 (b).

L'augmentation de la tension appliquée aux électrodes entraine une diminution de la pureté des produits récupérés dans C1 contrairement aux produits récupérés dans C2 dont la pureté augmente avec la tension.

Dans C1 (figure V-15 (a)), les micro-décharges peuvent expliquer ce phénomène. En effet, les matières peu chargées positivement à la sortie du dispositif de charge deviendront négatives et seront alors attirées par l'électrode supérieure si la tension appliquée à l'électrode inférieure est suffisamment élevée. De plus, les particules chargées fortement négativement en sortie du dispositif de charge verront leur charge encore augmenter et seront tellement attirées par l'électrode supérieure qu'elles l'impacteront et seront collectées dans C2. C'est notamment ce qui se passe dans le cas du mélange PVC – HIPS où l'on constate une diminution de la pureté du HIPS récupéré dans C2 (figure V-15 (b)).



Figure V-16 : Trajectoires des particules visualisées par la caméra rapide à différents instants. (I) Electrode cylindrique tournante reliée à une source de haute tension négative ; (II) Electrode cylindrique tournante reliée à une source de haute tension de polarité positive ; (1) Particule de PVC impactant l'électrode supérieure ; (2) Zone de déplacement des particules de HIPS ; (3) Zone de déplacement de la majorité des particules de PVC.

De grandes différences de pureté existent selon les mélanges traités. En effet, dans le cas du PVC récupéré dans C1 (figure V-15 (a)) pour une amplitude de tension de 36 kV, il est

possible d'avoir une pureté de 98,7 % s'il est mélangé à du HIPS mais seulement une pureté de 69,8 % en présence du PP. La série triboélectrique faite en V-1 explique ce phénomène (figure V-5 (b)). En effet, le PVC se charge négativement, tout comme le PP alors que le HIPS se charge positivement dans le dispositif de charge.

Quelques visualisations des trajectoires des particules ont été effectuées grâce à une caméra rapide. La figure V-16 montre certaines images obtenues avec un mélange PVC – HIPS. Outre le fait que les trajectoires des deux types de particules se distinguent bien par les zones (2) et (3), les images montrent que l'impact de certaines particules contre l'électrode supérieure (II) n'affecte pas les résultats de séparation. En effet, la particule de PVC (1) décolle très tôt de l'électrode inférieure (I) et impacte l'électrode supérieure (II) entre les figures V-16 (c) et (d). Toutefois, comme la particule conserve sa charge initiale, elle continue, malgré son rebond, à être attirée par l'électrode supérieure (II) et revient dans la zone (3) de déplacement « normal » des particules de PVC.

Habituellement, il est plus difficile d'avoir une pureté élevée dans C2 au contraire de C1 puisque seules les particules suffisamment chargées sont attirées et collectées dans C1. Le produit contenu dans C2 est alors composé des particules repoussées par la haute tension et celles qui ne sont pas suffisamment attirées. Dans le cas de l'installation prototype industrielle, PRD, c'est l'inverse. Le champ électrique étant plus intense, les particules sont plus fortement attirées et leurs trajectoires se distinguent d'autant plus. Ainsi, le produit récupéré dans C2 est pur contrairement au produit récupéré dans C1. Ceci est un avantage puisque l'installation prototype est capable de traiter de nouveau le produit mixte grâce aux volets de réglages.

Lors de la rédaction de ce mémoire de thèse des modifications sont en cours sur l'installation prototype PRD afin de pouvoir faire passer le produit mixte à nouveau dans le dispositif de charge dans le but de régler l'inclinaison du volet séparant C1 et le mixte et de confronter ce prototype et son dispositif de charge à un fonctionnement industriel.

V-4. Conclusions

Le dispositif de charge à cylindre tournant permet la charge de nombreuses matières plastiques. Plus son inclinaison est faible (dans la limite du bon fonctionnement du dispositif) et plus la vitesse de rotation du cylindre extérieur est élevée, plus la charge acquise par les particules est importante. La présence, à l'intérieur du tube, d'ailettes et leur hauteur jouent également sur la charge. La charge est maximale lorsque six ailettes de 15 mm de hauteur sont placées. En revanche, la présence du cylindre intérieur n'est pas optimale. Certes, il permet une augmentation de la charge lorsque les ailettes de 15 mm sont en place mais le fonctionnement est limité par certaines particules qui se bloquent entre les ailettes et le cylindre intérieur empêchant ainsi la rotation des deux cylindres. Aucun blocage n'est constaté lorsque les ailettes de 10 mm sont présentes mais elles ne permettent pas un contact entre les particules et le cylindre intérieur. Dans ce cas, le cylindre intérieur n'est donc pas utile.

Les séries triboélectriques établies grâce au dispositif de charge ont permis d'expliquer les résultats de séparation électrostatiques de six mélanges isolants. Globalement, la configuration utilisant le cylindre extérieur en PVC et une tension positive appliquée à l'électrode « NACA » du séparateur de la société Prodecologia, donne les meilleurs résultats de séparation.

Une polarité négative de l'électrode haute tension est à proscrire pour la majorité des mélanges étudiés tant la récupération des produits collectés dans C1 est faible. Cela s'explique par le fait que deux ou trois matières (PE, PVC et PP (selon le tube utilisé)) se chargent négativement sur les quatre. De plus, il faut que la charge positive que les particules de PP ou de HIPS acquièrent soit suffisamment élevée pour que celles-ci soient convenablement attirées. Ainsi, seul le HIPS est susceptible d'être correctement séparé si la tension est négative.

Enfin, la séparation industrielle de mélanges d'isolants sur le prototype PRD est prometteuse. Les produits récupérés dans C2 ont des niveaux de puretés élevés. Le réglage du volet séparant le compartiment mixte du compartiment C1 permettra sûrement une pureté du produit collecté dans C1 élevée et l'adaptation du prototype afin de faire passer le produit mixte en continu dans le dispositif de charge validera son fonctionnement continu sur de plus amples quantités.

CHAPITRE VI : APPLICATION DE LA DECHARGE A BARRIERE DIELECTRIQUE A LA CHARGE ELECTRIQUE ET A LA SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MELANGES GRANULAIRES ISOLANT – ISOLANT

L'objectif de cette étude est d'évaluer la possibilité d'améliorer les caractéristiques de charge triboélectrique de polymères en les exposant à une Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) à pression atmosphérique. Ce type de décharge électrique est connu pour modifier les propriétés de surface de certains matériaux. Des chercheurs [198], [199] ont constaté une diminution de l'angle de contact d'une gouttelette d'eau et une diminution de l'hydrophobicité du polyéthylène téréphtalate (PET), du polyuréthane (PU) et du polytétrafluoroéthylène (PTFE) après avoir été traité par du plasma froid telle que la DBD. Des modifications de rugosité de surface ont également été rapportées pour des plaques de polymères exposées à ce type de décharge [200].

Ainsi, l'objectif est de déterminer l'influence qu'une exposition à la DBD pourrait avoir sur la charge triboélectrique de granules isolants.

Dans le paragraphe VI-1, l'étude a visé l'influence de la durée d'exposition à la DBD, ainsi que de l'amplitude et de la fréquence du signal qui lui est appliqué, sur la charge triboélectrique de particules de PP et de PE. Pour ces dernières, des expériences ont été faites pour mettre en évidence les effets de deux facteurs supplémentaires : la forme du signal et le temps de repos entre l'exposition à la DBD et la charge triboélectrique.

Enfin, dans le paragraphe VI-2, la charge triboélectrique et la séparation électrostatique de plusieurs particules isolantes traitées par DBD ont été étudiées.

VI-1. Etude de la charge de particules après traitement par DBD

Dans un premier temps, l'influence des facteurs caractérisant la DBD sur la charge triboélectrique de particules de PP et de PE a été étudiée.

VI-1.1. Procédure expérimentale

Lors de cette étude, des échantillons de 7 g de deux matières ont été utilisées : le PP (figure II-4 (f)) et le PE (figure II-4 (e)). Chaque échantillon a tout d'abord été traité par une DBD atmosphérique créée dans le banc d'essais présenté au paragraphe II-3 (figure II-19). L'influence des paramètres régissant la DBD (amplitude de la tension, fréquence, forme d'onde, durée d'application du signal) sur la charge triboélectrique de ces échantillons a été étudiée. De plus, le temps de repos entre le traitement par DBD et la charge triboélectrique a également été pris en compte.

Chapitre VI : Application de la décharge à barrière diélectrique à la charge électrique et à la séparation électrostatique de mélanges granulaires isolant – isolant

Après avoir été traitées par DBD, les particules ont été chargées par triboélectricité en étant placées 5 min dans un dispositif de charge vibrant dont l'amplitude des vibrations étaient de 3 mm (Retsch, modèle AS200 basic ; figure II-16). Après avoir été chargées, les particules ont été déposées dans une cage de Faraday connectée à un électromètre (Keithley Instruments, modèle 6514 ; figure II-22) permettant la mesure de la charge électrique acquise par chaque échantillon.

VI-1.2. Application au traitement de particules de PP [201]

Dans un premier temps, une étude a été menée sur des particules de polypropylène (PP) issues de déchets d'équipements électriques et électroniques (figure II-4 (f)).

Toutes les expériences ont été effectuées avec une humidité ambiante relative de 57,8 % à 60,1 % et une température de 18,8°C à 19,5°C.

Des essais préliminaires ont été conduits pour fixer les limites des trois facteurs considérés, régissant la DBD : la fréquence du signal, f , de 50 Hz à 1000 Hz ; l'amplitude de la tension appliquée aux électrodes (ou tension crête-crête), U , de 30 kV à 54 kV et le temps de traitement, t , de 1 s à 600 s. L'étude a été menée en considérant un facteur à la fois, pour un signal carré.

Des expériences préliminaires ont démontré que le traitement par DBD et le chargement triboélectrique de particules de PP varient peu en fonction de l'humidité relative et de la température ambiante. Ainsi, un seul essai a été fait pour chaque expérience.

Lors de ces essais, la dispersion des résultats était de 2 % autour de la valeur moyenne.

- **Influence du temps de traitement :**

Afin de créer une DBD homogène, l'amplitude de la tension et la fréquence du signal ont respectivement été maintenues à 54 kV et 400 Hz.

Comme montré en figure VI-1, la durée de l'exposition à la DBD a un effet significatif sur la charge triboélectrique de particules de PP. Sans traitement par DBD, l'échantillon de 7 g acquiert une charge d'environ -130 nC. Cette valeur peut être augmentée de 32 % pour un traitement d'une durée de 3 s. Cependant, pour un traitement de 30 s, la charge est diminuée de 39 %.

Si l'exposition à la DBD dure plus longtemps, la charge des particules décroît rapidement. La caractéristique « antistatique » des particules de PP est due à la modification de surface consécutive à l'action de la DBD. En effet, sous l'exposition à une DBD, la rugosité et la mouillabilité augmentent. Pour de courtes expositions à la DBD (comme 3 s), la rugosité des particules augmente et crée ainsi, en surface, des pièges de charge alors que la mouillabilité ne change pas significativement. Ainsi, la charge acquise augmente. Cependant, pour de plus longues expositions, la mouillabilité augmente significativement et les particules deviennent conductrices par absorption de l'humidité ambiante [198-200], [202], [203].

Chapitre VI : Application de la décharge à barrière diélectrique à la charge électrique et à la séparation électrostatique de mélanges granulaires isolant – isolant

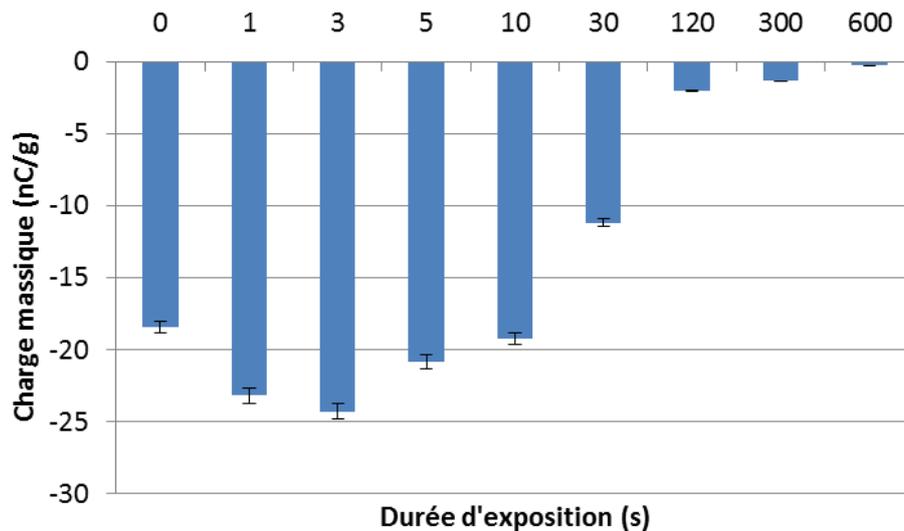


Figure VI-1 : Effet de la durée de la DBD sur la charge massique de particules de PP pour $U = 54$ kV et $f = 400$ Hz. La valeur à 0 s correspond à la charge que les particules acquièrent sans DBD.

Fort de ces résultats, une durée de traitement DBD de 3 s a été utilisée pour les expériences suivantes.

• **Influence de la tension appliquée :**

L'amplificateur haute tension peut fournir, au maximum, une tension alternative de ± 30 kV. Le rapport d'amplification (1/3000) limite donc l'amplitude de la tension pouvant être définie sur le GBF à 20 V (± 10 V). Ainsi, nous avons choisi dans un premier temps de limiter l'amplitude de la tension à 54 kV.

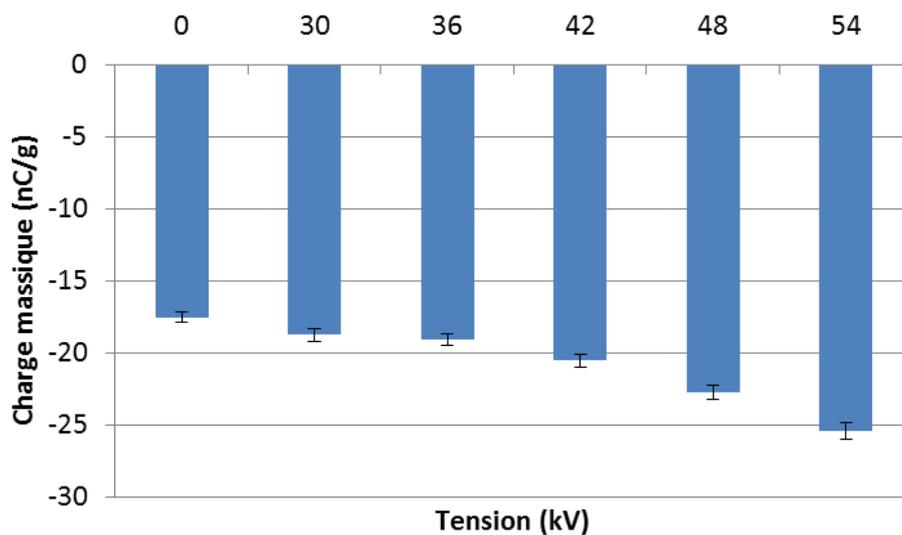


Figure VI-2 : Effet de la tension appliquée à la DBD sur la charge massique de particules de PP pour $t = 3$ s et $f = 400$ Hz. La valeur à 0 V correspond à la charge que les particules acquièrent sans DBD.

Lors de ces essais, la fréquence du signal envoyé à la DBD était de 400 Hz et les particules ont été traitées pendant 3 s. Les résultats de la figure VI-2 montrent que plus la tension est élevée, plus la charge acquise par les particules est élevée. En effet, la DBD est

Chapitre VI : Application de la décharge à barrière diélectrique à la charge électrique et à la séparation électrostatique de mélanges granulaires isolant – isolant plus efficace pour de hautes valeurs de tensions car cela génère plus de changement sur la caractéristique de surface en délivrant plus d'énergie.

- **Influence de la fréquence du signal :**

Pour étudier l'effet de la fréquence sur la charge triboélectrique du PP, la tension appliquée aux électrodes et le temps de traitement ont été gardés constants, respectivement à 42 kV et 3 s.

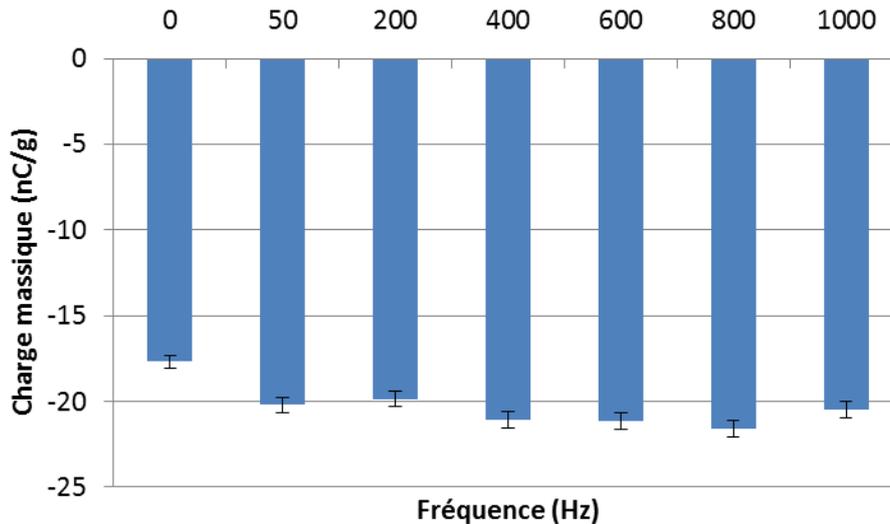


Figure VI-3 : Effet de la fréquence de la DBD sur la charge massique de particules de PP pour $t = 3$ s et $U = 42$ kV. La valeur à 0 Hz correspond à la charge que les particules acquièrent sans DBD.

Les résultats représentés sur la figure VI-3 montrent que la fréquence n'a pas une grande influence sur la charge triboélectrique du PP tant que la DBD est homogène. Effectivement, des études montrent que la DBD est homogène jusqu'à 800 Hz et devient filamentaire au-delà [204], [205]. Ainsi, certaines particules ne sont pas traitées par DBD. C'est pourquoi, la charge des particules diminue légèrement pour 1000 Hz.

La charge acquise par des particules de PP dans un dispositif de charge vibrant peut donc être significativement modifiée si elles ont auparavant été soumises à une décharge à barrière diélectrique.

VI-1.3. Application au traitement de particules de PE [206]

L'influence de la DBD sur des particules de PP a été démontrée dans le paragraphe IV-1.2. Une étude similaire a été menée sur des particules de PE a fin de conforter les résultats. Des expériences supplémentaires ont visé aussi la mise en évidence des effets de deux autres facteurs : la forme du signal de la DBD et le temps de repos des particules entre leur soumission à la DBD et leur chargement triboélectrique.

Dans la présente étude, 7 g de particules de PE ont été utilisés (figure II-4 (e)). Toutes les expériences ont été effectuées pour une humidité relative comprise entre 42,4 % et 52,0 % et une température comprise entre 26,5°C et 28,1°C.

Quatre facteurs influençant l'effet de la DBD sur la charge triboélectrique ont donc été étudiés : la fréquence, f (de 50 Hz à 1000 Hz), la tension crête à crête, U (de 30 kV à 60 kV), la durée d'exposition à la DBD, t (de 1 s à 300 s) et la forme du signal (carré, sinusoïdal ou triangulaire) fournis par le GBF. Enfin, l'influence du temps de repos des particules entre leur traitement par DBD et leur chargement triboélectrique (de 2 min à 24 h) a été étudiée. L'étude a été conduite en ne faisant varier qu'un seul facteur à la fois.

Pour les essais effectués sur le signal carré, la dispersion des résultats était de 11 % autour de la valeur moyenne alors que pour le signal sinusoïdal, elle était de 5 % et de 8 % pour le signal triangulaire. Les fluctuations des conditions ambiantes expliquent en partie ces erreurs expérimentales.

- **Influence du temps de traitement :**

L'effet du temps d'exposition à la DBD sur la charge acquise par des particules de PE peut être examiné sur la figure VI-4 pour $U = 42$ kV et $f = 400$ Hz. Conformément à ces résultats, une augmentation de la charge acquise est possible par application de la DBD. Celle-ci est plus élevée pour de courtes expositions à la DBD (inférieures à 10 s). Au-delà de cette valeur, la charge commence à diminuer et devient la même que sans traitement pour 300 s. Au vu des résultats obtenus avec les particules de PP, il est fort probable que la charge des particules de PE continue de diminuer si la durée d'exposition à la DBD augmente encore.

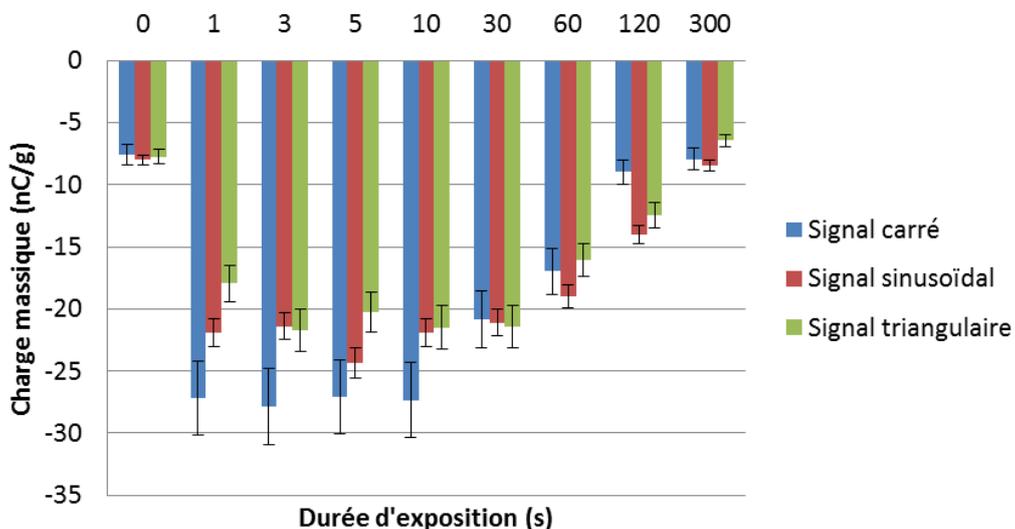


Figure VI-4 : Charge massique acquise pour différentes durées d'exposition à la DBD, pour $U = 42$ kV et $f = 400$ Hz. La valeur à 0 s correspond à la charge que les particules acquièrent sans DBD.

La forme carrée du signal (figure VI-5 (a)) donne les valeurs de charge les plus élevées. Ceci peut s'expliquer par la pente des différents signaux, plus importante pour le signal carré que pour le sinusoïdal et le triangulaire. De plus, l'énergie totale transmise aux particules est plus élevée pour ce type de signal. Dans ce cas, la tension efficace est égale à la valeur maximale de la tension. Pour les signaux sinusoïdal (figure VI-5 (b)) et triangulaire (figure VI-5 (c)), la tension efficace, U_{eff} , est moins importante comme indiqué respectivement par les formules VI-1 et VI-2 :

$$U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \quad (VI-1)$$

$$U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{3}} \quad (VI-2)$$

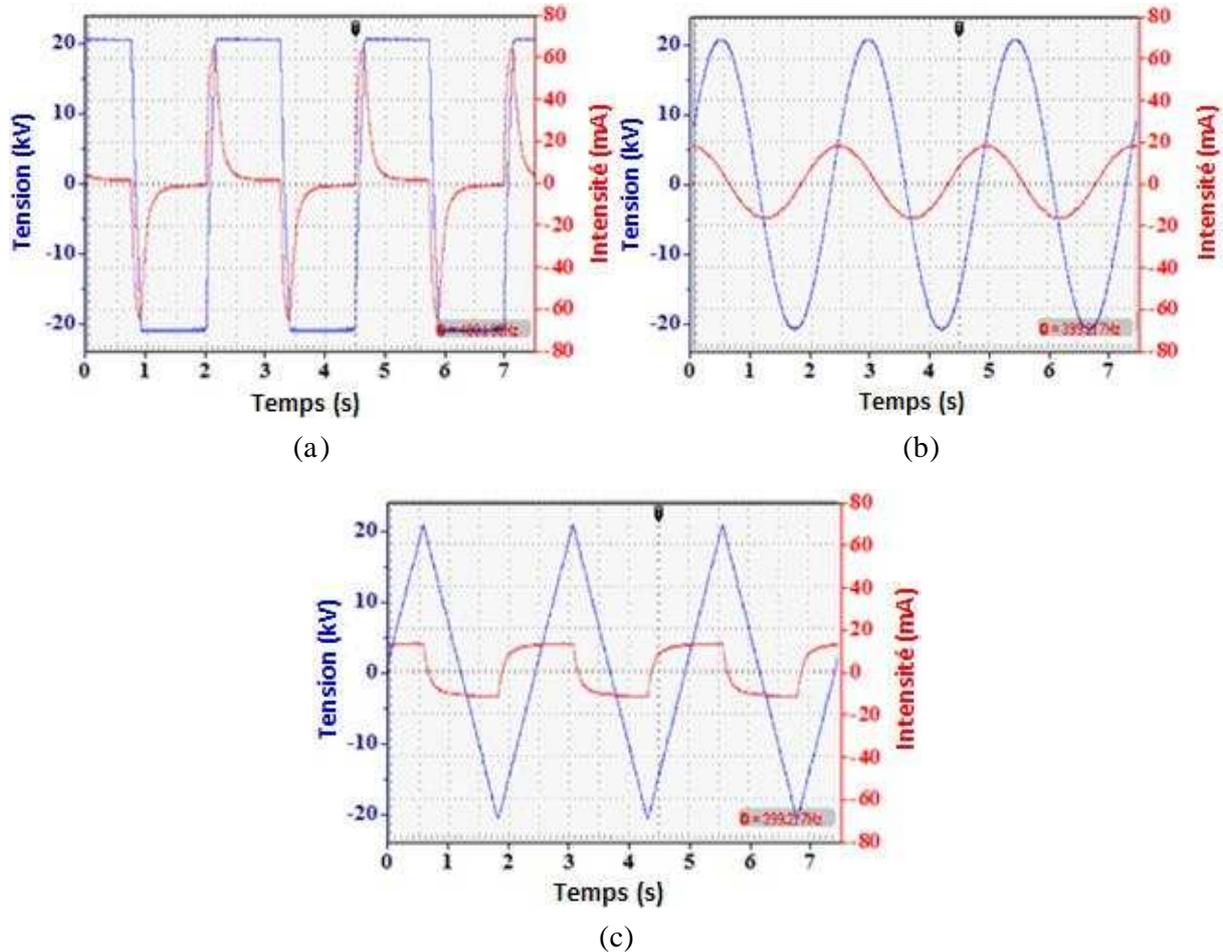


Figure VI-5 : Caractéristiques courant-tension de chaque type de signal obtenues par l'oscilloscope pour $U = 42$ kV et $f = 400$ Hz. (a) Signal carré ; (b) Signal sinusoïdal ; (c) Signal triangulaire.

Cela implique que la durée d'exposition doit être plus longue pour les signaux sinusoïdal et triangulaire pour atteindre le temps d'exposition optimal (permettant d'obtenir une charge maximale). Ainsi, les résultats de la figure VI-4 montrent que la charge maximale est acquise pour les échantillons exposés 3 s avec le signal carré, 5 s pour le signal sinusoïdal et entre 10 s et 30 s pour le signal triangulaire.

- **Influence de la tension appliquée :**

L'influence de la tension crête-crête sur la charge triboélectrique du PE a été étudiée pour chaque forme d'onde. Les résultats sont présentés sur la figure VI-6 et ont été obtenus pour un traitement de 3 s à une fréquence de 400 Hz.

Les fluctuations de charge sans DBD sont dues aux variations de température et d'humidité ambiante.

Chapitre VI : Application de la décharge à barrière diélectrique à la charge électrique et à la séparation électrostatique de mélanges granulaires isolant – isolant

Pour une tension crête-crête de 30 kV appliquée aux électrodes, les signaux sinusoïdal et triangulaire n'ont que peu d'effet sur la charge acquise par les particules de PE après avoir passé 5 min dans le dispositif de charge par vibration. Cependant, pour le signal carré, la charge des particules traitées est deux fois plus élevée que celles non-traitées. Entre 36 kV et 42 kV, la charge acquise par les granules augmente légèrement à cause du phénomène expliqué précédemment : la tension efficace est plus élevée pour le signal carré que pour les autres. Là encore, la charge acquise est plus élevée pour ce signal. Au-delà de 42 kV, la charge acquise reste quasiment constante quelle que soit la forme du signal. Avec la meilleure configuration (42 kV avec le signal carré), la charge vaut approximativement -21 nC.g^{-1} ce qui correspond à plus de trois fois la charge acquise sans DBD.

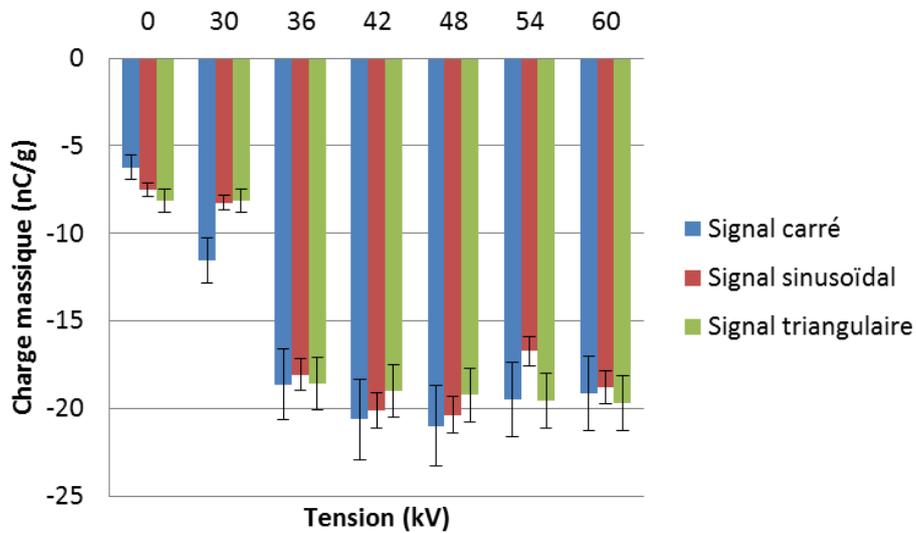


Figure VI-6 : Charge massique acquise pour différentes tension crête à crête appliquées au système d'électrodes de la DBD, pour $f = 400 \text{ Hz}$ et $t = 3 \text{ s}$. La valeur à 0 V correspond à la charge que les particules acquièrent sans DBD.

• Influence de la fréquence du signal :

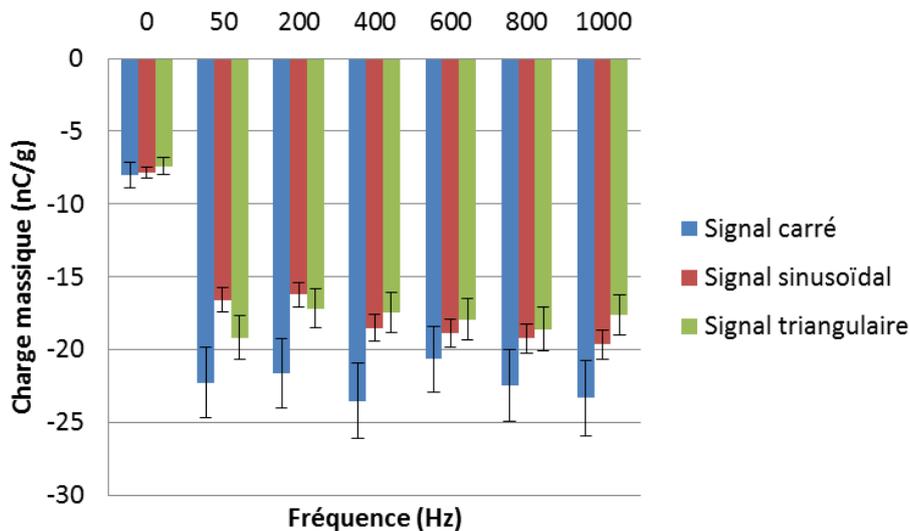


Figure VI-7 : Charge massique acquise pour plusieurs fréquences de DBD, pour $U = 42 \text{ kV}$ et $t = 3 \text{ s}$. La valeur à 0 Hz correspond à la charge que les particules acquièrent sans DBD.

La fréquence du signal a été variée entre 50 Hz et 1000 Hz (figure VI-7), alors que la tension crête-crête et la durée d'exposition ont été respectivement fixées à $U = 42$ kV et $t = 3$ s. Pour le signal sinusoïdal, la charge augmente légèrement avec la fréquence. Cependant, il semble que ce facteur ait une faible influence sur la charge acquise par les particules de PE. La charge reste quasiment constante quelle que soit la fréquence tant que la DBD reste homogène.

- **Influence du temps de repos des particules après traitement :**

Pour ces expériences, les variables de contrôle de la DBD étaient $U = 42$ kV, $f = 400$ Hz et $t = 3$ s. Les particules ont été chargées pendant 5 min dans le dispositif vibrant avec une amplitude de vibration de 3 mm. Pour chaque valeur du temps de repos, 3 essais ont été effectués avec une dispersion d'environ 7 % autour de la valeur moyenne.

Comme montré sur la figure VI-8, la charge acquise lorsque les particules sont directement chargées après la DBD est de $-21,4$ nC.g⁻¹. Lorsque le temps de repos est de 2 min, la charge est maximale, avec $-24,3$ nC.g⁻¹. Ensuite, la charge diminue légèrement pour 5 min et atteint presque la même charge que sans temps de repos (environ -20 nC.g⁻¹) de 10 min à 18 h. Après 24 h, la charge tend à décroître. L'effet de la décharge à barrière diélectrique sur les particules de PE reste important au moins durant 24 h. Ce phénomène est très intéressant pour des applications industrielles où le traitement par DBD et le chargement triboélectrique ne peuvent pas forcément être effectués successivement mais demande à être vérifié sur d'autres types de particules. Par ailleurs, il serait intéressant d'observer ce phénomène avec un temps de repos plus long.

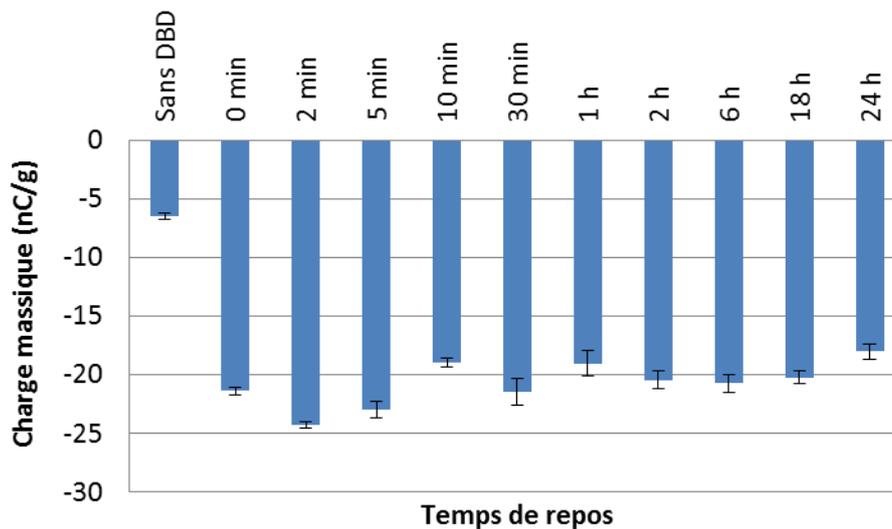


Figure VI-8 : Charge massique acquise pour différents temps de repos entre l'exposition à la DBD et la charge triboélectrique.

Des conclusions similaires à celles obtenues avec les particules de PP peuvent être faites dans le cas des particules de PE. La forme du signal carré est celle qui transmet le plus d'énergie aux particules et est donc la plus apte à modifier leur comportement. De plus, l'effet de la DBD sur les particules de PE reste significatif au moins pendant 24 h.

VI-2. Charge triboélectrique et séparation électrostatique de mélanges isolant – isolant

Des modifications du comportement triboélectrique de particules de PP et de PE ont été engendrées par une décharge à barrière diélectrique. Pour de courtes durées d'expositions à la DBD, la charge acquise par ces particules dans un dispositif vibrant augmente significativement. Le niveau de charge des particules isolantes détermine l'efficacité de leur séparation électrostatique. L'exposition des particules à une DBD a donc une influence sur les résultats de séparation électrostatique.

Lors de cette étude, les particules (seules ou en mélange) ont d'abord été soumises à une décharge à barrière diélectrique dont la fréquence du signal carré appliqué à l'électrode supérieure était de 400 Hz. La durée de traitement des particules était de 3 s et la tension crête – crête appliquée au système d'électrodes était de 42 kV.

100 g de matière ont été utilisés pour chaque essai. Toutefois, comme le banc d'essais ne permet de traiter que 7 g de particules à la fois, le traitement des 100 g prend entre 30 min et 40 min. Heureusement, comme vu au paragraphe VI-1.3, l'effet de la DBD sur les particules ne diminue qu'au bout de 24 heures, cela affecte donc peu les résultats de charge.

Une fois la totalité des particules traitées par DBD, elles ont été introduites dans le dispositif de charge à cylindre tournant. Là encore, pour chaque cylindre, une série triboélectrique a été établie en mesurant la charge électrique des particules par le biais d'une cage de Faraday connectée à un électromètre (Keithley ; modèle 6514).

Par la suite, des essais de séparation ont également été réalisés. Pour ce faire, les particules traitées par DBD et chargées dans le dispositif de charge à cylindre tournant, ont été introduites dans le séparateur électrostatique de la société Prodecologia.

VI-2.1. Séries triboélectriques de particules isolantes soumises à une DBD

La décharge à barrière diélectrique a une influence très importante sur les particules de PP et de PE. Afin de vérifier si cette influence est toujours la même quelle que soit les isolants, deux séries triboélectriques ont été établies pour chacun des tubes du dispositif de charge à cylindre tournant. Pour ce faire, après avoir été traitées par DBD, les particules ont été introduites dans le dispositif de charge à cylindre tournant (figure II-15). Pour chaque tube, l'inclinaison du dispositif était de 5° et la vitesse de rotation du cylindre extérieur était de 80 tr.min⁻¹. Le cylindre intérieur n'était pas présent et six ailettes de 15 mm de hauteur étaient fixées sur le cylindre extérieur. En sortie du dispositif, la charge des particules a été mesurée grâce à une cage de Faraday connectée à un électromètre.

Pour quantifier l'influence de la DBD, cette étude s'est concentrée sur neuf matières plastiques (figure II-4) : ABS (a), HIPS (b), PC (c), PC Cristal (d), PE (e), PP (f), PS (g), PS Cristal (h) et PVC (i). Les résultats alors obtenus sont décrits sur les figures VI-9 et VI-10 respectivement pour les tubes PEHD et PVC. Par ailleurs, les erreurs pour chacun des tubes sont respectivement de 3,6 % et de 1,5 %.

Chapitre VI : Application de la décharge à barrière diélectrique à la charge électrique et à la séparation électrostatique de mélanges granulaires isolant – isolant

Pour chaque matière, au moins deux essais ont été effectués afin de déterminer une valeur moyenne. Dans certains cas, un troisième essai a pu être fait afin de conforter les résultats. Avec le tube en PEHD, l'humidité relative était comprise entre 53,5 % et 57,7 % et la température entre 21,2°C et 22,7°C lors des essais. Avec celui en PVC, l'humidité était comprise entre 53,8 % et 56,0 % et la température entre 17,1°C et 19,6°C.

Pour les deux tubes, huit matières sur neuf se chargent négativement (PE, PS Cristal, PS, PC Cristal, PVC, PP, PC et HIPS ; figures VI-9 et VI-10). Cela peut être un avantage si l'écart de charge entre deux matières est suffisamment élevé pour attirer un type de particule sans le second (en jouant notamment sur la tension). En effet, toutes les matières sauf l'ABS se chargent négativement alors qu'auparavant seules trois ou quatre matières se chargeaient négativement en absence de DBD (figure V-5). De plus, l'ABS acquiert une charge positive bien plus faible que sans traitement (1,2 nC.g⁻¹ contre 6,1 nC.g⁻¹ sans DBD avec le tube en PVC). Les matières se chargeant négativement sans DBD acquièrent une charge plus élevée après traitement sauf le PVC dont la charge est égale ou légèrement inférieure. Seul l'ABS reste positif mais la charge qu'il acquiert est 5 à 7 fois inférieure à celle sans DBD.

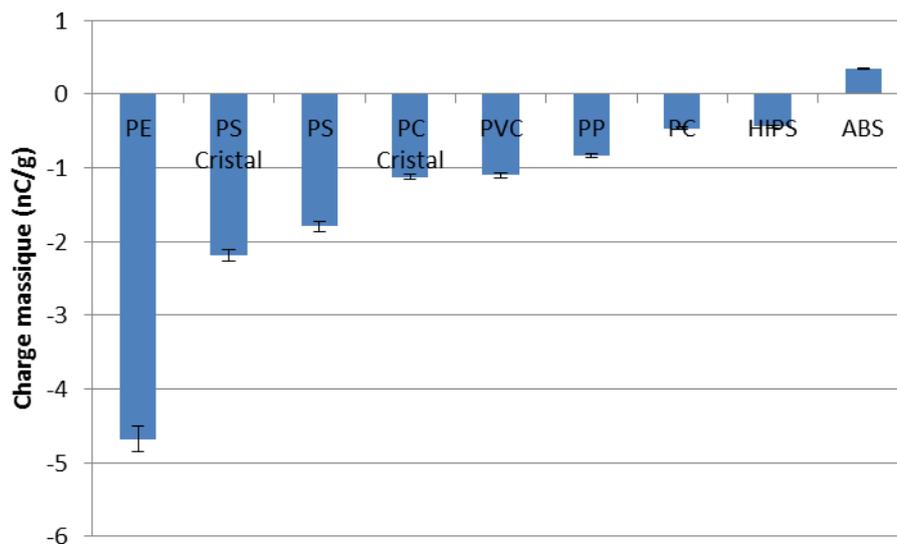


Figure VI-9 : Charge massique acquise par différents types de particules traitées par DBD dans le dispositif de charge à cylindre tournant équipé du tube en PEHD.

Avec le tube en PEHD, le PS Cristal, qui acquerrait une faible charge positive (0,4 nC.g⁻¹), se charge alors négativement avec la deuxième charge la plus élevée en valeur absolue (-2,2 nC.g⁻¹). Une séparation PS Cristal – PP, auparavant compliquée (les deux matières se chargeant faiblement positivement ; figure V-3) devient alors envisageable puisque la charge du PS Cristal semble suffisamment élevée pour que lui seul soit attiré. En revanche, d'autres séparations telles que PP – PVC se compliquent. Sans DBD, le PVC se charge négativement et le PP positivement alors qu'avec la DBD, les deux se chargent négativement avec des valeurs proches.

Là encore, c'est avec le tube PVC que les charges acquises sont les plus élevées (figure VI-10). Le PE acquiert notamment une charge de -8,9 nC.g⁻¹, soit 2,4 fois sa charge acquise

sans DBD. En revanche, la charge du PC peut être considérée comme nulle, ce qui empêche théoriquement toute séparation puisqu'il ne sera ni attiré ni repoussé par l'électrode haute tension. L'écart de charge entre le PP, le PVC et le PS Cristal est faible ce qui laisse présager que leur séparation serait peu efficace.

Beaucoup de phénomènes peuvent expliquer cette tendance des particules à se charger négativement après traitement par DBD : apport d'espèces chimiques, modification de l'hydrophobicité et de la rugosité de surface... Des mesures par spectromètre infrarouge et des visualisations par microscope permettent de constater des modifications de composition chimique et de surface d'une plaque de PP traitée par DBD (annexe III). Il semble qu'un apport d'espèces chimiques et qu'un décapage résultent du traitement par DBD mais une étude plus approfondie de ces mécanismes physiques d'action sur les polymères serait nécessaire tenter d'expliquer ce phénomène.

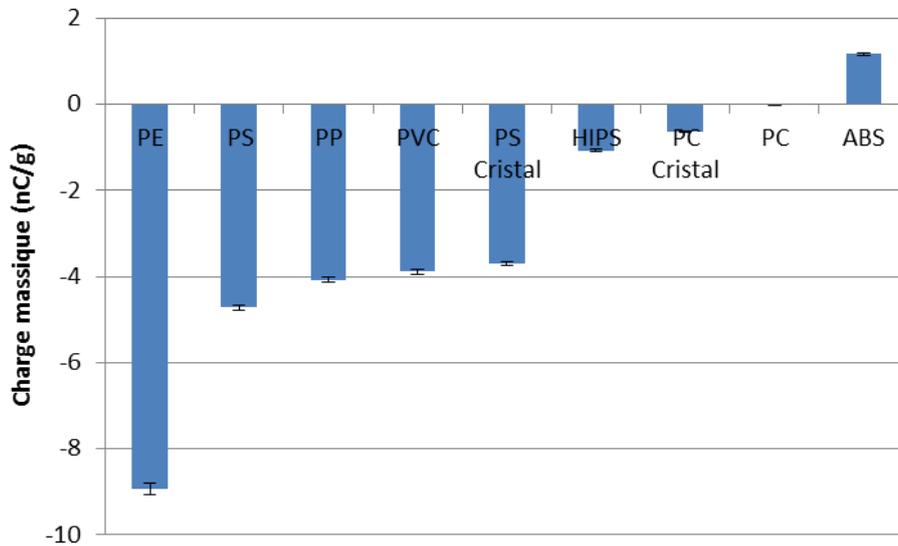


Figure VI-10 : Charge massique acquise par différents types de particules traitées par DBD dans le dispositif de charge à cylindre tournant équipé du tube en PVC.

VI-2.2. Séparation électrostatique de particules isolantes traitées par DBD

Des essais de séparation ont ensuite été réalisés dans le séparateur de la société Prodecologia (figure V-6). La distance entre l'électrode « NACA » et l'électrode de terre, d , était de 100 mm et son angle d'inclinaison, α , de 34° par rapport à l'horizontale. La vitesse de rotation de l'électrode cylindrique tournante était de 40 tr.min^{-1} , la tension appliquée à l'électrode « NACA » était de 35 kV (polarité positive) et l'angle d'inclinaison du déflecteur séparant les compartiments C1 et C2 était de 13° . Au vu des résultats obtenus au paragraphe V-2 et des séries triboélectriques obtenues avec traitement des particules par DBD aucun essai de séparation n'a été effectué avec une polarité négative de la tension.

Avant d'être introduits dans le séparateur, les 100 g de mélange à séparer sont traités par DBD, puis chargés dans le dispositif de charge à cylindre tournant. Les mélanges PE – PP, PP – HIPS, PE – PVC, PE – HIPS, PVC – HIPS et PP – PVC ont fait l'objet de cette étude. L'erreur moyenne obtenue lors des essais de séparation était de 6,6 %.

Chapitre VI : Application de la décharge à barrière diélectrique à la charge électrique et à la séparation électrostatique de mélanges granulaires isolant – isolant

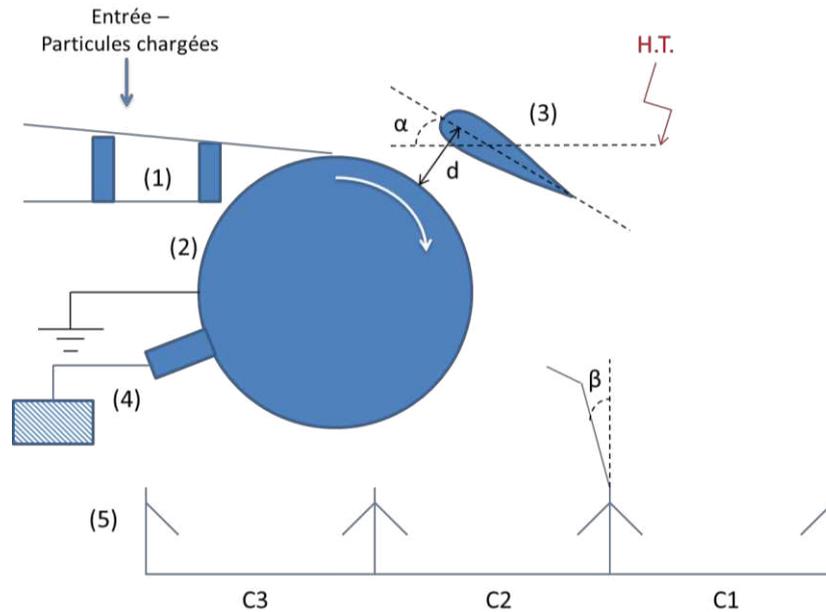


Figure VI-11 : Séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante de la société Prodecologia. (1) Table vibrante ; (2) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (3) Electrode « NACA » reliée à une source de haute tension réversible ; (4) Balai ; (5) Collecteur (3 compartiments).

- **Tube en PEHD :**

Lors des essais utilisant ce tube, l'humidité relative était comprise entre 50,3 % et 56,0 % et la température entre 21,7°C et 22,3°C.

La décharge à barrière diélectrique a un effet plus ou moins conséquent sur quasiment tous les mélanges étudiés. Dans le cas du mélange PP – PE (figure VI–12 (a)), la séparation est légèrement meilleure avec la DBD notamment grâce au gain de pureté dans le compartiment C2 (97,5 % de PP contre 90,4 % sans DBD). En revanche, la pureté du PE récupéré dans C1 est légèrement moins élevée (97,7 % contre 99,3 %). Cette bonne séparation s'explique par le positionnement des deux matières dans la série triboélectrique (figure VI–9). En effet, bien que celles-ci se chargent toutes les deux négativement, l'écart de charge les séparant est suffisamment important ($3,8 \text{ nC.g}^{-1}$ en valeur absolue) pour que le PE soit attiré sans pour autant attirer le PP. Une étude pour déterminer la tension optimale serait de nature à améliorer encore cette séparation. Le PE étant l'élément se chargeant le mieux, tous les mélanges le comprenant devrait se séparer convenablement. Ceci est prouvé par les résultats obtenus pour les mélanges PVC – PE et HIPS – PE (respectivement décrits sur les figures VI–12 (c) et (d)). Dans le cas PVC – PE, la matière attirée change par l'application de la DBD. Sans DBD, le PVC, mieux chargé, est attiré et récupéré dans C1 alors qu'avec la DBD, c'est le PE qui y est collecté. Le PE ayant une charge plus élevée, la séparation est meilleure puisque, dans C1, sa pureté est de 97,6 % alors que le PVC du compartiment C2 atteint une pureté de 99,8 %. Pour le mélange HIPS – PE, la séparation est également plus efficace lorsque la DBD est appliquée au mélange granulaire (PE pur à 98,5 %, HIPS pur à 93,9 %). De plus, avec la DBD, une partie non négligeable (27,2 %) du HIPS est récupéré dans le troisième compartiment avec une pureté supérieure à 98 %.

Chapitre VI : Application de la décharge à barrière diélectrique à la charge électrique et à la séparation électrostatique de mélanges granulaires isolant – isolant

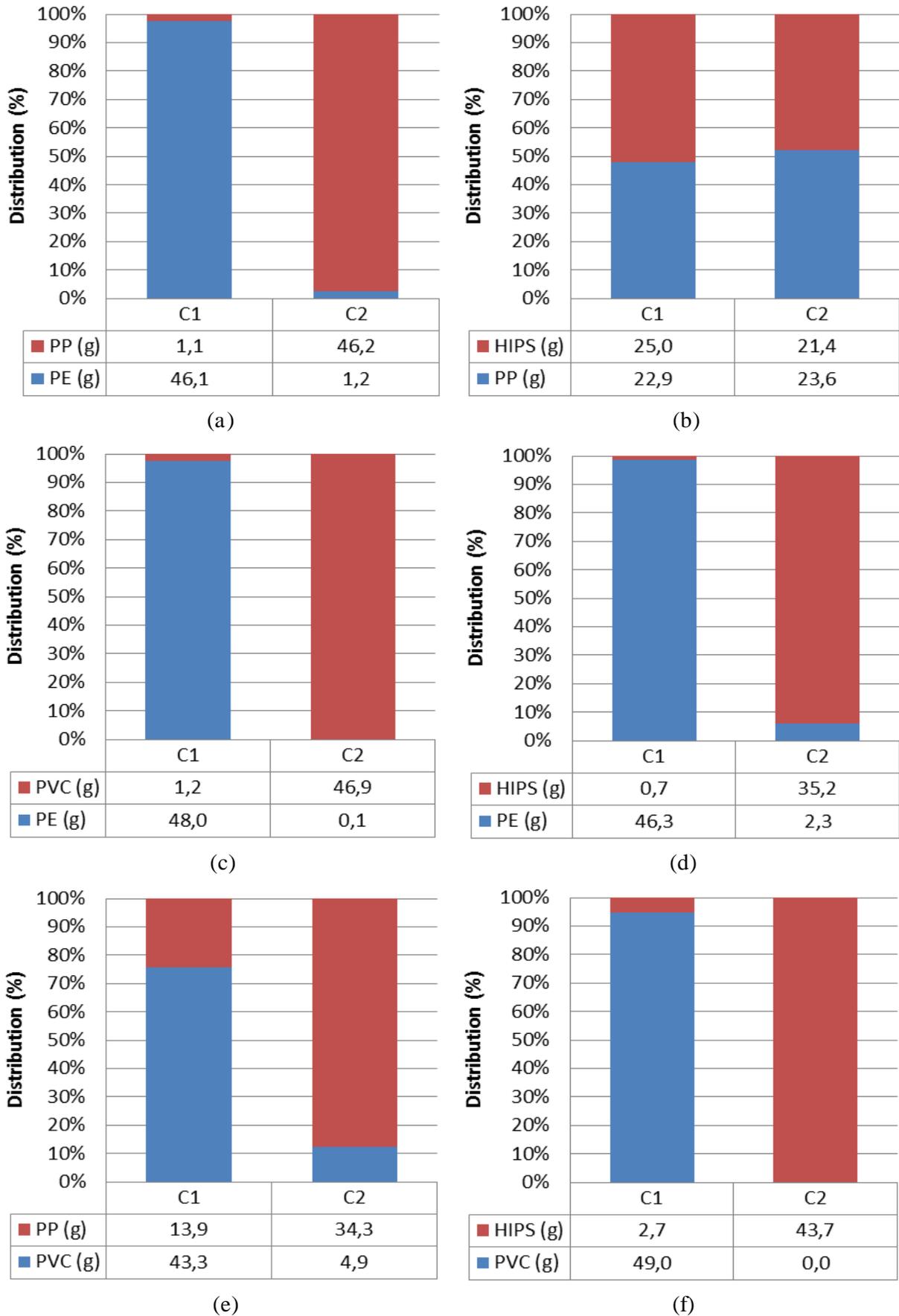


Figure VI-12 : Distribution des particules dans les compartiments du collecteur pour le mélange (a) PE-PP ; (b) PP-HIPS ; (c) PE-PVC ; (d) PE-HIPS ; (e) PP-PVC et (f) PVC-HIPS.

Chapitre VI : Application de la décharge à barrière diélectrique à la charge électrique et à la séparation électrostatique de mélanges granulaires isolant – isolant

Le mélange PP – HIPS reste difficile à séparer (figure VI-12 (b)). En effet, d'après la série triboélectrique obtenue pour le tube en PEHD après application de la DBD (figure VI-9), l'écart de charge entre les deux polymères est faible ($0,4 \text{ nC.g}^{-1}$ en valeur absolue) ce qui ne permet pas une bonne séparation.

Conformément aux séries triboélectriques, la séparation sans DBD du mélange PP – PVC donne de meilleurs résultats que lorsque les particules subissent son action (figure VI-12 (e)). En effet, avec DBD, le PP, comme le PVC, se chargent négativement avec des valeurs proches (écart de $0,3 \text{ nC.g}^{-1}$ en valeur absolue) alors que sans la DBD, le PP se charge positivement et le PVC négativement ce qui favorise la séparation. Ce phénomène est également constaté pour le mélange PVC – HIPS (figure VI-12 (f)) pour lequel le HIPS se charge positivement et le PVC négativement en l'absence de DBD. Toutefois, les résultats avec DBD sont très satisfaisant ce qui laisse supposer que si l'écart de charge entre deux matières est suffisant (ici $0,7 \text{ nC.g}^{-1}$ en valeur absolue), une séparation efficace peut avoir lieu.

• Tube en PVC :

Lors des essais utilisant ce tube, l'humidité relative était comprise entre 57,0 % et 58,6 % et la température entre 17,9°C et 19,1°C.

Là encore, l'application de la décharge à barrière diélectrique influe sur les résultats de séparation électrostatique. Pour tous les mélanges contenant du PE (figures VI-13 (a), (c) et (d)), le produit « non-PE » collecté dans C2 a une pureté supérieure à 97,5 %. En revanche, le produit collecté dans C1 n'est pur à plus de 95 % que dans le cas du mélange HIPS – PE. Pour les deux autres mélanges sa pureté est inférieure. Ceci est dû au fait que les particules de PP et de PVC acquièrent une charge négative plus élevée que celles de HIPS (figure VI-10). Par conséquent, le PP et le PVC sont aussi attirés par l'électrode haute tension. Un réglage légèrement plus faible de la tension appliquée à l'électrode devrait permettre d'attirer seulement le PE et ainsi d'améliorer la séparation.

Le mélange HIPS – PP ne donne pas de bons résultats de séparation (figure VI-13 (b)) malgré que leurs charges aient un écart important dans la série triboélectrique ($3,0 \text{ nC.g}^{-1}$ en valeur absolue). Cela pourrait s'expliquer par le fait que le PP se charge positivement au contact du HIPS et inversement. Ainsi, les charges des deux matières s'équilibreraient et celles-ci seraient donc majoritairement attirées ce qui est effectivement le cas puisque 61,6 g est récupéré dans le compartiment C1 et 31,7 g dans le compartiment C2.

D'après la série triboélectrique (figure VI-10), l'écart de charge entre le PP et le PVC est faible ce qui explique la mauvaise séparation obtenue avec ce mélange (figure VI-13 (e)).

Le mélange HIPS – PVC est un mélange qui se sépare bien (figure VI-13 (f)), conformément à la série triboélectrique. Une diminution de la tension permettrait d'améliorer légèrement la séparation en attirant moins de HIPS dans le compartiment C1.

Chapitre VI : Application de la décharge à barrière diélectrique à la charge électrique et à la séparation électrostatique de mélanges granulaires isolant – isolant

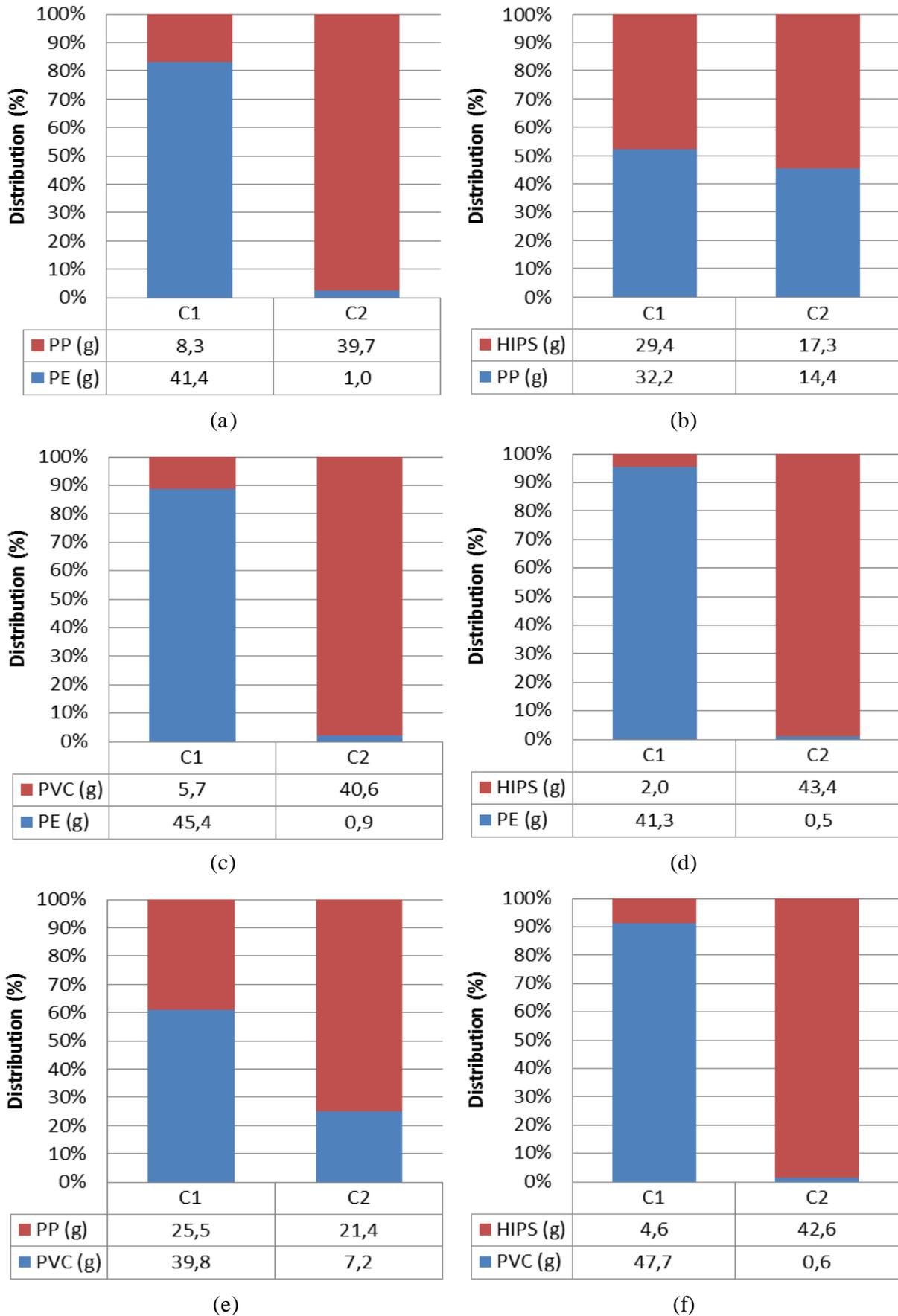


Figure VI-13 : Distribution des particules dans les compartiments du collecteur pour le mélange (a) PE-PP ; (b) PP-HIPS ; (c) PE-PVC ; (d) PE-HIPS ; (e) PP-PVC et (f) PVC-HIPS.

VI-3. Conclusions

La décharge à barrière diélectrique a une grande influence sur la charge triboélectrique de particules isolantes.

Pour les particules de PE, dans les meilleures conditions, la charge peut être multipliée par 3,5 en comparaison avec des granules non-traités par DBD.

Le signal de forme carré provoque l'effet le plus significatif sur la charge des particules. Il est suivi par le signal sinusoïdal et le signal triangulaire. Cela peut s'expliquer par le fait que la valeur efficace de la tension appliquée à l'électrode supérieure du système de DBD est maximale pour le signal carré et plus faible pour les deux autres.

La durée d'exposition a un effet significatif sur la charge acquise par des particules de PP et de PE. Pour de courtes expositions à la DBD (inférieur à 10 s), la charge acquise augmente fortement mais elle diminue pour de plus longues expositions jusqu'à redevenir égale ou inférieure à celle sans traitement par DBD. Ce constat est très intéressant dans le cas d'un processus industriel de séparation en flux continu où les mélanges seraient exposés à une DBD de courte durée lors de leur acheminement vers le dispositif de charge en amont de la séparation électrostatique.

L'augmentation de la tension crête-crête améliore la charge triboélectrique mais il semble que la fréquence n'a que peu d'influence tant que la DBD reste homogène.

L'effet de la DBD sur des particules de PE reste significatif plusieurs heures après que le traitement ait eu lieu, ce qui permet un délai entre l'exposition à la DBD et la charge triboélectrique dans un fonctionnement industriel.

Les séries triboélectriques obtenues avec le dispositif de charge à cylindre tournant sont fortement impactées par le traitement par DBD des particules. En effet, la plupart des particules acquièrent une charge négative bien qu'elle soit positive sans traitement. L'explication de ce phénomène est complexe (apport d'espèces chimiques, modification de la rugosité, de l'hydrophobicité...) et nécessite encore beaucoup de travaux de recherche.

L'application de la décharge à barrière diélectrique permet dans certains cas d'améliorer les résultats de séparation notamment si elle est combinée au tube en PEHD.

Le mélange PP – HIPS est le seul mélange donnant de mauvais résultats de séparation quel que soit la configuration utilisée. Cela est vraisemblablement dû au fait que les particules, par frottement entre elles, se chargent de polarités opposées à celles qu'elles acquièrent par frottement avec les parois du cylindre. Par exemple, les granules de HIPS se chargent positivement en contact avec les parois du dispositif de charge mais semble se charger négativement au contact du PP

Un récapitulatif des puretés des produits obtenus pour chaque séparation effectuée avec le dispositif de charge à cylindre tournant et le séparateur de la société Prodecologia (avec ou sans DBD ; en polarité positive ou négative) est donné en annexe IV.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les équipements électriques et électroniques sont de plus en plus nombreux sur le marché mondial, tout comme les déchets qui y sont liés (DEEE). A contrario, les ressources, fossiles, nécessaires à la fabrication de ces équipements sont de plus en plus rares. Il est donc primordial de procéder au recyclage des différentes matières qui les composent. Cette thèse s'inscrit dans cette volonté de protection de l'environnement en étudiant la séparation électrostatique de multiples mélanges aussi bien à l'échelle de laboratoire qu'à l'échelle industrielle.

Ainsi, une première partie de l'étude s'est focalisée sur la séparation électrostatique de matériaux conducteurs et isolants de déchets de câbles électriques. Ces déchets, et les DEEE en général, sont des mélanges de multiples conducteurs et isolants. C'est pourquoi, la séparation électrostatique de mélanges de plusieurs conducteurs ou de plusieurs isolants a également été étudiée. Les expériences montrent que de telles séparations sont faisables avec des procédés peu énergivores et efficaces.

L'étude de la séparation électrostatique de mélanges de conducteurs et d'isolants a mis en exergue les éléments suivants :

- l'utilisation d'un séparateur électrostatique à plaque permet la séparation de déchets de câbles électriques,
- les deux configurations d'électrodes étudiées permettent une séparation mais de meilleurs résultats sont obtenus en utilisant une électrode elliptique connectée à une haute tension positive et une électrode plaque en forme de « S », liée à la terre,
- l'influence du champ électrique sur les particules dites « monobrin » est faible mais les forces centrifuge et de gravité permettent à elles seules une bonne séparation dans ce type d'installation,
- l'adaptation industrielle des séparateurs électrostatiques à plaque est compliquée par la présence de poussières dans les déchets de câbles électriques. Deux solutions peuvent être envisagées : utiliser un système d'aspiration des poussières au risque de perdre une partie des particules broyées ou modifier le système d'électrodes pour permettre son nettoyage en continu,
- l'étude de laboratoire a permis la fabrication et la mise au point d'un prototype de séparateur industriel par la société CITF, utilisant un système d'électrodes original : deux électrodes cylindriques et une électrode couronne type tige filetée, toutes trois en rotation continue, afin de permettre leur nettoyage,
- la mise au point de ce prototype a permis la fabrication d'une première machine de série capable de traiter 100 kg.h^{-1} de déchets de câbles électriques en mélange (monobrin, multibrin et DEEE).

Les produits obtenus en sortie de machine peuvent être un mélange de plusieurs conducteurs et un mélange de plusieurs isolants d'où la nécessité de mettre au point des procédés de séparation pour ces deux types de mélanges.

L'étude de la séparation de mélanges de deux ou plusieurs matériaux conducteurs a mené aux conclusions suivantes :

- l'amélioration de la pureté du cuivre est possible par le biais d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant, capable de collecter séparément les particules d'autres matériaux conducteurs, notamment d'aluminium,
- une simulation numérique des trajectoires des particules permet de déterminer la faisabilité de telles séparations,
- l'utilisation d'un champ électrique étendu est nécessaire afin de distinguer au mieux les trajectoires des particules à séparer,
- l'utilisation d'une caméra rapide permet de mieux comprendre les phénomènes en jeu et de comparer les trajectoires réelles avec celles obtenues numériquement,
- la présence d'une trappe sur l'électrode plaque en forme de « S » connectée à une source de haute tension permet d'améliorer la collecte des particules conductrices légères,
- la séparation simultanée de particules de cuivre, d'aluminium et d'isolants est réalisable avec une configuration d'électrodes originale, à condition que le champ électrique soit suffisamment étendu et qu'un effet couronne soit présent.

La conception, la réalisation et la validation fonctionnelle d'un dispositif de charge triboélectrique à cylindre tournant est l'une des contributions originales majeures de cette thèse. Le dispositif permet la charge triboélectrique de particules isolantes de tailles millimétriques issues du broyage de DEEE :

- l'augmentation de l'inclinaison du cylindre par rapport à l'horizontale diminue la charge acquise par des particules isolantes en raccourcissant leur temps de séjour au sein du dispositif. Une inclinaison comprise entre 3° et 7° permet d'avoir une charge optimale,
- la charge de ces particules augmente avec la vitesse de rotation du cylindre extérieur du dispositif jusqu'à la valeur seuil de 60 tr.min⁻¹ au-delà de laquelle elle reste constante. Contrairement à l'inclinaison, l'augmentation de la vitesse de rotation du cylindre extérieur allonge la durée de séjour des particules et augmente le nombre d'impacts entre celles-ci et les parois du dispositif,
- la charge des particules augmente avec le nombre et la hauteur des ailettes présentes sur la paroi intérieure du cylindre extérieur,
- la présence du cylindre intérieur augmente la charge acquise par les particules si elle est combinée à la présence d'ailettes d'une hauteur de 15 mm mais son fonctionnement n'est alors pas optimal (risque de blocage du dispositif),
- le cylindre extérieur en PVC transmet une charge plus élevée aux particules que le cylindre en PEHD,

- le cylindre en PVC possède un bon positionnement dans la série triboélectrique en étant situé quasiment au centre des matières étudiées.

La séparation électrostatique des particules isolantes chargées par le dispositif de charge à cylindre tournant montre que :

- la plupart des mélanges étudiés peuvent être séparés par un procédé électrostatique lorsqu'ils sont préalablement chargés dans le dispositif de charge à cylindre tournant,

- seul le mélange PP-HIPS est particulièrement compliqué à trier dans le séparateur électrostatique à tambour. Cela est vraisemblablement dû au fait que les particules se chargent de manière opposées entre elles et au contact des parois du dispositif de charge,

- une polarité négative de la haute tension appliquée au système d'électrodes du séparateur électrostatique à tambour donne de moins bons résultats qu'avec une polarité positive sauf pour les mélanges contenant du HIPS dont la charge est suffisamment élevée pour qu'il soit fortement attiré,

- l'étude de laboratoire a permis l'adaptation du prototype de la société CITF pour permettre des séparations isolant – isolant tout en gardant sa configuration originale (bien que l'électrode couronne de type tige filetée ait été enlevée),

- un autre atout de l'installation prototype est de pouvoir connecter à une source de haute tension chacune de ses deux électrodes avec des polarités opposées, de sorte à intensifier davantage le champ électrique et à améliorer ainsi la séparation électrostatique des particules chargées,

- des visualisations par caméra rapide ont permis de mieux comprendre la séparation et de constater que certaines particules impactaient l'électrode connectée à la haute tension. Toutefois, les particules isolantes conservant leur charge, la qualité de la séparation est peu affectée.

L'application de la Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) à la charge triboélectrique de mélanges de déchets plastiques granulaires en vue de leur séparation électrostatique mène aux conclusions suivantes :

- la charge triboélectrique et donc la séparation électrostatique sont grandement influencées par le traitement de surface des particules isolantes en utilisant une DBD,

- l'influence du temps de traitement sur la charge acquise par des particules de PP et de PE au sein d'un dispositif vibrant peut être positive ou négative : la charge peut augmenter significativement pour de courtes expositions (quelques secondes) ou au contraire bien diminuer pour de plus longues expositions (de plusieurs dizaines de secondes à quelques minutes),

- l'augmentation de la tension appliquée au système d'électrodes permet d'augmenter la charge acquise par ces particules alors que la fréquence est peu influente,

- la forme du signal joue un rôle important en fonction de la tension efficace qu'elle implique. Un signal carré a une tension efficace plus élevée que celle d'un signal sinusoïdal, elle-même plus élevée que celle d'un signal triangulaire. La tension efficace jouant

directement sur la création de la DBD et son influence sur les particules, un signal carré aura plus d'influence sur la charge triboélectrique qu'un signal sinusoïdal ou triangulaire de même amplitude,

- les séries triboélectriques, obtenues avec des matériaux traités par DBD puis chargées dans le dispositif à cylindre tournant montrent une tendance très forte des particules à acquérir une charge négative, rendant ainsi certains mélanges plus aptes ou, au contraire, plus difficiles à être séparés.

Perspectives :

La séparation électrostatique a été étudiée sur des mélanges granulaires de certains déchets. Il serait intéressant d'étudier la séparation électrostatique d'autres types de déchets et de voir l'influence des tailles des particules composant les mélanges sur les résultats des processus de charge et/ou de séparation.

La faisabilité de la séparation électrostatique de mélanges de deux conducteurs a été démontrée en condition de laboratoire. Toutefois, le système d'électrodes permettant cette séparation reste à valider sur une installation industrielle.

La modélisation numérique permettant une première estimation des trajectoires des particules conductrices doit être améliorée afin de prendre en compte l'ensemble des conditions dans lesquelles se produit la séparation, notamment les impacts entre elles et avec les électrodes.

L'étude de la séparation électrostatique a porté sur des mélanges binaires de matériaux isolants. Toutefois, les déchets sont le plus souvent collectés en mélanges de plus de deux matériaux. Etudier la séparation de mélanges comportant plus de deux isolants répondrait à un besoin fort de l'industrie du recyclage.

Bien que le prototype de la société CITF ait déjà subi certaines modifications permettant la séparation électrostatique de mélanges isolant – isolant, son adaptation pour permettre des essais en fonctionnement continu et sur de grandes quantités est nécessaire. Ainsi, les verrous technologiques (s'il y en a) pourront être levés, les conditions optimales de séparation pourront être définies et une première machine de série permettant la séparation électrostatique, à l'échelle industrielle, de mélanges de déchets plastiques pourra être construite.

L'étude sur la DBD pourrait être étendue en utilisant d'autres matières pour les barrières diélectriques avec plusieurs épaisseurs et en faisant des mesures de potentiels de surface sur les particules.

Enfin, des travaux plus approfondis sont à réaliser sur les particules traitées par DBD, en regardant notamment les modifications de l'état de surface, afin de comprendre et quantifier les mécanismes physiques et chimiques influençant leur charge (décapage, modification chimique...). Il serait intéressant, par exemple, d'utiliser la spectrométrie infrarouge pour voir si des espèces chimiques ont été apportées par la DBD et d'essayer de contrôler ces apports pour voir leurs influences sur la charge triboélectrique de particules isolantes.

SIGLES DES PLASTIQUES

ABS : Acrylonitrile Butadiène Styène

HIPS : High Impact Polystrene

HDPE : High Density Polyethylene

LDPE : Low Density Polyethylene

PA : Polyamide

PC : Polycarbonate

PET : Polyéthylène téréphtalate

PMMA : Polyméthacrylate de méthyle

PP : Polypropylène

PS : Polystyrène

PU : Polyuréthane

PVC : Polychlorure de Vynil

XLPE : Cross-linked polyethylene

TABLE DES FIGURES

Figure I-1 : Représentation schématique de l'induction électrostatique.	6
Figure I-2 : Electrodes statiques utilisées pour la charge par induction électrostatique.	7
Figure I-3 : Différentes configurations d'électrodes couronnes.	8
Figure I-4 : Représentation schématique de l'effet couronne sur une particule isolante (5.a) et conductrice (5.b).	9
Figure I-5 : Charge triboélectrique de deux particules en contact.	10
Figure I-6 : Représentation schématique d'un dispositif de charge statique [64].	12
Figure I-7 : Dispositif à vibration [52].	13
Figure I-8 : (a) Représentation schématique d'un dispositif de charge triboélectrique vibrant [66] ; (b) Dispositif de charge de marque Retsch.	13
Figure I-9 : Représentation schématique d'un dispositif de charge par cyclone [65].	14
Figure I-10 : Régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse du gaz.	15
Figure I-11 : Dispositif de chargement à lit fluidisé [62].	16
Figure I-12 : Représentation schématique d'un dispositif de charge triboélectrique à air comprimé [9].	17
Figure I-13 : Installation expérimentale de charge triboélectrique à air comprimé [75].	17
Figure I-14 : Représentation schématique d'un dispositif de charge à cylindre tournant [77].	18
Figure I-15 : Dispositif de charge à cylindre tournant breveté par Tao [78].	19
Figure I-16 : Séparateur électrostatique à plaque.	20
Figure I-17 : Séparateur électrostatique à plaque assisté par une décharge couronne [12]. ...	21
Figure I-18 : Granules de plastique (a) et de cuivre (b) de déchets de câbles électriques rigides.	22
Figure I-19 : Séparateur électrostatique à tambour.	23
Figure I-20 : (a) Lignes équipotentiels calculées avec le logiciel d'analyse numérique TRICOMP ; (b) Variation du champ électrique sur un quart de la surface du tambour en fonction de l'angle α [104].	24
Figure I-21 : (a) Trajectoires d'une particule conductrice pour différentes valeurs de son rayon ; (b) Trajectoires de granules conducteurs impactant l'électrode statique [108].	24
Figure I-22 : (a) Variation du champ électrique à la surface du tambour en fonction de l'angle α (logiciel TRICOMP) ; (b) Trajectoires d'une particule isolante pour différentes valeurs de son rayon [107].	25
Figure I-23 : Trajectoires simulées dans un séparateur électrostatique à tambour.	25
Figure I-24 : Flux de traitement pour le recyclage du cuivre et du PVC issus de granules de DEEE.	26
Figure I-25 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour à double étage [115].	27

Figure I-26 : Représentation schématique du flux de traitement des déchets de câbles électriques [118].	28
Figure I-27 : Séparateurs électrostatique fabriqués par HAMOS.	29
Figure I-28 : Illustration d'un séparateur de l'entreprise PhySep.	29
Figure I-29 : Représentation schématique du séparateur électrostatique utilisé par Younes [122].	30
Figure I-30 : Distribution des produits obtenus dans les compartiments du collecteur [122].	30
Figure I-31 : (a) Principe du séparateur triboélectrostatique à chute libre ; (b) Cas concret [55].	31
Figure I-32 : Ajout d'un média dans un mélange traité par un séparateur électrostatique à chute libre [136].	31
Figure I-33 : Représentation schématique de l'installation proposée par Lee [137].	32
Figure I-34 : Représentation schématique de dispositifs de charge pouvant être utilisés dans l'installation brevetée par Lee [137].	32
Figure I-35 : Principe de fonctionnement d'un séparateur triboélectrostatique à tambour [138].	33
Figure I-36 : Représentation schématique de l'installation proposée par Fujita et al. [139].	34
Figure I-37 : Séparateur triboélectrostatique vibrant breveté par Yoon et al. [140].	34
Figure I-38 : Comportement des particules en fonction de leur composition et de leur polarité [140].	35
Figure I-39 : (a) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à plaques de laboratoire ; (b) Résultats de séparation de plusieurs mélanges de PA et de PC [80].	36
Figure I-40 : Photographie d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques [151].	37
Figure I-41 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à convoyeur pour des mélanges de plastiques granulaires récemment breveté [6], [154].	38
Figure I-42 : Représentation schématique du séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes cylindriques tournantes [156].	39
Figure I-43 : Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes cylindrique tournantes.	39
Figure I-44 : Principe de séparation des systèmes HAMOS [121].	40
Figure I-45 : Installation de séparation à chute libre proposée par Plas-Sep [121].	41
Figure I-46 : Configuration classique d'une DBD volumique.	43
Figure I-47 : Principe de fonctionnement d'une DBD.	44
Figure I-48 : Différentes configurations de DBD volumiques.	44
Figure I-49 : Différents régimes de DBD de volume à pression atmosphérique.	45
Figure I-50 : Formes d'ondes électriques d'une décharge filamentaire sous excitation AC sinusoïdale à 10 kHz [165].	45
Figure I-51 : Forme d'onde électrique d'une décharge homogène de type Glow à 10 kHz [170].	46

Figure I-52 : Formes d'ondes électriques d'une décharge homogène de type Townsend [170].	47
Figure I-53 : Ensemble des réactions possibles lors d'un contact plasma-polymère [179].	48
Figure I-54 : Modification chimique de surface par plasma non polymérisant [188-190].	49
Figure II-1 : Granules calibrés de câbles électriques souples (a) et rigides (b).	51
Figure II-2 : Déchets de câbles électriques broyés issus de câbles électriques souples (a) et de câbles électriques rigides (b).	52
Figure II-3 : Particules de cuivre nu (a), de cuivre étamé (b) et d'aluminium (c) issus de câbles DEEE.	52
Figure II-4 : Photographie des matières utilisées pour la détermination des séries triboélectriques : (a) ABS, (b) HIPS, (c) PC, (d) PC cristal, (e) PE, (f) PP, (g) PS, (h) PS Cristal et (i) PVC.	53
Figure II-5 : Séparateur électrostatique Carpco en fonctionnement « plaque ».	55
Figure II-6 : Séparateur électrostatique Carpco en fonctionnement « tambour ».	55
Figure II-7 : Prototype de séparateur électrostatique industriel PRD (voir Vue 3D présentée en annexe I).	56
Figure II-8 : Vue de dessus de l'installation PRD.	58
Figure II-9 : Electrodes encrassées après quelques minutes de fonctionnement.	58
Figure II-10 : Evolution du système d'électrodes de l'installation prototype.	59
Figure II-11 : Photo (a) et schéma (b) du pré-broyeur de la société ECP.	60
Figure II-12 : (a) Convoyeur ; (b) Poulie magnétique.	61
Figure II-13 : Groupe rotor et chambre de coupe du broyeur.	62
Figure II-14 : Séparateur électrostatique CP100 (Vue 3D en annexe II).	63
Figure II-15 : Dispositif de charge à cylindre(s) tournant(s).	64
Figure II-16 : Dispositif de charge triboélectrique.	64
Figure II-17 : Séparateur électrostatique Prodecologia.	65
Figure II-18 : Configuration d'électrodes utilisée pour la séparation de mélanges isolant – isolant avec le prototype de séparateur industriel PRD.	66
Figure II-19 : Banc de Décharge à Barrière Diélectrique.	67
Figure II-20 : Régimes de DBD.	67
Figure II-21 : Caméra rapide utilisée pour la visualisation de particules dans un séparateur électrostatique à plaque.	68
Figure II-22 : Système de mesure de charge.	69
Figure II-23 : Représentation schématique d'un processus.	70
Figure II-24 : Représentation graphique des points de mesure nécessaires à un plan d'expériences complet.	71
Figure II-25 : Représentation graphique des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences composite.	71
Figure III-1 : Configuration #1.	74
Figure III-2 : Configuration #2.	74

Figure III-3 : Caractéristiques de l'installation.	76
Figure III-4 : Iso-contours de la récupération et de la pureté du produit conducteur en fonction de l'angle d'inclinaison et de la tension pour la configuration classique #1.	81
Figure III-5 : Iso-contours de la récupération et de la pureté du produit conducteur en fonction de l'angle d'inclinaison et de la tension pour la configuration simplifiée #2.	81
Figure III-6 : Champ électrique entre les électrodes du séparateur à plaque pour une tension appliquée de 30 kV.	83
Figure III-7 : Variation du champ électrique le long de la plaque en forme de « S » de la configuration #1 (a) et le long de la plaque plane de la configuration #2 (b).	83
Figure III-8 : Simulation numérique de la trajectoire d'une particule de cuivre.	84
Figure III-9 : Iso-contours en fonction de la tension et de l'angle d'inclinaison pour l'échantillon #1.	90
Figure III-10 : Iso-contours des produits en fonction de la tension et de l'angle d'inclinaison pour l'échantillon #3.	94
Figure III-11 : (a) Encrassement de l'électrode plaque ; (b) Encrassement de l'électrode elliptique.	96
Figure III-12 : Mise en place d'une électrode cylindrique, du moteur permettant sa rotation et d'un balai.	97
Figure III-13 : (a) Equerre initiale ; (b) Nouvelle équerre placée en bout de table vibrante. .	98
Figure III-14 : Tige fileté de 8 mm de diamètre.	99
Figure III-15 : Pallier métallique permettant la mise en rotation et la transmission de la tension.	100
Figure IV-1 : Forces agissant sur les particules conductrices dans un séparateur électrostatique à tambour.	104
Figure IV-2 : Montage servant à la détermination de la tension de décollement de particules d'aluminium.	104
Figure IV-3 : Géométrie étudiée et conditions aux limites.	107
Figure IV-4 : Séparateur électrostatique de laboratoire (Carpco Inc.).	108
Figure IV-5 : Répartition du champ électrique le long de la surface de l'électrode cylindrique reliée à la terre pour $\alpha = 40^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 125$ mm.	110
Figure IV-6 : Simulations numériques des trajectoires des particules pour chaque configuration, obtenues avec MATLAB, pour $\alpha = 40^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 125$ mm.	110
Figure IV-7 : Evolution, pour la configuration #2, du taux de récupération du produit cuivre nu et étamé en fonction de la valeur de la haute tension U (a), de l'angle d'inclinaison de l'électrode haute tension α (b) et de la distance entre les deux électrodes d (c).	113
Figure IV-8 : Répartition des produits cuivre nu et étamé dans chaque secteur pour les deux configurations.	114
Figure IV-9 : Flux de produit supposé dans une potentielle application industrielle.	116
Figure IV-10 : Simulation numérique des trajectoires des deux types de particules pour la configuration #2 avec $\alpha = 50$; $U = -25$ kV et $d = 150$ mm.	117

Figure IV-11 : Image de la position des particules au sein du séparateur, obtenue par la caméra rapide.	117
Figure IV-12 : Visualisation des trajectoires par analyse des images obtenues par la caméra rapide, pour $\alpha = 50^\circ$, $U = -25$ kV et $d = 150$ mm.	118
Figure IV-13 : Simulation numérique des trajectoires de particules pour $\alpha = 50^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.	120
Figure IV-14 : Zoom des trajectoires simulées des particules pour la configuration optimale : $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.	121
Figure IV-15 : Distribution des particules dans les 15 compartiments du collecteur pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.	122
Figure IV-16 : Trajectoires des particules visualisées par la caméra rapide à différents instants.	123
Figure IV-17 : Trajectoires des particules, pour la plaque en « S » inversée, obtenues par la caméra rapide pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.	124
Figure IV-18 : Ajout d'une trappe métallique à la configuration d'électrodes.	124
Figure IV-19 : Répartition du champ électrique le long de l'électrode cylindrique reliée à la terre avec et sans trappe métallique pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.	125
Figure IV-20 : Trajectoires simulées des particules avec la trappe métallique pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.	125
Figure IV-21 : Distribution des particules dans les 15 compartiments du collecteur pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm avec la trappe métallique.	126
Figure IV-22 : Trajectoires des particules, pour la plaque en « S » et la trappe métallique, obtenues par la caméra rapide pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.	127
Figure IV-23 : Distribution des particules dans les 15 compartiments du collecteur pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm avec la trappe plastique.	127
Figure IV-24 : Trajectoires des particules avec la plaque en « S » et la trappe plastique, obtenues par la caméra rapide pour $\alpha = 30^\circ$, $U = -20$ kV et $d = 100$ mm.	128
Figure IV-25 : Séparateur électrostatique de laboratoire.	129
Figure IV-26 : Distribution des particules dans les 4 compartiments du collecteur pour la configuration #1.	130
Figure IV-27 : Distribution des particules dans les 4 compartiments du collecteur pour la configuration #2.	131
Figure IV-28 : Distribution des particules dans les 4 compartiments du collecteur pour la configuration #3.	132
Figure IV-29 : Distribution des particules dans les 4 compartiments du collecteur après traitement des compartiments C1 et C2 issus d'une première séparation avec la configuration #3.	132
Figure V-1 : Evolution de la charge massique de particules de HIPS en fonction de l'inclinaison du dispositif de charge pour une vitesse de rotation du cylindre extérieur de 60 $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$	136

Figure V-2 : Evolution de la charge massique de particules de HIPS en fonction de la vitesse de rotation du cylindre extérieur pour un angle d'inclinaison de 5° .	137
Figure V-3 : Charge massique acquise par différents types de particules grâce au dispositif de charge équipé du tube en PEHD.	139
Figure V-4 : Charge massique acquise par différents types de particules grâce au dispositif de charge équipé du tube en PVC.	140
Figure V-5 : Séries triboélectriques obtenues pour le tube en PEHD (a) et en PVC (b).	140
Figure V-6 : Séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante de la société Prodecologia.	141
Figure V-7 : Distribution des particules dans les compartiments du collecteur pour le mélange (a) PVC-HIPS ; (b) PE-PVC ; (c) PE-HIPS ; (d) PP-PVC ; (e) PE-PP et (f) PP-HIPS.	143
Figure V-8 : Résultats de séparation du mélange PVC - HIPS.	144
Figure V-9 : Distribution des particules dans les compartiments du collecteur pour les mélanges (a) PVC-HIPS, (b) PE-PVC ; (c) PE-HIPS ; (d) PP-PVC ; (e) PE-PP et (f) PP-HIPS.	145
Figure V-10 : Distribution des particules dans les compartiments du collecteur pour les mélanges (a) PVC-HIPS ; (b) PE-PVC ; (c) PE-HIPS ; (d) PP-PVC ; (e) PE-PP et (f) PP-HIPS.	147
Figure V-11 : Distribution des particules dans les compartiments du collecteur pour les mélanges (a) PVC-HIPS ; (b) PE-PVC ; (c) PE-HIPS ; (d) PP-PVC ; (e) PE-PP et (f) PP-HIPS.	149
Figure V-12 : Vue de dessus de l'installation PRD modifiée pour le tri des plastique.	150
Figure V-13 : Installation prototype PRD.	151
Figure V-14 : Récupération des produits en fonction de l'amplitude de tension entre les deux électrodes pour le produit majoritaire de chaque mélange dans C1 (a) et dans C2 (b).	152
Figure V-15 : Pureté des produits en fonction de l'amplitude de tension entre les deux électrodes pour le produit majoritaire de chaque mélange dans C1 (a) et dans C2 (b).	153
Figure V-16 : Trajectoires des particules visualisées par la caméra rapide à différents instants.	154
Figure VI-1 : Effet de la durée de la DBD sur la charge massique de particules de PP pour $U = 18 \text{ V}$ et $f = 400 \text{ Hz}$.	159
Figure VI-2 : Effet de la tension appliquée à la DBD sur la charge massique de particules de PP pour $t = 3 \text{ s}$ et $f = 400 \text{ Hz}$.	159
Figure VI-3 : Effet de la fréquence de la DBD sur la charge massique de particules de PP pour $t = 3 \text{ s}$ et $U = 14 \text{ V}$.	160
Figure VI-4 : Charge massique acquise pour différentes durées d'exposition à la DBD, pour $U = 14 \text{ V}$ et $f = 400 \text{ Hz}$.	161
Figure VI-5 : Caractéristiques courant-tension de chaque type de signal obtenues par l'oscilloscope pour $U = 14 \text{ V}$ et $f = 400 \text{ Hz}$.	162

Figure VI-6 : Charge massique acquise pour différentes tension crête à crête appliquées au système d'électrodes de la DBD, pour $f = 400$ Hz et $t = 3$ s.....	163
Figure VI-7 : Charge massique acquise pour plusieurs fréquences de DBD, pour $U = 14$ V et $t = 3$ s.....	163
Figure VI-8 : Charge massique acquise pour différents temps de repos entre l'exposition à la DBD et la charge triboélectrique.....	164
Figure VI-9 : Charge massique acquise par différents types de particules traitées par DBD dans le dispositif de charge à cylindre tournant équipé du tube en PEHD.	166
Figure VI-10 : Charge massique acquise par différents types de particules traitées par DBD dans le dispositif de charge à cylindre tournant équipé du tube en PVC.	167
Figure VI-11 : Séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante de la société Prodecologia.....	168
Figure VI-12 : Distribution des particules dans les compartiments du collecteur pour le mélange (a) PE-PP ; (b) PP-HIPS ; (c) PE-PVC ; (d) PE-HIPS ; (e) PP-PVC et (f) PVC-HIPS.	169
Figure VI-13 : Distribution des particules dans les compartiments du collecteur pour le mélange (a) PE-PP ; (b) PP-HIPS ; (c) PE-PVC ; (d) PE-HIPS ; (e) PP-PVC et (f) PVC-HIPS.	171

TABLE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Série triboélectrique obtenue par Bill Lee [49].....	11
Tableau II-1 : Propriétés physiques du cuivre et du PVC.	51
Tableau III-1 : Plages de variations des facteurs α et U, identiques pour les deux configurations d'électrodes.....	77
Tableau III-2 : Résultats du plan factoriel composite obtenu avec la configuration classique #1.....	78
Tableau III-3 : Résultats du plan factoriel composite obtenu avec la configuration simplifiée #2.....	78
Tableau III-4 : Récupérations et puretés des produits obtenus avec la configuration #1.....	79
Tableau III-5 : Récupérations et puretés des produits obtenus avec la configuration #2.....	79
Tableau III-6 : Valeurs des coefficients du modèle de chaque réponse et de R2 et Q2 pour la configuration #1.	80
Tableau III-7 : Valeurs des coefficients du modèle de chaque réponse et de R2 et Q2 pour la configuration #2.	80
Tableau III-8 : Résultats prédits par le modèle et obtenus expérimentalement au point de fonctionnement optimum pour la configuration classique #1.....	82
Tableau III-9 : Résultats prédits par le modèle et obtenus expérimentalement au point de fonctionnement optimum pour la configuration simplifiée #2.....	82
Tableau III-10 : Plages de variation des facteurs utilisées lors des essais sur les échantillons de mélanges de câbles électriques souples #1 et #2.	86
Tableau III-11 : Plages de variation des facteurs utilisées lors des essais sur les échantillons de mélanges de câbles électriques rigides #3 et #4.	86
Tableau III-12 : Résultats du plan factoriel composite mené sur les particules « modèles » de câbles électriques souples (#1).....	87
Tableau III-13 : Résultats du plan factoriel composite mené sur les particules broyées de câbles électriques souples (#2).....	87
Tableau III-14 : Récupérations et puretés obtenues avec les particules « modèles » de câbles électriques souples (#1).....	88
Tableau III-15 : Récupérations et puretés obtenues avec les particules broyées de câbles électriques souples (#2).....	88
Tableau III-16 : Valeurs des coefficients du modèle de chaque réponse et de R2 et Q2 pour les particules « modèles » de câbles électriques souples (#1).....	89
Tableau III-17 : Valeurs des coefficients du modèle de chaque réponse et de R2 et Q2 pour les particules broyées de câbles électriques souples (#2).....	89
Tableau III-18 : Résultats prédits par le modèle et obtenus expérimentalement au point de fonctionnement optimum avec les particules « modèles » de câbles électriques souples (#1).....	90

Tableau III-19 : Résultats prédits par le modèle et obtenus expérimentalement au point de fonctionnement optimum avec les particules broyées de câbles électriques souples (#2).....	90
Tableau III-20 : Résultats du plan factoriel composite mené sur les particules « modèles » de câbles électriques rigides (#3).....	92
Tableau III-21 : Résultats du plan factoriel composite mené sur les particules broyées de câbles électriques rigides (#4).....	92
Tableau III-22 : Récupérations et puretés obtenues avec les particules « modèles » de câbles électriques rigides (#3).....	92
Tableau III-23 : Récupérations et puretés obtenues avec les particules broyées de câbles électriques rigides (#4).....	93
Tableau III-24 : Valeurs des coefficients du modèle de chaque réponse et de R2 et Q2 pour les particules « modèles » de câbles électriques rigides (#3).....	93
Tableau III-25 : Valeurs des coefficients du modèle de chaque réponse et de R2 et Q2 pour les particules broyées de câbles électriques rigides (#4).....	93
Tableau III-26 : Résultats prédits par le modèle et obtenus expérimentalement au point de fonctionnement optimum avec l'échantillon #3.	95
Tableau III-27 : Résultats prédits par le modèle et obtenus expérimentalement au point de fonctionnement optimum avec l'échantillon #4.	95
Tableau III-28 : Récupérations et puretés détaillées du PVC au point de fonctionnement optimal pour l'échantillon #4.....	95
Tableau III-29 : Exemple d'essais effectués avec la configuration présentée en Figure III-12 sans électrode couronne permettant de voir l'influence de la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique sur les récupérations de produits conducteur et isolant.....	97
Tableau III-30 : Exemples d'essais réalisés avec la configuration utilisant deux électrodes cylindrique tournantes et une électrode couronne.....	98
Tableau IV-1 : Plages de variation des facteurs.	109
Tableau IV-2 : Résultats du plan d'expériences factoriel pour la configuration #1.....	111
Tableau IV-3 : Résultats du plan d'expériences factoriel pour la configuration #2.....	111
Tableau IV-4 : Résultats du plan d'expériences factoriel pour la configuration #3.....	112
Tableau IV-5 : Résultats de séparation pour les valeurs optimales des facteurs pour chaque configuration d'électrodes.	114
Tableau IV-6 : Retraitement du produit cuivre nu.....	115
Tableau IV-7 : Plages de variation des facteurs.	119
Tableau IV-8 : Résultats de l'étude numérique.....	120
Tableau V-1 : Influence du nombre et de la hauteur des ailettes et de la présence du cylindre intérieur sur la charge acquise par des particules de PE.....	138
Tableau V-2 : Conditions d'humidités et de températures pour les différents essais de séparation.	142

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Deloitte développement durable, A. Deprouw, M. Jover, S. Chouvenc. ADEME, E. Fangeat. « Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques. Données 2016. », 2017. Disponible sur www.ademe.fr/mediatheque.
- [2] ERDYN, ADEME. « Enquête sur l'état de l'art et les perspectives des techniques de tri automatique des déchets », 2003. Disponible sur www.ademe.fr/mediatheque.
- [3] A. Iuga, R. Morar, A. Samuila. and L. Dascalescu. « Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes », IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, vol. 148, pp 47-54, 2001.
- [4] Y. Higashiyama and K. Asano. « Recent progress in electrostatic separation technology », Particulate Science and Technology, vol. 16, pp 77-90, 1998.
- [5] A. Tilmatine, K. Medles, M. Younes, A. Bendaoud and L. Dascalescu. « Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles ». IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, pp. 1564–1569, 2010.
- [6] L. Calin and L. Dascalescu. « Method for electrostatically separating a granular mixture made of different materials and device for implementing same ». Patent FR2943561/2009, WO2010109096/2010, October 1, 2009.
- [7] Y. Hemery, X. Rouau, C. Dragan, M. Bilici, R. Beleca and L. Dascalescu. « Electrostatic properties of wheat brans and its constitutive layers: Influence of particle size, composition and moisture content ». Journal of Food Engineering, vol. 93, pp. 114-124, 2009.
- [8] J. Wang, E. Smits, R. M. Boom and M. Schutyser. « Arabinoxylans concentrates from wheat bran by electrostatic separation ». Journal of Food Engineering, vol. 155, pp. 29-36, 2015.
- [9] J. Wang, M. De Wit, M. Schutyser and R. M. Boom. « Analysis of electrostatic powder charging for fractionation of foods ». Innovative Food Science and Emerging Technologies, vol. 26, pp. 360-365, 2014.
- [10] K. Haga. « Applications of the electrostatic separation technique », Handbook of electrostatic processes, Marcel Dekker, U.S.A., pp. 365-368, 1995.
- [11] I. I. Inculet, G. S. P. Castle and J. J. Brown. « Electrostatic separation of plastics for recycling », Particulate Science and Technology, vol. 16, pp. 77-90, 1998.
- [12] J. E. Lawver and W. P. Dyrenforth. « Electrostatic separation », Electrostatics and Its Applications (A.D. Moore, Ed.), pp. 221-249, Wiley, New York, 1973.
- [13] S. Atroune, A. Tilmatine, R. Alkama, A. Samuila and L. Dascalescu. « Comparative experimental study of tribo-electric charging of two size-classes of granular plastics », Particulate Science and Technology, vol.33, pp. 652-658, 2015.
- [14] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, V. Neamtu and I. Suarasan. « Corona charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators », Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 27, pp. 1242-1251, 1994.

- [15] J.M. Crowley. « Fundamentals of Applied Electrostatics », Morgan Hill, California: Laplacian Press, 1999.
- [16] C.H. Park, N. Subasinghe and H.S. Jeon. « Separation of covering plastics from particulate copper in cable wastes by induction electrostatic separation », *Materials Transactions*, vol. 56, pp. 1140-1143, 2015.
- [17] M. Govi. « Quelques expériences sur l'induction électrostatique », *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, vol. 4, pp. 264-266, 1875.
- [18] D. H. Pontius, P. Vann Bush and L. E. Sparks. « Performance of large-diameter wires as discharge electrodes in electrostatic precipitators », *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 34, pp. 1203-1207, 1984.
- [19] H. A. Said, H. Nouri and Y. Zebboudj. « Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator ». *Journal of Electrostatics*, vol. 73, pp. 19-25, 2015.
- [20] J.A. Giacometti, S. Fedosov and M.M. Costa. « Corona charging of polymers: recent advances on constant current charging » *Brazilian Journal of Physics*, vol. 29, pp. 269-279, 1999.
- [21] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila and V. Neamtu. « Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes », *Particulate Science and Technology*, vol. 16, pp. 25-42, 1998.
- [22] K. Senouci, K. Medles and L. Dascalescu, « Effective solutions for monitoring the electrostatic separation of metal and plastic granular waste from electric and electronic equipment », *Waste Management and Research*, vol. 31, pp. 160-168, 2013.
- [23] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, M. Huzau and L. Dascalescu. « Characterization of dual corona electrodes for electrostatic processes applications », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, pp. 692-698, 2008.
- [24] A. Samuila, M. Blajan, R. Beleca, M. Huzau, R. Morar, L. Dascalescu and A. Iuga. « Modeling of wire corona electrode operation in electrostatic separation at small and large gaps », *Journal of Electrostatics*, vol. 63, pp. 955-960, 2005.
- [25] A. Bouteffaha, A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Plopeanu and L. Dascalescu. « Experimental and numerical characterization of corona discharge generated by a triode electrode system », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 2513-2519, 2015.
- [26] A. Samuila, M. Mihailescu, A. Iuga, R. Morar, R. Tobazeon and L. Dascalescu. « Optimization of corona electrode position in roll-type electrostatic separators », *Proceedings ESA-IEEE Joint Meeting on Electrostatics*, Little Rock, pp. 769-783, 2003.
- [27] A. Bendaoud, L. Dascalescu, M. Blajan, A. Samuila, A. Stochita and P. V. Notingher. « Corona charging of granular layers of insulating particles at the surface of a grounded electrode », *Journal of Electrostatics*, vol. 63, pp. 643-647, 2005.
- [28] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, I. Suarasan, A. Samuila and D. Rafiroiu. « Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators », *Journal of Electrostatics*, vol. 29, pp. 211-225, 1993.

- [29] M. Kachi and L. Dascalescu. « Corona discharges in asymmetric electrode configurations », *Journal of Electrostatics*, vol. 72, pp. 6-12, 2014.
- [30] A. Reguig, A. Bendaoud, P. Dordizadeh, A. R. Salama, S. Messal and L. Dascalescu. « Experimental study of a modified dual-type high-voltage electrode for electrostatic separation applications », *Journal of Electrostatics*, vol. 88, pp. 232-235, 2017.
- [31] A. Reguig, A. Bendaoud, B. Neagoe, Y. Prawatya and L. Dascalescu. « Electric potential distribution at the surface of insulating materials exposed to corona discharges from various electrode configurations », *Journal of Electrostatics*, vol. 82, pp. 55-62, 2016.
- [32] W. R. Harper. « Contact and Frictional Electrification », Oxford University Press, London, 1967.
- [33] W. D. Greason. « Investigation of a test methodology for triboelectrification », *Journal of Electrostatics*, vol. 49, pp. 245–256, 2000.
- [34] D. K. Davies. « Charge generation on dielectric surfaces », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 2, pp. 1533-1537, 1969.
- [35] W. D. Greason and I. I. Inculet. « Insulator work function determination from contact charging with metals », *Conference Record 1975 IEEE-IAS Annual Meeting*, pp. 428-435, 1975.
- [36] G. S. P. Castle. « Contact charging between insulators », *Journal of Electrostatics*, vol. 40/41, pp. 13-20, 1997.
- [37] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu and L. Dascalescu. « Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device », *Journal of Electrostatics*, vol. 63, pp. 937-942, 2005.
- [38] M. Blajan, R. Beleca, A. Iuga and L. Dascalescu. « Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol 46, pp. 1558-1563, 2010.
- [39] G. Buda, A. Samuila, S. Atroune, M. Bilici and L. Dascalescu. « Set point identification of a tribocharging process for mixed granular solids », *Journal of Electrostatics*, vol. 71, pp. 407-412, 2013.
- [40] L.H. Lee. « Dual mechanism for metal polymer contact electrification », *Journal of Electrostatics*, vol. 32, pp. 1-29, 1994.
- [41] S. Nicoara, L. Calin, A. Iuga and N. Serban. « Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose », *Environment and Progress*, vol. 6, pp. 341-346, 2006.
- [42] E.G. Kelly and D.J. Spottiswood. « The theory of electrostatic separations: a review, part 1, Fundamentals », *Minerals Engineering*, vol. 2, pp. 33-46, 1989.
- [43] W. Jing, and M.J. Realff. « Design and optimization of free-fall electrostatic separators for plastics recycling », *AIChE Journal*, vol. 49, pp. 3138-3149, 2003.
- [44] V. Gente, F.L. Marca, F. Lucci and P. Massacci. « Electrical separation of plastics coming from special waste », *Waste Management*, vol. 23, pp. 951-958, 2003.

- [45] R.D. Pascoe and B.O. Connel. « Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation », *Minerals Engineering*, vol. 16, pp. 1205-1212, 2003.
- [46] A. F. Diaz and R. M. Felix-Navarro. « A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties », *Journal of Electrostatics*, vol. 62, pp. 277-290, 2004.
- [47] C. H. Park, H. S. Jeon, B. G. Cho and J. K. Park. « Triboelectrostatic separation of covering plastics in chopped waste electric wire », *Polymer Engineering and Science*, vol. 47, pp. 1975-1982, 2007.
- [48] C. H. Park, J. K. Park, H. S. Jeon and B. C. Chun. « Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger », *Journal of Electrostatics*, vol. 66, pp. 578-583, 2008.
- [49] Trifield, « Tribo-electric series », Disponible sur : <https://www.trifield.com/content/tribo-electric-series/>.
- [50] Y. Matsushita, N. Mori and T. Sometani. « Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades », *Electrical Engineering in Japan*, vol. 127, pp. 33-40, 1999.
- [51] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami and L. Dascalescu. « Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials », *Journal of Electrostatics*, vol. 69, pp. 631-637, 2011.
- [52] M. Blajan, A. Samuila, V. Neamtu, R. Beleca, L. Caliap, D. Vadan, A. Iuga and L. Dascalescu. « Experimental modeling of particle electrification in vibrated zigzag shaped metallic tubes ». In: *Proceedings of ESA/IEJ/IEEE-IAS/SFE Joint Conference on Electrostatics*, June 6-9, 2006, University of California, and Berkeley, California. pp. 538-543, 2006. ISBN-0-7803-9209-4
- [53] M. Lungu. « Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect », *Mineral Engineering*, vol. 17, pp. 69-75, 2004.
- [54] Y. Higashiyama, Y. Ujiie and K. Asano. « Triboelectrification of plastic particles on a vibrating feeder laminated with a plastic film », *Journal of Electrostatics*, vol. 42, pp. 63-68, 1997.
- [55] G. Buda, M. Bilici, A. Samuila and L. Dascalescu. Experimental study of the tribocharging process of plastic granular materials on a vibratory feeder device. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, pp. 1489-1496, 2013.
- [56] G. Buda, A. Samuila, M. Bilici and L. Dascalescu. « Premises for the statistical control of a tribocharging process for granular materials », *Particulate Science and Technology*, vol. 32, pp. 138-143, 2014.
- [57] D. K. Yanar and B. A. Kwetkus. « Electrostatic separation of polymer powders », *Journal of Electrostatics*, vol. 35, pp. 257-266, 1995.
- [58] M. Zelmat, A. Tilmatine, M. Rizouga, R. Gouri, K. Medles and L. Dascalescu. « Experimental analysis of a cyclone tribocharging device for free-fall triboelectric separation

- of plastic particles », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, pp. 1584-1589, 2013.
- [59] G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki and T. Fujita. « Electrostatic separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone », *Magnetic and Electrical Separation*, vol. 11, pp. 63-92, 2002.
- [60] M. Zelmat, M. Rizouga, A. Tilmatine, A. Bendaoud, K. Medles and L. Dascalescu. « Experimental analysis of a vibrating tribocharging device of plastic particles for a free-fall electrostatic separator », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, pp. 4228-4232, 2014.
- [61] L. Eriksson, E. Johansson, N. Kettaneh-Wold, C. Wikstöm and S. Wold. « Design of Experiments. Principles and applications », Learnways AB, Umetrics, Umeaa, Sweden, 2000.
- [62] L. Calin, A. Mihalcioiu, A. Iuga and L. Dascalescu. « Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification », *Particulate Science and Technology*, vol. 25, pp. 205-211, 2007.
- [63] M. Saeki and A. Masumoto. « Electrostatic Separation of Chopped Waste Electric Cables », *Journal of Environment and Engineering*, vol. 2, pp. 227-236, 2007.
- [64] M. Zelmat, M. Rizouga, A. Tilmatine, K. Medles, M. Miloudi and L. Dascalescu. « Experimental comparative study of different tribocharging devices for triboelectric separation of insulating particles », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 1113-1118, 2013.
- [65] A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S. E. Bendimerad, M. Miloudi and K. Medles. « Experimental investigation of electrostatic separators of plastic particles using different charging devices », *Separation Science and Technology*, vol. 49, pp. 464-468, 2014.
- [66] J. Li, G. Wu and Z. Xu. « Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation », *Waste Management*, vol. 35, pp. 36-41, 2014.
- [67] G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki and T. Fujita. « Triboelectrostatic separation of ABS, PS and PP plastic mixture », *Materials Transactions*, vol. 44, pp. 161-166, 2003.
- [68] C. H. Park, H. S. Jeon and J. K. Park. « PVC removal from mixed plastics by triboelectrostatic separation », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 144, pp. 470-476, 2007.
- [69] C. H. Park, H. S. Jeon, H. S. Yu, O. H. Han and J. K. Park. « Application of electrostatic separation to the recycling of plastic wastes: separation of PVC, PET and ABS », *Environmental Science and Technology*, vol. 42, pp. 249-255, 2007.
- [70] P. Anglaret, J. Filippi and S. Kazmierczak. « Technologie Génie Chimique » Amiens Centre régional de documentation pédagogique, tome 3, 1989.
- [71] S.L. Escalante, G. Touchard and G. Dominguez. « Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes », *Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena*, pp. 694-697, 2002.
- [72] L. Dascalescu, M. Bilici, C. Dragan, A. Samuila, Y. Ramdani and A. Tilmatine. « Robust design and capability evaluation of a tribo-aerodynamic charging process for fine particles », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, pp. 1086-1092, 2011.

- [73] C. Dragan, M. Bilici, S. Das, A. Samuila and L. Dascalescu. « Tribocharging of insulating powders in the annular ducts of pneumatic devices », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, pp. 1138-1143, 2010.
- [74] C. Dragan, A. Samuila, S. Das, D. Iancu, M. Bilici and L. Dascalescu. « Factors that influence the tribo-charging of insulating ducts in suction-type dilute-phase pneumatic transport systems », *Journal of Electrostatics*, vol. 67, pp. 184-188, 2009.
- [75] Z. Chen, F. Liu, L. Wang, Y. Li, R. Wang and Z. Chen. « Tribocharging properties of wheat bran fragments in air-solid pipe flow », *Food Research International*, vol. 62, pp. 262-271, 2014.
- [76] J. D. Brown and P.F. Wynen. « Tribo-charging and Electrostatic Separation of Mixed Electrically Insulating Particles », U. S. Patent 6 927 354, August 9, 2005.
- [77] G. Wu, J. Li and Z. Xu. « Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review », *Waste Management*, vol. 33, pp. 585-597, 2013.
- [78] D. Tao and X. Jiang. « Electrostatic particle charger, electrostatic separation system and related methods », US Patent 2006/0213760, September 28, 2006.
- [79] L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila and L. Dascalescu. « Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, pp. 1044-1051, 2008.
- [80] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga and A. Samuila. « Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, pp. 1476-1483, 2011.
- [81] L. Brands, P. M. Beier and I. Stahl. « Electrostatic separation », *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley, New York, 2000.
- [82] A. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, R. Morar, R. Belaca, S. Das and L. Dascalescu. « Removal of metallic particles from acrylonitrile butadiene styrene wastes using electrostatic separation methods », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, pp. 322-329, 2011.
- [83] A. Iuga, S. Vlad, M. Mihailescu and L. Dascalescu. « A laboratory plate/screen-type electrostatic separator for granular mixtures: design, engineering and application », *Particulate Science and Technology*, vol. 22, pp. 275-283, 2004.
- [84] T. Zeghloul, S. Touhami, G. Richard, M. Miloudi, O. Dahou and L. Dascalescu. « Optimal operation of a plate-type corona-electrostatic separator for the recovery of metals and plastics from granular wastes », *IEEE Transactions on Industry applications*, vol. 52, pp. 2506-2512, 2016.
- [85] A. Tilmatine, S. Bendimerad, F. Boukhoulda, K. Medles and L. Dascalescu. « Electrostatic separators of particles. Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures », *Waste Management*, vol. 29, pp. 228-232, 2009.
- [86] L. Dascalescu, T. Zeghloul and A. Iuga. « Electrostatic separation of metals and plastics from waste electrical and electronic equipment », *WEEE Recycling Research*,

- Development and Policies (A. Chagnes, G. Cote, E. Ekberg, M. Nilsson, T. Retegan, Eds), Elsevier, Amsterdam 2016, pp. 53-74.
- [87] C. R. Hicks and K. V. Turner Jr. «Fundamental concepts in the design of Experiments », Oxford university press, Oxford, 1999.
- [88] J. Goupy. « Plan d'expérience pour surface de réponse », Dunod, pp. 253-255, 1999.
- [89] N. L. Frigon and D. Mathews. « Practical guide to experimental design », New York, USA: Wiley, 1996.
- [90] K. Medles, A. Tilmatine, F. Miloua, A. Bendaoud, M. Younes, M. Rahli and L. Dascalescu. « Set point identification and robustness testing of electrostatic separation processes », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, pp. 618-626, 2007.
- [91] L. Dascalescu, A. Tilmatine, F. Aman and M. Mihailescu. « Optimization of electrostatic separation processes using response surface modelling », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, pp. 53-59, 2004.
- [92] S. Vlad, A. Iuga and L. Dascalescu. « Modelling of conducting particle behaviour in plate-type electrostatic separators », Journal of Physics D : Applied Physics, vol. 33, pp. 127-133, 2000.
- [93] S. Vlad, A. Iuga and L. Dascalescu. « Numerical computation of conducting particle trajectories in plate-type electrostatic separators », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, pp. 66-71, 2003.
- [94] S. Das, K. Medles, M. Younes, C. Dragan and L. Dascalescu. « Separation of fine granular mixtures in S-plate-type electrostatic separators, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, pp. 1137-1143, 2007.
- [95] A. Samuila, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu and L. Dascalescu. « Electrostatic technologies for materials recovery in high-intensity electric fields », 2006.
- [96] T. Butunoi, G. Gagi, A. Samuila, V. Neamtu, R. Morar, L. Dascalescu and A. Iuga. « Electric and electronic equipment of a research-oriented electrostatic separator », 12th International Conference OPTIM 2010, Brasov, Roumanie, 20-22 mai, 2010.
- [97] A. Iuga, L. Dascalescu, R. Morar, I. Csorvassy and V. Neamtu. « Corona-electrostatic separators for recovery of waste non-ferrous metals », Journal of Electrostatics, vol. 23, pp. 235-243, 1989.
- [98] L. Dascalescu, A. Mizuno, R. Tobazeon, A. Iuga, R. Morar, M. Mihailescu and A. Samuila. « Charges and forces on conductive particles in roll-type corona-electrostatic separators », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, pp. 947-956, 1995.
- [99] L. Dascalescu, R. Tobazeon and P. Atten. « Behaviour of conductive particles in corona-dominated electric fields », Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 28, pp. 1611-1618, 1995.
- [100] S. Das, A. Samuila, C. Dragan and L. Dascalescu. « Behaviour of charged insulating particles in contact with a rotating roll electrode », Journal of Electrostatics, vol. 67, pp. 189-192, 2009.

- [101] A. Iuga, M. Mihailescu, A. Cocis and L. Dascalescu. « Particle charge neutralization in roll-type electroseparators », *Journal of Electrostatics*, vol. 23, pp. 235-243, 1997.
- [102] L. Dascalescu. « Numerical analysis of the electric field of roll-type electrostatic separator », *Journal of Electrostatics*, vol. 29, pp. 255-267, 1993.
- [103] L. Dascalescu, P. Ribardi re, M. Mihailescu and P. Levin. « Numerical analysis of induction charging of conductive cylinders in non-uniform electric fields », *Journal of Electrostatics*, vol. 51-52, pp. 597-602, 2001.
- [104] M. Younes, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, A. Samuila and L. Dascalescu. « Simulation numérique des trajectoires des particules métalliques dans le séparateur couronne-électrostatique   tambour », *Acta Electrotehnica*, vol. 47, pp. 19-25, 2006.
- [105] J. Li, H. Lu, Z. Xu and Y. Zhou. « A model for computing the trajectories of conductive particles from waste printed circuit boards in corona electrostatic separators », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 151, pp. 52-57, 2008.
- [106] J. Wu, J. Li and Z. Xu. « An improved model for computing the trajectories of conductive particles in roll-type electrostatic separators for recycling metals from WEEE », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 167, pp. 489-493, 2009.
- [107] M. Younes, A. Younes, H. Sayah, A. Tilmatine, A. Samuila and L. Dascalescu. « Numerical and experimental study of insulating particles behavior in roll-type corona-electrostatic separator », *Particulate Science and Technology*, vol. 31, pp. 71-80, 2013.
- [108] R. Morar, A. Iuga, L. Dascalescu and A. Samuila. « Factors which influence the insulation-metal electroseparation », *Journal of Electrostatics*, vol. 30, pp. 403-412, 1993.
- [109] L. Dascalescu, A. Samuila, A. Iuga, R. Morar and I. Csorvasy. « Influence of material superficial moisture on insulation-metal electroseparation », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, pp. 844-852, 1994.
- [110] K. Medles, L. Dascalescu, A. Tilmatine, A. Bendaoud and M. Younes. « Experimental modeling of the electrostatic separation of granular materials », *Particulate Science and Technology*, vol. 25, pp. 163-171, 2007.
- [111] S. Touhami, K. Medles, O. Dahou, A. Tilmatine, A. Bendaoud and L. Dascalescu. « Modeling and optimization of a roll-type electrostatic separation process using artificial neural networks », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 1773-1780, 2013.
- [112] M. Younes, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli and L. Dascalescu. « Numerical modeling of conductive particle trajectories in roll-type corona-electrostatic separators », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, pp. 1130-1136, 2007.
- [113] A. Younes, M. Younes, H. Sayah, M. Bilici, A. Samuila and L. Dascalescu. « Effect of spark-discharges on the trajectories of insulating particles in roll-type corona-electrostatic separators. Experimental and numerical study », *Journal of Electrostatics*, vol. 71, pp. 84-91, 2013.
- [114] J. Li, Z. Xu and Y. Zhou. « Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards », *Journal of Electrostatics*, vol. 65, pp. 233-238, 2007.

- [115] J. Wu, J. Li and Z. Xu. « A new two-roll electrostatic separator for recycling of metals and nonmetals from waste printed circuit board », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 161, pp. 257-262, 2009.
- [116] J. Wu, J. Li and Z. Xu. « Optimization of key factors of the electrostatic separation for crushed PCB wastes using roll-type separator », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 154, pp. 161-167, 2008.
- [117] J. Wu, J. Li and Z. Xu. « Electrostatic separation for multi-size granule of crushed printed circuit board waste using two-roll separator », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 159, pp. 230-234, 2008.
- [118] A. Tilmatine, S. Flazi, K. Medles, Y. Ramdani and L. Dascalescu. « Séparation électrostatique : complément des procédés mécaniques de recyclage des déchets industriels », *Journal of Electrostatics*, vol. 61, pp. 21-30, 2004.
- [119] H. M. Veit, T. R. Diehl, A. P. Salami, J. S. Rodrigues, A. M. Bernardes and J. A. S. Tenorio. « Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap », *Waste Management*, vol. 25, pp. 67-74, 2005.
- [120] Y. Qin, J. Wu, Q. Zhou and Z. Xu. « Quadratic nonlinear models for optimizing electrostatic separation of crushed waste printed circuit boards using response surface methodology », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 167, pp. 1038-1043, 2009.
- [121] K. Freegard, G. Ant and S. Frisch. « WEEE Plastics Separation Technologies », DEFRA Waste and Resources Evidence Program, 2007.
- [122] M. Younes, H. Sayah, M. Younes, A. Samuila and L. Dascalescu. « Behavior of conducting particles in a new electrostatic separator with two high-voltage electrodes », *Particulate Science and Technology*, vol. 28, pp. 207-216, 2010.
- [123] S. Trigwell, N. Grable, C. U. Yurteri, R. Sharma and M. K. Mazumder. « Effects of surface properties on the tribocharging characteristics of polymer powder as applied to industrial processes », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, pp. 79-86, 2003.
- [124] H. S. Jeon, C. H. Park, B. G. Cho and J. K. Park. « Separation of PVC and rubber from covering plastics in communication cable scrap by tribo-charging », *Separation Science and Technology*, vol. 44, pp. 190-202, 2009.
- [125] R. K. Dwari and K. Rao. « Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator », *Minerals Engineering*, vol. 22, pp. 119-127, 2009.
- [126] S. Masuda, M. Toragushi, T. Takahashi and K. Haga. « Electrostatic beneficiation of coal, using a cyclone-tribocharger », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 19, pp. 789-793, 1983.
- [127] M. K. Mazumder, R. A. Sims, A. S. Biris, P. K. Srirama, D. Saini, C. U. Yurteri, S. Trigwell, S. Dea and R. Sharma. « Twenty-first century research needs in electrostatic processes applied to industry and medicine », *Chemical Engineering Science*, vol. 61, pp. 2192-2211, 2006.

- [128] S. Bendimerad, A. Tilmatine, M. Ziane and L. Dascalescu. « Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator », *International Journal of Environmental Studies*, vol. 66, pp. 529-538, 2009.
- [129] A. Tilmatine and L. Dascalescu. « Set-point identification of a free-fall electrostatic process for plastic particles », *International Journal of Environmental Studies*, vol. 67, pp. 27-40, 2010.
- [130] C. Xiao, L. Allen, M. B. Biddle and M. Fisher. « Electrostatic separation and recovery of mixed plastics », *Society of Plastics Engineers (SPE) Annual Recycling Conference (ARC)*, Dearborn, Michigan (US), 1999.
- [131] Z. Chen, L. Wang, R. Wang, Y. Li and Z. Chen. « Triboelectric separation of aleurone cell-cluster from wheat bran fragments in nonuniform electric field », *Food Research International*, vol. 62, pp. 111-120, 2014.
- [132] R. K. Dwari, S. K. Mohanta, B. Rout, R. K. Soni, P. S. R. Reddy and B. K. Mishra. « Studies on the effect of electrode plate position and feed temperature on the tribo-electrostatic separation of high ash Indian coking coal », *Advanced Powder Technology*, vol. 26, pp. 31-41, 2015.
- [133] V. Starman, J. Kacerovsky, F. Mach, P. Karban and I. Dolezel. « Experimental study of triboelectric separator for mixture of plastic particles », *International Symposium on Theoretical Electrical Engineering*, Pilsen, Czech Republic, 2013.
- [134] J. Wang, M. De Wit, R. M. Boom and A. I. Schutyser. « Charging and separation behavior of gluten-starch mixtures assessed with a custom-built electrostatic separator », *Separation and Purification Technology*, vol. 152, pp. 164-171, 2015.
- [135] Y. Endo, E. Hirose and S. Ogsawara. « Technology for recycling mixtures of residual plastics from household appliances », *Mitsubishi electric technical report*, 2008.
- [136] C. Xiao and L. Allen. « Electrostatic separation enhanced by media addition », *US Patent 6452126*, September 17, 2002.
- [137] J. K. Lee. « Separation system and method of unburned carbon in fly ash from a coal-fired power plant », *US patent 5885330*, March 23, 1999.
- [138] H. Daiku, T. Inoue, M. Tsukahara and K. Kakeda. « Electrostatic separation technology for waste plastics – development of a high-purity type separator for plastics », *Proceedings of the Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, December 11 -15, Tokyo, Japan, pp. 562-565, 2001.
- [139] Y. Fujita, M. Kumagai and Y. Aizawa. « Friction electrifying-type electrostatic sorting apparatus », *US Patent 5746320*, May 5, 1998.
- [140] R. H. Yoon, O. H. Han, E. S. Yan and B. W. Park. « Electrostatic method of separating particulate materials », *US Patent 6320148*, November 20, 2001.
- [141] C. Dragan, O. Fati, M. Radu, L. Calin, A. Samuila and L. Dascalescu. « Tribocharging of mixed granular plastics in a fluidized-bed device », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, pp. 1922-1928, 2011.

- [142] J. Li and L. Dascalescu. « Newly-patented technical solutions for improving the tribo-electrostatic separation of mixed granular solids », *Recent Patents on Engineering*, vol. 6, pp. 104-115, 2012.
- [143] M. F. Boukhoulda, M. Miloudi, K. Medles, M. Rezoug, A. Tilmatine and L. Dascalescu. « Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 2375-2381, 2013.
- [144] M. Ha, C. Jeon, D. Choi and H. Choi. « A numerical study on the triboelectrostatic separation of PVC materials from mixed plastics for waste plastic recycling », *KSME International Journal*, vol. 17, pp. 1485-1495, 2003.
- [145] M. Bilici, L. Dascalescu, T. György, V. Barna, F. Rahou and A. Samuila. « Experimental modelling of the tribo-aero-electrostatic separation of mixed granular solids », *Conference Record 2011 IEEE/IAS Annual Meeting, Orlando, Florida*. DOI: 10.1109/IAS.2011.6074273, 2011.
- [146] J. Li, L. Dascalescu, M. Bilici and Z. Xu. « Numerical modeling of the trajectories of plastic granules in a tribo-aero-electrostatic separator », *Journal of Electrostatics*, vol. 71, pp. 281-286, 2013.
- [147] T. Likitwattanasade and S. A. Barringer. « The influence of particle size and dustiness in powder mixtures during nonelectrostatic and electrostatic coating », *Journal of Electrostatics*, vol. 77, pp. 44-50, 2015.
- [148] A. Tilmatine, A. Benabboun, Y. Brahami, A. Bendaoud, M. Miloudi and L. Dascalescu. « Experimental investigation of a new triboelectrostatic separation process for mixed fine granular plastics », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, pp. 4245-4250, 2014.
- [149] H. Ban, T. X. Li, J. C. Hower, J. L. Schaefer and J. M. Stencel. « Dry triboelectrostatic beneficiation of fly ash », *Fuel*, vol. 76, pp. 801-805, 1997.
- [150] F. S. Ali, I. I. Inculet and A. Tedoldi. « Charging of polymer powder inside a metallic fluidized bed », *Journal of Electrostatics*, vol. 45, pp. 199-211, 1999.
- [151] S. Messal, A. Mekhalef, K. Medles, T. Zeghloul and L. Dascalescu. Factors that influence the efficiency of a tribo-aero-electrostatic separator for finely grinded matter. *Proc. Electrostatics Joint Conference, West Lafayette, USA, 13-17 June 2016*.
- [152] M. Miloudi, K. Medles, A. Bendaoud, A. Tilmatine and L. Dascalescu. « Improvement of the industrial pilot of a tribo-aero-electrostatic separator for binary mixtures of granular insulating materials », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 3479-3484, 2015.
- [153] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine and L. Dascalescu. « Experimental study of the optimum operating conditions of a pilote-scale tribo-aero-electrostatic separator of mixed granular solids », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 699-706, 2013.

- [154] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, S. El-Mossouess and K. Medles. « Tribo-aero-electrostatic separator for coarse granular insulating materials », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, pp. 1510-1515, 2013.
- [155] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, K. Medles and A. Tilmatine. « Improved overall performances of a tribo-aero-electrostatic separator for granular plastics from Waste Electric and Electronic Equipment », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 4159-4165, 2015.
- [156] A. Mekhalef, K. Medles, F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal and L. Dascalescu. « Study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 4166-4172, 2015.
- [157] M. D. West, C. Charles and R. W. Boswell. « Testing a Helicon double layer thruster immersed in a space-simulation chamber », *Journal of Propulsion and Power*, vol. 24, pp. 134-141, 2008.
- [158] F. Paschen. « Sur la différence de potentiel nécessaire à la formation d'arc électrique dans de l'air, de l'hydrogène et du gaz carbonique sous différentes pressions (Traduction de l'allemand) », *Wied. Annales de Physique*, vol. 37, pp. 69-96, 1889.
- [159] U. Kogelschatz, « Dielectric barrier discharges: Their history, discharge physics and industrial applications », *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 23, pp. 1-46, 2003.
- [160] T. Shao, K. Long, C. Zhang, J. Wang, D. Zhang, P. Yan and S. Zhang. « Electrical characterization of dielectric barrier discharge driven by repetitive nanosecond pulses in atmospheric air », *Journal of Electrostatics*, vol. 67, pp. 215-221, 2009.
- [161] T. Shao, P. Yan, K. Long and S. Zhang. « Dielectric barrier discharge excited by repetitive nanosecond-pulses in air at atmospheric pressure », *IEEE Transactions on Plasma Sciences*, vol. 36, pp. 1358-1359, 2008.
- [162] K. Hassouni, F. Massines and J. M. Pouvesle. « Plasmas hors-équilibre à des pressions atmosphériques », in *Plasmas froids: Génération, caractérisation et technologies*, Saint-Etienne, Publications de l'Université de Saint Etienne, pp. 49-108, 2004.
- [163] F. Massines and G. Gouda. « A comparison of polypropylene-surface treatment by filamentary, homogeneous and glow discharges in helium at atmospheric pressure », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 31, pp. 3411-3420, 1998.
- [164] S. Pasquiers and J. M. Tatibouët. « Association des plasmas non-thermiques à la catalyse: applications et verrous technologiques », in *Plasmas froids: Astrophysique, aérospatial, environnement, biologie et nanomatériaux*, Saint-Etienne, Publication de l'Université de Saint-Etienne, pp. 183-192, 2006.
- [165] N. Gherardi. « Physico-chimie et régimes des décharges contrôlées par barrière diélectrique en mélange azote - gaz oxydant - silane. Application à l'activation de surfaces polymères et aux dépôts », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1998.
- [166] R. Bartnikas. « Note on ac discharge between metallic-dielectric electrodes in helium », *Journal of Applied Physics*, vol. 40, pp. 1974-1976, 1969.

- [167] T. Yokoyama, M. Kogoma, T. Moriwaki and S. Okazaki. « The mechanism of the stabilisation of glow plasma at atmospheric pressure », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 23, pp. 1125-1128, 1990.
- [168] S. Kanazawa, M. Kogoma, T. Moriwaki and S. Okazaki. « Stable glow plasma at atmospheric pressure », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 21, pp. 838-840, 1988.
- [169] S. Kanazawa, M. Kogoma, S. Okazaki and T. Moriwaki. « Glow plasma treatment at atmospheric pressure for surface modification and film deposition », *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research section B*, vol. 37, pp. 842-845, 1989.
- [170] N. Naudé, J. P. Cambronne, N. Gherardi and F. Massines. « Electrical model and analysis of the transition from an atmospheric pressure Townsend discharge to a filamentary discharge », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 38, pp. 530- 538, 2005.
- [171] C. Liu and J. R. Roth. « Plasma-related characteristics of a steady-state glow discharge at atmospheric pressure », *Proceedings IEEE International Conference on Plasma Science*, Vancouver, pp. 129, 1992.
- [172] J. R. Roth, L. Laroussi and C. Liu. « Experimental generation of steady-state glow discharge at atmospheric pressure », *Proceedings IEEE International Conference on Plasma Science*, Tampa, pp. 170, 1992.
- [173] F. Massines, C. Mayoux, R. Messaoudi, A. Rabehi and P. Ségur. « Experimental study of an atmospheric pressure glow discharge, application to polymers surface treatment », *Proceedings International Conference on Gas Discharges and their Applications*, Swansea, pp. 730-733, 1992.
- [174] R. Messaoudi, F. Massines, A. Younsi, B. Despax and C. Mayoux. « Humidity effect on corona discharges, role of electric field », *Proceedings International Conference on Gas Discharges and their Applications*, Swansea, pp. 318-321, 1992.
- [175] F. Massines, N. Gherardi, N. Naudé and P. Ségur. « Recent advances in the understanding of Homogeneous dielectric barrier discharges », *HAKONE XI*, Oleron Island, 7-12 September, 2008.
- [176] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg. « Principles of Plasma Discharges and Materials Processing », Inc. 572, New York, John Wiley and Sons, 1994.
- [177] H. F. Winters and J. W. Coburn. « Surface science aspects of etching reactions », *Surface Science Reports*, vol. 14, pp. 162-269, 1992.
- [178] B. Wu. « Photomask plasma etching: a review », *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement and Phenomena*, vol. 24, pp. 1-15, 2006.
- [179] C. Sarra-Bournet. « Fonctionnalisation de surface de polymères par plasma à la pression atmosphérique. Animation de surface et dépôt de couche minces par un procédé de décharge par barrière diélectrique », *Thèse de doctorat*, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, pp. 1-241, 2009.
- [180] H. Rauscher, M. Perucca, and G. Buyle. « Plasma Technology for Hyperfunctional Surfaces », *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim*, pp. 1-400, 2010.

- [181] M. B. Olde Riekerink. « Structural and chemical modification of polymer surfaces by gas plasma etching », Press: Printpartners Ipskamp, Enschede, The Netherlands, pp. 1-151; 2001.
- [182] J. Lai, B. Sunderland, J. Xue, S. Yan, W. Zhao, M. Folkard, B. D. Michael and Y. Wang. « Study on hydrophilicity of polymer surfaces improved by plasma treatment », *Applied Surface Science*, vol. 252, pp. 3375–3379, 2006.
- [183] E. M. Liston, L. Martinu and M. R. Wertheimer. « Plasma Surface Modification of polymers for Improved Adhesion - a Critical-Review », *Journal of adhesion science and technology*, vol. 7, pp. 1091-1149, 1993.
- [184] S. Lerouge, M. R. Wertheimer and L. H. Yahia. « Plasma sterilization: A review of parameters, mechanisms, and limitations », *Plasmas and Polymers*, vol. 6, pp. 175-188, 2001.
- [185] N. Zouzou, C. Agbangla, E. Moreau and G. Touchard. « Diesel particle treatment using a surface dielectric barrier discharge », *IEEE Transactions on plasma science*, vol. 36, pp. 1354-1355, 2008.
- [186] N. Zouzou, K. Takashima, A. Mizuno and G. Touchard. « Generation and application of wide area plasma », Chapter 8 of *Industrial plasma Technology: Application from Environmental to Energy Technologies*, Weinheim: Wiley-VCH, 2010.
- [187] H. Schonhorn, F. W. Ryan and R. H. Hansen. « Surface Treatment of Polypropylene for Adhesive Bonding », *Journal of adhesion*, vol. 2, pp. 93-99, 1970.
- [188] J. Izdebska. « Corona Treatment », *Printing on polymers*, pp. 123-142, 2016.
- [189] R. d'Agostino, P. Favia, C. Oehr and M. R. Wertheimer. « Plasma Processes and Polymers », Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, pp. 1-518, 2005.
- [190] Document technique « Traitement de surface par plasma froid », pp. 1-9, Disponible sur : www.cpi-plasma.com.
- [191] G. Richard, S. Touhami, T. Zeghloul, A. Salama and L. Dascalescu. « Experimental and numerical evaluation of two electrode systems for plate-type electrostatic separators », *Journal of Electrostatics*, vol. 85, pp. 1-10, 2017.
- [192] L. Dascalescu, S. Vlad, A. Iuga and P. L. Levin. « Electrostatics of conductive particles in contact with a plate electrode affected by a non-uniform electric field », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 34, pp. 60-67, 2001.
- [193] G. Richard, S. Touhami, T. Zeghloul and L. Dascalescu. « Optimization of metals and plastics recovery from electric cable wastes using a plate-type electrostatic separator », *Waste Management*, vol. 60, pp. 112-122, 2017.
- [194] N. J. Félici. « Forces et charges de petits objets en contact avec une électrode affectée d'un champ électrique », *Revue Générale de l'Electricité*, vol. 75, pp. 1145-1160, 1966.
- [195] G. Richard, A. R. Salama, K. Medles, C. Lubat, S. Touhami and L. Dascalescu. « Experimental and numerical study of the electrostatic separation of two types of copper wires from electric cable wastes », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, pp. 3960-3969, 2017.

- [196] A. R. Salama, G. Richard, K. Medles, T. Zeghloul and L. Dascalescu. « Numerical and experimental study of a roll-type electrostatic separator for the recovery of aluminum and copper from waste electric wires », presented at the 10th conference of the French Society of Electrostatics SFE'2016, Poitiers, France, August 29-31, 2016.
- [197] G. Richard, A. R. Salama, K. Medles, T. Zeghloul and L. Dascalescu. « Comparative study of three high-voltage electrode configurations for the electrostatic separation of aluminum, copper and PVC from granular WEEE », *Journal of Electrostatics*, vol. 88, pp. 29-34, 2017.
- [198] K. G. Kostov, A. L. R. dos Santos, R. Y. Honda, P. A. P. Nascente, M. E. Kayama, M. A. Algatti and R. P. Mota. « Treatment of PET and PU polymers by atmospheric pressure plasma generated in dielectric barrier discharge in air », *Surface and Coatings Technology*, vol. 204, pp. 3064-3068, 2010.
- [199] Z. Niu, C. Zhang, T. Shao, Z. Fang, Y. Yu and P. Yan. « Repetitive nanosecond-pulse dielectric barrier discharge and its application on surface modification of polymers », *Surface and Coatings Technology*, vol. 228, pp. 578-582, 2013.
- [200] M. F. Bekkara, B. Naegoe, Y. Prawatya, Y. Benmimoun, T. Zeghloul and N. Zouzou. « Modifying the surface characteristics of polymers by exposure to dielectric barrier discharge », presented at the 10th conference of the French Society of Electrostatics SFE'2016, Poitiers, France, August 29-31, 2016.
- [201] G. Richard, A. Nadjem, K. Medles, M. Kachi, T. Zeghloul and L. Dascalescu. « Tribocharging of PP Granules after exposure to a Dielectric Barrier Discharge (DBD). Effect of Exposure Duration, Voltage Amplitude and Frequency », *Proceedings 2017 Annual Meeting of the Electrostatic Society of America*, Ottawa, Canada, June 2017.
- [202] S. Ren, K. Wang, Q. Y. Nie, D. Z. Wang and S. H. Guo. « Surface modification of PE film by DBD plasma in air », *Applied Surface Science*, vol. 255, pp. 3421-3425, 2008.
- [203] K. G. Kostov, T. M. C. Nishime, L. R. O. Hein and A. Toth. « Study of polypropylene surface modification by air dielectric barrier discharge operated at two different frequencies », *Surface and Coatings Technology*, vol. 234, pp. 60–66, 2013.
- [204] P. Bruggeman and R. Brandenburg. « Atmospheric pressure discharge filaments and microplasmas: physics, chemistry and diagnostics », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, pp. 1-28, 2013.
- [205] R. B. Tyata and D. P. Subedi. « An investigation of the effect of electrode geometry and frequency of power supply in the homogeneity of dielectric barrier discharge in air », *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, vol. 6, pp. 96-101, 2010.
- [206] G. Richard, A. Benabderrahmane, K. Medles, A. Tilmatine, T. Zeghloul and L. Dascalescu. « Factors that affect tribocharging of PE granules after exposure to a dielectric barrier discharge (DBD) », *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Cincinnati, OH, pp. 1-4, 2017.

LISTE DES PUBLICATIONS

Articles dans des revues avec comité de lecture :

2017

G. Richard, A. R. Salama, K. Medles, T. Zeghloul and L. Dascalescu. « Comparative study of three high-voltage electrode configurations for the electrostatic separation of aluminum, copper and PVC from granular WEEE », *Journal of Electrostatics*, vol. 88, pp. 29-34, 2017.

G. Richard, A. R. Salama, K. Medles, C. Lubat, S. Touhami and L. Dascalescu. « Experimental and numerical study of the electrostatic separation of two types of copper wires from electric cable wastes », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, pp. 3960-3969, 2017.

G. Richard, S. Touhami, T. Zeghloul, A. Salama and L. Dascalescu. « Experimental and numerical evaluation of two electrode systems for plate-type electrostatic separators », *Journal of Electrostatics*, vol. 85, pp. 1-10, 2017.

G. Richard, S. Touhami, T. Zeghloul and L. Dascalescu. « Optimization of metals and plastics recovery from electric cable wastes using a plate-type electrostatic separator », *Waste Management*, vol. 60, pp. 112-122, 2017.

T. Zeghloul, A. M. Benhafssa, **G. Richard**, K. Medles and L. Dascalescu. « Effect of particle size on the tribo-aero-electrostatic separation of plastics », *Journal of Electrostatics*, vol. 88, pp. 24-28, 2017.

2016

T. Zeghloul, S. Touhami, **G. Richard**, M. Miloudi, O. Dahou and L. Dascalescu. « Optimal operation of a plate-type corona-electrostatic separator for the recovery of metals and plastics from granular wastes », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, pp. 2506-2512, 2016.

Communications avec actes :

2017

G. Richard, A. Benabderrahmane, K. Medles, A. Tilmatine, T. Zeghloul and L. Dascalescu. « Factors that affect tribocharging of PE granules after exposure to a dielectric barrier discharge (DBD) », 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Cincinnati, OH (U.S.A.), October 1-5, 2017.

I. E. Achouri, T. Zeghloul, **G. Richard**, K. Medles, H. Nouri and L. Dascalescu. « Premises for industrial application of a two-rotating-disks-type tribo-aero-electrostatic separator for micronized WEEE », 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Cincinnati, OH (U.S.A.), October 1-5, 2017.

G. Richard, A. Nadjem, K. Medles, M. Kachi, T. Zeghloul and L. Dascalescu. « Tribocharging of PP Granules after exposure to a Dielectric Barrier Discharge (DBD). Effect of Exposure Duration, Voltage Amplitude and Frequency », 2017 Annual Meeting of the Electrostatics of America, Ottawa (Canada), June 13-15, 2017.

I. E. Achouri, T. Zeghloul, K. Medles, **G. Richard**, H. Nouri and L. Dascalescu. « Tribo-aero-electrostatic separation of micronized waste plastics », 2017 Annual Meeting of the Electrostatic Society of America, Ottawa (Canada) June 13-15, 2017.

A. Benabderrahmane, **G. Richard**, A. Tilmatine, A. M. Delisor, T. Zeghloul and L. Dascalescu. « Modeling and optimization of a roll-type tribo-electrostatic separator for granular plastic mixtures », 2017 Annual Meeting of the Electrostatic Society of America, Ottawa (Canada), June 13-15, 2017.

G. Richard, A. R. Salama, K. Medles, T. Zeghloul and L. Dascalescu. « Comparative study of three high-voltage electrode configurations for electrostatic separation of aluminum, copper and PVC from granular WEEE », Electrostatics 2017, Frankfurt (Germany), April 10-13, 2017.

T. Zeghloul, A. M. Benhafssa, **G. Richard**, K. Medles and L. Dascalescu. « Effect of particle size on the tribo-aero-electrostatic separation of plastics », Electrostatics 2017, Frankfurt (Germany), April 10-13, 2017.

2016

A. R. Salama, **G. Richard**, K. Medles, T. Zeghloul and L. Dascalescu. « Numerical and experimental study of a roll-type electrostatic separator for the recovery of aluminum and copper from waste electric wires », presented at the 10th conference of the French Society of Electrostatics SFE'2016, Poitiers, France, August 29-31, 2016.

G. Richard, A. R. Salama, K. Medles, C. Lubat, S. Touhami and L. Dascalescu. « Electrostatic separation of two types of copper wires from electric cable wastes », 2016 Electrostatics Joint Conference, Purdue University, West Lafayette, IN (U.S.A.), June 13-16, 2016.

2015

T. Zeghloul, L. Dascalescu, S. Touhami, M. Miloudi, O. Dahou and **G. Richard**. « Corona-assisted plate-type electrostatic separation process for granular plastic wastes », Conference Record IEEE/IAS Annual Meeting, Dallas, October 18-22, 2015.

ANNEXES

Annexe I : Vue 3D du prototype de séparateur industriel PRD

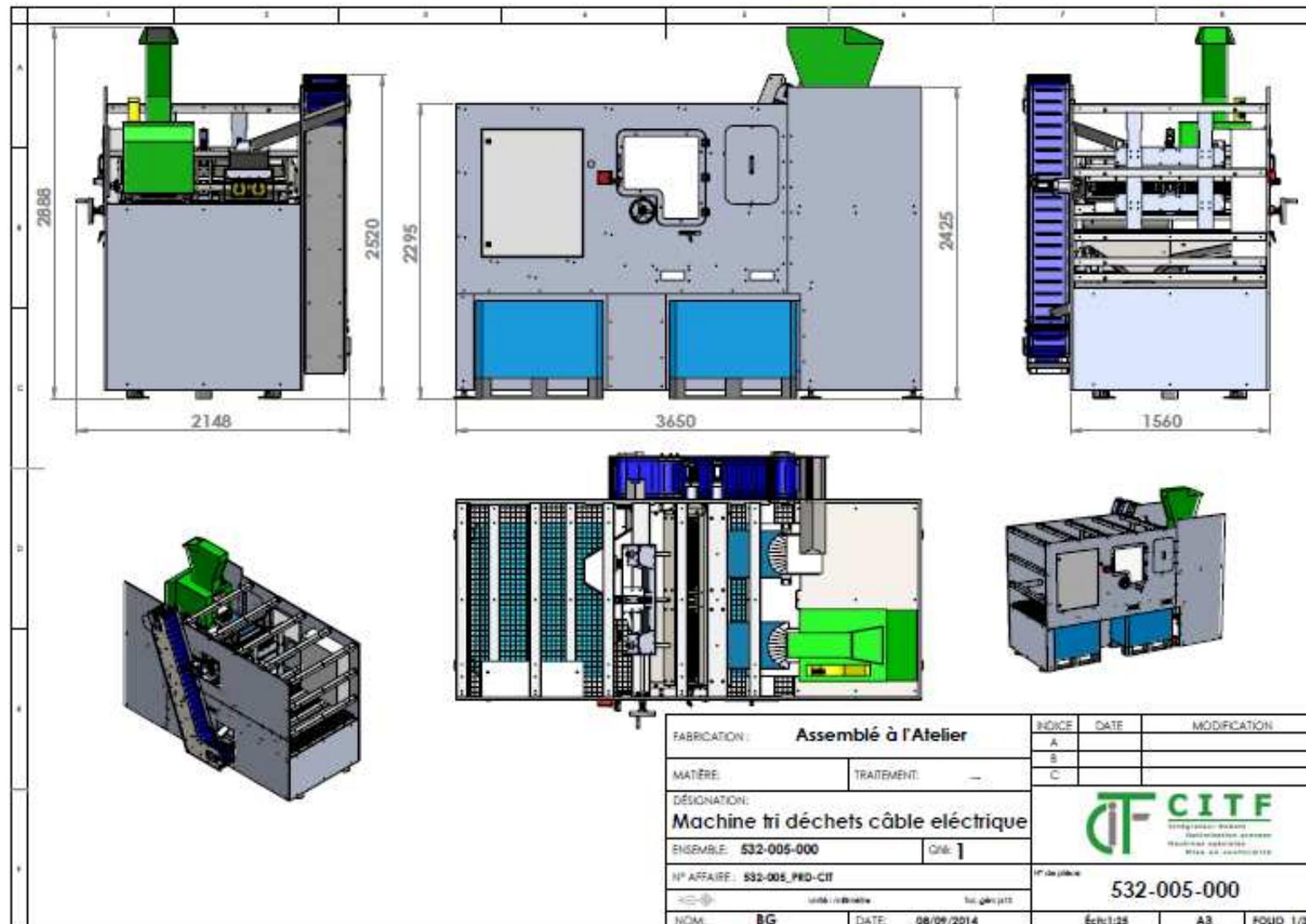


Fig. I-i : Vue 3D du prototype de séparateur électrostatique industriel.

Annexe II : Vue 3D du séparateur électrostatique industriel de série CP100

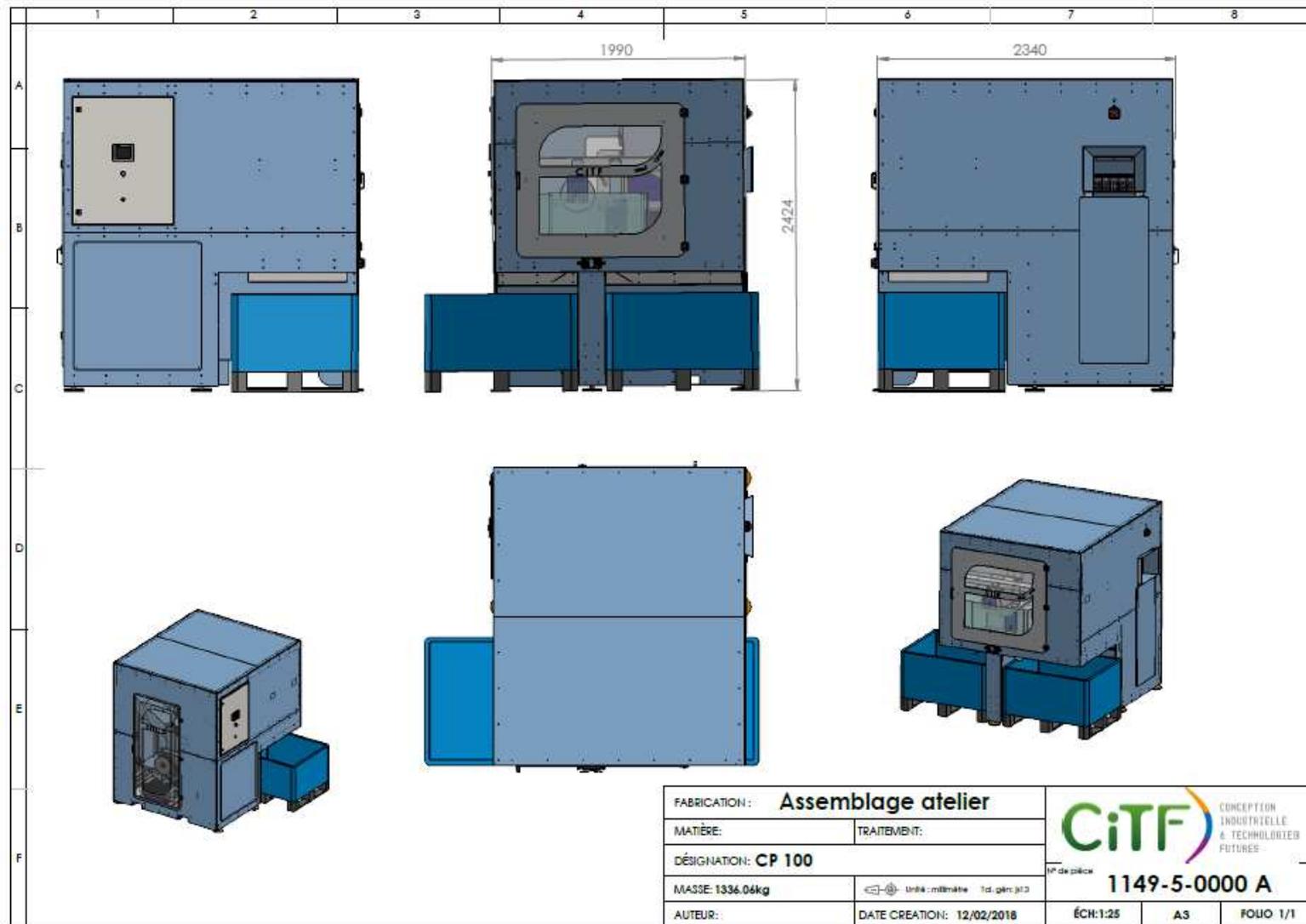


Fig. II-i : Vue 3D du premier séparateur électrostatique industriel de série CP100.

Annexe III : Visualisation de l'état de surface et spectrométrie infrarouge d'une plaque de PP avec traitement par DBD

Un microscope a été utilisé pour constater les modifications d'état de surface d'une plaque de PP traitée par DBD avec un signal carré d'une amplitude de 14 V et d'une fréquence de 400 Hz créé par le GBF et dont l'amplitude est multipliée 3000 fois par l'amplificateur haute tension (figure III-i). L'amplitude du signal alors appliqué au système d'électrode est donc de ± 21 kV. Un traitement de 10 s ne semble pas modifier la surface de la plaque. Celle-ci reste relativement lisse. En revanche, un traitement de 5 min par DBD change complètement l'aspect de la plaque. De multiples boursoufflures apparaissent et ressemblent à des gouttelettes d'eau. Toutefois, elles ne disparaissent pas en essuyant la plaque avec un chiffon propre et sont donc caractéristiques au matériau.

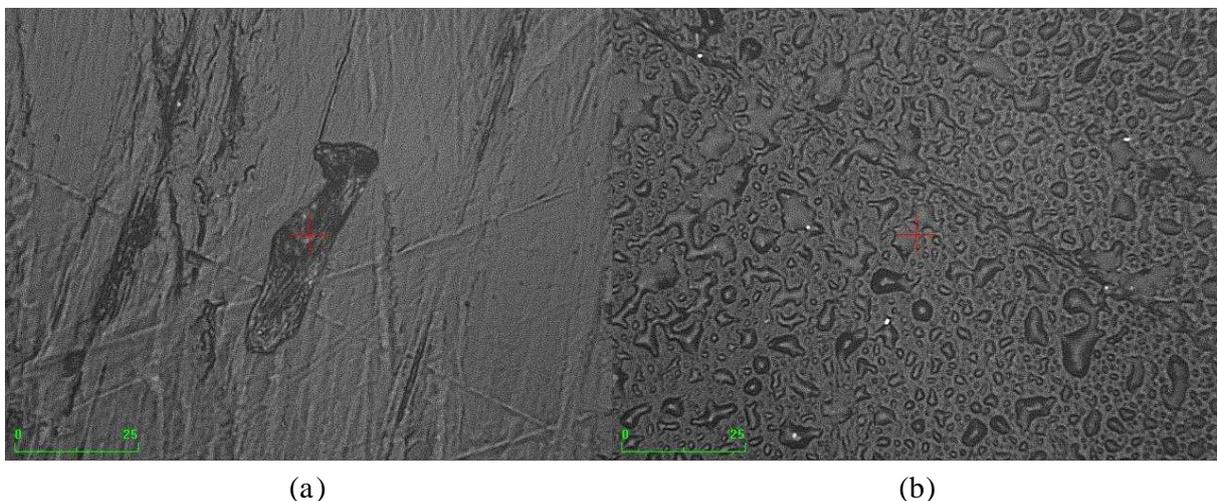
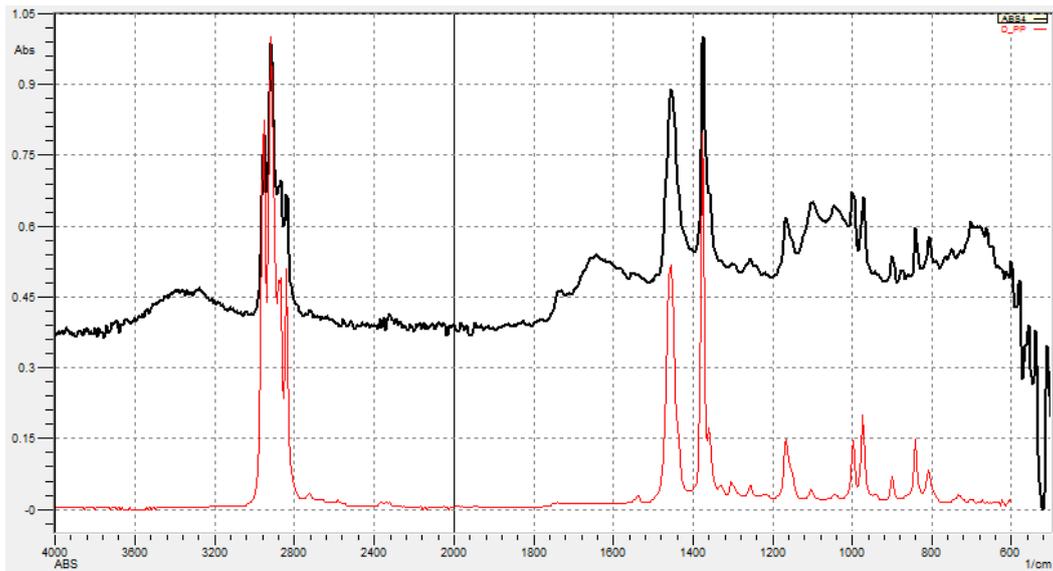


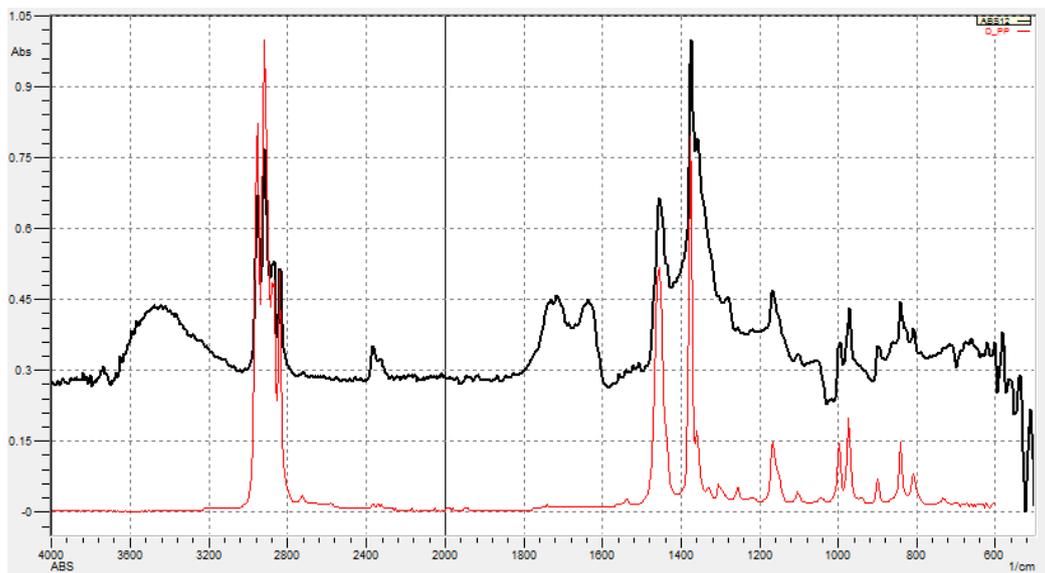
Fig. III-i : Visualisation par microscope de l'état de surface d'une plaque de PP traitée par DBD. (a) Traitement de 10 s ; (b) Traitement de 5 min.

L'utilisation d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier sur ces mêmes plaques a donné les résultats présentés sur la figure III-ii. Par rapport à la courbe de référence (en rouge sur chacun des graphiques), plusieurs modifications sont engendrées par le traitement par DBD. La valeur du spectre augmente en trois points : aux alentours de 1760 cm^{-1} , 2480 cm^{-1} et 3360 cm^{-1} . A contrario, les « pics » présents pour 2880 cm^{-1} et 1480 cm^{-1} diminuent lorsque le temps de traitement par DBD augmente. Chaque pic correspond à une liaison moléculaire. Il semblerait que les pics en 3360 cm^{-1} , 2880 cm^{-1} et 1760 cm^{-1} correspondent respectivement aux liaisons OH, CH et C=O. Il existe donc un impact moléculaire du traitement par Décharge à Barrière Diélectrique d'une plaque de Polypropylène.

Annexe III : Visualisation de l'état de surface et spectrométrie infrarouge d'une plaque de PP avec traitement par DBD



(a)



(b)

Fig. III-ii : Spectre infrarouge d'une plaque de PP traitée par DBD. (a) Traitement de 10 s ; (b) Traitement de 5 min. Courbe noire : spectre mesuré ; Courbe rouge : spectre de référence du PP.

Annexe IV : Récapitulatif des puretés des produits obtenus pour les différentes configurations étudiées pour la séparation de mélanges isolant – isolant

Tabl. IV-i : Récapitulatif des puretés des produits obtenus pour chaque mélange et chaque configuration.

	Tube PEHD ; Polarité (+) ;		Tube PEHD ; Polarité (-) ;		Tube PEHD ; Polarité (+) ;		Tube PVC ; Polarité (+) ;		Tube PVC ; Polarité (-) ;		Tube PVC ; Polarité (+) ;	
	Sans DBD		Sans DBD		Avec DBD		Sans DBD		Sans DBD		Avec DBD	
PE/PP	99,3	90,5	98,2	56,2	97,7	97,6	95,4	75,2	95,7	52,0	83,3	97,5
PP/HIPS	55,8	53,4	94,5	59,2	47,8	47,7	84,7	67,3	96,5	54,1	52,3	54,5
PE/PVC	87,0	80,8	73,3	50,4	97,6	99,9	82,3	87,3	80,0	50,0	88,8	97,8
PE/HIPS	89,4	79,2	98,8	74,2	98,5	93,9	91,3	88,4	97,9	64,5	95,4	98,9
PP/PVC	99,3	84,9	98,4	50,6	75,7	87,5	98,2	91,8	95,1	53,2	60,9	74,9
PVC/HIPS	99,6	98,9	100,0	78,4	94,8	100,0	99,8	94,9	100,0	69,4	91,2	98,6

Titre : ETUDE EXPERIMENTALE ET OPTIMISATION FONCTIONNELLE DES INSTALLATIONS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MELANGES DE MATERIAUX GRANULAIRES

Résumé : La démarche expérimentale menée dans cette thèse CIFRE a eu comme objectif l'étude de la faisabilité de la séparation électrostatique d'une large gamme de mélanges de matériaux granulaires issus de déchets d'équipements électriques et électroniques (conducteur – isolant, conducteur – conducteur et isolant – isolant). Trois mécanismes physiques de charge électriques ont été mis en oeuvre : l'induction électrostatique, la décharge couronne et l'effet triboélectrique. Un dispositif de charge de laboratoire et deux séparateurs électrostatiques industriels ont été conçus et réalisés. Le dispositif de charge à cylindre(s) tournant(s) permet la charge triboélectrique de matériaux plastiques. Le prototype de séparateur industriel a d'abord été réalisé pour le traitement de mélanges granulaires conducteur – isolant puis a été adapté à la séparation isolant – isolant. Les trois mécanismes de charge peuvent y être utilisés. Ce prototype a permis la fabrication du premier séparateur électrostatique de série de la société CITF dédié à la séparation de déchets de câbles électriques. Des mesures de charge et de masse ainsi que des simulations et visualisations des trajectoires des particules par caméra rapide ont facilité l'analyse des phénomènes. La méthode des plans d'expérience a permis d'identifier les facteurs influents sur les processus de séparation et de définir leur point de fonctionnement optimal. L'influence d'une décharge à barrière diélectrique sur la charge triboélectrique et la séparation électrostatique de mélanges plastiques a été étudiée. Les travaux réalisés dans cette thèse ont confirmé la séparabilité électrostatique de mélanges de matériaux granulaires.

Mots-clés : Séparation électrostatique, charge triboélectrique, décharge à barrière diélectrique, visualisation par caméra rapide, simulation numérique, DEEE.

Title: EXPERIMENTAL STUDY AND OPTIMIZATION OF ELECTROSTATIC SEPARATORS FOR GRANULAR MATERIALS MIXTURES

Abstract: The experimental approach used in this thesis was aimed at the study of the feasibility of the electrostatic separation of a wide range of granular mixtures from waste electric and electronic equipment (conductive – insulator, conductive – conductive, insulator – insulator). Three physical mechanisms of electrical charging have been studied: electrostatic induction, corona discharge and triboelectric effect. A tribo-charging device and two industrial electrostatic separators have been designed and engineered. The rotating cylinder tribo-charging device allows the triboelectric charging of plastics. The industrial separator prototype was firstly built for processing conducting – insulator granular mixtures and then adapted for insulator – insulator separation. This prototype, which enables the use of all three electrical charging mechanisms, served as model for the CITF company first industrial electrostatic separator for the recycling of metals and plastics from electric cable wastes. Charge and mass measurement, as well as modelling and visualization of particle trajectories by a high-speed camera facilitated the investigations. Design of experiments method was used to define the influential factors and find the optimum operating conditions of the separation processes. Dielectric barrier discharge exposure of granular plastics may enhance the efficiency of the triboelectric charging of these materials and hence facilitate their electrostatic separation. These researches have confirmed the feasibility of the electrostatic separation of a wide variety of granular mixtures.

Keywords: Electrostatic separation, triboelectric charge, dielectric barrier discharge, high-speed camera visualization, numerical study, WEEE.