

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

UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES



Faculté de Génie électrique

Département d'Électrotechnique

Thèse présentée par :

MESSAFEUR Radjaa

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat LMD

Option : Haute tension

Intitulé de la thèse :

***Etude d'un procédé de séparation d'un mélange
de particules isolantes issues de plusieurs matériaux***

Présentée devant le jury composé de :

Pr. BENDAOUD Abdelber	Professeur	(U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Président
Pr. OUIDDIR Rabeh	Professeur	(U.S.T.M.B. Oran)	Encadreur
Pr. DASCALESCU Lucian	Professeur	(Univ. Poitiers, France)	Co-Encadreur
Dr. MILOUA Farid	MCA	(U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Examineur
Dr. MILOUDI Mohamed	MCA	(U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Examineur
Pr. TILMATINE Amar	Professeur	(U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Invité

Soutenue en 2018



Laboratoire de recherche APELEC (Application of Plasma, Electrostatics & Electromagnetic Compatibility)



Remerciements

Le travail de synthèse que nécessite la rédaction d'une thèse est un travail difficile, mais à présent que je me retrouve face à mes remerciements, je me sens toute aussi impuissante....

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

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

*Je remercie sincèrement le Professeur **Lucian DASCALESCU** pour avoir accepté de codiriger ma thèse. Je lui exprime toute ma reconnaissance pour les conseils enrichissants aux plans théorique et pratique dans le domaine de l'électrostatique. Et aussi, j'exprime mes sentiments les plus sincères de reconnaissance et de remerciements au Professeur **Amar TILMATINE**. Je le remercie surtout pour ses qualités humaines, son dévouement, sa disponibilité, son écoute, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance, veuillez trouver dans ce travail le témoignage de mon profond respect.*

*En outre, j'adresse mes remerciements à monsieur **BENDAOU Abdelber** pour avoir accepté de présider le jury, tout comme j'adresse ma profonde reconnaissance à messieurs **MILOUA Farid** et **MILOUDI Mohamed** pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce modeste travail.*

*Par ailleurs j'aimerais tout particulièrement remercier ma mère, la femme la plus forte que je connaisse, qui a été toujours présente pour moi tout au long de mon parcours, qui a toujours fait de son mieux pour que je puisse mener à bien mes études. Je la remercie pour son soutien sans faille et pour la confiance qu'elle m'a toujours accordée. Et à la mémoire de mon père que j'ai aimé qu'il soit présent. A mon frère **Imad**, mes soeurs : **Amina, Nour el houda et Ibtissem**, ma nièce **Nihed Sila** et ma cousine **Rania** à toutes **ma famille** et à **Aicha Senoussaoui** et **Djillali Aouimer**. Votre présence et la confiance que vous m'avez donnée étaient une des raisons qui m'ont poussée à continuer jusqu'au bout malgré tous les moments durs.*

*À ma meilleure amie **MAHI Imene Nassima**, j'exprime toute ma gratitude, malgré les obstacles et les défis par lesquels nous sommes passés, tu as assumé jusqu'au bout, sans te lasser, sans te fatiguer.*

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

Merci Bon Dieu !

Merci encore à tous !

MESSAFEUR Radjaa

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Introduction générale	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART	
Introduction	5
I.1. Généralités sur les matières plastiques	5
I.1.1. Les familles des matières plastiques	6
a) Les thermoplastiques	6
b) Les thermodurcissables	7
c) Les élastomères ou caoutchoucs	8
I.2. Mécanismes de charge électrique	9
I.2.1. Effet tribo-électrique	9
I.2.2. Série triboélectrique	10
I.3. Forces exercées sur les matériaux granulaires	11
I.3.1. Forces de la pesanteur	11
I.3.2. Forces de London-Van der Waals	11
I.3.3. Forces de Coulomb	13
I.3.4. Forces aérodynamiques	15
I.4. Dispositifs de charge	16
I.4.1. Dispositif de charge par ventilateur	16
I.4.2. Dispositif de charge par cyclone	17
I.4.3. Dispositif de charge de type statique	18
I.4.4. Dispositif de charge à lit fluidisé	19
I.4.5 Chargement tribo-aéro-électrostatique	20
I.5. Séparation électrostatique de matériaux granulaires	21
I.5.1. Séparation de matériaux isolants	21
a) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages	22
b) Séparateurs à disques métalliques tournants	24
c) Séparateur à électrodes cylindriques tournantes	26
I.5.2 Séparation de matériaux conducteurs et isolants	27
a) Séparation électrostatique à électrode plaque	28
b) Séparateur électrostatique à tambour	29
Conclusion	32

CHAPITRE II : ETUDE DE CHARGEMENT DES PARTICULES ISOLANTES

Introduction	33
II.1. Matériaux utilisés	33
II.2. Installations expérimentales	36
II.2.1. Dispositif de chargement triboélectrique à tube	36
II.2.2. Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé	37
II.3. Matériels et méthode	38
II.3.1. Mesure de la charge	38
II.3.2. Mesure de l'humidité relative	39
II.3.3. Mesure de la masse granulaire	40
II.3.4. Souffleurs et variateur de tension	41
II.4. Résultats et Discussion du dispositif de chargement à tube	42
II.4.1. Déroulement de l'expérience	42
II.4.2. Interprétation des résultats	46
II.5. Résultats et Discussion du dispositif de chargement à lit fluidisé	47
II.5.1. Influence du temps de chargement	47
II.5.2. Influence de la vitesse de l'air de fluidisation	49
II.5.3. Analyses et Discussions	50
Conclusion	50

CHAPITRE III : ETUDE DE LA SEPARATION D'UN MELANGE TERNAIRE

Introduction	51
III.1. Séparateur électrostatique à tambour Prodecologia	52
a) Structure du séparateur	52
b) Etude de chargement	55
c) Etude de séparation électrostatique	57
III.2. Séparateur tribo-Aéro-électrostatique à bandes transporteuses	61
III.3. Séparateur tribo-électrostatique à chute libre	64
Conclusion	68

CHAPITRE IV : SEPARATION TRIBO-ELECTROSTATIQUE D'UN MELANGE QUATERNAIRE DE PLASTIQUE

Introduction	69
IV.1. Séparateur à tapis roulant	69
IV.1.1. Description du séparateur à tapis roulant	69
IV.1.2. Principe de fonctionnement de la séparation triboélectrique	70
IV.2. Séparation des mélanges quaternaires	71

IV.2.1. Résultats de séparation électrostatique à tube	71
a) Analyses des trajectoires des produits purs	71
b) Résultats de séparation des mélanges quaternaires	76
IV.2.2. Résultats de séparation électrostatique avec lit fluidisé	89
IV.2.3. Comparaison de la pureté et la récupération entre les deux dispositifs chargement (à lit fluidisé et glissement)	93
Conclusion	96

CHAPITRE V : MODELISATION ET OPTIMISATION D'UN ELECTRO-SEPARATEUR A TAPIS CONDUCTEUR

Introduction	97
V.1. Description du dispositif de chargement par cylindre tournant	97
V.1.1. Déroulement de l'expérience	101
V.1.2. Résultats et discussion	101
a. Influence du temps de chargement	102
b. Influence de la masse granulaire	102
c. Influence de la vitesse	103
V.2. Description d'un séparateur à tapis roulant	104
V.2.1. Principe de la méthode des plans d'expériences	105
a) Modélisation des paramètres par la méthode des plans d'expériences	106
b) Application de la méthode du plan d'expérience composite	106
c) Représentation matricielle	108
d) Calcul des coefficients	108
V.2.2. Analyse statistique des modèles	110
V.2.3. Analyse des variances des modèles	113
V.2.4. Qualité descriptive du modèle	114
V.2.5. Influence des facteurs choisis sur la récupération	115
a. La Récupération du produit PA	115
b. La Récupération du produit HIPS	116
c. La Récupération du produit ABS Marron	117
d. La Récupération du produit PVC	118
V.2.6. Détermination du point de fonctionnement optimal	119
Conclusion	120
Conclusion générale	122

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Sur la planète, les quantités de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) sont en augmentation, entraînée par l'utilisation croissante d'information, de communications et de technologie des appareils [1].



Figure i.1 Exemple des déchets électrique et électronique (DEEE)

Pour certains gouvernements, aborder l'ensemble des problèmes environnementaux, sociaux et relatifs à la pauvreté que pose la gestion à la fois formelle et informelle des déchets est un véritable combat [1]- [2]. Les problèmes liés aux déchets sont souvent gérés de manière fragmentaire et sans coordination, et ce sont principalement des solutions en bout de chaîne qui sont proposées plutôt que des mesures préventives et des approches intégrées. La moitié de la population mondiale, n'ont pas accès à des services de traitement des déchets, et jeter ses ordures à l'air libre reste la méthode la plus courante d'élimination dans la plupart des pays à faible revenu et à revenu intermédiaire de la tranche inférieure [3].

Les mélanges de matières plastiques contenues dans les DEEE doivent être séparés en différents types de polymères afin d'être recyclés [4]. Au cours des vingt dernières années, la séparation électrostatique est avéré être une solution efficace à ce problème dont elle représente la classe la plus importante pour le tri sélectif des matériaux solides par des forces électriques qui agissent sur les particules chargés ou polarisées [5, 6].

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. 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 [7].

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.

Notre manuscrit organisé en cinq chapitres comporte tout d'abord une **première partie**, décrivant la matière plastique et l'effet tribo-électrique et aussi les principales forces exercées sur les matériaux granulaires. Puis elle regroupe les informations essentielles concernant plusieurs procédés de chargement et de séparation étudiés dans des laboratoires de recherche, y compris une brève description sur leur principe de fonctionnement.

Le second chapitre présente les dispositifs de chargement des particules par effet triboélectrique à lit fluidisé et à tube de différentes matières (inox, aluminium, PVC, carton, acétate, acétate thermique, et plastique) utilisant différents produits provenant de recyclage des déchets d'équipements électriques et informatiques (Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS), High Impact Polystyrene greed (HIPS) ,High Impact Polystyrène (HIPS), Polycarbonate (PC), Polyamide (PA), Chlorure de Polyvinyle (PVC),Polyéthylène Haute Densité (PEHD), Polystyrene (PS), polypropylène (PP)).

Le troisième chapitre est consacré à l'étude d'un produit ternaire utilisant le nouveau séparateur électrostatique à tambour de la société Prodecologia, Rivne, Ukraine, qui a déjà permis la séparation isolant – isolant , puis on a entamé une deuxième séparation avec les séparateurs : tribo-Aéro-électrostatique à base de bandes transporteuses qui était breveté à l'IUT d'Angoulême (Université de Poitiers) et le séparateur à chute libre.

A l'aide des résultats présentés en chapitre 2, on a pu choisir les produits qui peuvent être séparé et ceux qui ne peuvent pas être séparé. **Le quatrième chapitre** détaillera

l'installation et les expériences réalisées avec le séparateur à tapis roulant TBS utilisant les deux dispositifs de chargement cité dans le 2eme chapitre dont une comparaison est faite en dernier pour voir l'efficacité de chaque dispositifs à séparer un produit quaternaire.

Le cinquième chapitre est subdivisé en deux parties : la première à l'étude de chargement tribo-électrique par un dispositif à cylindre tournant, on faisant varier quelques paramètres de contrôle, afin d'optimiser leur chargement pour les séparer dans un électro-séparateur à tapis roulant avec bande transporteuse conductrice (Aluminium) ça sera la deuxième parties de notre étude dont les expériences préliminaires de séparation feront l'objet d'une modélisation et une optimisation du dispositif, utilisant la méthodologie des plans d'expériences.

CHAPITRE I :

ETAT DE L'ART

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

Les équipements électriques et électroniques (EEE) contiennent souvent des substances ou composants dangereux pour l'environnement (piles et accumulateurs, gaz à effet de serre, composants contenant du mercure, condensateurs pouvant contenir des PCB, etc.), mais ils présentent aussi un fort potentiel de recyclage des matériaux qui les composent (métaux ferreux et non ferreux, métaux rares, verre, plastiques, etc.) [8,9].

Cette thèse s'intéresse au recyclage des plastiques, qui sont présents dans tous les domaines de l'activité humaine, depuis l'emballage jusqu'à la fusée interplanétaire; aussi pouvons-nous désormais nous considérer comme entrés dans l'«âge des plastiques». Cette primauté des plastiques sur les autres matériaux est due, en dehors de leur faible prix, au fait qu'il n'y a pas une seule forme de plastique mais une multitude, avec pour chacune des propriétés particulières. De plus, les procédés de fabrication permettent d'obtenir aisément et sans usinage les formes les plus complexes.

Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier lieu une généralité sur les matières plastiques et une sur l'effet triboélectrique et les forces exercés sur les matériaux granulaires. Après nous allons citer quelques dispositifs de chargement triboélectrique [10].

Et finalement, nous allons décrire la construction et présenter les principes de fonctionnement des dispositifs de séparation électrostatique [11,12], appliquée au recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques.

I.1. Généralités sur les matières plastiques

Le terme « plastique » décrit une grande variété de composés organiques obtenus par synthèse chimique. Produites essentiellement à partir du pétrole, les matières plastiques sont l'un des symboles du XXe siècle, La bakélite (1909) est le plus ancien plastique entièrement synthétique.

Il existe également des plastiques naturels : poix, latex, bitume, brai, résines, laques, ambre, écaille, corne, et des plastiques d'origine animale généralement extraite du lait et utilisé dans la fabrication des produits médicaux.

La matière plastique est composée principalement de polymères, qui a la propriété de se mettre en forme facilement par moulage, extrusion, coulage après un chauffage modéré (100- 300 °C).

Les formes commerciales des matières plastiques La matière plastique première utilisée lors de sa mise en forme moyennant un des procédés peut être livrée sous une des formes suivantes :

- Granulés ;
- Poudre ;
- Résine ;
- Et des semi-produits (feuilles, films, pastilles, et fibres).

Un matériau constitué de granulés plastiques contient au moins un produit thermoplastique et se présente sous forme de petits grains. Les granulés sont fondus, extrudés ou moulés, pour fabriquer des objets en PE, PP, PS, etc.



Figure I.1 Formes de livraison de la matière plastique première

I.1.1. Les familles des matières plastiques

Les matières plastiques utilisées à l'échelle industriel sont très diverses mais elles peuvent être classées en trois classes :

a) Les thermoplastiques

C'est de loin la famille la plus utilisée : ils représentent près de 90 % des applications des matières plastiques [12]. Ils sont moins fragiles, plus faciles à fabriquer (machine à injecter et cadences élevées) et permettent des formes plus complexes que les thermodurcissables. Ils existent sous forme rigide ou souple, compacte ou en faible épaisseur, sous forme de feuille très mince (film...), de revêtement, expansé ou allégé...

➤ Propriétés principales

Ils ramollissent et se déforment sous l'action de la chaleur. Ils peuvent, en théorie, être refondus et remodelés un grand nombre de fois tout en conservant leurs propriétés ; ils sont comparables à la cire ou à la paraffine. Insensibles à l'humidité, aux parasites, aux moisissures (sauf polyamides) ils peuvent être fabriqués dans une gamme de couleurs très étendue.

Inconvénients : fluage élevé ; coefficient de dilatation linéaire élevé, entraînant un retrait important au moment du moulage ; combustible ; sensible aux ultraviolets.

➤ **Principales familles**

Thermoplastiques de grande diffusion :

À eux seuls, ils représentent de 70 à 80 % du total des plastiques mis en œuvre. On y trouve les polyéfines (polyéthylène, polypropylène), le polystyrène et les PVC (polychlorure de vinyle).

Thermoplastiques techniques :

Les polyamides, proche du nylon textile, sont les plus utilisés du groupe : ils comportent de nombreuses variantes, de bonnes caractéristiques mécaniques, et une bonne tenue aux températures. Les polycarbonates sont transparents et résistants aux chocs (verres correcteurs, vitrage antieffraction...). Les polyesters, voisins des fibres textiles polyesters, sont transparents et imperméables aux gaz (applications voisines des polyamides). Les polyacétals résistent à la fatigue, à l'eau et aux solvants (lave-linge, lave-vaisselle...).

Thermoplastiques hautes performances :

Plus coûteux, ils sont caractérisés par leur résistance à la chaleur et par des propriétés électriques élevées. Les résines fluorées (PTEE, Poly chlorotrifluoroéthylène PCTEE, Poly fluorure de vinylidène PVDF) sont les plus classiques ; elles résistent à presque tous les agents chimiques, ne vieillissent pas, ne brûlent pas, ont de bonnes qualité frottant. Les polysulfones et les polysulfones de phénylènes (PPS), plus récents, transparents, allient résistance à la température, propriétés mécaniques et électriques élevées.

b) Les thermodurcissables

Ils ne ramollissent pas et ne se déforment pas sous l'action de la chaleur. Une fois créée il n'est plus possible de les remodeler par chauffage. Au moment de la mise en œuvre, ils ramollissent dans un premier temps, puis durcissent de manière irréversible sous l'action prolongée de la chaleur.

➤ **Propriétés principales**

Ils présentent une bonne tenue aux températures élevées (> 200°C), aux attaques chimiques, une meilleure résistance au fluage que les thermoplastiques (conserver une meilleure stabilité dimensionnelle dans le temps), une bonne rigidité pour un prix de matière première peu élevé et faible retrait au moulage. Inconvénients : mise en œuvre moins pratique et plus lente que les thermoplastiques ; pas de moulage par injection et cadences de fabrication assez faibles.

➤ Principales familles

Les phénoplastes (PF) noirs ou bruns (bakélite) et les aminoplastes blancs ou crème (urée formaldéhyde UF, mélamine-formol MF) sont les plus courants et les moins coûteux.

Les époxydes (EP), les polyesters (UP) et les polyuréthanes (PUR) peuvent être classés dans le groupe des plastiques techniques.

Pour les hautes performances, plus coûteux, on a les polyamides PF, qui conservent leurs propriétés mécaniques et électriques au-delà de 300°C, et les silicones SI, qui résistent à la chaleur et ont des propriétés mécaniques élevées.

c) Les élastomères ou caoutchoucs

Ils sont obtenus par synthèse chimique, comme les plastiques, et possèdent des propriétés comparables à celle de caoutchouc naturel. Le néoprène (1930) fut le premier caoutchouc de synthèse.

Applications : pneumatiques, courroies, tapis, tuyaux, amortisseurs, joints d'étanchéité, revêtements divers, pièces mécaniques, chaussure.

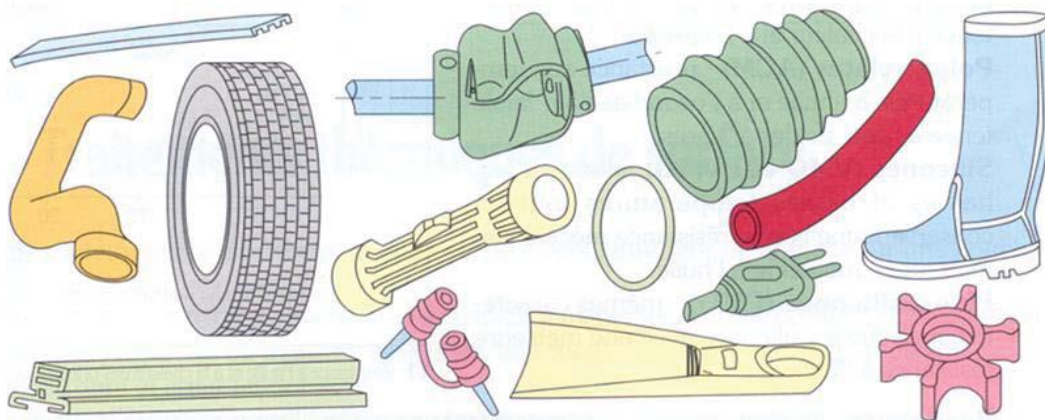


Figure I.2 Exemples de pièces en élastomères

➤ Principales caractéristiques

La propriété la plus remarquable est l'élasticité ou la capacité à s'allonger sans se rompre (à pourcentage très élevé, jusqu'à 1000 %). À l'opposé le module d'élasticité longitudinal E reste très petit (inférieure à 10 N/mm² : près de 200 000 pour les aciers) traduisant une faible rigidité.

Élastomères vulcanisés :

Ce sont les plus traditionnels. La vulcanisation consiste à incorporer du soufre au caoutchouc afin d'améliorer la résistance tout en maintenant l'élasticité. Ils peuvent être extrudés ou moulés.

Les Principales nuances sont : caoutchouc naturel, nitrile, butyle, chlorurée, EPDM (éthylène propylène), SBR (styrène-butadiène), Fluorés (FPM).

Élastomères thermoplastiques :

Plus récents, ils ont les qualités des élastomères vulcanisés haut de gamme avec en plus la simplicité de mise en oeuvre des plastiques thermoplastiques (moulage par injection, pas de vulcanisation).

Les Principales nuances sont :

- Polyuréthane (PUR) : grande dureté, résistance à l'abrasion et au déchirement, faible tenue à la chaleur et à l'humidité.
- Polyacrylates (ACM) : résistance aux températures, à l'huile et à l'ozone de l'air, faible tenue à l'eau.
- Silicones (VMQ et PVMQ) : résistent aux hautes et basses températures tout en conservant une bonne résistance mécanique, mais tenue moyenne à l'huile.
- Fluorosilicones (FMQ) : même caractéristiques que les silicones avec une meilleure Résistance à l'huile.

I.2. Mécanismes de charge électrique

I.2.1. Effet tribo-électrique

La triboélectricité – du grec « tribein » qui signifie frotter – désigne le phénomène électrostatique par lequel un transfert de charges électriques est créé lorsque deux matériaux de nature différente sont mis en contact. Quand deux matériaux électriquement neutres se frottent l'un à l'autre, des charges électriques sont transférées au niveau surfacique de l'un vers l'autre, dans un même sens, il en résulte l'obtention de deux matériaux différemment chargés. La charge statique ainsi acquise se produit dans un système où généralement la conductivité du matériau est faible, elle persiste donc même après rupture du contact, et de nouveaux contacts auront pour effet de produire d'autres transferts [13-14], ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés (Figure I-3). C'est le mécanisme physique le plus utilisé pour charger des matériaux granulaires ou micronisés plastiques en vue de leur séparation dans un champ électrique intense [15-21].

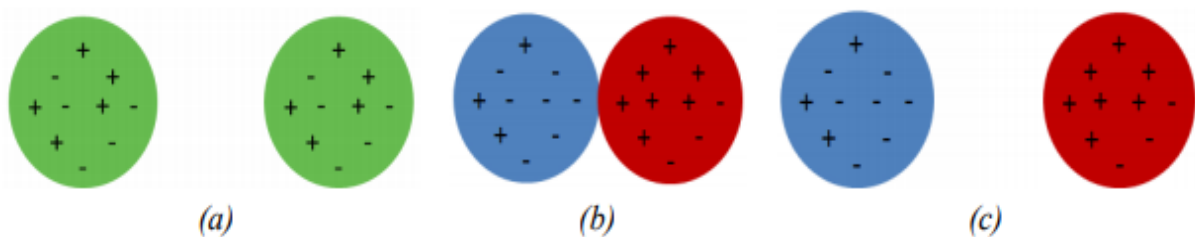


Figure I.3 Charge triboélectrique de deux particules en contact.

- (a) Particules électriquement neutres sans contact entre elles ;
- (b) Contact et transfert de charge ;
- (c) Rupture du contact, particules chargées.

I.2.2. Série triboélectrique

La série triboélectrique est le classement de divers matériaux dans un ordre donné [17], de sorte qu'un frottement entre deux matériaux qui se suivent aboutit à charger le premier positivement et le second négativement. Plus ces matériaux sont éloignés dans la liste, plus les charges engendrées par leur frottement sont élevées. Certaines de ces séries ont été proposées de longue date : Wilcke (1759), Faraday (1840), Jamin et Bouty qui proposent à peu près la même série. Une autre série donnée par Shaw (1917), qui en plus d'être beaucoup plus étendue que les précédentes, donne une meilleure description des échantillons employés, celle-ci a également démontré l'effet de la température qui peut produire des inversions dans l'ordre établie [22-24].

Bill Lee introduit aussi le concept d'« affinité » triboélectrique : le rapport entre la charge triboélectrique échangée et l'énergie dépensée dans le frottement (Tableau I-1).

Tableau I.1. Série triboélectrique réalisée par Bill Lee en 2009.

Nom d'isolant	Affinité triboélectrique [nC/J]	Charge acquise si frotté avec du métal (F : faible, N : normal)	Remarques
Polyuréthane solide	+40	+N	Un peu conducteur
Nylatron (nylon + MoS ₂)	+28	+N	/
Verre	+25	+N	Un peu conducteur
Papier	+10	-F	Un peu conducteur
Bois (pin)	+7	-F	/
Silicone	+6	+N	/
Coton	+5	+N	Un peu conducteur
Caoutchouc nitrile	+3	-F	/
Laine	0	-F	/
Polycarbonate	-5	-F	/
ABS	-5	-N	/
Poly méthacrylate de méthyle)	-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	Un peu conducteur
Téflon	-190	-N	Très électronégatif

Quelques différences ont été constatées dans les séries triboélectriques d'un chercheur à un autre, ceci reflète principalement la culture matérielle de leurs époques respectives et souligne un certain facteur aléatoire de ces séries. En effet, il a été démontré que certains facteurs externes pouvaient inverser les polarités obtenues lors des frottements.

I.3. Forces exercées sur les matériaux granulaires

Trois types des forces inter particulières agissent sur les matériaux granulaires lors du frottement ou du simple contact :

- A. Les forces de la pesanteur
- B. Les forces électrostatiques
- C. Les forces aérodynamiques

I.3.1. Forces de la pesanteur

Le poids d'un objet est égal à la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre. Cette force de pesanteur est caractérisée par une origine : le centre de gravité G (ou centre d'inertie) du corps, une direction : la verticale passant par G, un sens : vers le bas et une valeur $P = m \cdot g$ avec P en Newton (N), m en kg et $g = 9.81 \text{ N.kg}^{-1}$ [25].

I.3.2. Forces de London-Van der Waals

Il s'agit de forces attractives (figure I.4). Si on considère deux atomes distant de r , la force d'interaction F [N] entre moments dipolaires instantanés [26] s'écrit :

$$F = -\frac{\alpha^2}{r^7} \frac{4}{3} \frac{hc}{\lambda_i} \quad (1.1)$$

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

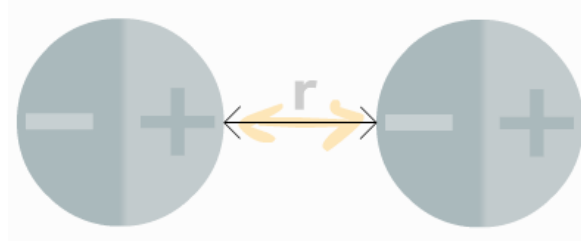


Figure I.4 La force attractive de London-Van der Waals

Les forces de London – van der Waals étant inversement proportionnelles à la septième puissance de leur distance, cela entraîne un accroissement rapide de l'interaction pour les courtes distances.

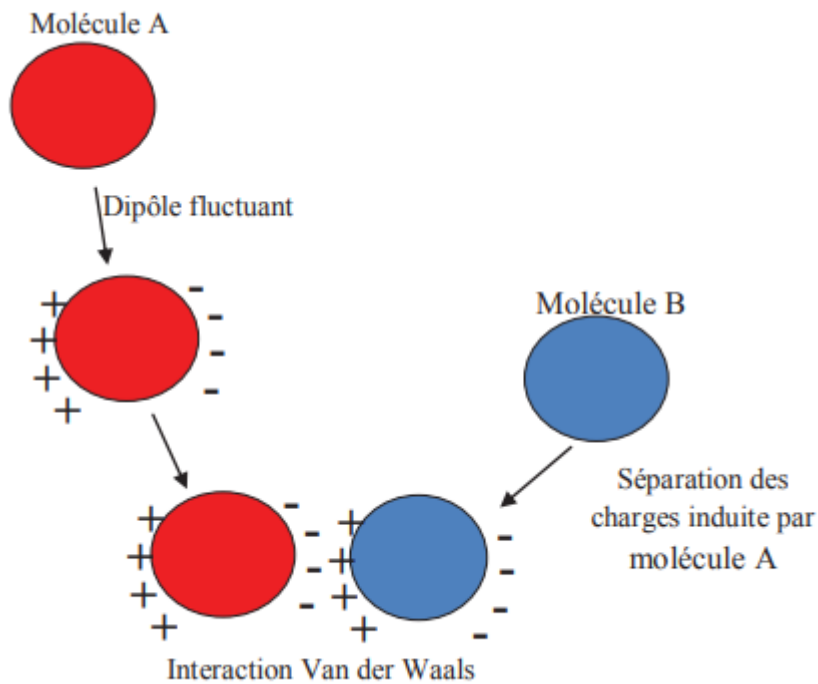


Figure I.5 Le phénomène physique derrière la force Van der Waals : polarisation électrique des atomes ou molécules neutres

Le calcul réalisé par *HAMAKER* [26] pour deux sphères identiques de rayon R séparées de r (distance centre à centre) et baignant dans le vide conduit à :

$$F_A = -\frac{A}{6(r-2R)} \left(\frac{2R^2}{r^2-4R^2} + \frac{2R^2}{r^2} + \ln \frac{r^2-4R^2}{r^2} \right) \quad (1.2)$$

Où A est la constante de *HAMAKER*.

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

HAMAKER est donc suffisante. Une approximation de cette dernière, obtenue pour $r \ll R$, est largement utilisée :

$$F_A = - \frac{A.R}{12(r-2R)^2} \quad (1.3)$$

Le tableau I.2 donne la valeur des forces d'interaction entre des particules séparées par une distance de $50 \text{ \AA}$, en fonction de leur rayon. Pour des particules de 1 mm , elles sont approximativement identiques. Ces constatations expliquent le fait que les fines particules aient plus tendance à s'agglomérer que les grosses.

Tableau I.2 Forces de Van der Waals et de pesanteur en fonction de la taille des particules, d'après Higuchi

Rayon [cm]	Forces de Van der Waals $a = 50 \text{ \AA} [cm/s^2]$	Poids [g.cm/s ²]
10^{-5}	3.3×10^{-4}	4.1×10^{-12}
10^{-4}	3.3×10^{-3}	4.1×10^{-9}
10^{-3}	3.3×10^{-2}	4.1×10^{-6}
10^{-2}	3.3×10^{-1}	4.1×10^{-3}
10^{-1}	3.3	4.1

I.3.3. Forces de Coulomb

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

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

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

$$F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (1.4)$$

Où :

F_e : Force électrique en newton (N) ;

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

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

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

k : Constante de la loi de Coulomb, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ et ϵ_0 étant la permittivité du vide.

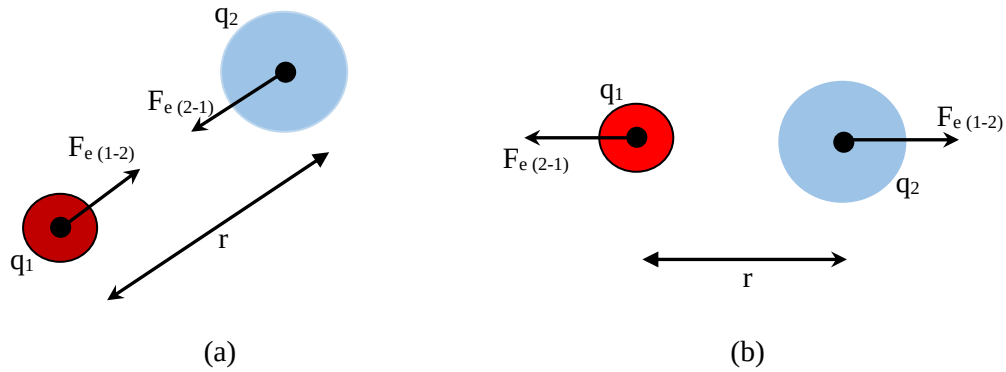


Figure I.6 Force de coulomb entre deux sphères chargées

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

(b) : répulsion, charges signes semblables ($q_1 q_2 > 0$)

Tableau I.3 Forces d'interaction électrostatique entre deux sphères chargées

Rayon [cm]	Forces [cm/s^2]	Poids [$\text{g} \cdot \text{cm}/\text{s}^2$] Densité=1
10^{-4}	9×10^{-6}	4.1×10^{-9}
10^{-3}	9×10^{-4}	4.1×10^{-6}
10^{-2}	9×10^{-2}	4.1×10^{-3}
10^{-1}	9	4.1
1	9×10^2	4.1×10^3

Par conséquent, entre deux particules de $1 \mu\text{m}$ de diamètre, avec le même maximum de charges, la force qui s'exerce est 1000 fois supérieure à celle de la pesanteur. En analysant les deux tableaux, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Les forces de Van der Waals diminuent plus rapidement que les forces électrostatiques, quand la distance entre les particules augmente.
- ✓ Pour des particules de diamètre égal ou inférieur au micron, les forces de Van der Waals sont plus importantes que les forces électrostatiques, lorsque ces particules sont en contact.
- ✓ Quand le diamètre des particules diminue, les forces de van der Waals décroissent plus lentement que les forces électrostatiques.

I.3.4. Forces aérodynamiques

Afin de bien étudier les mouvements des particules dans les procédés de chargement triboélectrique, il va falloir maîtriser les forces aérodynamiques agissant sur ces particules.

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

$$F_i = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad (1.5)$$

Où :

F_i : la force d'inertie

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

F_a : la force aérodynamique et F_g la force gravitationnelle.

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

$$F_i = W(\rho_s - K_\rho) \frac{dv}{dt} \quad (1.6)$$

Où :

v : la vitesse de particule

K : coefficient de forme [27] (pour les particules sphériques $K=0,5$),

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

ρ : densité de l'air.

La force aérodynamique s'écrit :

$$F_a = \frac{C_d \pi R^2 \rho v_r^2}{2} \quad (1.7)$$

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

V : vitesse du fluide [m/s] ;

L : dimension du fluide [m] ;

ν_i : viscosité du fluide [m²/s] ;

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

La force de frottement avec l'air est dépendante de la vitesse, cette dépendance peut être très compliquée, et seulement les cas spéciaux peuvent être traités analytiquement.

I.4. Dispositifs de charge

Multiplés travaux ont été publiés sur les procédés de chargement triboélectrique, qui utilisent essentiellement : des ventilateurs, des tubes rotatifs, des lits fluidisés (créés par des soufflantes ou des compresseurs), des micro-cyclones, ou des chargeurs statiques [28-32].

I.4.1. Dispositif de charge par ventilateur

Les principaux éléments de cette installation sont (Figure I-7) : le tube cylindrique isolant en PVC, le moteur à courant continu qui entraîne l'hélice isolante et le support métallique. Le dispositif utilise l'air ascendant qui donne naissance à des turbulences dans le tube contenant le mélange de particules, provoquant ainsi leur tribo-électrification lorsque celles-ci entrent en collisions entre-elles ou avec les parois du tube [33-34]. Le mélange chargé est récupéré en pivotant le cylindre sans procéder à l'arrêt du moteur afin d'éviter l'adhérence des particules aux parois et permettre la récupération complète du contenu.

Notons ici que le matériau du cylindre joue un rôle important dans ce mécanisme de charge et peut être choisi judicieusement en fonction du mélange à traiter, car le nombre de collisions entre particule-paroi est important à cause de la force centrifuge qui tente de projeter les particules entre les parois du dispositif.

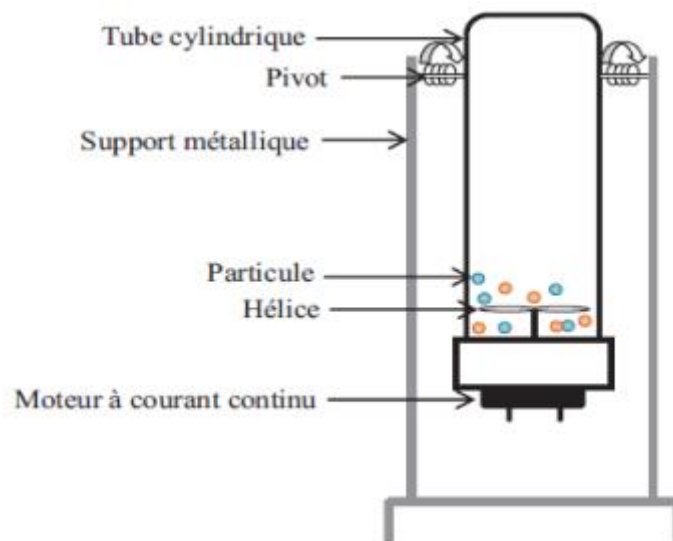


Figure I.7 Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur [33].

Ce dispositif peut être adapté à un fonctionnement continu (Figure I-8) en introduisant les granules par sa partie supérieure, et en les récupérant chargés par sa partie inférieure.

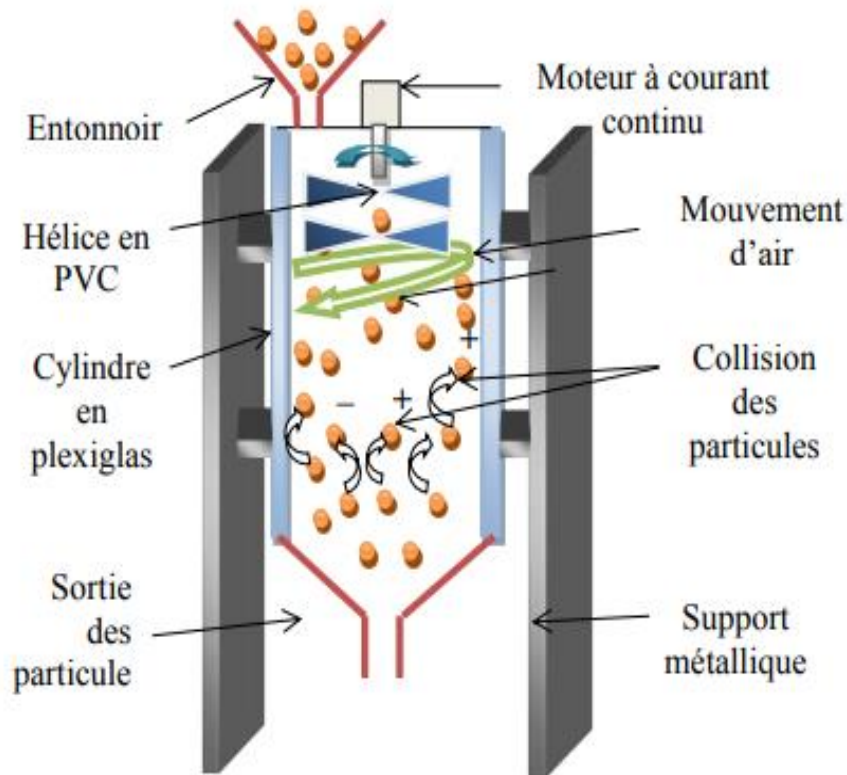


Figure I.8 Dispositif de charge tribo-électrique à plusieurs hélices et à fonctionnement continu.

I.4.2. Dispositif de charge par cyclone

Les particules qui vont rentrer à l'intérieur du cyclone à l'aide d'un ventilateur se chargent par le contact et frottement contre la paroi du cyclone [35–38]. Les particules descendent vers le bas par le mouvement de l'air qui traverse le cyclone, et atteint le fond. Puis, elles sortent par une ouverture en bas du cyclone. En fin les particules se chargent totalement comme l'explique la figure I.9.

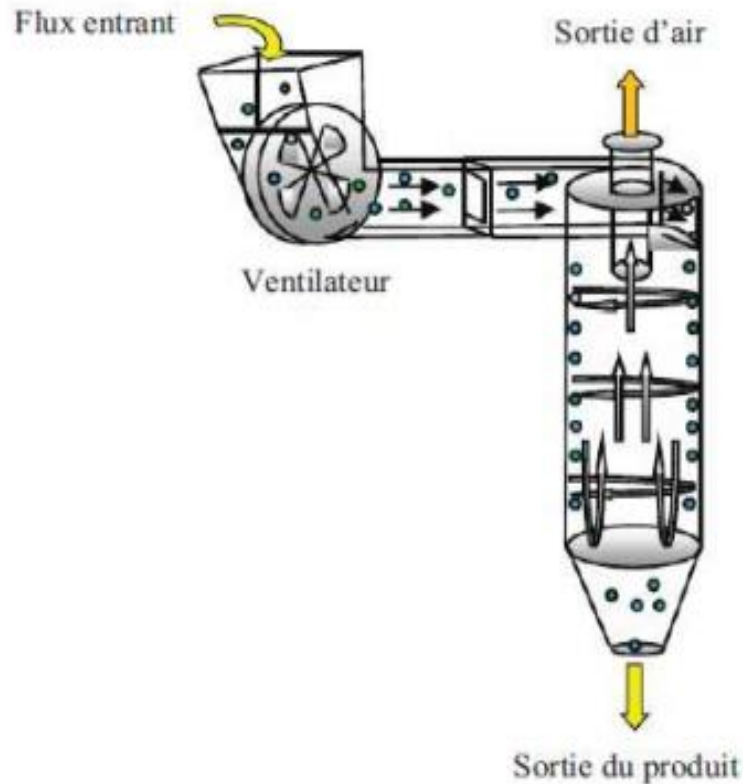


Figure I.9 Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [39].

I.4.3. Dispositif de charge de type statique

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique en matière isolante ou métallique (Figure I-10), à l'intérieur de laquelle sont disposées plusieurs plaques inclinées. Les particules glissent le long de ces plaques par gravitation et se chargent par frottement avec celles-ci (effet tribo-électrique) [35].

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

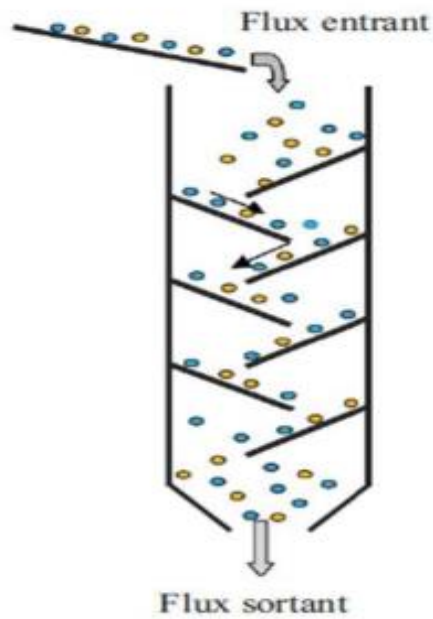


Figure I.10 Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [35].

I.4.4. Dispositif de charge à lit fluidisé

C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique [40-47]. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (Figure I.11).

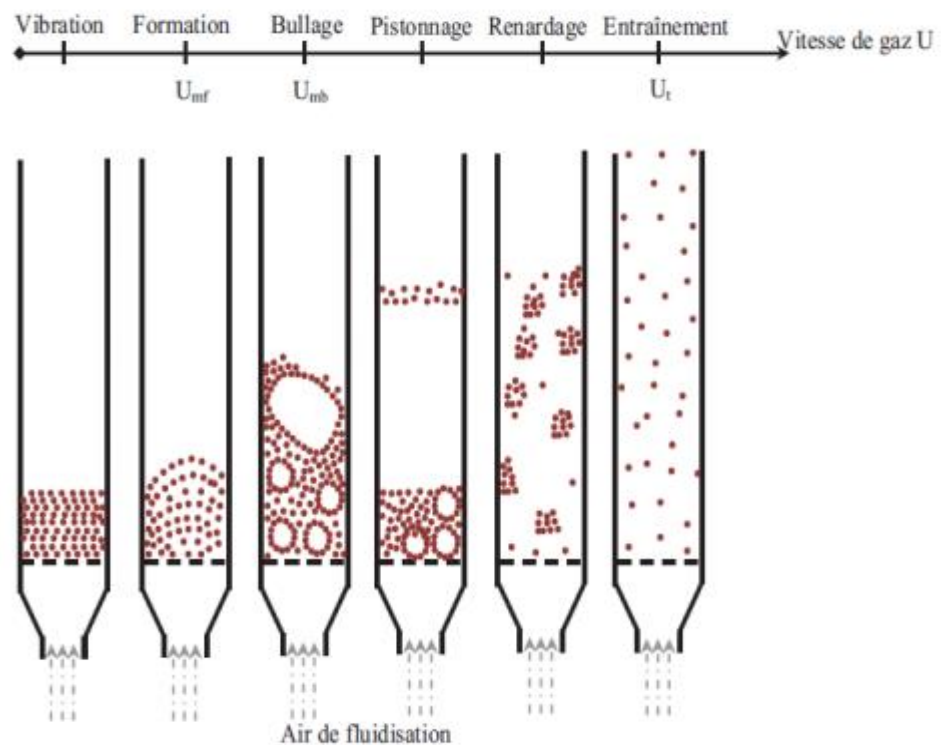


Figure I.11 Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation [42].

- la vibration: pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le disperseur sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.
- formation: le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques des fluides : ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation U_{mf} , le lit montre une certaine expansion de la couche, on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules.
- 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 de distribution de gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide à ébullition.
- le pistonage: 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 : c'est le phénomène d'entraînement.

I.4.5 Chargement tribo-aéro-électrostatique

Un article récent [36] décrit une combinaison de deux modes de chargement en cascade (Figure I.12). La première section du dispositif assure le chargement triboélectrique en lit fluidisé. Les particules sont dirigées vers la deuxième partie du dispositif, destinée au chargement statique sur des plaques inclinées. Cette solution technique permet de mieux contrôler le processus, multipliant les mécanismes de charge employés.

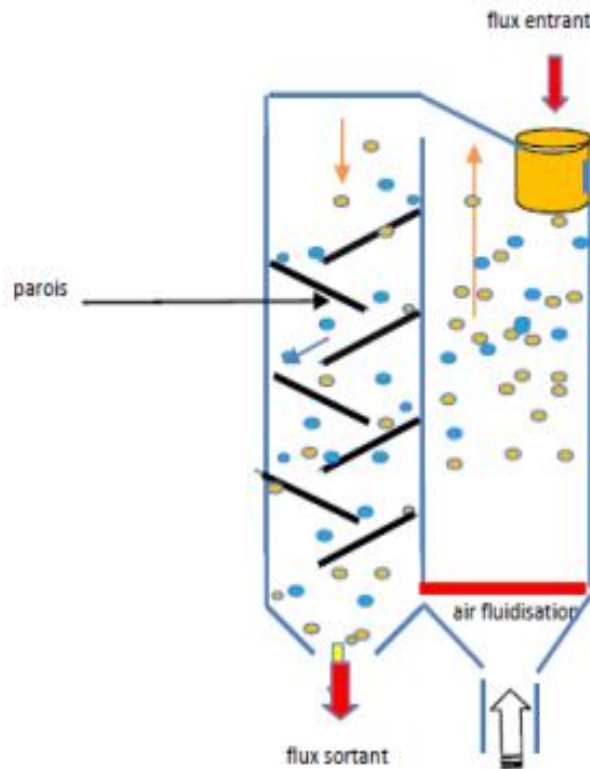


Figure I.12 Représentation schématique d'un dispositif composé d'un lit fluidisé et d'un chargeur statique

I.5. 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. Toutefois, ces procédés sont souvent coûteux (aussi bien financièrement qu'en termes d'énergie), 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 adaptation.

Ainsi, de nombreux laboratoires de recherche concentrent leur travail dans l'amélioration de cette technologie afin d'obtenir de meilleurs résultats de séparation [48-83].

I.5.1. Séparation de matériaux isolants

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

a) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages

L'installation est composée de deux étages superposés, détachables, attachées à un même support vertical. Le séparateur tribo-aéro-électrostatique, situé à l'étage supérieur, est une enceinte parallélépipédique (hauteur : 500 mm ; largeur : 130 mm ; profondeur : 110 mm), ayant deux parois transparentes, afin de permettre la visualisation des phénomènes. Les parois latérales, opaques, ont des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces internes. Ces électrodes sont connectées à deux alimentations haute tension continue variable (0... 60 kV) de polarités différentes, afin de créer un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules chargés et contrôler ainsi leurs trajectoires. La charge des granules se produit par effet triboélectrique dans le lit fluidisé créé à l'intérieur de cette enceinte.

L'air de fluidisation est fourni par une soufflante à débit variable. Le diffuseur d'air (une plaque perforée située à l'extrémité inférieure de l'étage supérieur de l'installation) assure l'uniformité de la fluidisation du lit de granules. Ceux-ci sont introduits dans l'enceinte de séparation par un entonnoir, alimenté par un vibro-transporteur à débit ajustable. Sous l'action combinée des forces électriques, aérodynamiques et gravitationnelles, ils se séparent essentiellement en fonction de la polarité de leur charge et sortent par le bas de cette enceinte (figure I.13).

Deux chambres en SAN/PMMA dirigent les deux flux de granules ainsi créés vers l'étage inférieur de l'installation, composé de deux séparateurs électrostatiques à chute libre. Les électrodes de ces séparateurs ont les dimensions 520 mm x 100 mm et sont collées sur quatre plaques isolantes en plexiglas (650 mm x 110 mm). Les extrémités supérieures de ces quatre plaques sont positionnées aux deux pivots, afin de se déplacer et former des angles allant de 0° jusqu'à 45° par rapport à la verticale. Les deux plaques centrales sont connectées à la terre, tandis que les deux électrodes extérieures, connectées à des alimentations haute tension de polarités opposées. La récupération des produits séparés est faite dans deux collecteurs identiques, comportant chacun dix compartiments (longueur : 100 mm ; largeur : 30 mm ; profondeur : 85 mm) [48].

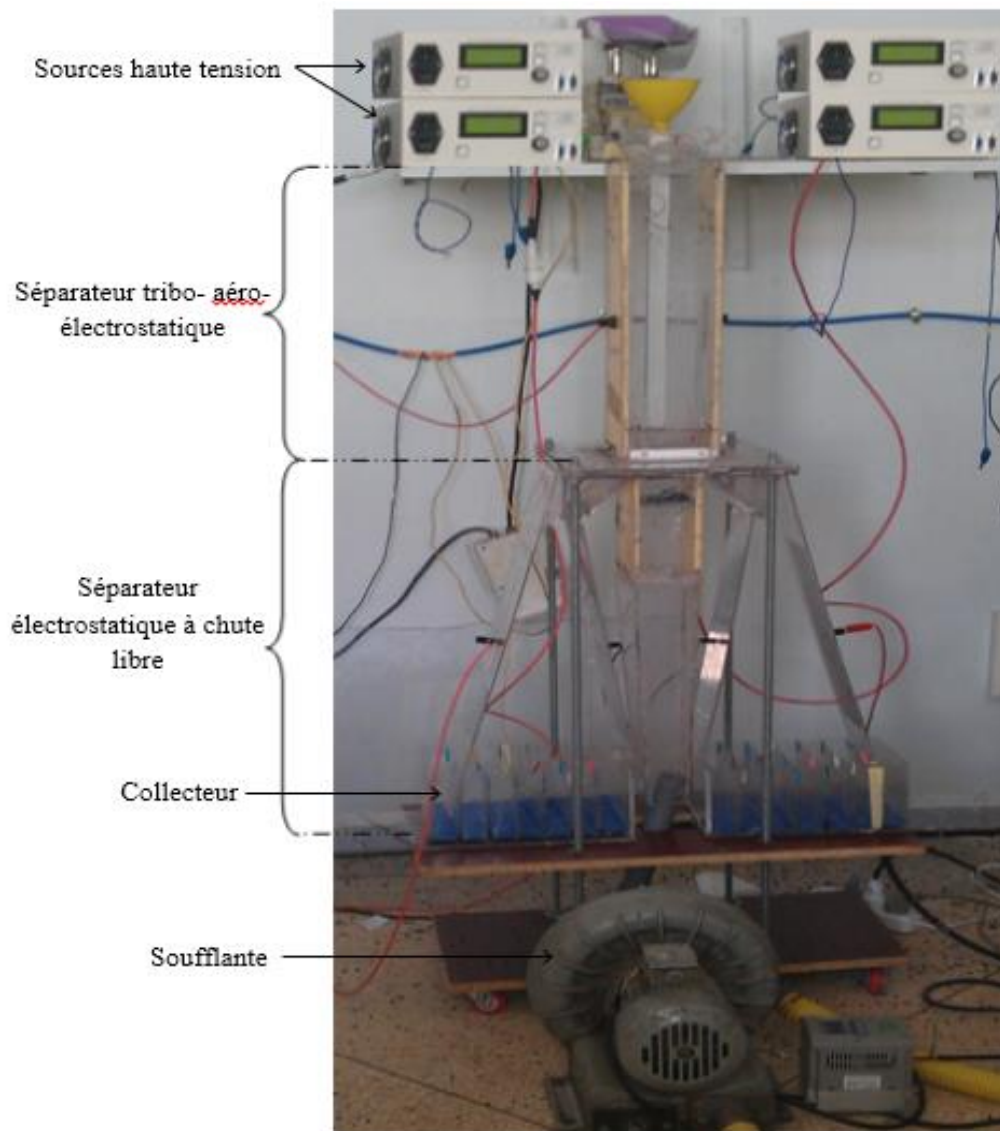


Figure I.13 Photos du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages [48]

La figure I.14 montre l'association d'une nouvelle méthode de chargement cela permet de mieux contrôler le processus, multipliant les mécanismes de charge employés. Après le tri des granules en fonction de la polarité de leur charge et sortent par le fond de cette chambre, les particules se dirigent dans deux dispositifs de chargeur statiques parallélépipédiques en PMMA, comprenant des parois inclinées et détachables. Les particules glissent le long de ces parois par gravité pour atteindre les deux séparateurs électrostatiques à chute libre.

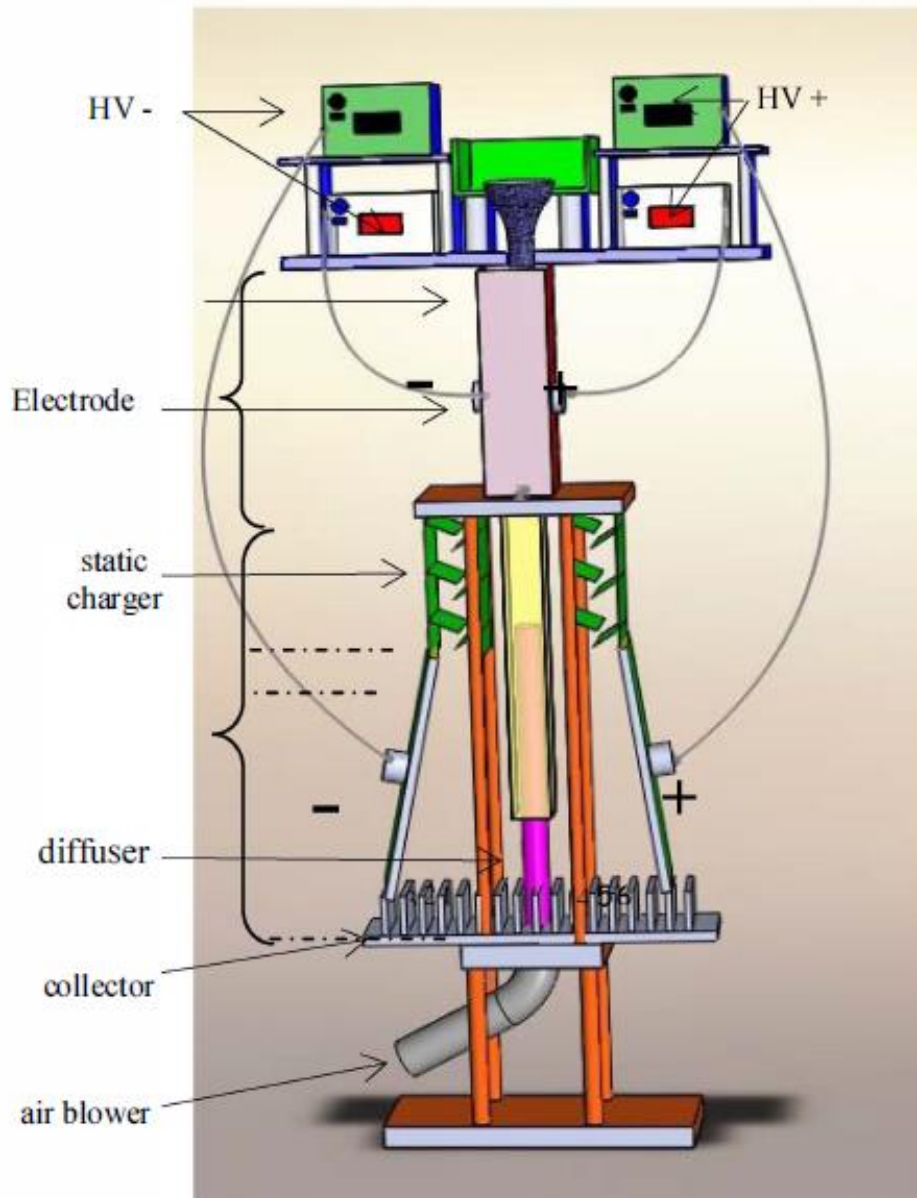


Figure I.14 Représentation schématique d'un nouveau séparateur tribo- aéro à double chargement

b) Séparateurs à disques métalliques tournants

L'aspect général de ce type de séparateur tribo-aéro-électrostatique [55] est présenté sur la figure I.15. 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 [54-55],[58]. 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.15 Photographie d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques [55].

(1) Moteurs électriques ; (2) Chambre de séparation ; (3) Electrodes-disques tournantes ; (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.

c) Séparateur à électrodes cylindriques tournantes

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes est présenté sur les figures I.16 et I.17 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 entraînement 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 [57].

Le mélange de matériaux pulvérulents qui a été testé sur cette installation comprend deux types de PVC, l'un de couleur blanche et l'autre de couleur grise broyés dans une usine de fabrication de tuyaux de plastique (CHIALI, Sidi-Bel-Abbès, Algérie). La taille des particules est typiquement comprise entre 150 μm et 250 μm .

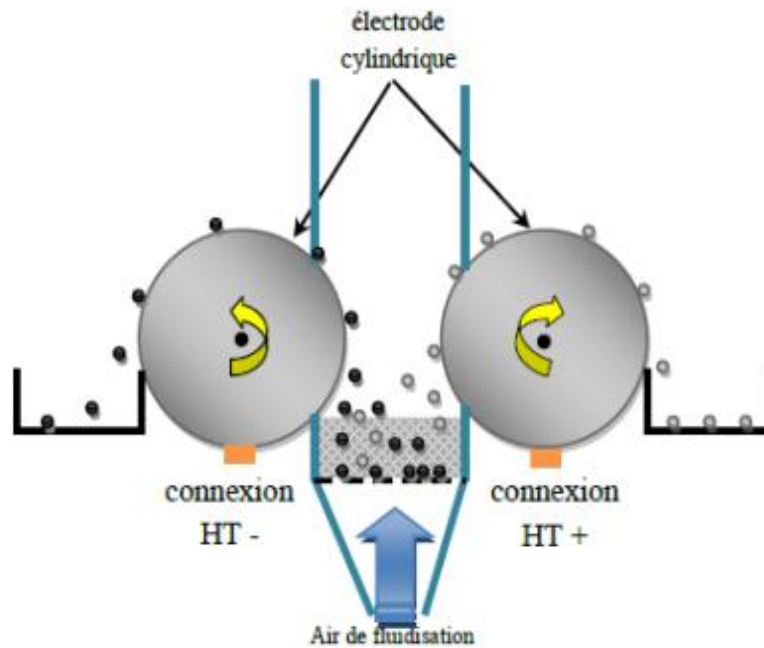


Figure I.16 Représentation schématique du séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes cylindriques tournantes [57].

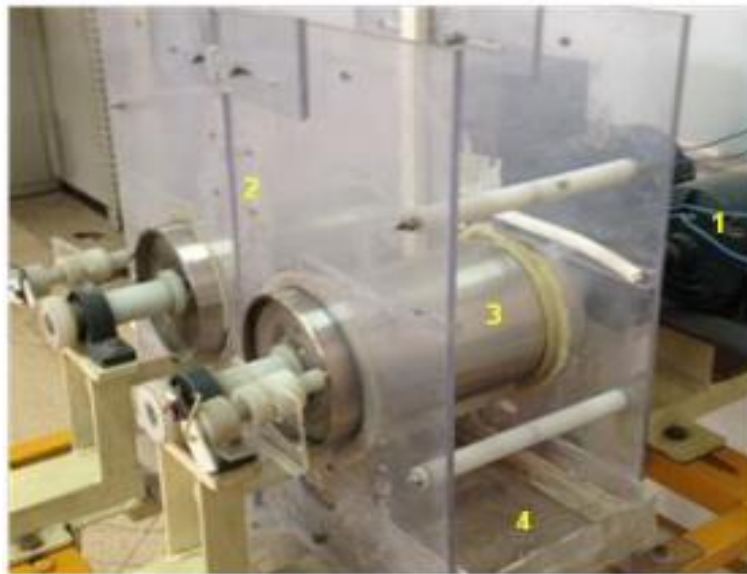


Figure I.17 Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes cylindriques tournantes. (1) Moteur à courant continu ; (2) Chambre de séparation ; (3) Electrodes cylindriques tournantes ; (4) Bacs collecteurs [57]

I.5.2 Séparation de matériaux conducteurs et isolants

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

a) Séparation électrostatique à électrode plaque

Le principe de fonctionnement de l'électro-séparateur à plaque peut être décrit comme suit : les granules semi-conducteurs (mauvais et bon conducteurs) sont transportés par le vibro-transporteur électromagnétique (1) et déposés sur l'électrode plaque reliée à la terre (2). Les particules « glissent » ensuite à la surface de la plaque et se comportent différemment suivant qu'elles sont électriquement plus ou moins bonnes conductrices [68].

- **Les granules conducteurs**, en arrivant dans la zone du champ électrique généré par l'électrode statique de forme elliptique (3), acquièrent par induction électrostatique une charge de signe opposé au potentiel de la haute tension continue. Ils subissent alors une force d'attraction électrique exercée par cette électrode et se déposent dans la partie droite du collecteur (4).

- **Les granules non conducteurs**, vu leur constante de relaxation élevée, n'acquièrent pas de charge par induction électrostatique. Ils ne sont donc pas attirés par l'électrode elliptique et tombent sous l'action de leur poids et de leur vitesse dans la partie gauche du collecteur qui leur est destinée.

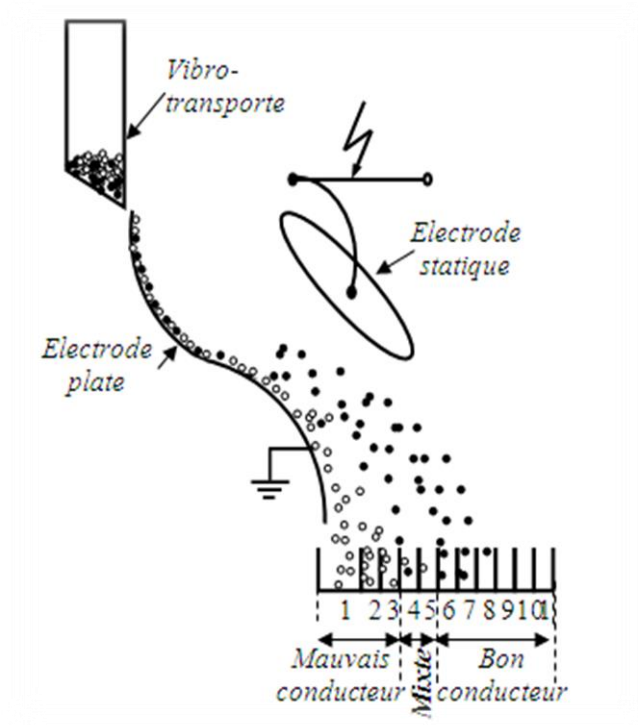


Figure I.18 Schéma simplifié du principe de l'électro-séparation à plaque [68]

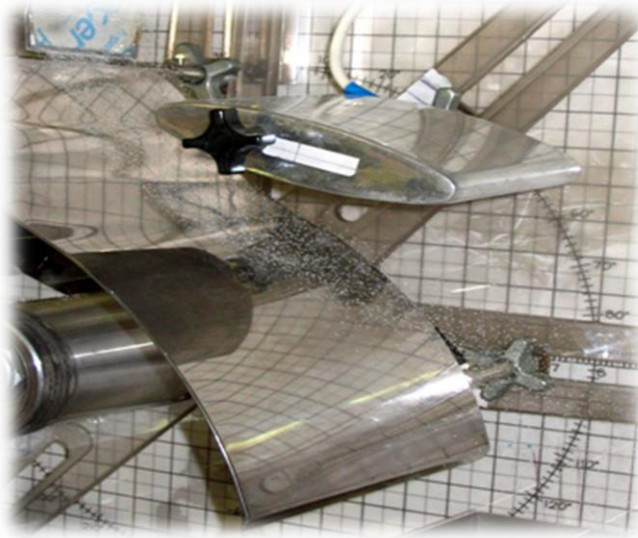


Figure I.19 Photographie de l'électro - Séparateur à plaque

b) Séparateur électrostatique à tambour

Le séparateur à tambour, comme celui montré sur la figure I.20, est le modèle le plus utilisé. Son principe de fonctionnement consiste en la création de charges électriques par ionisation de l'air grâce à une électrode (1) et ainsi les granules déposées par le vibro-transporteur (4) sur le cylindre tournant (tambour) (3) acquièrent tous une charge électrique de même signe que le potentiel HT.

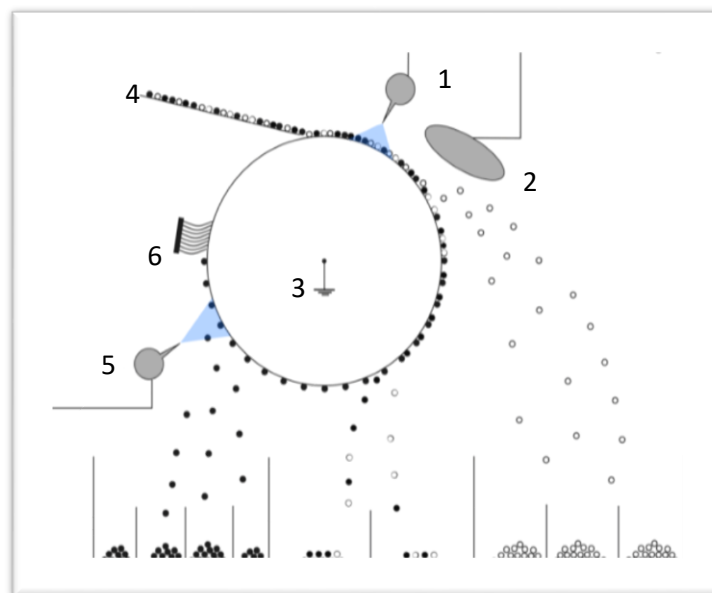


Figure I.20 Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour

(1) : Electrode couronne reliée à une source de haute tension (HT) ; (2) : Electrode statique reliée à la même source de HT ; (3) : Electrode cylindrique reliée à la terre ; (4) : Vibro-transporteur ; (5) : Electrode de neutralisation reliée à une source HT alternative ; (6) : Brosse ;

Les granules isolant à la surface du tambour grâce à la force d'image électrique

$$F_i = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0(2R)^2} \quad (1.8)$$

Avec :

Q : Charge du granule acquise par bombardement ionique dans la zone de décharge couronne générée entre les électrodes (1) et (3) (figure I.20).

R : distance séparant le centre du granule de la surface du tambour relié à la terre.

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

Il existe des installations regroupant en série et en parallèle plusieurs unités de séparation de ce type. Ainsi, la société américaine CARPCO [77] propose une installation où le montage de deux ou trois séparateurs en série (l'alimentation d'un séparateur est constituée d'un des produits obtenus dans le séparateur qui le précède) permet à l'utilisateur d'améliorer la pureté des produits obtenus. En mettant en parallèle deux ou plusieurs unités de séparation (parfois même des dizaines d'unités), on obtient une installation capable de traiter des quantités plus importantes de matériaux.

L'électro – séparateur à tambour tournant, utilisant la décharge couronne pour charger les granules permet de séparer un mélange granulaire isolant- métal (PVC/Cuivre par exemple) avec une pureté qui peut atteindre les valeurs de 100%.

La séparation électrostatique du cuivre, d'aluminium et des matériaux isolant électrique représente une technologie économiquement viable pour la préservation de l'environnement ; car elle offre du plastique recyclé de qualité élevée et une meilleure efficacité pour le recouvrement des matériaux que les méthodes conventionnelles de traitement des déchets. Elle représente de nos jours, une technologie moderne de recyclage des matériaux usagés issus des déchets industriels, elle est considérée comme la meilleure possibilité utilisée pour la séparation d'un mélange de granules isolant- métal.

La figure I.21 représente le séparateur électrostatique à cylindre tournant appartenant au laboratoire IRECOM de l'université de Sidi Bel Abbés.



Figure I.21 Photographie de l'électro-séparateur réalisé au laboratoire IRECOM [77]

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



Figure I.22 Séparateur électrostatique à tambour industriel installé à l'ERO

Conclusion

Plusieurs recherches ont été effectuées avec plusieurs dispositifs de chargement triboélectrique et des séparateurs électrostatiques sur le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques DEEE et aussi sur des matériaux récupérés issues de broyage de ce dernier, dont le rendement de ces installations sont importantes.

La séparation de plusieurs matériaux isolants est compliquée puisque les phénomènes de tribo-électriques sont plus complexes, un nouveau dispositif de chargement sera développé dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE II :
ETUDE DE CHARGEMENT
DES PARTICULES ISOLANTES

CHAPITRE II : ETUDE DE CHARGEMENT DES PARTICULES ISOLANTES

Le résultat de tout processus de séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules.

Multiple études comparatives des procédés de chargement ont été effectuées, chargeur à air comprimé avec ventilateur, et lit fluidisé, cylindre tournant, tube aluminium, tube inox...etc. Le résultat concernant l'acquisition de charge se varie d'une étude à l'autre, mais ce qui est commun comme résultat est : lors de la séparation des mélanges. C'est la raison pour laquelle notre étude de chargement des particules isolantes sera effectuée par ce dernier.

Dans ce chapitre nous allons présenter notre nouveau dispositif de chargement à tube (Aluminium, Inox, PVC...ect) dont le principe de fonctionnement est par glissement des particules à l'intérieur de ce dernier, et aussi les différents résultats de chargement triboélectrique avec le dispositif à lit fluidisé seront mentionnés.

II.1. Matériaux utilisés

Plusieurs types de granules isolantes ont été utilisés dans les expériences. Les matériaux qui font l'objet de notre étude sont couramment utilisés dans la plasturgie des équipements électriques et électroniques en général [1-3]. Il s'agit des particules en :

- Acrylonitrile Butadiène Styrène noir (ABS)
- Acrylonitrile Butadiène Styrène marron (ABS)
- High Impact Polystyrene greed (HIPS)
- High Impact Polystyrene blanche (HIPS)
- Polycarbonate (PC)
- Polyamide (PA)
- Chlorure de Polyvinyle (PVC)
- Polyéthylène Haute Densité noir (PEHD)
- Polyéthylène Haute Densité blanc (PEHD)
- Polystyrene (PS)
- Polypropylène (PP)

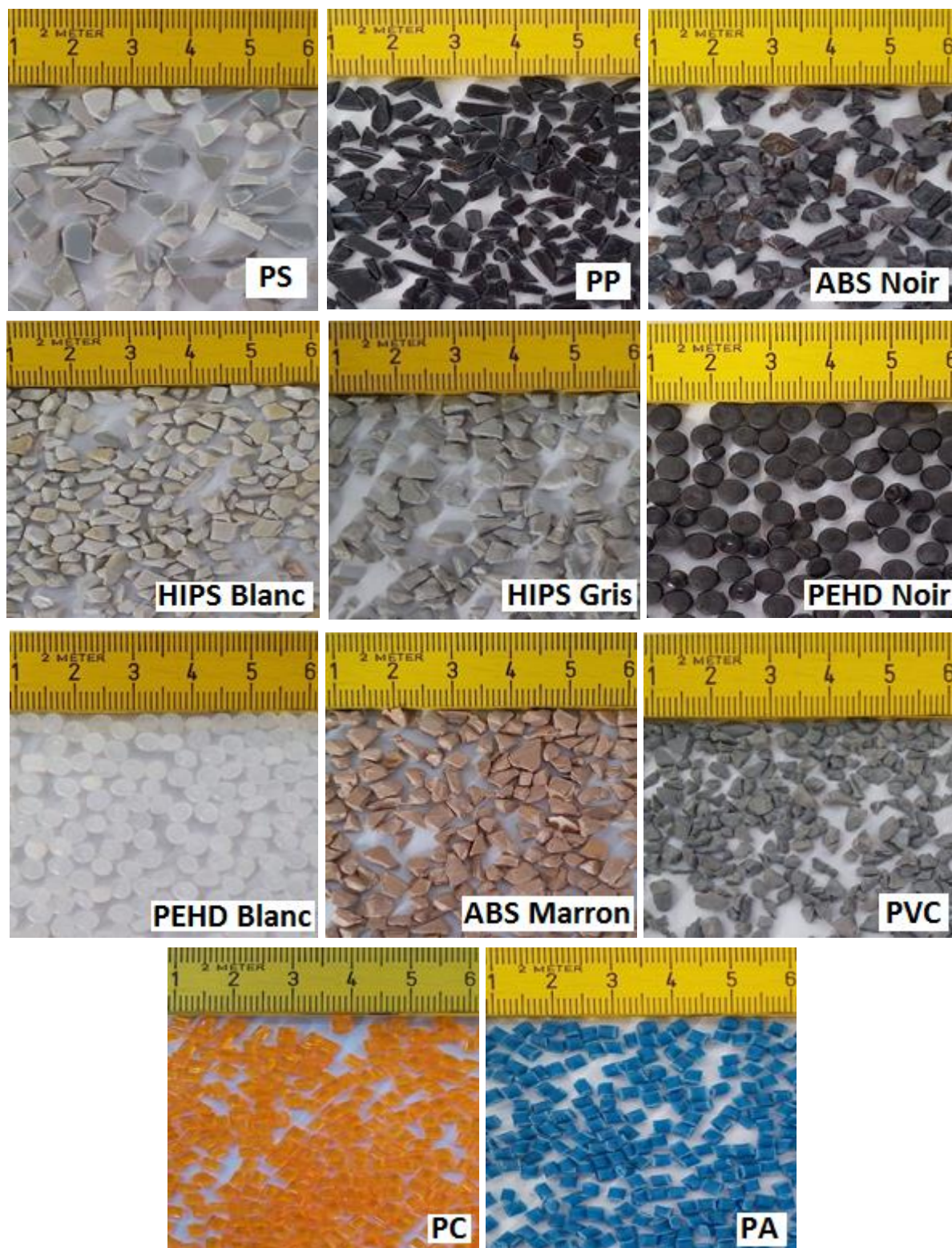


Figure II.1 Echantillons de particules utilisés

Tableau II.1 Caractéristiques des particules

Type de particules	Taille (mm)	Nature	Couleur	Densité (g/cm ³)
Chlorure de Polyvinyle (PVC)	1	recyclé	gris	1,380
Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS)	2 – 1	recyclé	Marron	1,040
			Noir	
Polycarbonate (PC)	1	brute	orange	1,20
Polyamide (PA)	1	brute	Bleu	1,13 -1,35/1,41
High Impact Polystyrène (HIPS)	2 - 3	Recyclé	Blanc et crème	1.03 - 1.06
			Gris	
Polyéthylène Haute Densité blanc (PEHD)	1	Brute	Blanc	0.944 - 0.965
Polyéthylène Haute Densité noir (PEHD)	2	Brute	Noir	0.944 - 0.965
Polystyrène (PS)	3- 4	brute	Gris et blanc	1,04
Polypropylène (PP)	3- 4	brute	Noir	0.905

II.2. Installations expérimentales

II.2.1. Dispositif de chargement triboélectrique à tube

L'installation est composée d'un tube de diamètre 50 mm et de longueur 640 mm (**Figure II.2**), qui repose sur un support qui est aussi posé sur une table [84].

Le chargement s'effectue par glissement des particules à l'intérieur du tube incliné.

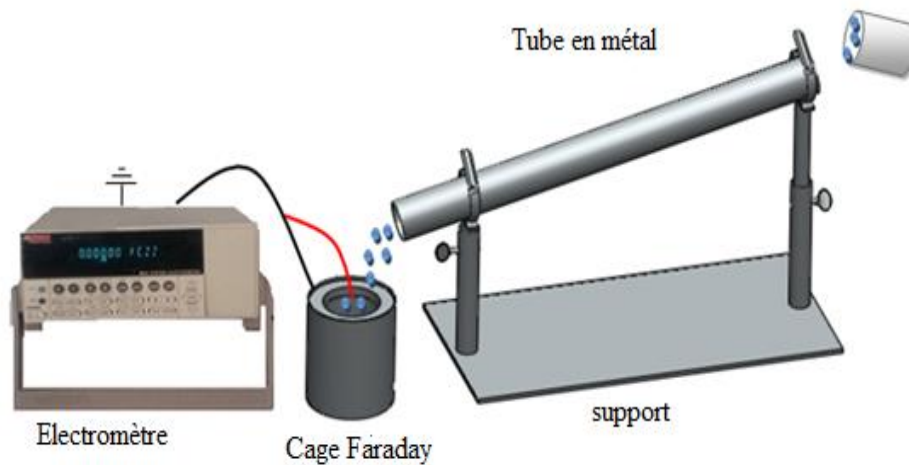


Figure II.2 Installation de chargement triboélectrique à tube (Solidworks)

Nous avons utilisé trois tubes en inox, en aluminium et en PVC, montrés à la figure II.3.



(a) Tube en Inox



(b) Tube en Aluminium



(c) Tube en PVC

Figure II.3 Photos des tubes utilisés pour le chargement par glissement

✚ Nous avons aussi utilisé les tubes suivants de même dimensions :

- tube en acétate
- tube en acétate thermique
- tube en carton
- tube en plastique.

II.2.2. Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé

Ce système de chargement triboélectrique est constitué d'un cylindre de matière polypropylène (**Figure II.4 et II.5**), dont le principe de fluidisation débute par des collisions majoritairement type particule-particule, et finit par des collisions quasiment particule-paroi [84].



Figure II.4 Chargement tribo-électrique dans un dispositif à tube cylindrique

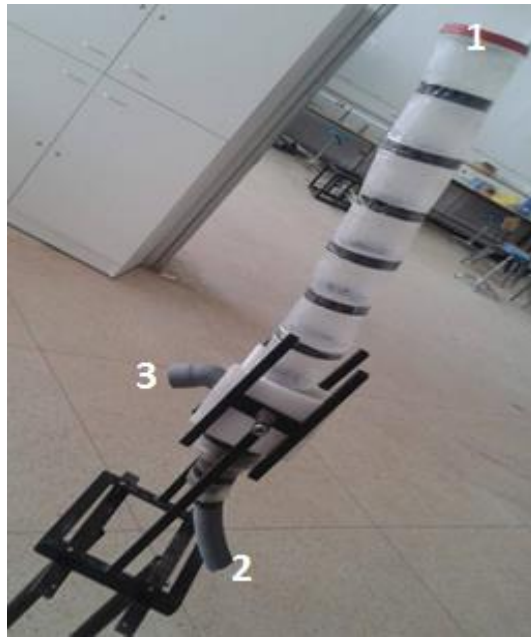


Figure II.5 Photographie de dispositif à tube cylindrique
(1) L'entrée du produit, (2) Injection de l'air, (3) Sortie du produit

II.3. Matériels et méthode

Après avoir récupéré la matière granulaire chargée, il est impératif de passer par trois techniques de mesure :

II.3.1. Mesure de la charge

Il est primordial de disposer de méthodes permettant d'évaluer la polarité et l'intensité des charges électrostatiques présentes au sein des particules. Cet objectif peut être atteint par la cage de Faraday.

La cage de Faraday (figure II.6) est l'un des dispositifs les plus courants pour mesurer la charge des particules tribo-électrisées. Une cage de Faraday est constituée de deux cylindres conducteurs concentriques séparés par un isolant. Le cylindre extérieur est relié à la terre, non seulement pour éviter que les charges extérieures ne soient mesurées mais aussi pour réduire toutes les perturbations électriques extérieures. Le produit dont on doit mesurer la charge est introduit dans le cylindre intérieur. Ce cylindre est isolé de la terre et connecté à un électromètre dont le rôle est de mesurer la charge électrique qui s'y répartit sur la surface extérieure par répulsion électrostatique (les charges de même signe se repoussent le plus loin possible sur la surface) [11].



Figure II.6 Cage de Faraday utilisés

Afin de mesurer précisément la charge acquise, Un électromètre numérique Keithley modèle 6514 (Figure II.7) a été utilisé, ayant les avantages principaux suivants :

- Mesures de charge de 10fC à 20 μ C ;
- Haute vitesse - jusqu'à 1200 lectures / seconde ;
- Interfaces facilement avec les commutateurs, les ordinateurs et les gestionnaires de composants ;
- Annule les offsets de tension et de courant facilement.



Figure II.7 Electromètre numérique Keithley modèle 6514

II.3.2. Mesure de l'humidité relative

Une telle étude expérimentale n'est réalisable que lorsqu'il s'agit d'une humidité relative idéale, ce qui exclut en particulier toute mesure où l'humidité (HR%) est inconvenable. Donc, on doit la mesurer avant chaque série d'expériences, utilisant un thermo hygromètre numérique (Luttron HT-3007 SD) (Figure II.8).

Le Luttron HT-3007 SD est un appareil compact avec tête de sonde intégrée pour l'humidité, pour la mesure de l'humidité et de la température de l'air. Le grand écran de deux lignes affiche l'humidité, la température du bulbe humide ou le point de rosée, ainsi que la température rapidement et de manière fiable.



Figure II.8 Thermo hygromètre luttron HT-3007 SD

II.3.3. Mesure de la masse granulaire

Mesurer la masse granulaire avant chaque expérience est nécessaire, pour cela on utilise une balance électronique modèle CAS MWP-600H (figure II.9), spécifiée par :

- Haute précision
- 8 unités de mesures
- Fonction comptage, pesage et pourcentage
- Affichage rétro éclairé
- Interface RS-232
- Alarme de surcharge
- Mise hors tension automatique
- Calibration automatique
- Capacité x précision : 600 x 0.01g



Figure II.9 Balance numérique CAS MWP-600H

II.3.4. Souffleurs et variateur de tension

Le rôle de souffleur (Figure II.10) consiste à envoyer l'air comprimé à la chambre de lit fluidisée où existe le répartiteur d'air au-dessous du cylindre. Un mouvement d'air aléatoire se crée à l'intérieur de la chambre, ce qui donne un frottement des granules. Grâce à la collision entre les particules et entre particules et parois, cette méthode est appelée chargement tribo-électrique par lit fluidisé. On peut appliquer un débit variable selon la tension qui est réglée par un variateur de tension.



Figure II.10 Photographie représente variateur de tension avec souffleur

II.4. Résultats et Discussion du dispositif de chargement à tube

II.4.1. Déroulement de l'expérience

On a pris l'échantillon de granules du plastique, (10 g pour chaque produit), puis on a versé l'échantillon dans les tubes de façon uniforme. Les particules de plastique se mettent en frottement par glissement avec la paroi du tube.

Après avoir chargé ces particules tribo- électriquement, elles sont mises dans une cage de faraday pour estimer le taux de la charge acquise.

Les essais ont été réalisés sur les onze types d'isolants précédemment cités (HIPS_{blanc}, HIPS_{gris}, PA, PVC et ABS_{marron}, ABS_{noir}, PEHD_{noir}, PEHD_{blanc}, PP, PC, PS) séparément.

Les paramètres mesurés sont :

- ✓ la charge acquise des particules durant chaque passage;
- ✓ la masse du produit granulaire [g] ;

Le taux d'humidité HR pendant l'étude expérimentale était de l'ordre de 60 % à 70% et la température ambiante T était entre 19°C et 24°C.

Tous les résultats obtenus concernant le taux de chargement des particules sont divisés par la masse granulaire, autrement dit la charge acquise par le matériau granulaire s'exprime en nC/g.

- ❖ Les résultats de chargement obtenus par glissement avec les différents tubes sont représentés par les histogrammes aux **Figures II.11 à la Figure II.17** Les résultats sont donnés en fonction de nombre de passage dans le tube (n).

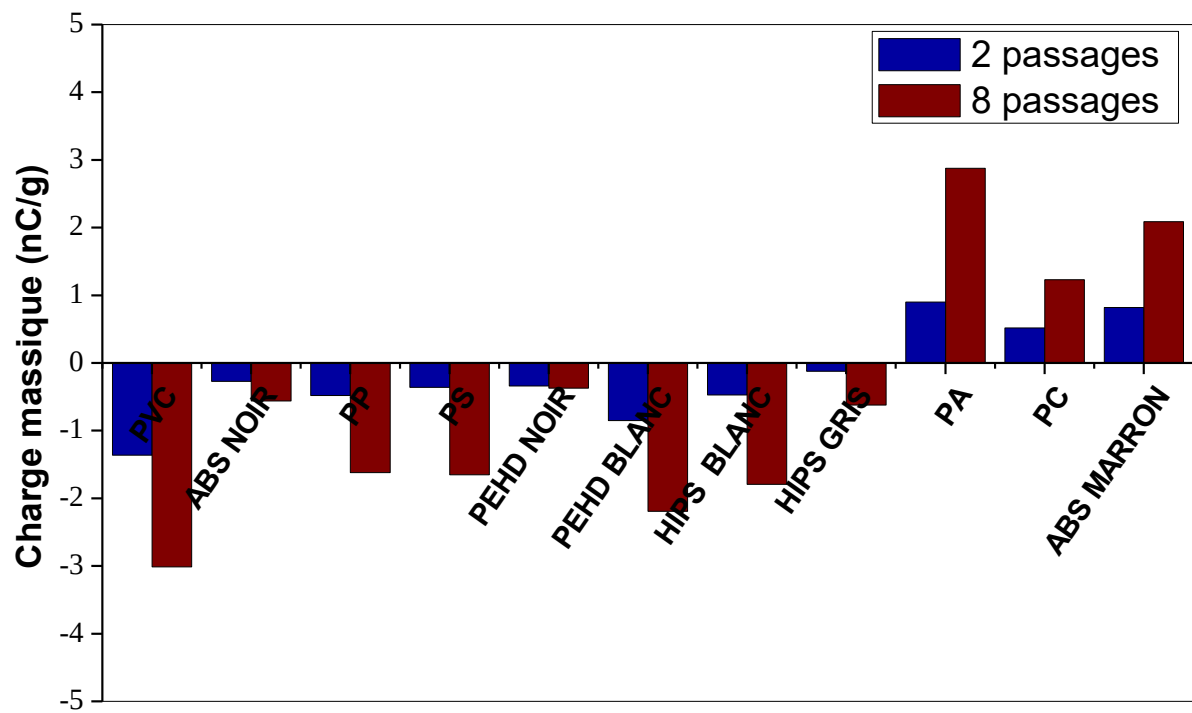


Figure II.11 Représentation graphique de l'influence du nombre de passage "n" sur la charge acquise (Tube en inox)

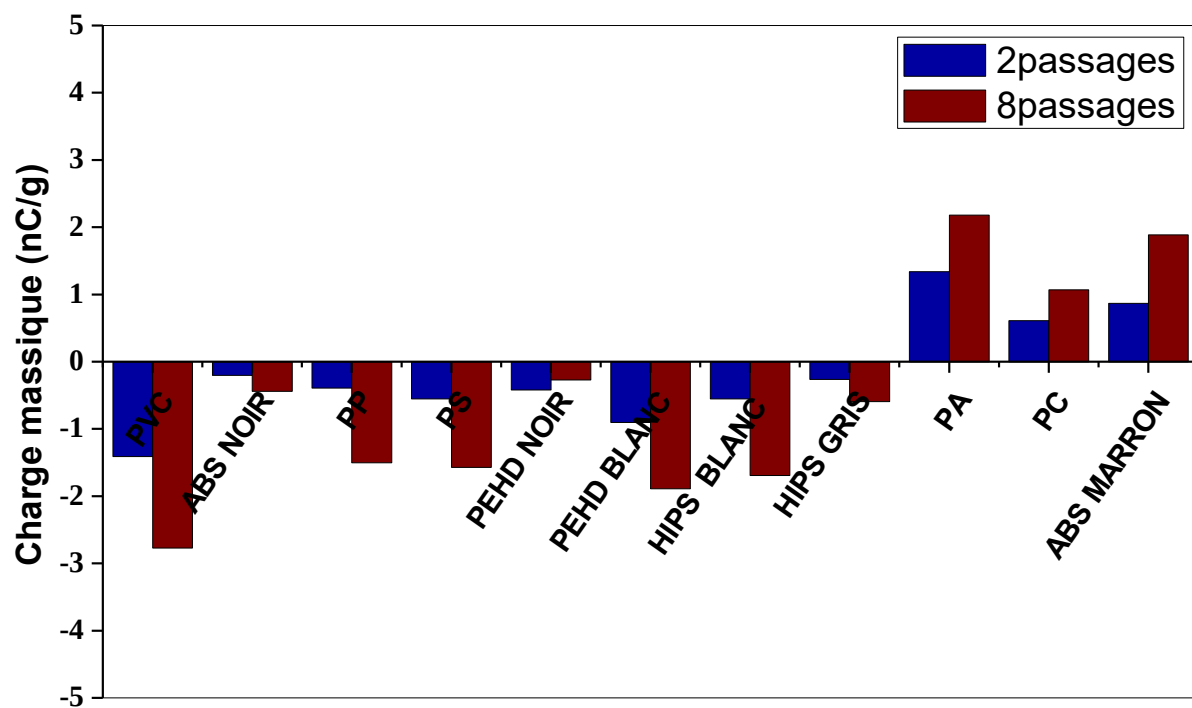


Figure II.12 Représentation graphique de l'influence du nombre de passage "n" sur la charge acquise (Tube en aluminium)

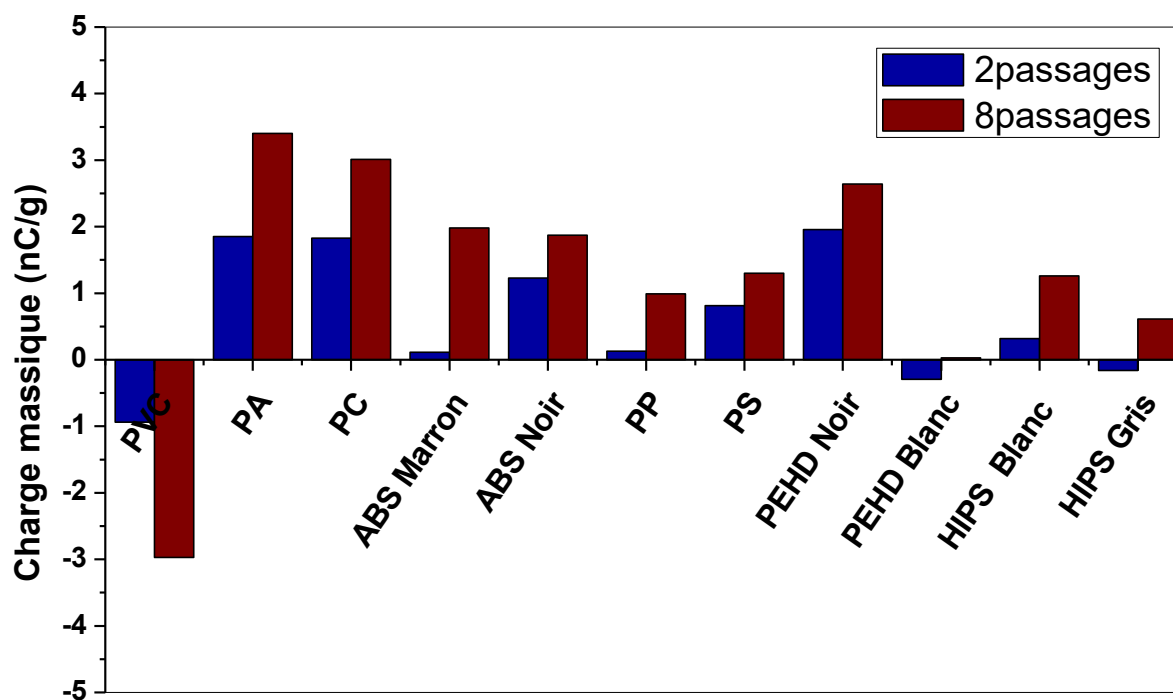


Figure II.13 Représentation graphique de l'influence du nombre de passage "n" sur la charge acquise (Tube en PVC)

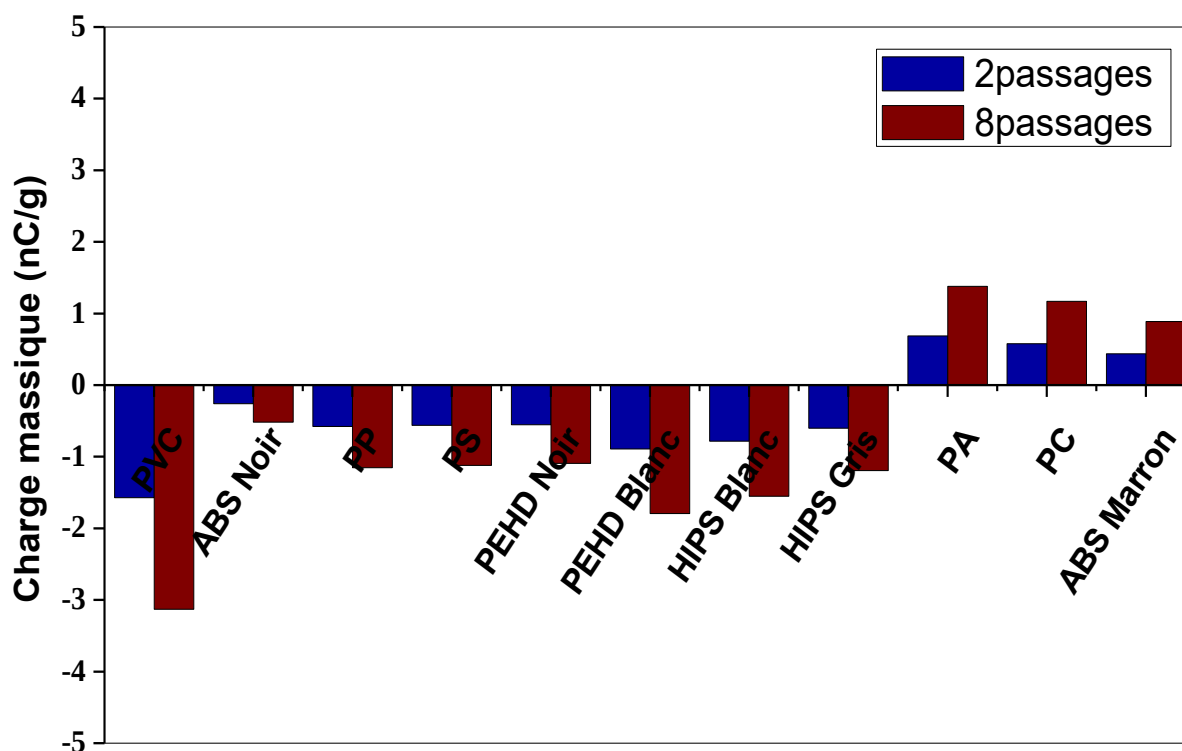


Figure II.14 Représentation graphique de l'influence du nombre de passage "n" sur la charge acquise (Tube en plastique)

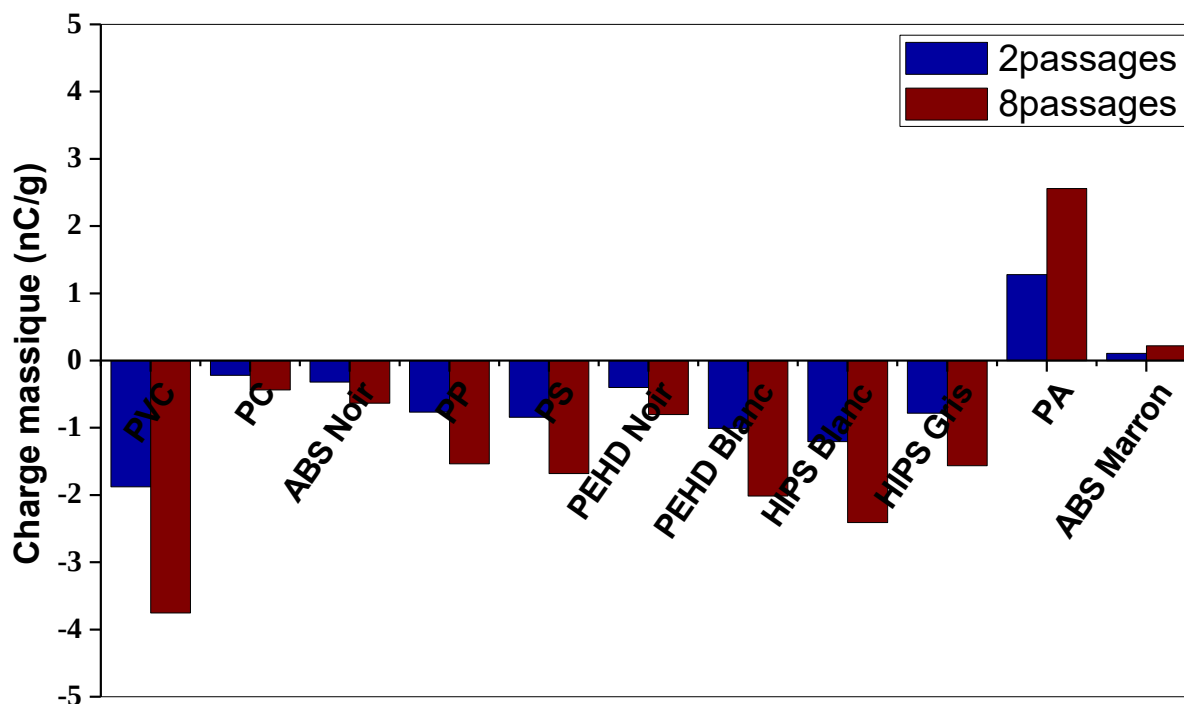


Figure II.15 Représentation graphique de l'influence du nombre de passage "n" sur la charge acquise (Tube en acétate thermique)

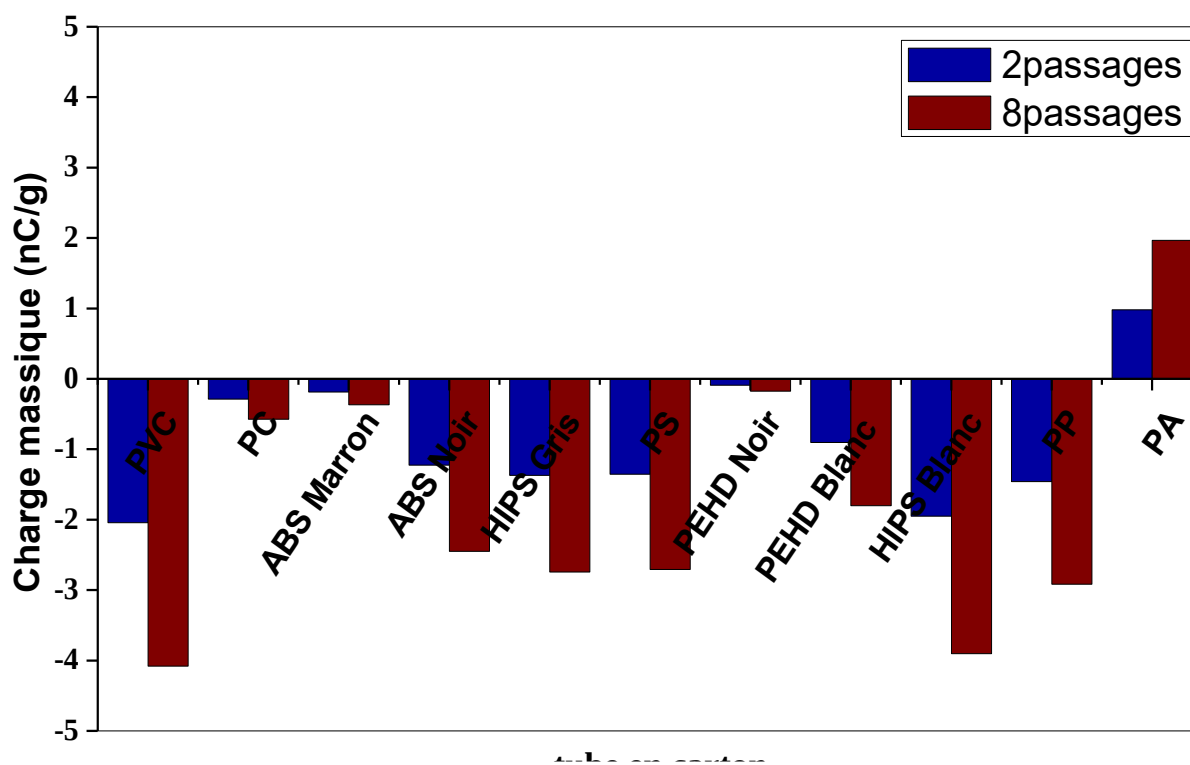


Figure II. 16 Représentation graphique de l'influence du nombre de passage "n" sur la charge acquise (Tube en carton)

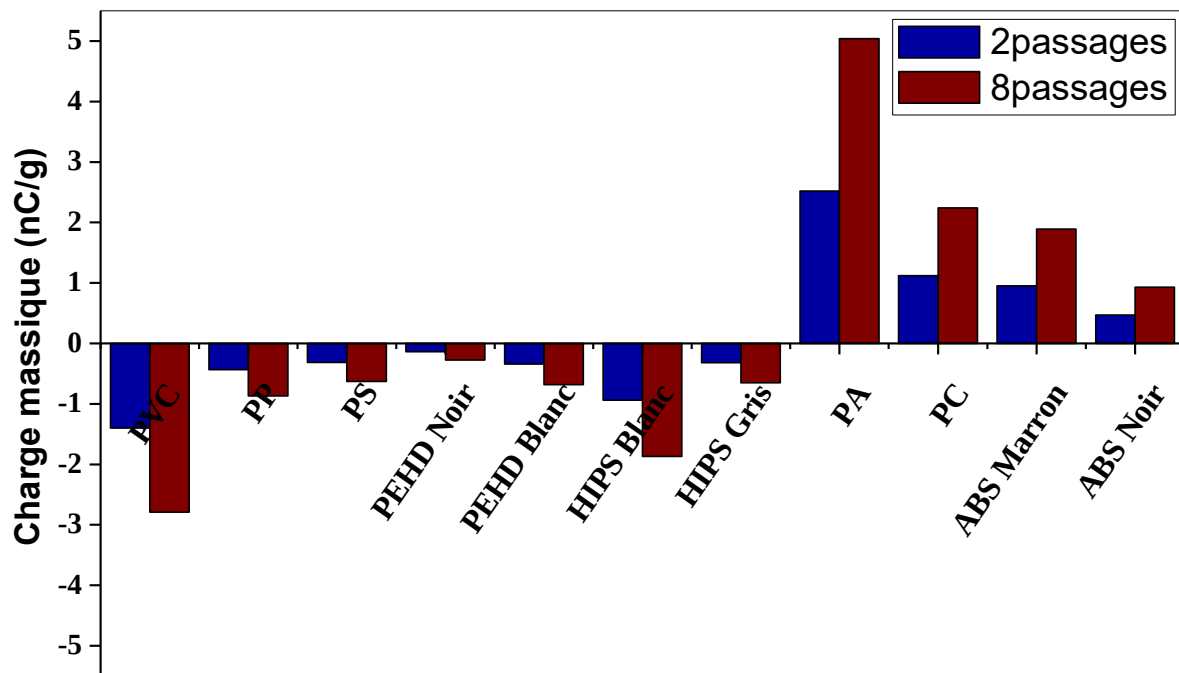


Figure II.17 Représentation graphique de l'influence du nombre de passage "n" sur la charge acquise (Tube en acétate)

II.4.2. Interprétation des résultats

✓ Les résultats des expériences menées sur les types de particule montrent que la charge acquise des particules croît avec l'augmentation du nombre de passage et la longueur du tube de chargement, car le glissement entre particules/paroi devient plus important et plus fort.

✓ La charge des particules pour le tube en PVC est importante que les tubes en aluminium et inox ($n=8$). Par contre toutes les particules se chargent positivement sauf le PVC et le PEHD_{Blanc} dont ce dernier devient positif en augmentant le nombre de passage mais avec une valeur presque nulle.

✓ La charge des particules avec le tube de plastique sont presque comme les deux tubes d'Aluminium et l'Inox. Par contre pour le tube en acétate thermique le PC devient négatif et la charge d'ABS_{Marron} diminue.

✓ Pour le tube en carton toutes les particules se chargent avec un signe négatif sauf le PA qui est chargé avec un signe positif.

✓ Pour le tube en acétate on constate que les particules se chargent presque comme le tube en inox ou aluminium, sauf ABS_{Noir} qui devient positif. Mais les valeurs de la charge sont beaucoup plus petites.

✓ Le signe de la charge d'un matériau dépend de celui avec lequel il rentre en contact (paroi). On peut classer ces produits sur une échelle indiquant leur tendance relative

à se charger positivement ou négativement, d'où on arrive à extraire notre propre série triboélectrique,

✓ Chaque matériau a sa propre électronégativité, automatiquement son propre ordre dans la série tribo-électrique, ce qui rend l'influence de la matière des parois si importante.

✓ Cette étude est utile car elle permet de choisir les matériaux qui peuvent être séparé, en utilisant le tube adéquat qu'il faut.

Le rendement des installations de séparation électrostatique est lié à l'efficacité du processus de charge. Les résultats obtenus montrent que les dispositifs de chargement triboélectrique « tube aluminium et tube inox » peuvent représenter une solution viable pour la charge triboélectrique des matériaux plastiques granulaires.

Les résultats obtenus de ces expériences sont indispensables dans l'étude de séparation électrostatique avec le "tapis roulant" représenté dans le quatrième chapitre.

II.5. Résultats et Discussion du dispositif de chargement à lit fluidisé

La difficulté de commande et de réglage des paramètres d'un chargeur tribo-électrostatique réside dans le fait que les signes peuvent s'inverser de manière facile, est très surprenant, c'est une particularité de l'électricité statique. Il est donc très important de formuler l'ensemble des paramètres qui ont une grande influence sur le contrôle de dispositif.

Les essais ont été réalisés sur les onze types d'isolants précédemment cités séparément, en utilisant une paroi interne de dispositif en PP.

Les paramètres de contrôle sont :

- le temps de chargement durant chaque expérience [s] ;
- La vitesse de l'air de fluidisation 112.5 à 450 tr/min ;

Le taux d'humidité HR pendant l'étude expérimentale était de l'ordre de 40,4 % à 50% et la température ambiante T variante entre 30°C et 28.3°C.

Tous les résultats obtenus concernant le taux de chargement des particules sont divisé par la masse granulaire, autrement dit la charge acquise par le matériau granulaire s'exprime en nC/g (charge massique).

II.5.1. Influence du temps de chargement

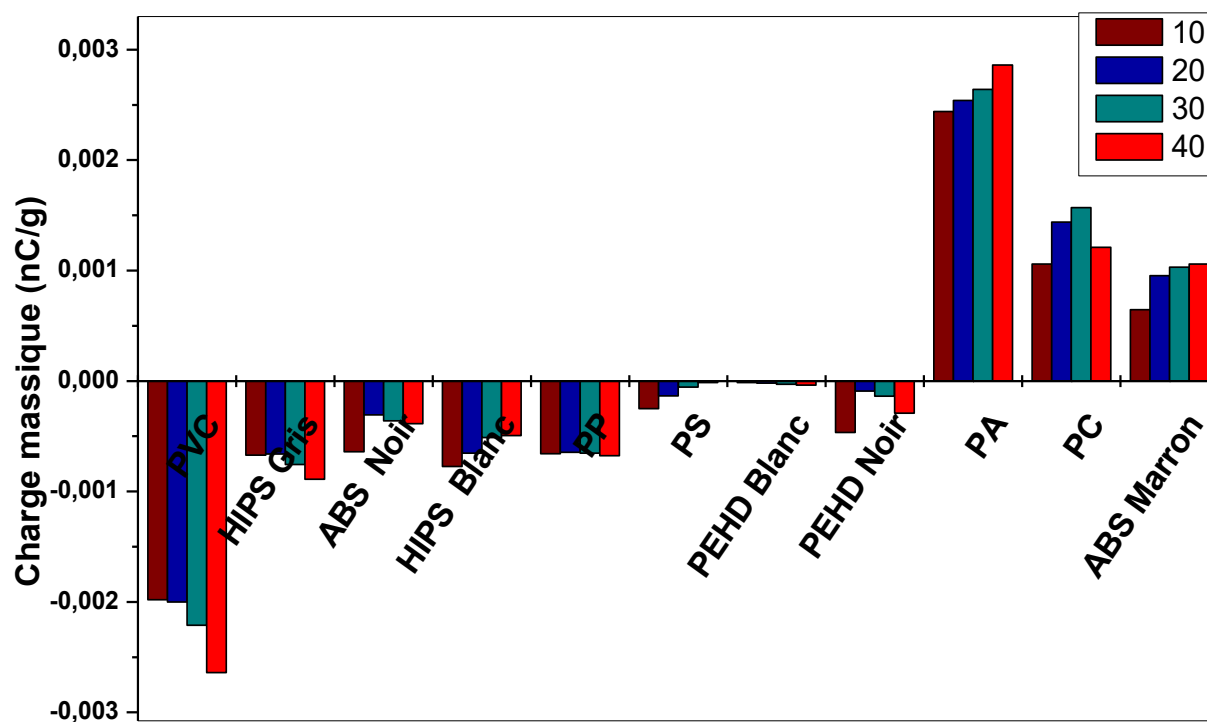
La figure II.18 représente l'influence du temps de chargement sur la charge acquise par le produit granulaire, allant de $t = 10$ s jusqu'à $t = 40$ s, avec un pas de 10, les autres paramètres sont maintenus constants :

- La masse du produit $m = 10$ g ;

- La vitesse de l'air de fluidisation régler par la variation de la tension de l'alimentation V est égale à 200 V.

Tableau II.2 Charge massique (nC /g) des particules en fonction du temps (s)

	10	20	30	40
PA	2,44E-03	2,54E-03	2,64E-03	2,86E-03
PC	1,06E-03	1,44E-03	1,57E-03	1,21E-03
ABS Marron	6,46E-04	9,53E-04	1,03E-03	1,06E-03
PEHD Noir	-4,65E-04	-9,05E-05	-1,38E-04	-2,92E-04
HIPS Gris	-6,70E-04	-6,61E-04	-7,56E-04	-8,89E-04
ABS Noir	-6,40E-04	-3,07E-04	-3,61E-04	-3,87E-04
HIPS Blanc	-7,75E-04	-6,53E-04	-5,12E-04	-4,93E-04
PP	-6,58E-04	-6,46E-04	-6,52E-04	-6,76E-04
PS	-2,51E-04	-1,35E-04	-5,50E-05	-1,45E-05
PEHD Blanc	-1,45E-05	-1,90E-05	-2,85E-05	-3,80E-05
PVC	-1,98E-03	-2,00E-03	-2,21E-03	-2,64E-03

**Figure II.18** Influence du temps de chargement sur la charge acquise par les 11 particules

II.5.2. Influence de la vitesse de l'air de fluidisation

Les résultats de la charge acquise en fonction de vitesses de fluidisation : ($v=50$ V, $v=100$ V, $v=150$ V et $v=200$ V), avec un pas de 50V sont présentés dans la figure II.19, le temps de chargement et la masse granulaire sont maintenus constant : $t=10$ s et $m=10$ g.

Tableau II.3 Charge massique (nC /g) des particules en fonction de la vitesse (V)

	50	100	150	200
PA	1,11E-03	1,66E-03	2,25E-03	2,44E-03
PC	1,34E-03	1,21E-03	1,14E-03	1,06E-03
PEHD Blanc	3,14E-04	7,90E-05	6,15E-05	-1,45E-05
PEHD Noir	-3,70E-05	-9,05E-05	-3,88E-04	-4,65E-04
ABS Marron	8,49E-04	9,68E-04	9,94E-04	1,01E-03
HIPS Gris	-1,58E-04	-3,20E-04	-5,11E-04	-6,70E-04
ABS Noir	-4,19E-04	-4,32E-04	-6,09E-04	-6,40E-04
HIPS Blanc	-4,54E-04	-5,39E-04	-6,42E-04	-7,75E-04
PS	-2,22E-04	-3,12E-04	-5,17E-04	-6,58E-04
PP	-4,90E-05	-6,51E-05	-1,60E-04	-2,51E-04
PVC	-1,48E-03	-1,66E-03	-1,81E-03	-1,98E-03

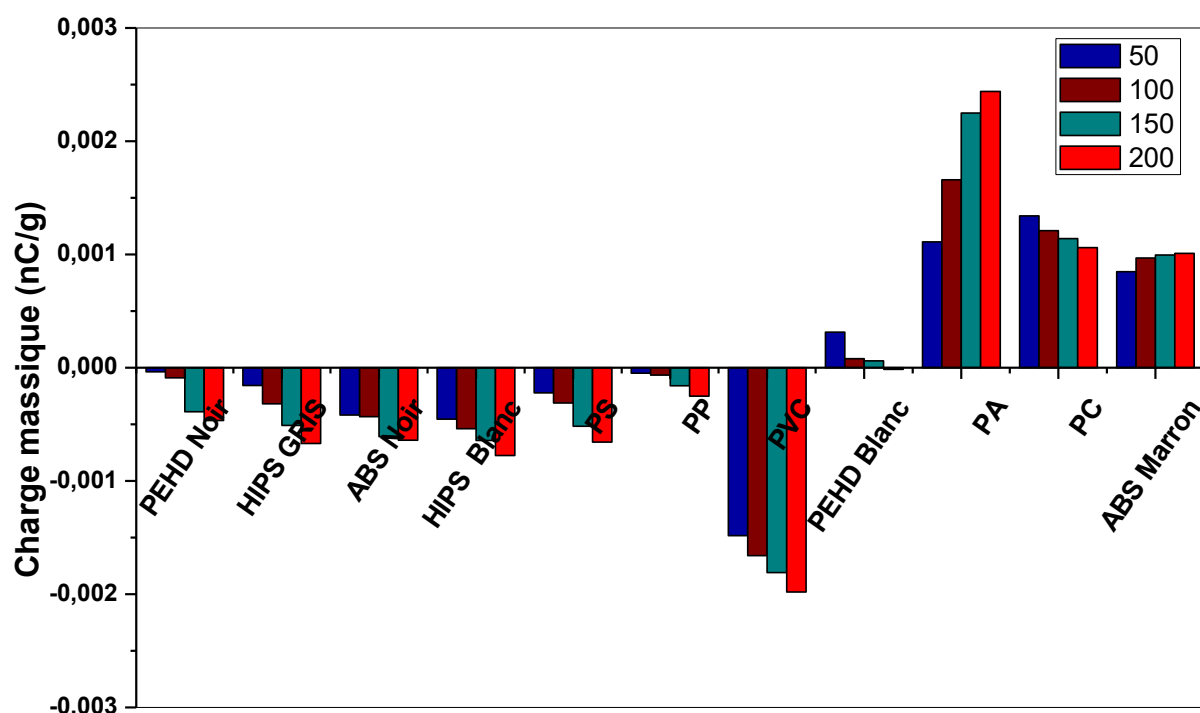


Figure II.19 Influence de la vitesse de l'air de fluidisation sur la charge acquise par les 11 produits granulaire

II.5.3. Analyses et Discussions

- ✓ La collision des particules avec la paroi de dispositif crée une charge positive pour le PA, PC et ABS_{Marron} et une charge négative pour le PVC, PEHD_{NOIR}, PEHD_{BLANC}, HIPS Gris et blanc, PP et le PS.
- ✓ La charge acquise par les granules de PA et ABS_{Marron} est proportionnelle au temps de leur chargement à cause de l'accroissement du nombre des collisions.
- ✓ Plus on augmente le débit d'air, plus l'intensité de la charge ainsi que le nombre des collisions augmentent. Atteignant un certain débit le lit fluidisé dépasse sa dernière phase ce qui diminue la charge pour le PC à $t=40s$. C'est l'illustration du fait que la vitesse d'air de fluidisation est proportionnelle au chargement de PVC et ABS Marron et HIPS Gris, arrivant à une vitesse de $V = 200 \text{ V}$, la charge de PC et de HIPS BLANC et ABS Noir diminuent en augmentant la vitesse.
- ✓ En augmentant le temps et la vitesse la valeur de la charge du PEHD_{NOIR} et PEHD_{BLANC} devient nul.
- ✓ D'après ces résultats ; on remarque que l'acquisition de charge est meilleure lorsque la vitesse est égale à 200 V et le temps $t=30s$; ces paramètres sont utilisés dans l'étape suivante de la séparation.

Conclusion

Le rendement des installations de séparation électrostatique est lié à l'efficacité du processus de charge. Les résultats obtenus montrent que les dispositifs de chargement triboélectrique « tube aluminium et tube inox » peuvent représenter une solution viable pour la charge triboélectrique des matériaux plastiques granulaires.

Les résultats expérimentaux concernant le procédé d'acquisition de charge statique montrent que la matière des parois influe sur la charge acquise par les particules en signe et en grandeur.

Ces expériences préliminaires ont pour but d'évaluer la charge acquise par les matériaux granulaires isolants dans le dispositif à tube aluminium et tube inox afin de connaître les caractéristiques électriques des matériaux granulaires avant leur utilisation.

Le chargement des onze différentes matières plastiques granulaires dans le dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisés acquièrent des petites charges (à l'ordre de pC/g) comparant au dispositif de chargement par glissement qui est à l'ordre de nC/g .

Les résultats obtenus de ces expériences sont indispensables dans l'étude de séparation électrostatique "tapis roulant" dans le quatrième chapitre.

Le chapitre suivant présentera la séparation d'un produit binaire et ternaire en utilisant trois différents séparateurs électrostatique.

CHAPITRE III :
ETUDE DE LA SEPARATION
D'UN MELANGE TERNAIRE

CHAPITRE III : ETUDE DE LA SEPARATION D'UN MELANGE TERNAIRE

Le cœur de métiers de plusieurs industries comme l'APR2 résidait alors dans la collecte et le recyclage des DEEE (Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques).

Confronté à d'importants volumes de plastiques (coques d'écrans, d'imprimantes, d'ordinateurs...), il n'existait, au départ, aucune solution de retraitement de ces plastiques (figure III.1), si ce n'est l'enfouissement et l'incinération de ces déchets considérés comme ultimes.

Insatisfaits par cette situation à l'impact environnemental négatif, ils ont investi massivement en R&D afin de mettre au point des solutions industrielles uniques de tri et de recyclage.



Figure III.1 Des matières de plastique vierges

La problématique dans les dispositifs de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique est de savoir à partir de quelle charge les mélanges granulaires peuvent être séparés ; trop chargés implique une surconsommation d'énergie et moins chargés entraîne une mauvaise électro- séparation ; encore ce type de traitement nécessite le passage d'un procédé à un autre à travers une phase ou une autre infrastructure intermédiaire d'un côté et d'un autre côté, faire à chaque type de produit une étude d'optimisation de la charge avant de le faire passer à l'électro- séparation ; donc le rendement de de tout processus de

séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules plus cette dernière est contrôlée, plus la séparation est améliorée.

Le but de ce chapitre est de faire une étude sur un mélange ternaire et d'essayer le mode de chargement nécessaire pour augmenter la pureté.

Premièrement on a commencé par le nouveau séparateur électrostatique à tambour de la société Prodecologia, Rivne, Ukraine, qui a déjà permis la séparation isolant – isolant, puis on va entamer une deuxième séparation avec les séparateurs : tribo-Aéro-électrostatique à base de bandes transporteuses qui était breveté à l'IUT d'Angoulême (Université de Poitiers) et le séparateur à chute libre.

Afin de séparer des mélanges comportant deux isolants différents ou plus, deux étapes successives sont nécessaires. Tout 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.

III.1. Séparateur électrostatique à tambour Prodecologia

a) La structure du séparateur

Le séparateur se compose de deux parties suivantes (figure III.2) :

- Le dispositif de chargement tribo-électrique;
- Le séparateur électrostatique.

❖ L'apparence générale du séparateur électrostatique EBS-27/7,5-15.042 est présentée sur la Figure III.3.

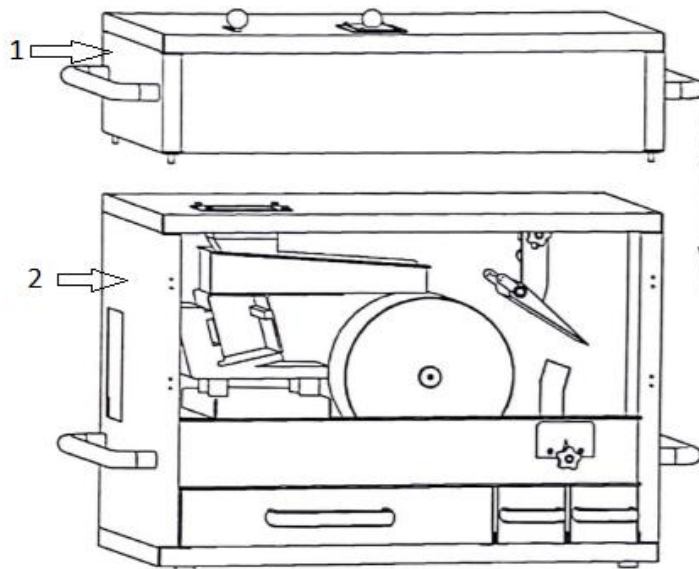


Figure III.2 Représentation schématique de la composition du séparateur électrostatique Prodecologia

(1) : Le dispositif de chargement ; **(2)** : le dispositif de séparation

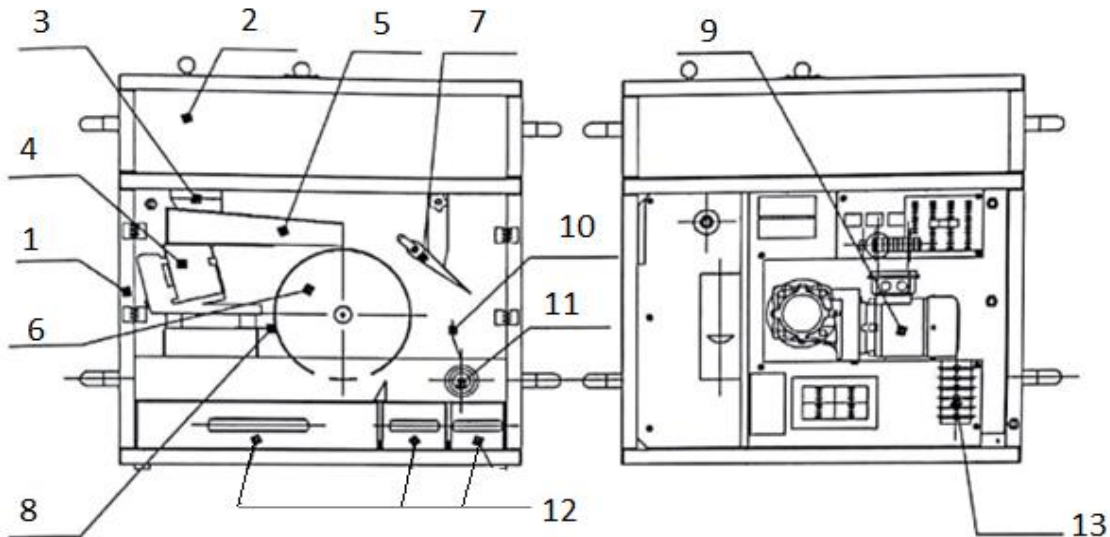


Figure III.3 L'apparence générale du séparateur

(1) : Le séparateur électrostatique ; (2) : Le dispositif tribo électrique ; (3) : La sortie des particules de dispositif de chargement ; (4) : Vibreur ; (5) : Vibro-transporteur ; (6) : Tambour ; (7) : Electrode reliée à une source de haute tension réversible ; (8) : La brosse ; (9) : Le moteur ; (10) : Un volet d'inclinaison réglable ; (11) : le régulateur de la disposition de volet ; (12) : Les collecteurs ; (13) : le panneau du réglage du séparateur.

Le séparateur fonctionne dans le régime automatique avec la séquence de mécanismes de 'lancer' et 'arrêt'.



Figure III.4 Le panneau de réglage du séparateur

Le principe de fonctionnement de séparateur Prodecologia montré sur la figure III.5 consiste à charger les particules (1) puis les déposées sur un vibro- transporteur (2) pour les

mener sur le cylindre tournant (3) (tambour) et ils seront séparés par une électrode (4) relié à une haute tension.



Figure III.5 Photos du séparateur électrostatique Prodecologia [85]

Le dispositif de tribo électrique est un tube incliné, à l'intérieure il y a des pales en plastique qui tournent à l'aide d'un moteur (figure III.6) qui est destiné à charger les particules au cours de la séparation électrostatique.

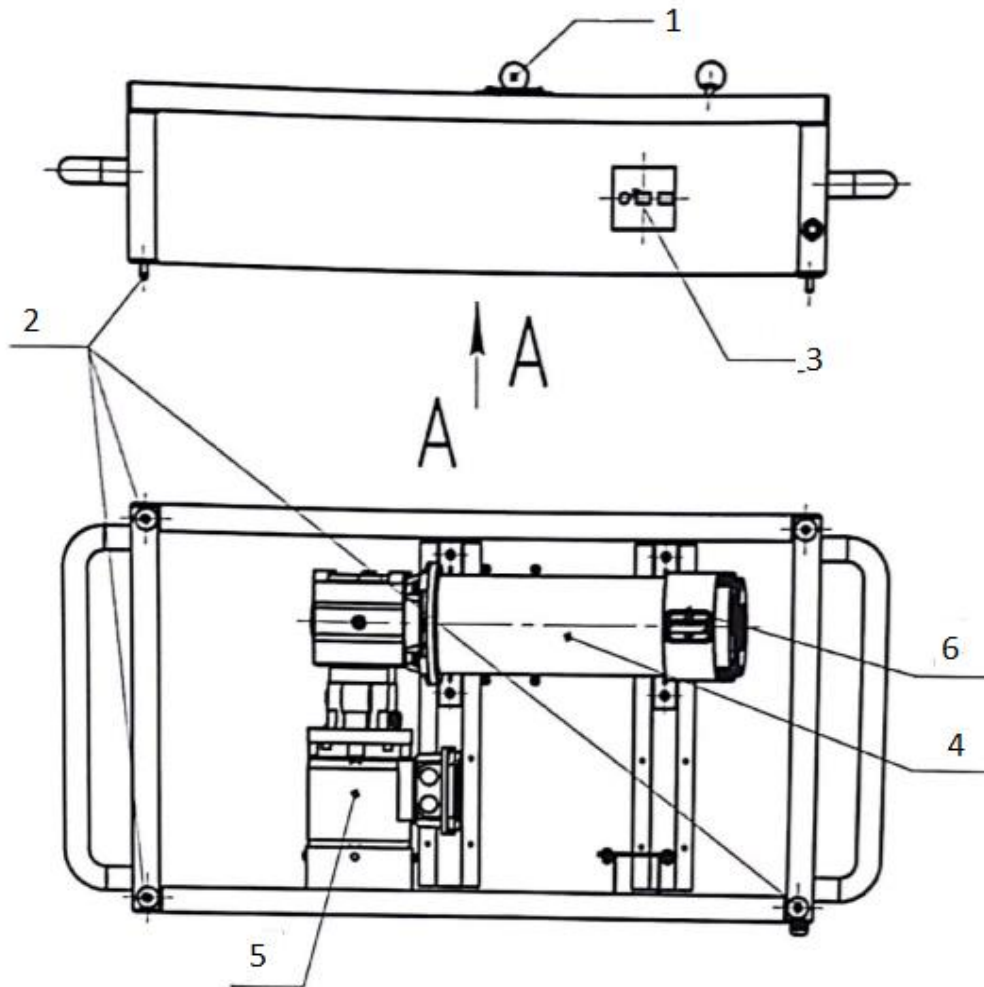


Figure III.6 La construction de dispositif de chargement

(1) : L'entrée de produit ; (2) : les crochets de fixation ; (3) : le panneau de commande de dispositif ; (4) : le tube ; (5) : le moteur ; (6) : la valve rotative

b) Etude de chargement

Les DEEE sont composés d'une multitude de plastiques différents, des essais ont été menés sur la charge de plusieurs types de polymères : Polyamide (PA), Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS), High-Impact Polystyrène (HIPS), Polycarbonate (PC), Acrylonitrile Butadiène Styrène/Polycarbonate (ABS+PC), Polyéthylène Haute Densité blanc (PEHD), Polypropylène (PP), Polystyrène (PS) et Polychlorure de vinyle (PVC).

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.

La valeur de la charge électrique acquise par les particules est mesurée dans une cage de Faraday, par un électromètre numérique, les résultats sont exprimés en termes de charge massique (nC/g).

Les résultats de chargement des onze produits sont représentés par l'histogramme de la **(Figure III.7)** Signalons que pour toutes les expériences, la valeur de la charge massique représente la moyenne de trois essais presque identiques.

On a introduit une masse de 50g dans le chargeur triboélectrique du séparateur électrostatique Prodecologia présenté précédemment (figure III.5) et le taux d'humidité HR pendant l'étude expérimentale était à 59%.

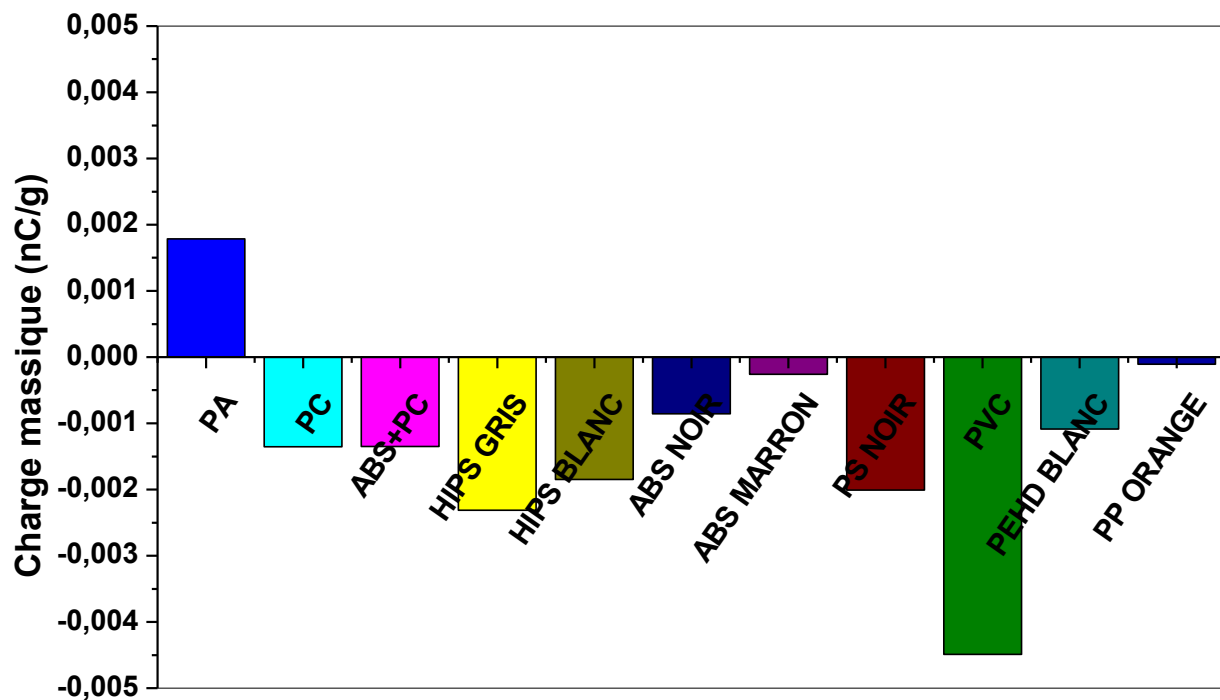


Figure III.7 Représentation graphique de la charge massique des onze particules

La polarité des charges dépend de nombreux facteurs, on peut cependant établir des listes ou séries dites triboélectriques, auxquelles on prête la valeur d'indice : plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée.

Cette série nous a aidés pour choisir les produits qui peuvent être séparés et aussi à savoir l'emplacement de la paroi de ce tube.

On voit que :

- La charge acquise par le PP et l'ABS_{MARRON} est trop faible, presque nul ;
- La charge du PVC est importante.
- Le PA est le seul qui se charge positivement et les autres particules prennent des charges négatives.

c) Etude de séparation électrostatique

Le dispositif de charge triboélectrique est adapté au fonctionnement continu, en amont d'une installation de séparation électrostatique de mélanges de matériaux isolants.

Le mélange à séparer est introduit dans le dispositif de chargement qui passera directement dans la table vibrante. Cette table vibrante répartie et dépose uniformément les particules chargées sur une électrode cylindrique tournante reliée à la terre. Sa vitesse de rotation est comprise entre 35 tr.min^{-1} et 80 tr.min^{-1} . Une seconde électrode reliée à une source de haute tension de polarité réversible pouvant atteindre $\pm 35 \text{ kV}$, crée le champ électrique nécessaire à la séparation des particules.

Enfin, les particules séparées sont récupérées dans un collecteur composé de 4 compartiments (figure III.8). Un volet 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 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 [85].



Figure III.8 Séparateur électrostatique Prodecologia (vue du haut)

Les essais ont été réalisés avec trois types d'isolants **PA, PP, et PVC** (par ordre) (image III.9), et la masse du mélange granulaire est 60g comprenant 20g de chaque type de plastique.

Le taux d'humidité HR pendant l'étude expérimentale était $H=61,7\%$ et la température $T=18,2^\circ$.

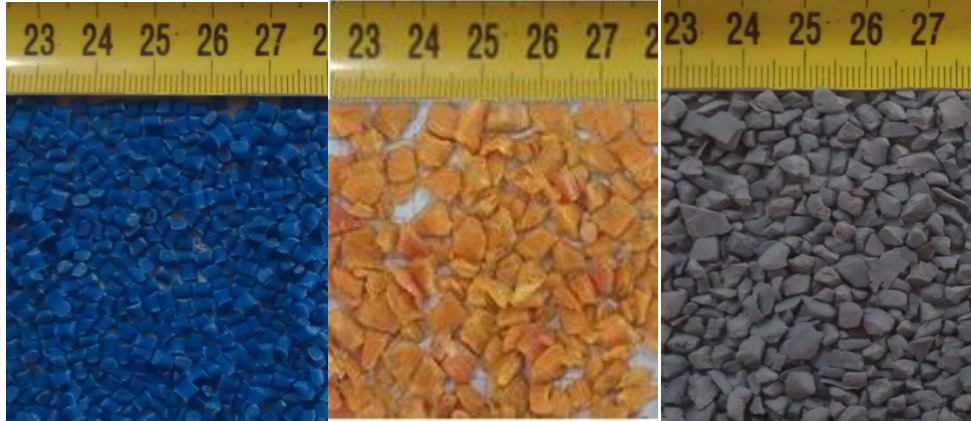
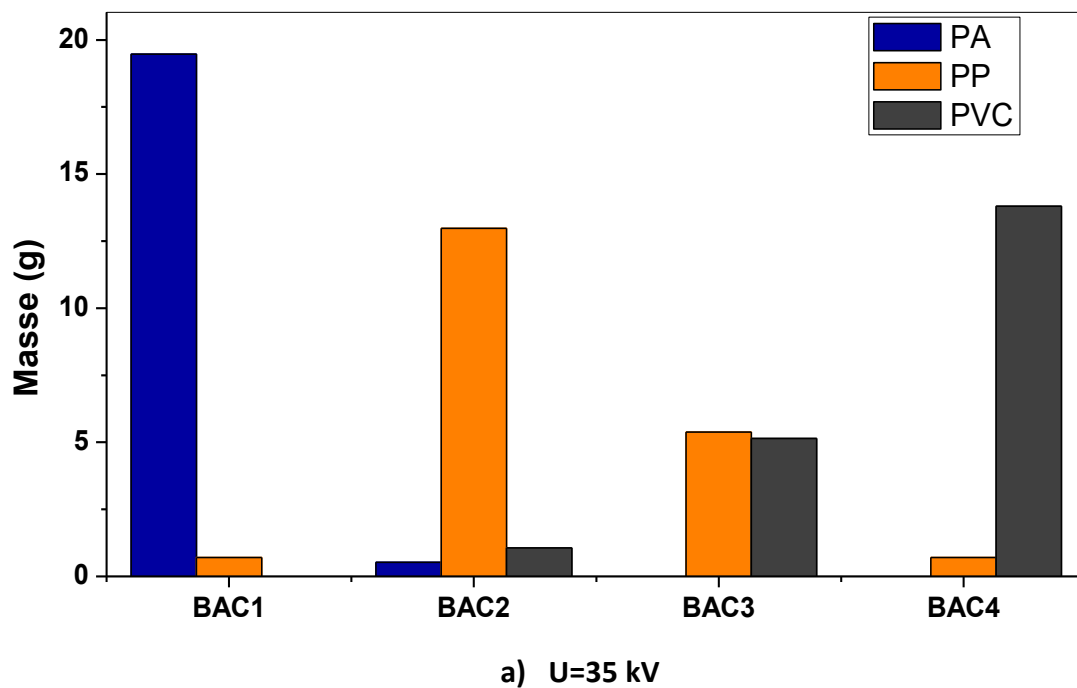
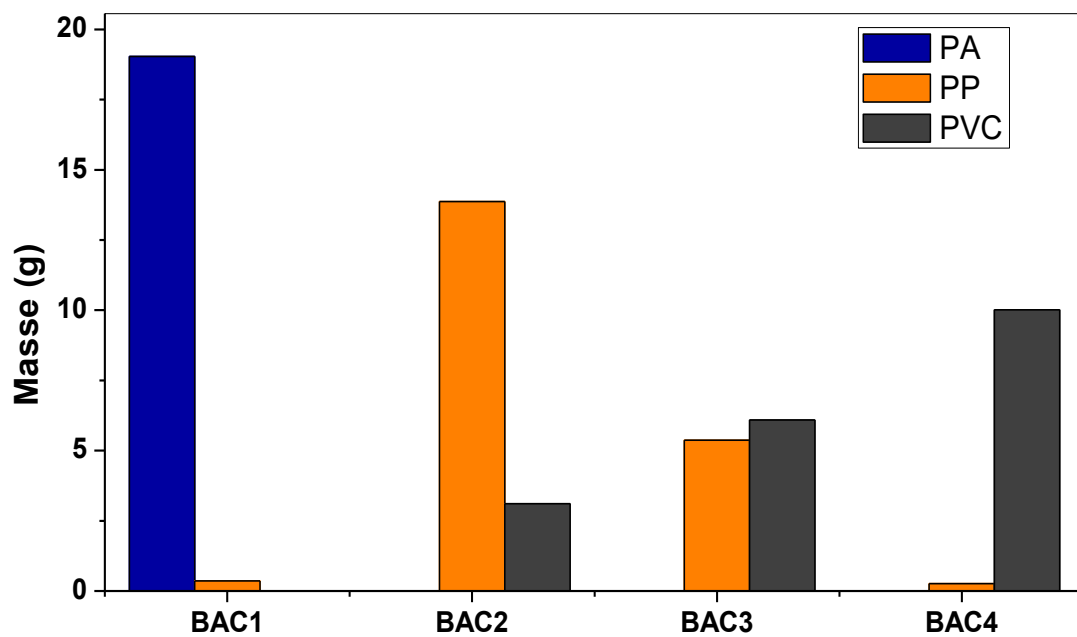


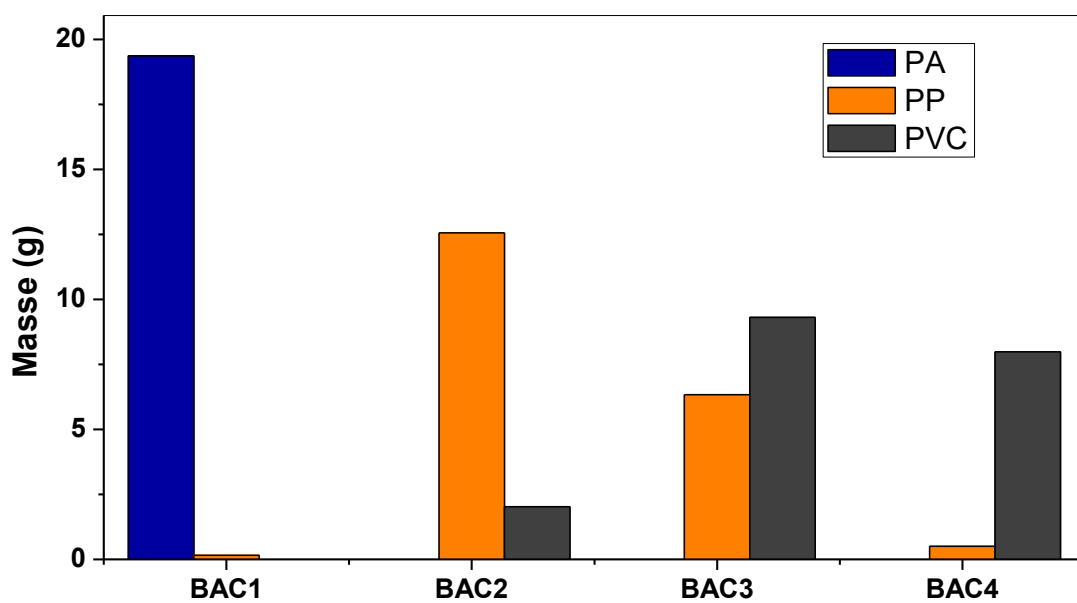
Figure III.9 Echantillon des granules utilisés

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. Les résultats obtenus sont représentés par des histogrammes à la figure III.10.





b) U=30 kV



c) U=25 kV

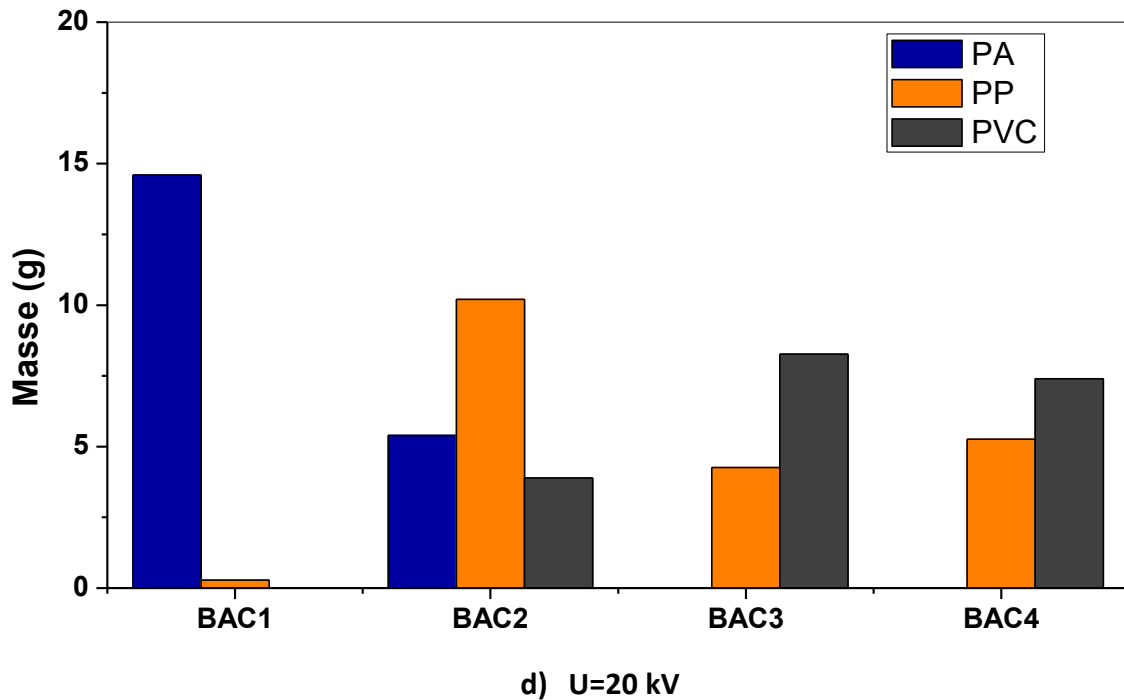


Figure III.10 Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PA-PP et PVC)

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 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 HT. Leurs trajectoires vont donc se modifier et elles vont atterrir dans le bac numéro 1. Et les particules moins chargées vont tomber en chute libre en bac numéro 2 ou en bac 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 4.

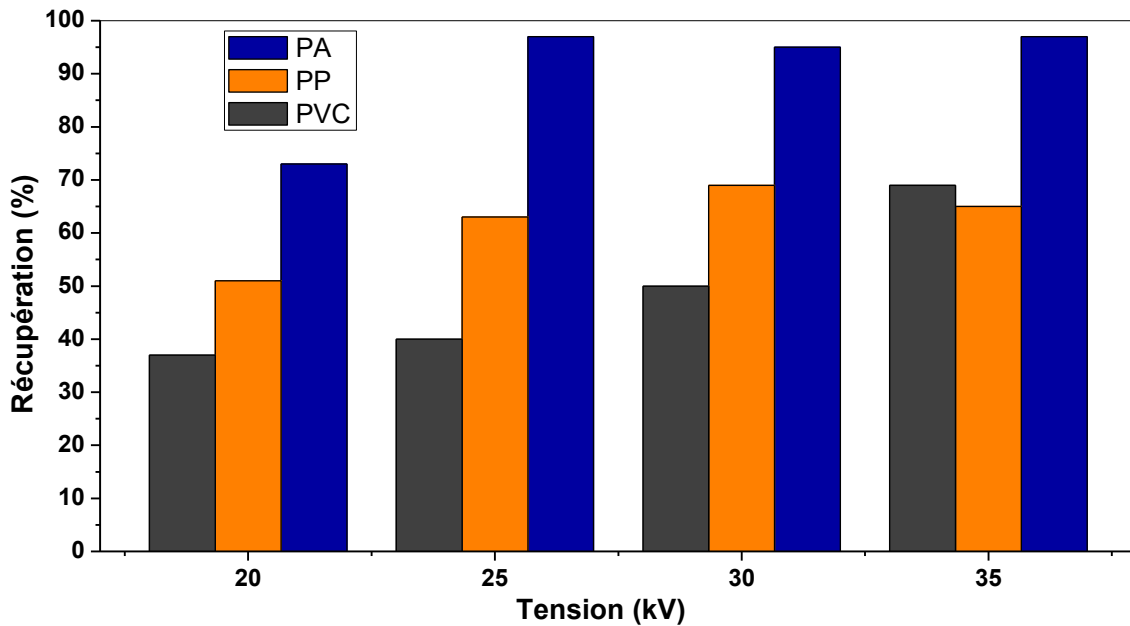


Figure III.11 La récupération de chaque plastique en fonction de la tension

D'après les figure III.10 et la figure III.11, On voit que :

- ✓ la séparation du produit ternaire est possible avec le séparateur électrostatique à tambour Prodecologia ;
- ✓ Plus on augmente la tension plus le mixte diminue ;
- ✓ La récupération du PVC est proportionnelle avec la tension et de même pour le PP sauf que pour la tension 30 kV la récupération augmente à 69% ;
- ✓ Le taux de récupération du PA est envers 97% pour toutes les valeurs de la tension à l'exclusion de 20 kV ou la valeur de récupération décroît à 71% ;

Puisque on a arrivé à séparer le PA presque à 100% et avec une bonne pureté, on a décidé d'entamer une deuxième séparation pour le produit binaire (PVC et PP) pour augmenter le rendement de récupération.

La deuxième séparation est effectuée avec les séparateurs : tribo-Aéro-électrostatique à bandes transporteuses et le séparateur tribo-électrostatique à chute libre.

III.2. Séparateur tribo-Aéro-électrostatique à bandes transporteuses

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique [86-88] breveté par Calin et Dascalescu [89], a la particularité que ses électrodes sont deux convoyeurs métalliques liés à des générateurs de haute tension continue (figure III.12).

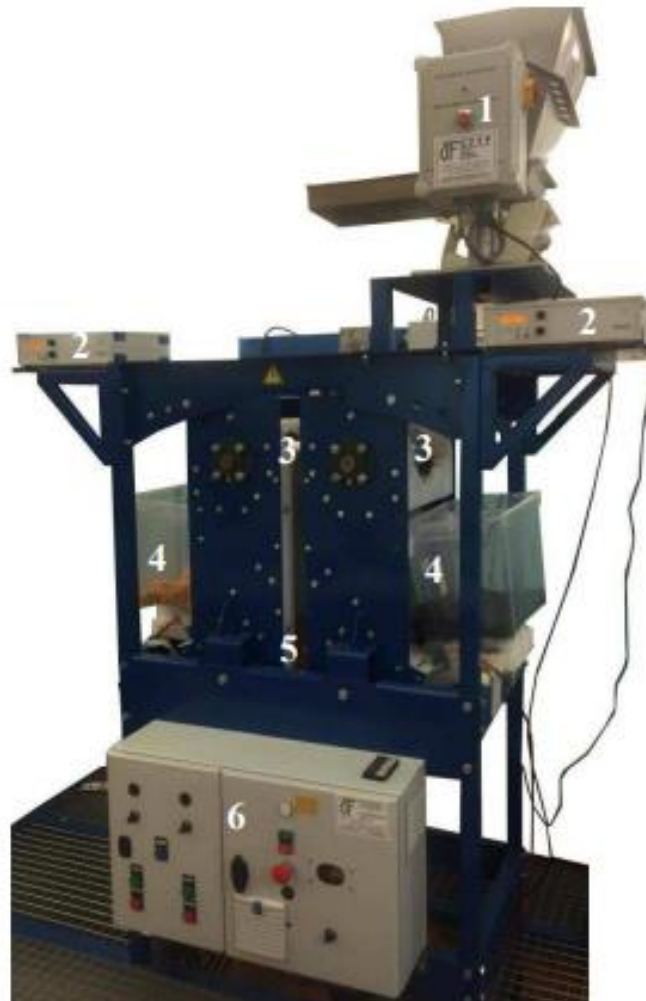


Figure III.12 Séparateur tribo-aéro- électrostatique pour le recyclage des DEEE ;

1 : Goulotte oscillante ; 2 : Alimentations en haute tension ; 3 : Convoyeurs-électrodes ; 4 : Collecteurs de granules ; 5 : Lit fluidisé ; 6 : Boîte électrique de commande.

Le dispositif est constitué de de deux parties (Figure III.13):

- ❖ La chambre d'air en plexiglas de 150x350x500 mm (largeur x longueur x hauteur) qui constitue le premier élément lié à la soufflante d'air.

Cette chambre ayant la forme d'un tronc de pyramide renversé assure la bonne diffusion et l'uniformisation de la quantité d'air injecté grâce à la présence de diffuseur présent à sa partie supérieure et assurant la jonction avec la seconde partie du dispositif.

- ❖ La chambre de fluidisation et de séparation dont deux parois sont en plexiglas et les deux autres constituent les bandes transporteuses du tapis roulant, ils sont à base d'une matière conductrice (Inox) de 0.2 mm d'épaisseur et de 40 cm de largeur, soumises à des hautes tensions continues de polarités inversées.

Les deux bandes conductrices s'appuient une structure et des tambours isolants en PVC, leur entrainement est assuré par des moteurs triphasés alternatifs de 90 W, commandés par des variateurs de fréquence.

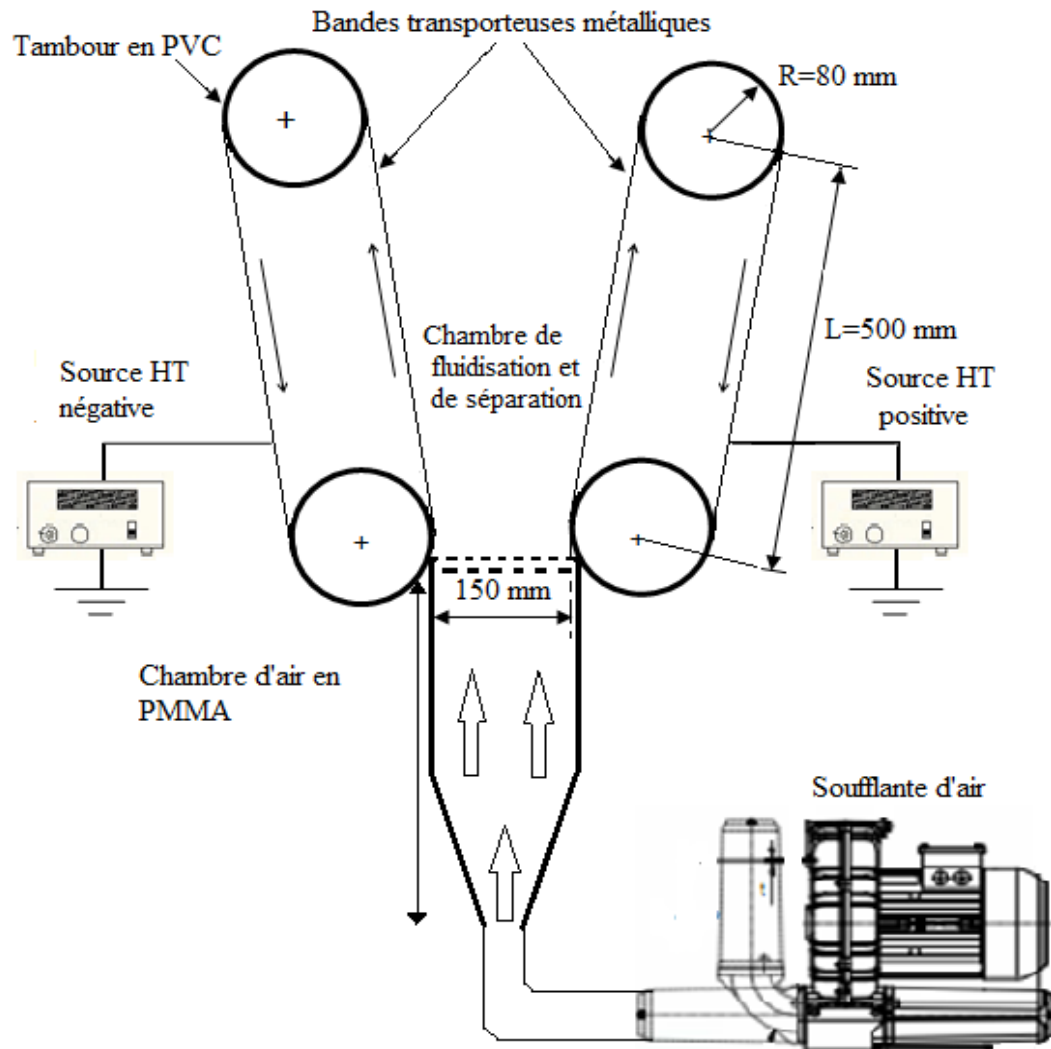


Figure III.13 Représentation schématique du séparateur à bandes transporteuses conductrices

Soumises à l'action de la pesanteur et des forces aérauliques, le mélange granulaire admis dans la chambre de séparation forme un lit fluidisé. Le débit de l'air de fluidisation est ajusté par un régulateur de pression à une valeur assurant le fonctionnement du lit fluidisé en régime d'ébullition, favorisant ainsi les impacts entre les granules et leur électrisation par effet tribo-électrique. Chaque granule chargé positivement ou négativement se déplace sous l'action de la force de Coulomb dans le champ électrique horizontal créé entre deux électrodes de type tapis roulants conducteur, alimentées par deux générateurs de haute tension continue de polarité opposée ajustable. Soumises à l'action de la force d'image électrique, les

granules chargés adhèrent à la surface des électrodes et cette bande transporteuse permet leur évacuation (produits purs) vers les bacs de récupération à l'extérieur du procédé.

➤ Procédure expérimentale

Les expériences ont été réalisées sur deux types d'échantillons cités précédemment : PP et le PVC.

- ✓ La masse de mélange : $m=1000\text{g}$;
- ✓ La tension : $V= \pm 26\text{ kV}$;
- ✓ Le taux d'humidité HR et la température pendant l'étude expérimentale : $H=53,7\%$, $t=18,2^\circ$;

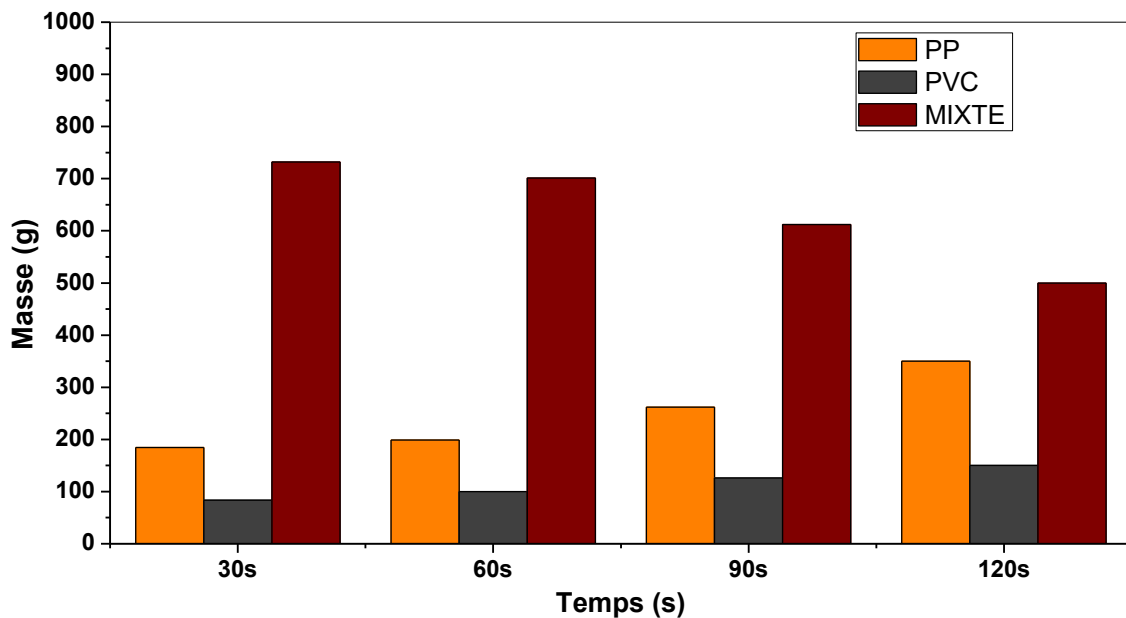


Figure III.14 Masses des produits purs récupérés (PP et PVC) en fonction de temps

Plus on augmente le débit d'air, plus l'intensité ainsi que le nombre de collision augmente. Atteignant un certain débit le lit fluidisé dépasse sa dernière phase ce qui diminue la charge.

Le mixte diminue en fonction de temps et la masse de PP et PVC accroissent ;

La récupération du PVC est moins bonne cela dû à son poids, puisqu'il est un peu plus lourds que le PP on a récupéré que 30% de sa masse.

III.3. Séparateur tribo-électrostatique 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 III.15), [87], [90-

94]. Les forces électrostatiques qui agissent sur les granules chargés les conduisent vers l'électrode de polarité opposée où ils sont collectés dans des bacs.

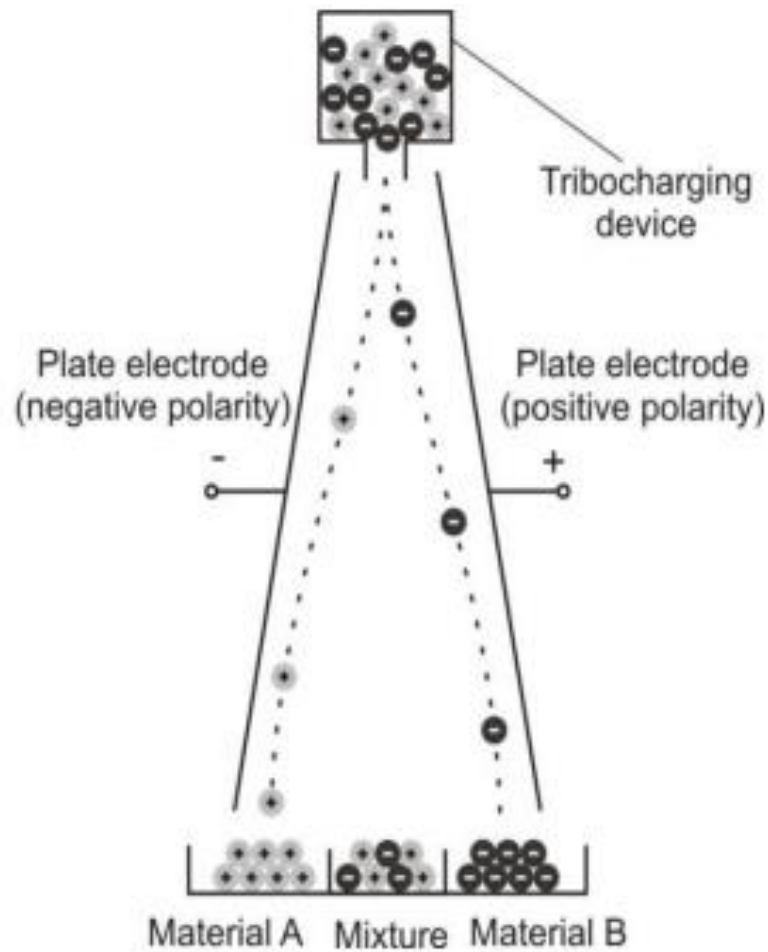


Figure III.15 Principe du séparateur tribo-électrostatique à chute libre

Les électrodes représentent la partie essentielle de ce dispositif (figure III.16). Cette partie se compose de deux plaques en plexiglas, d'une épaisseur de 3 mm et de dimension 1.28m × 0,75 m. recouverte d'une bande adhésive en aluminium de dimension 0.4m X 0.9m et positionnée à 10 cm du bord supérieur dans le sens de la longueur et centrée dans le sens de la largeur.



Figure III.16 Une photo du Séparateur tribo-électrostatique à chute libre

Les expériences ont été effectuées sur le PP et le PVC avec une tension de ± 38 kV et une masse de 1000g (500g chaque plastique).le taux de l'humidité était à 50% et la température à 17°.

La figure III.17 représente la masse des particules dans chaque compartiment avec les granules de PP et PVC en utilisant la méthode de chargement à lit fluidisé, et la figure III.18 est la récupération obtenue avec le séparateur à bandes transporteuses et le séparateur à chute libre.

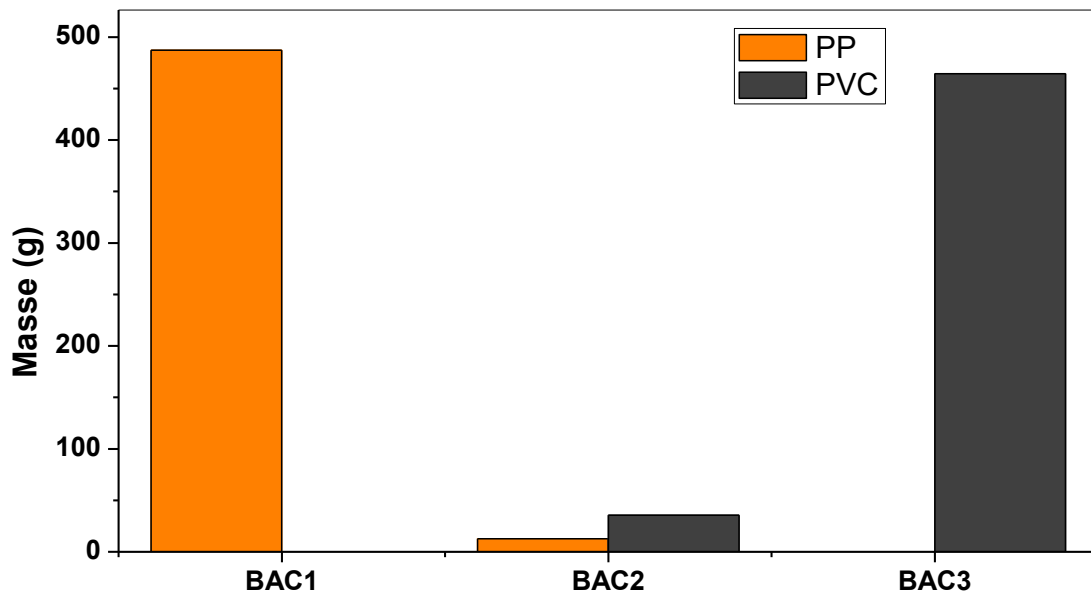


Figure III.17 Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec produit binaire (PP et PVC)

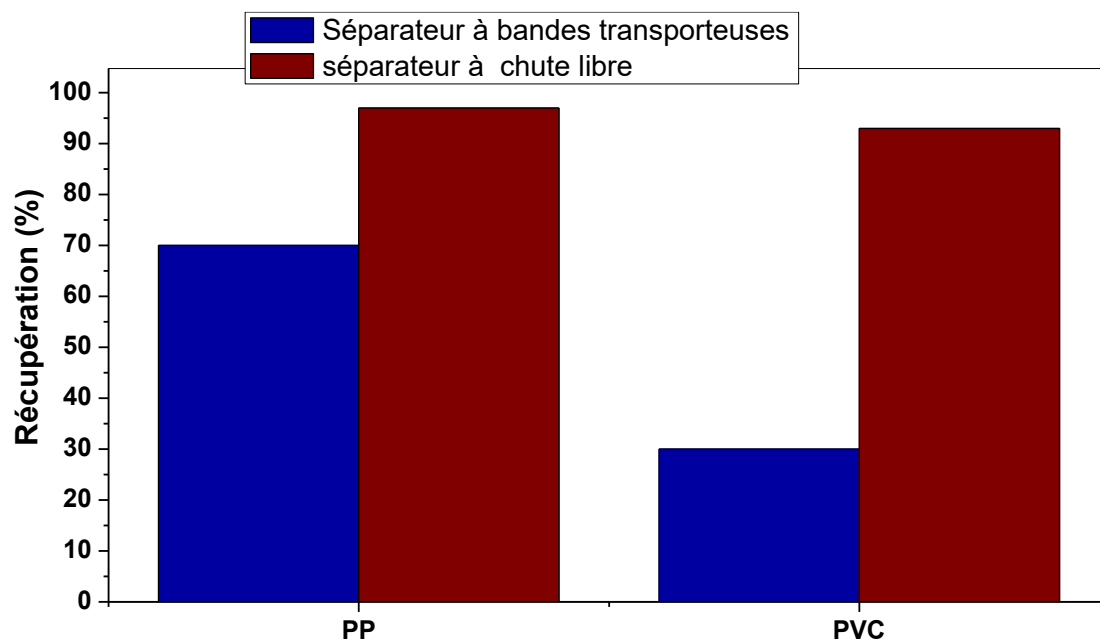


Figure III.18 La récupération de chaque plastique en utilisant le séparateur à bandes transporteuses et le séparateur à chute libre

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

- Avec le séparateur à chute libre on a récupéré 97% de PP et 93% de PVC ;
- Et avec le séparateur à deux bandes transporteuses on a récupéré 70% de PP et 30% de PVC.

Conclusion

Pour effectuer ces différentes séparations, 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.

Le séparateur électrostatique à tambour Prodecologia nous a permis de séparer un mélange ternaire, avec une récupération inférieure à 70% pour le PP et le PVC contrairement au PA, on a eu un bon rendement de récupération (97%).

L'introduction de la deuxième séparation est accompagnée d'une grande récupération surtout avec le séparateur tribo électrostatique à lit fluidisé.

La séparation des mélanges d'isolants sur le prototype PRD est prometteuse. Mais pour mieux contrôler le comportement des particules et augmenter le taux de chargement et de séparation d'autres méthodes et dispositifs seront décrits dans le chapitre suivant ou on entame la séparation de produits quaternaires avec le séparateur à tapis roulant.

CHAPITRE IV :
SEPARATION TRIBO-
ELECTROSTATIQUE D'UN
MELANGE QUATERNAIRE DE
PLASTIQUES

CHAPITRE IV : SEPARATION TRIBO-ELECTROSTATIQUE D'UN MELANGE QUATERNAIRE DE PLASTIQUES

Les déchets d'équipements informatiques sont composés d'une grande diversité de matériaux plastiques dont le recyclage nécessite la recherche et le développement de nouvelles technologies de séparation physique.

La séparation électrostatique est un terme générique donné à une importante classe de technologies de traitement de matériel, largement utilisé pour le triage des mélange granulaires grâce à des forces électriques agissant sur des particules chargées ou polarisées .

L'avantage d'un séparateur électrostatique à tapis roulant par rapport aux autres installations se démarque par le fait qu'il conduit les particules vers la zone de la séparation avec une faible vitesse, ce critère augmente l'influence de la force électrique sur la trajectoire de la particule.

Le résultat de tout processus de séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules.

Ce chapitre se subdivise en deux parties, la première partie est consacrée aux résultats de séparation électrostatique avec le dispositifs de chargement à tube et la deuxième partie aux résultats avec le dispositifs à lit fluidisé dont une comparaison est faites entre les deux pour voir la faisabilité de chaque dispositifs à séparer un produit quaternaire.

IV.1. Séparateur a tapis roulant

IV.1.1. Description du séparateur à tapis roulant

Ce type de séparateur est destiné exclusivement à séparer les particules de plastique préalablement chargées, dont le principe repose sur l'utilisation d'une bande transporteuse isolante. L'installation contient deux éléments principaux : le tapis roulant (bande transporteuse) et l'électrode elliptique, qui sont reliés à un même support métallique (relié à la terre). La bande a une longueur de 830 mm et une largeur de 110 mm [84].

La récupération des produits est assurée par seize bacs dont la longueur est de 26 cm et la largeur 5 cm (**Figure IV.1**).

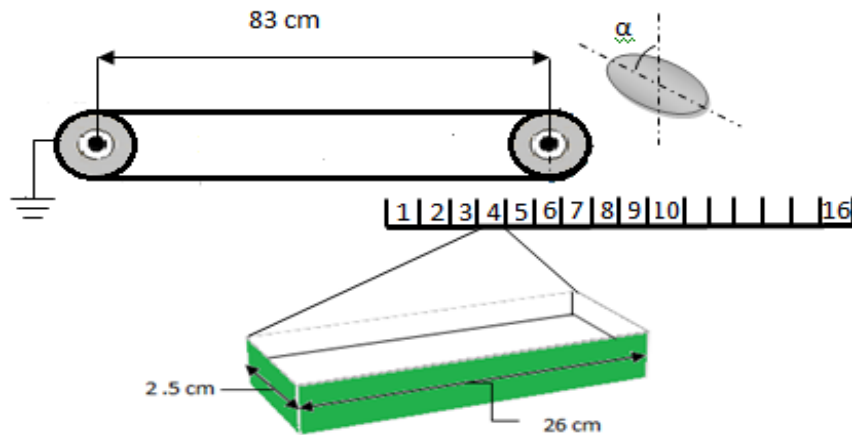


Figure IV.1 Vue synoptique du séparateur à tapis roulant

Les dimensions de l'électrode elliptique sont :

- ✓ Les rayons : 13,6 cm et 6,5 cm
- ✓ La largeur 12,3 cm

L'électrode est soumise à une haute tension positive réglable (**Figure IV.2**).

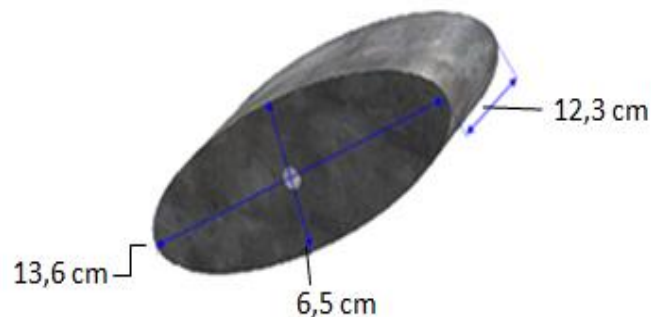


Figure IV.2 Electrode statique de forme elliptique

IV.1.2. Principe de fonctionnement de la séparation triboélectrique

Le séparateur TBS (*Tribocharged Belt Separator*) à tapis roulant est particulièrement adapté à la séparation des particules de plastique.

Le schéma de la figure explique le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant. Les particules chargées par triboélectricité tombent sur un tapis roulant et sont transportées vers la région de séparation.

Une électrode haute tension attire les particules d'une polarité et repousse les particules de polarité opposée permettant ainsi la séparation [95].

Ce dispositif a été optimisé pour la séparation de différents matériaux granulaires isolants (Figure IV.3) [78].

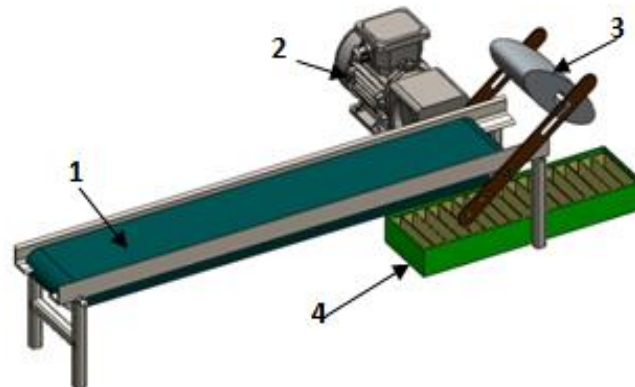


Figure IV.3 Représentation de séparateur à tapis roulant avec SolidWorks [84]

1. Convoyeur ; 2. Moteur ; 3. Electrode HT ; 4. Collecteur

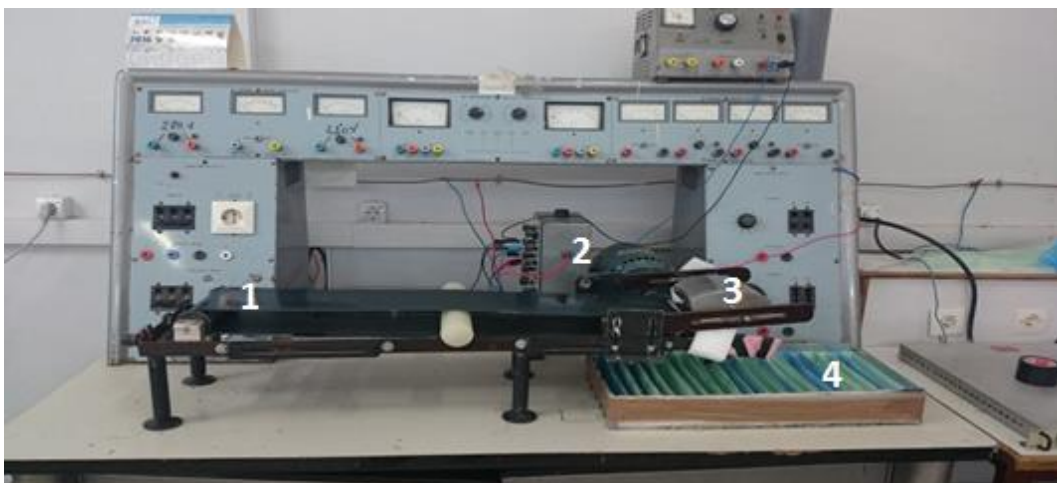


Figure IV.4 Séparateur triboélectrique à tapis roulant (prototype laboratoire)

IV.2. Séparation des mélanges quaternaires

IV.2.1. Résultats de séparation électrostatique à tube

a) Analyses des trajectoires des produits purs

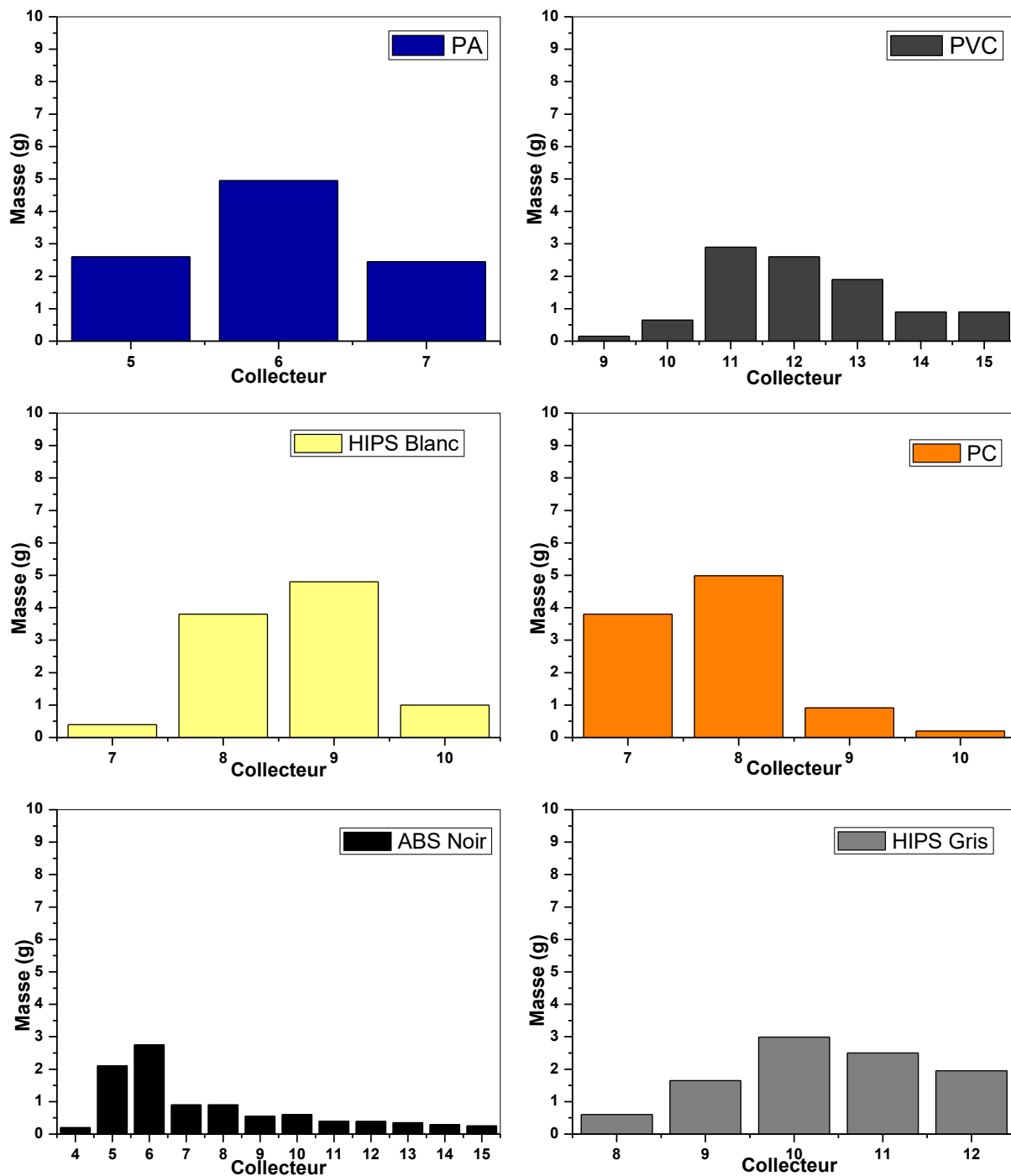
Les expériences préliminaires ont été effectuées avec des produits purs d'un seul matériau, afin d'étudier les trajectoires des particules.

Les histogrammes ci-dessous représentent l'emplacement des produits récupérés dans le collecteur, en introduisant les particules dans des tubes inclinés.

Les particules sont introduites dans un tuyau en inox puis en aluminium, ensuite on les pose dans le convoyeur qui les mène vers une électrode elliptique qui attire ou repousse selon leur signe de chargement.

 Tube en Aluminium

Les figures ci-dessous montrent la trajectoire des 11 produits pure en utilisant le tube en Aluminium pour le chargement de ce dernier (**Figure IV.5**).



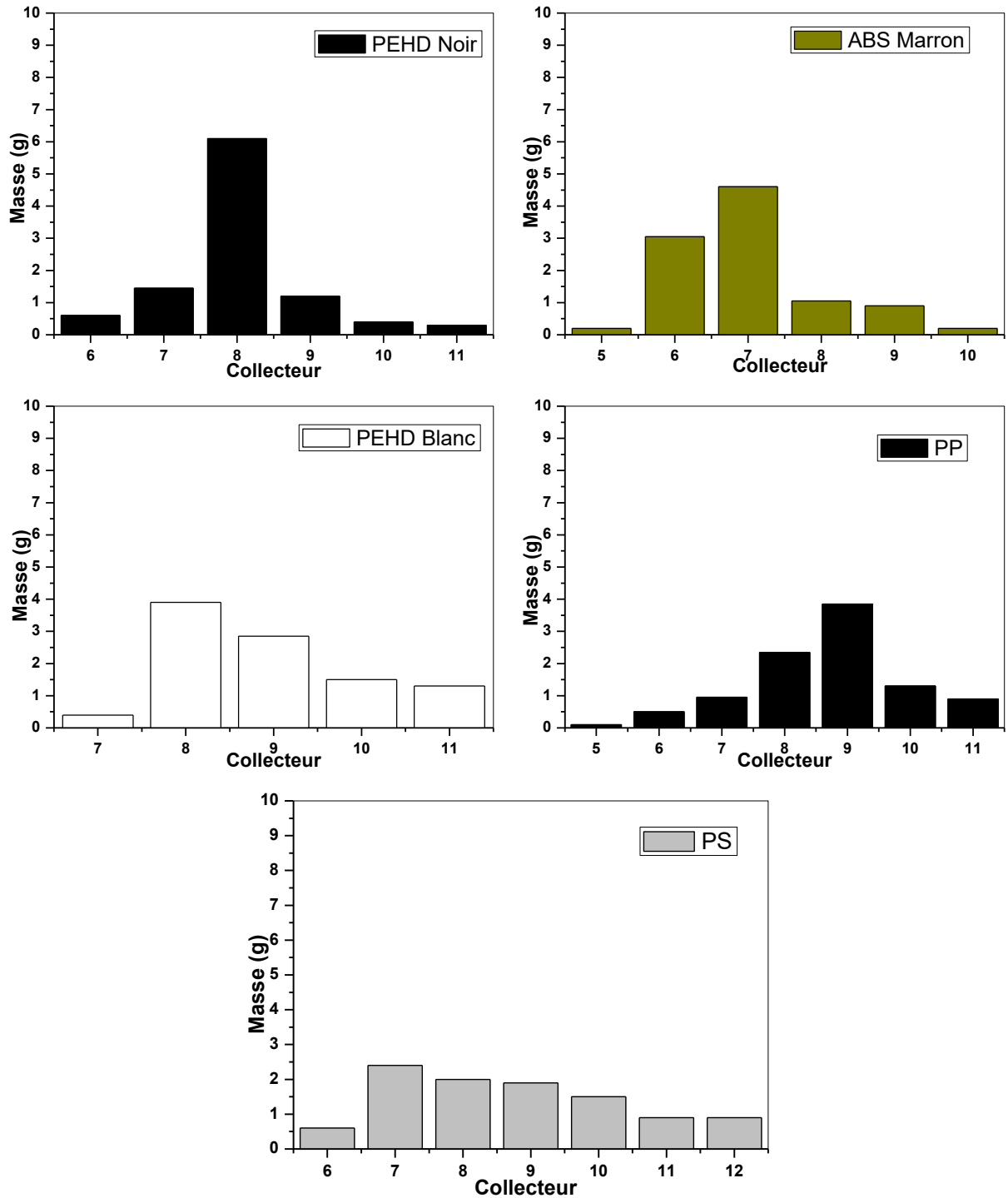
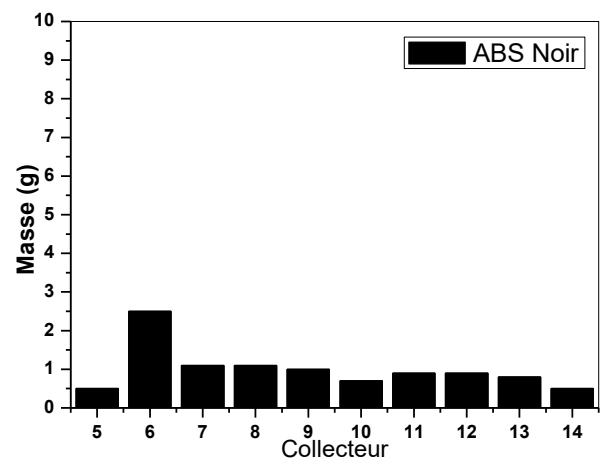
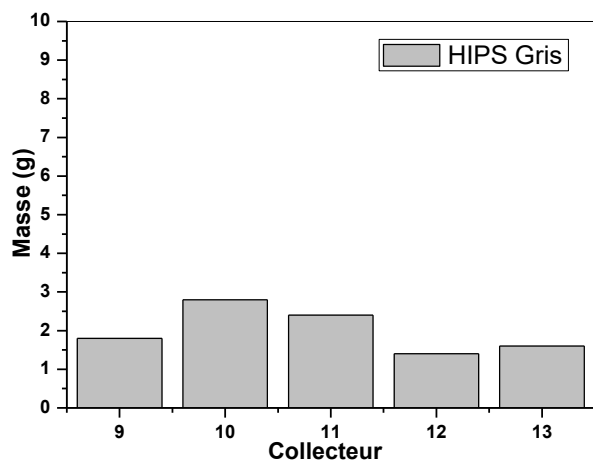
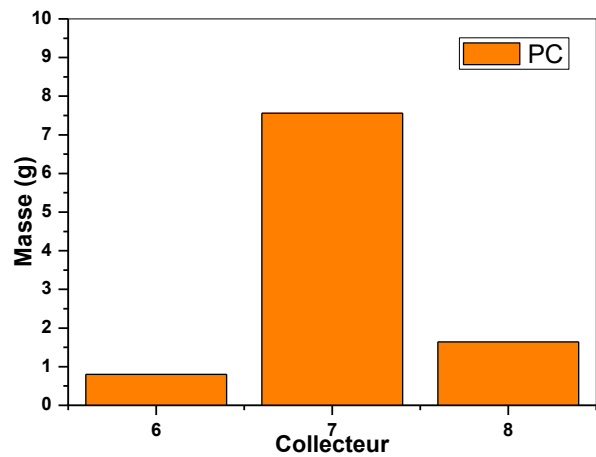
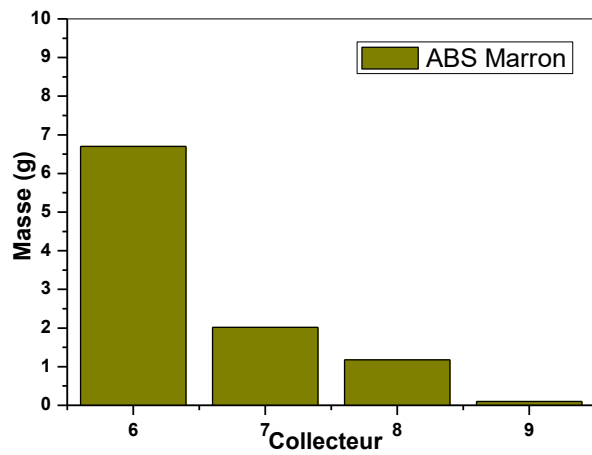
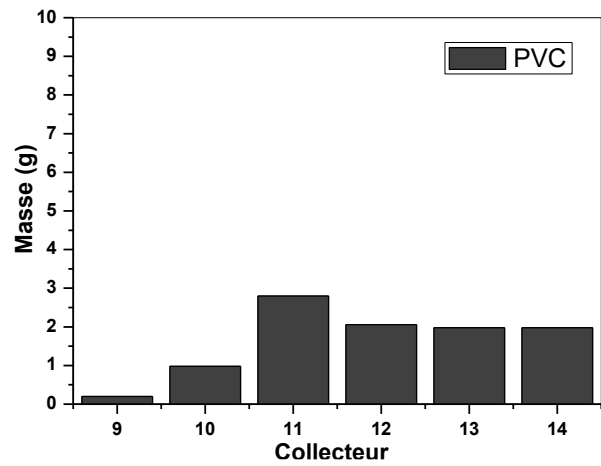
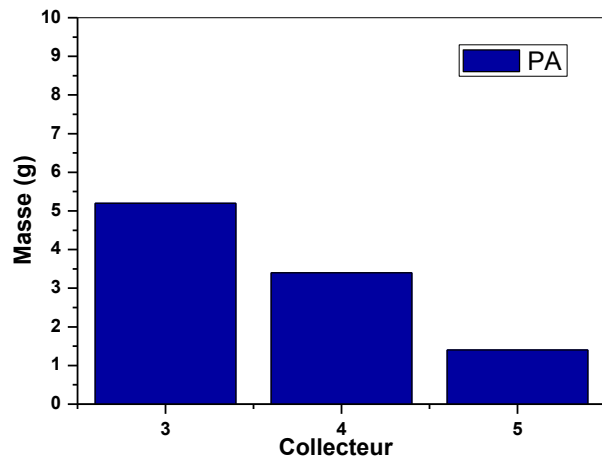


Figure IV.5 Trajectoires des particules obtenues après chargement avec le tube en Aluminium, pour onze différents types de plastique

Tube en INOX

La figure IV.6 représente la trajectoire des onze particules en utilisant le tube en INOX.



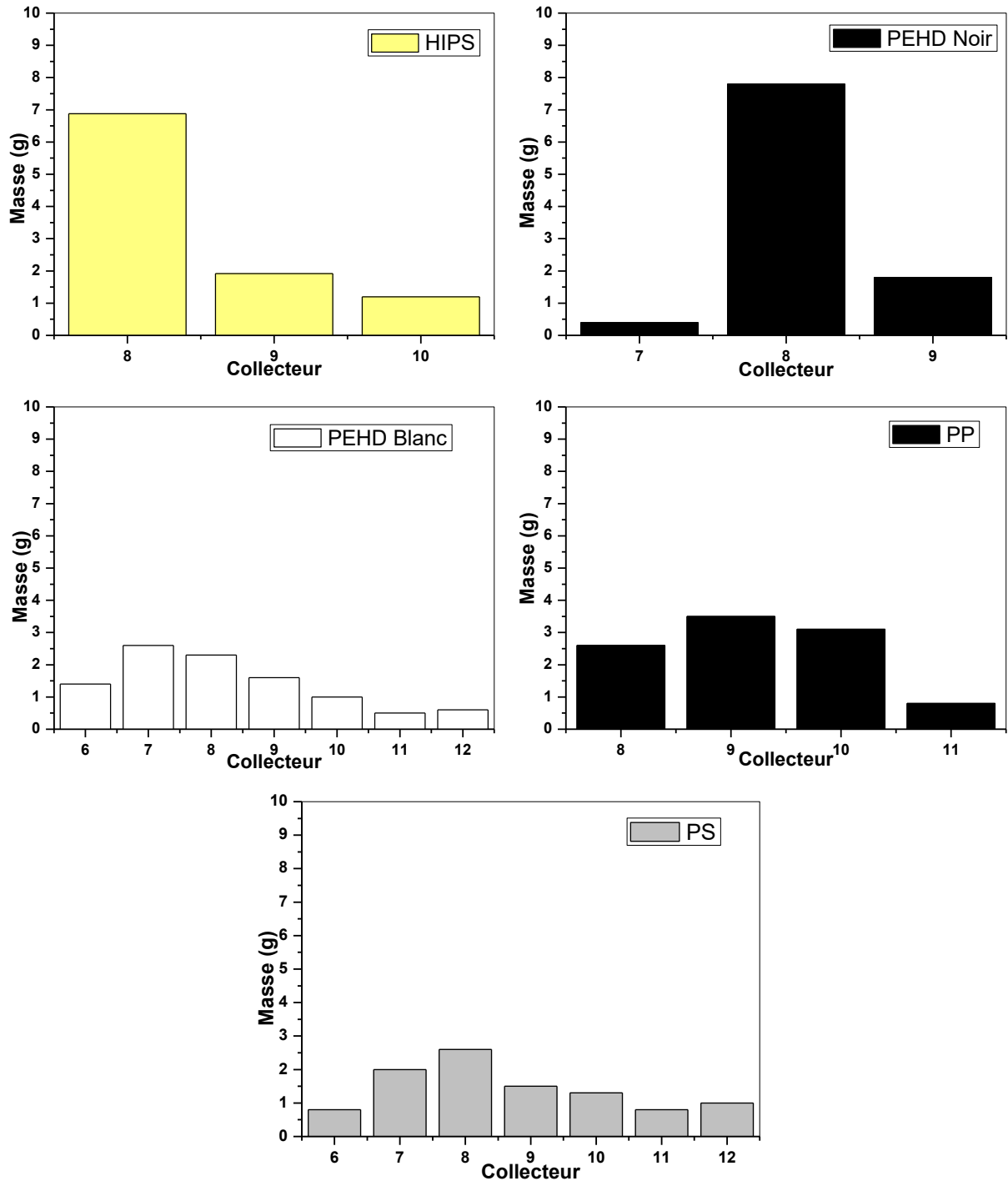


Figure IV.6 Trajectoires des particules obtenues après chargement avec le tube en Inox pour onze différents types de plastique

Les résultats obtenus dans les **Figures IV.5 et IV.6** montrent que :

- ✓ chaque type de plastique a un emplacement différent dans les compartiments, cela dépend de sa taille, sa masse, sa charge et la haute tension appliquée ainsi que la nature du tube (INOX, ALUMINIUM).

- ✓ Dans ce type de chargement, l'acquisition de charge s'obtient plutôt par glissement entre « particule-parois » au lieu des collisions « particule-particule ».
- ✓ Ces résultats montrent aussi qu'on peut identifier les produits qui peuvent se séparer et ceux qui ne peuvent pas être séparés.

b) Résultats de séparation des mélanges quaternaires

Dans un premier temps, on va procéder aux tests de séparation de deux échantillons des mélanges granulaires comportant quatre types de particules (**PA-PC-HIPS_B-PVC**) et (**PA-ABS_{Marron}-PEHD_{Noir}-HIPS_{Gris}**) avec le séparateur à tapis roulant. On mesure après le processus de séparation la masse récupérée dans chaque collecteur. On garde les mêmes conditions pour toutes les expériences :

- Masse du mélange granulaire 40 g comprenant 10 g de chaque type de plastique.
- Vitesse du tapis roulant : $v = 50$ m/s.

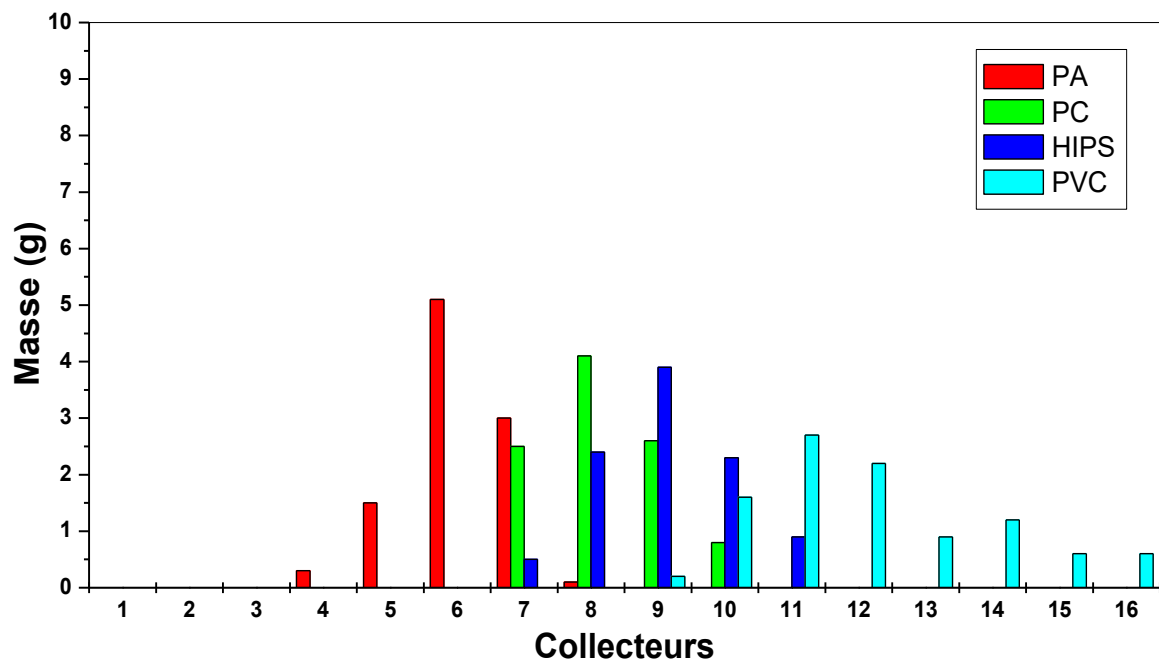
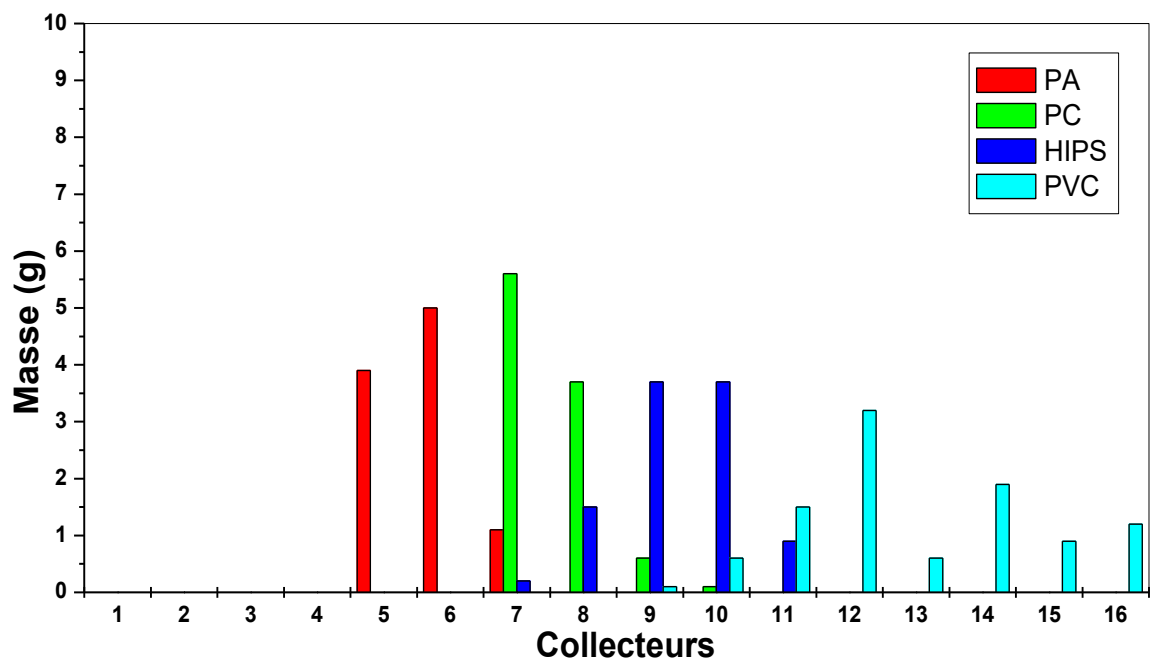
Après avoir séparé le produit granulaire, la masse des granules récupérés dans les compartiments, a été mesurée en utilisant une balance électronique avec une résolution de 0,01 g.

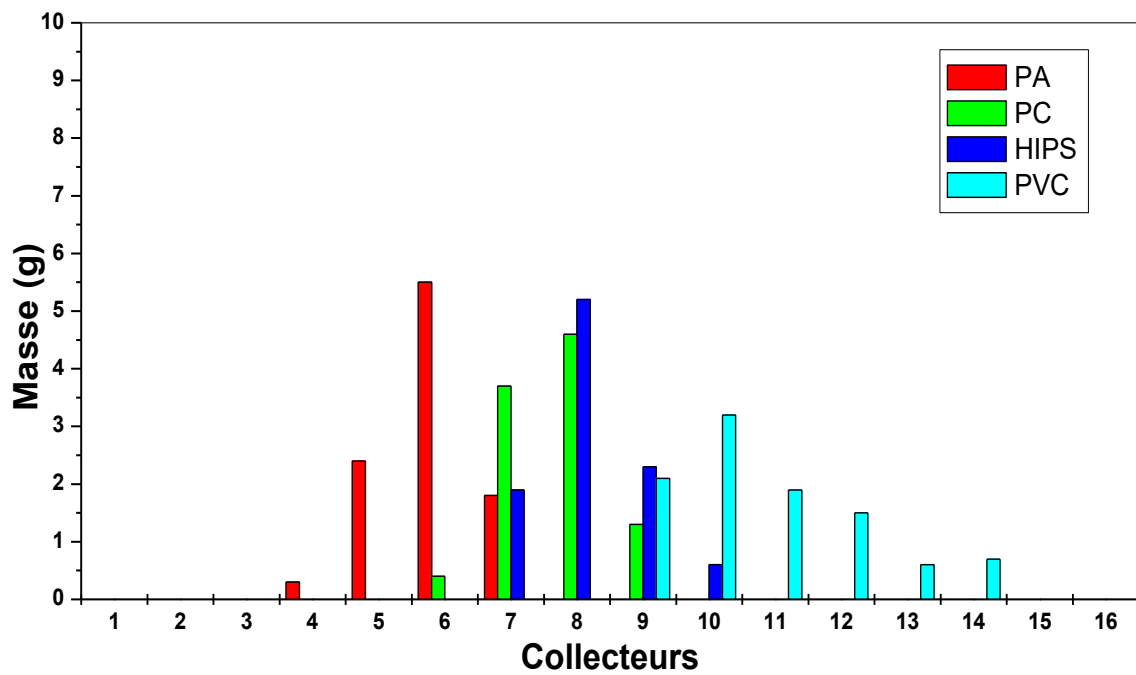
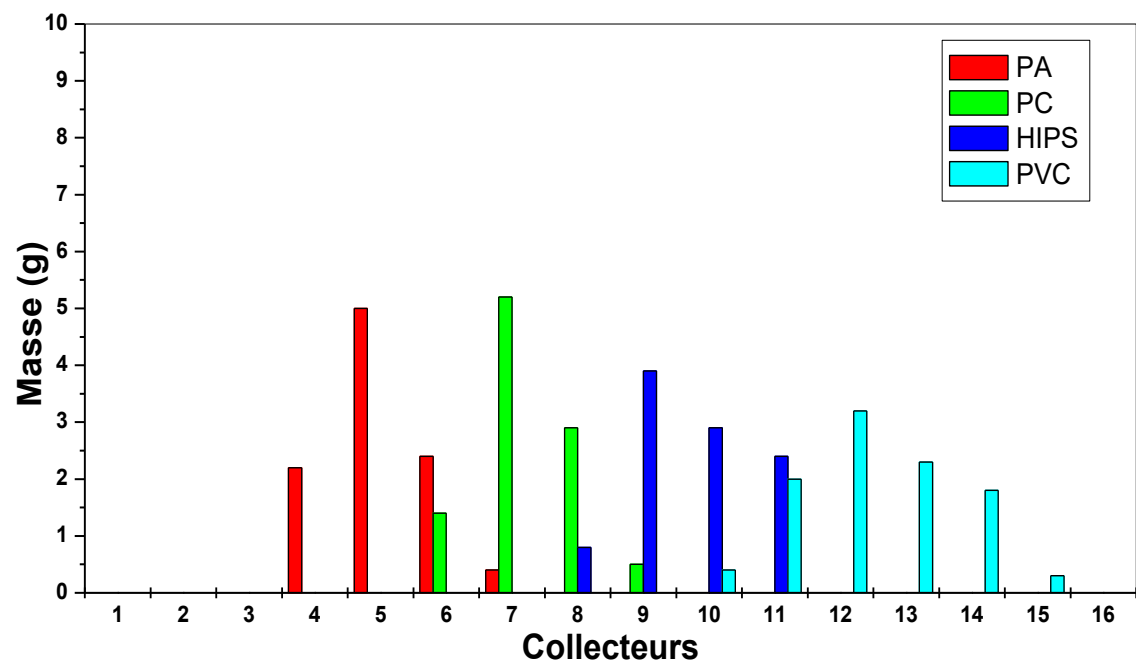
Echantillon # 1

Les essais ont été réalisés avec l'Echantillon# 1 comprenant quatre types d'isolants (**PA, PC, HIPS_{Blanc} et PVC**), en passant n fois le même échantillon dans le tube pour le chargement triboélectrique.

- Les paramètres de contrôle sont :
 - ✓ Nombre de passage durant chaque expérience [n] ;
 - ✓ Tension [kV] ;
 - ✓ Matière des parois (aluminium, inox).
- Le taux d'humidité HR pendant l'étude expérimentale était de l'ordre de 52 % à 57 %.

Les résultats obtenus sont représentés par des histogrammes à la **Figure IV.7** avec le tube en aluminium et à la **Figure IV.8** en utilisant le tube en Inox.

a) $n = 2$; $U = 35$ kVb) $n = 8$; $U = 35$ kV

a) $n=2$; $U=30$ kVb) $n=8$; $U=30$ kV

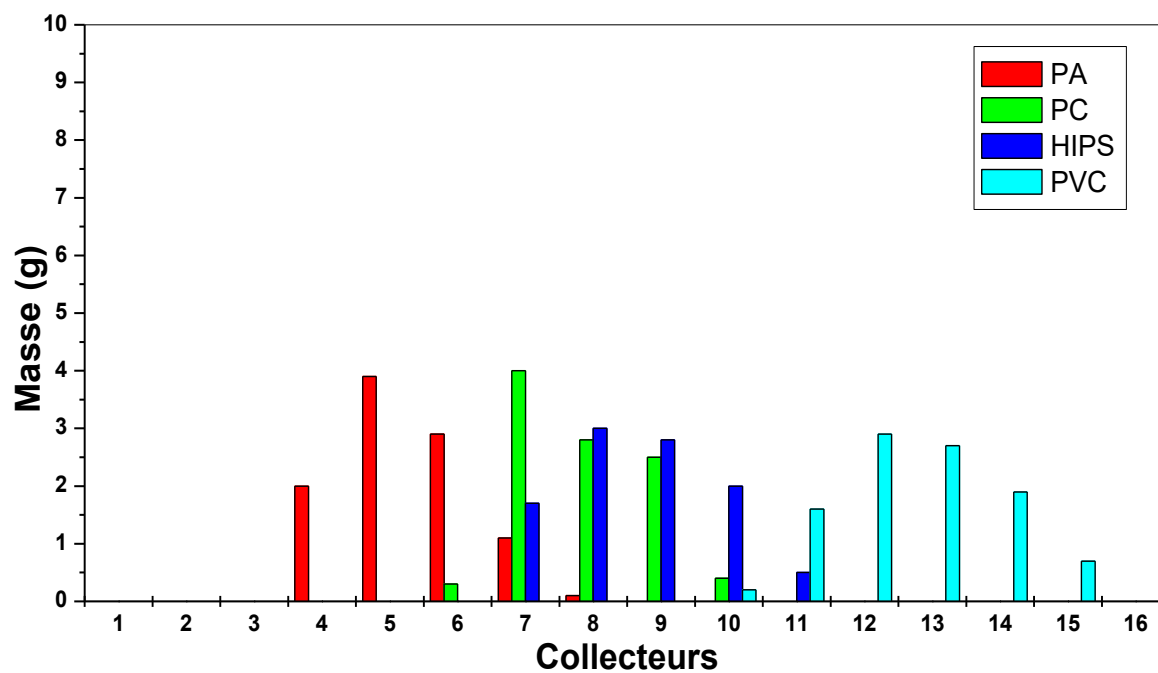
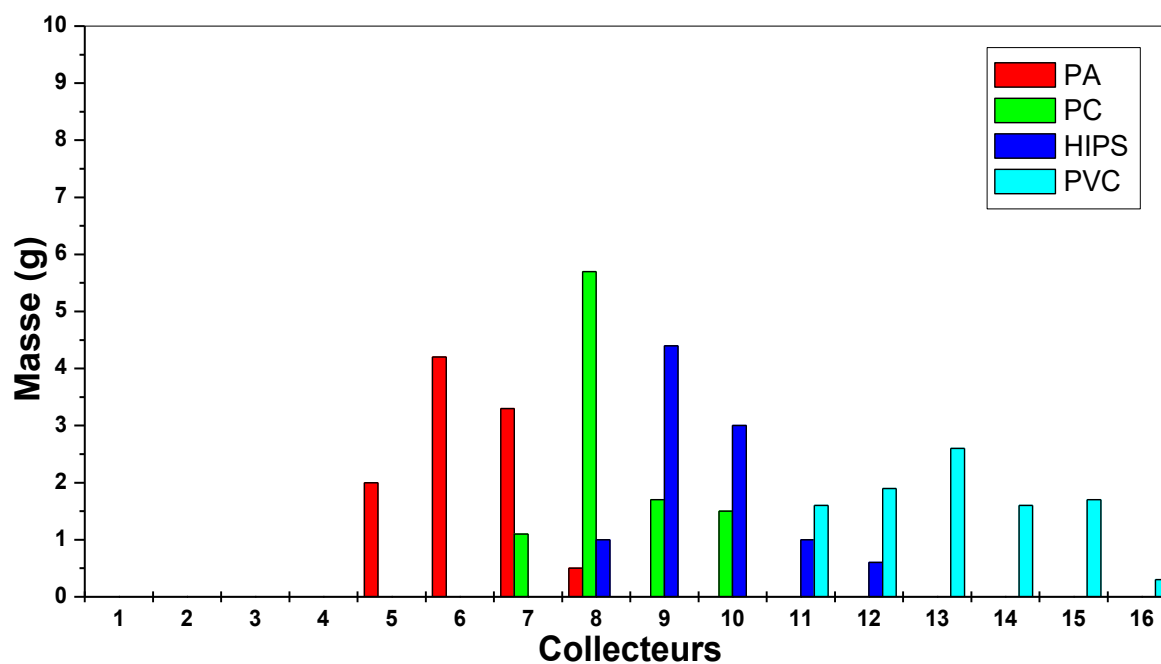
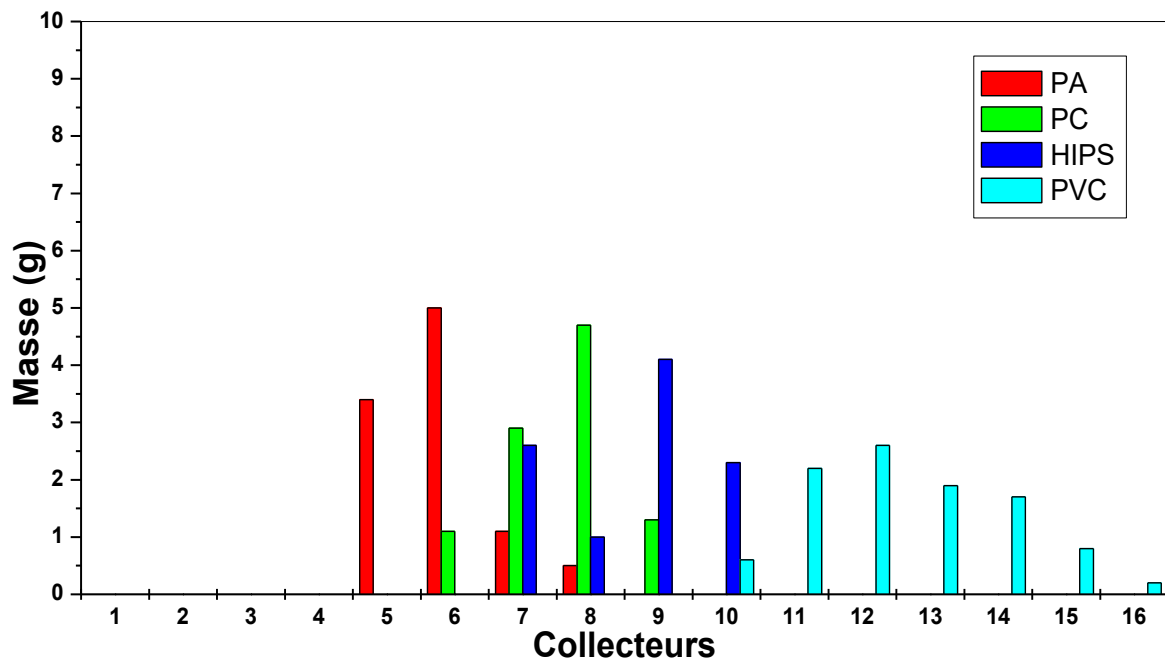
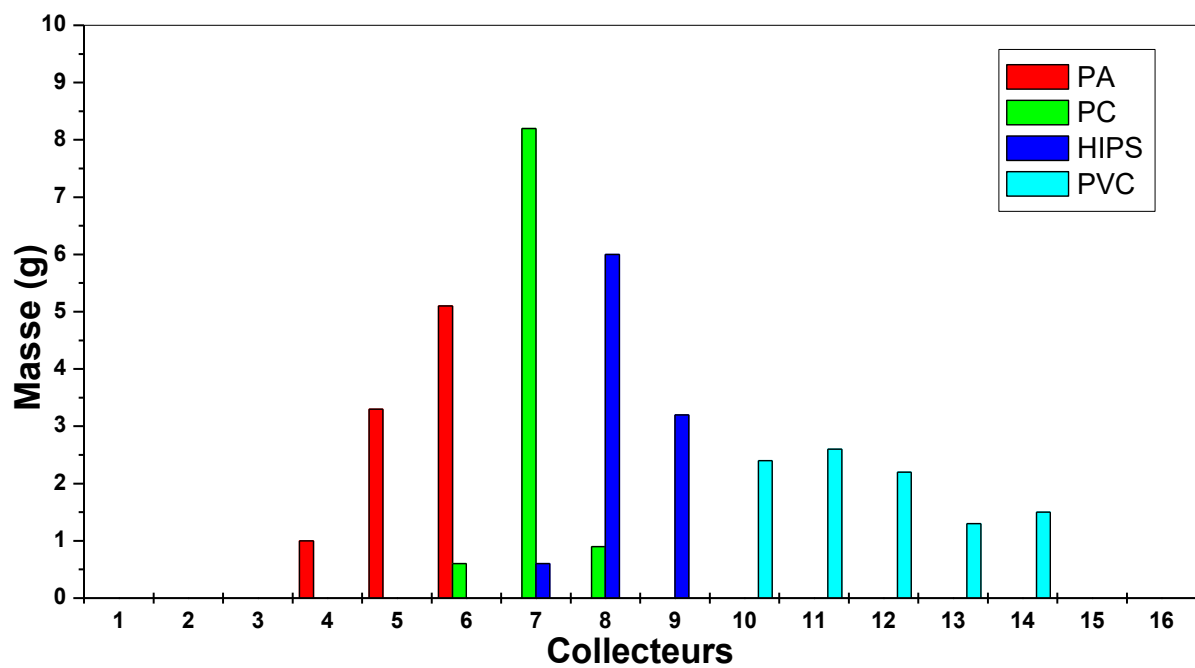
a) $n=2$; $U=25$ kVb) $n=8$; $U=25$ kV

Figure IV.7 Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon # 1(PA-PC-HIPS Blanc-PVC) en utilisant le tube en aluminium

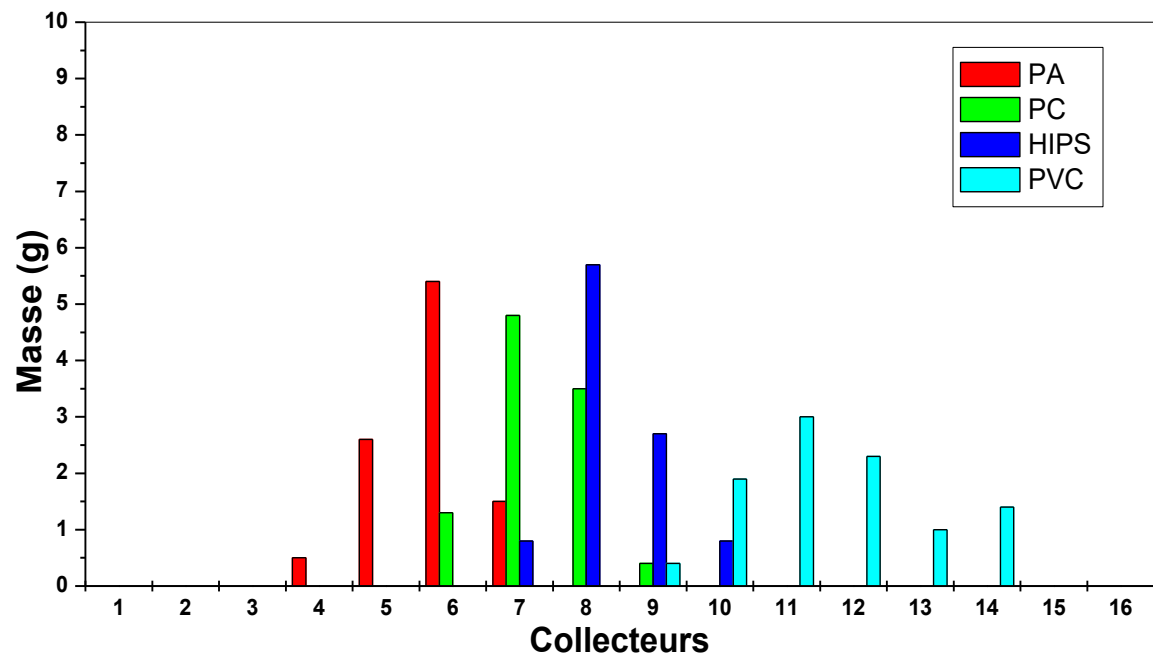
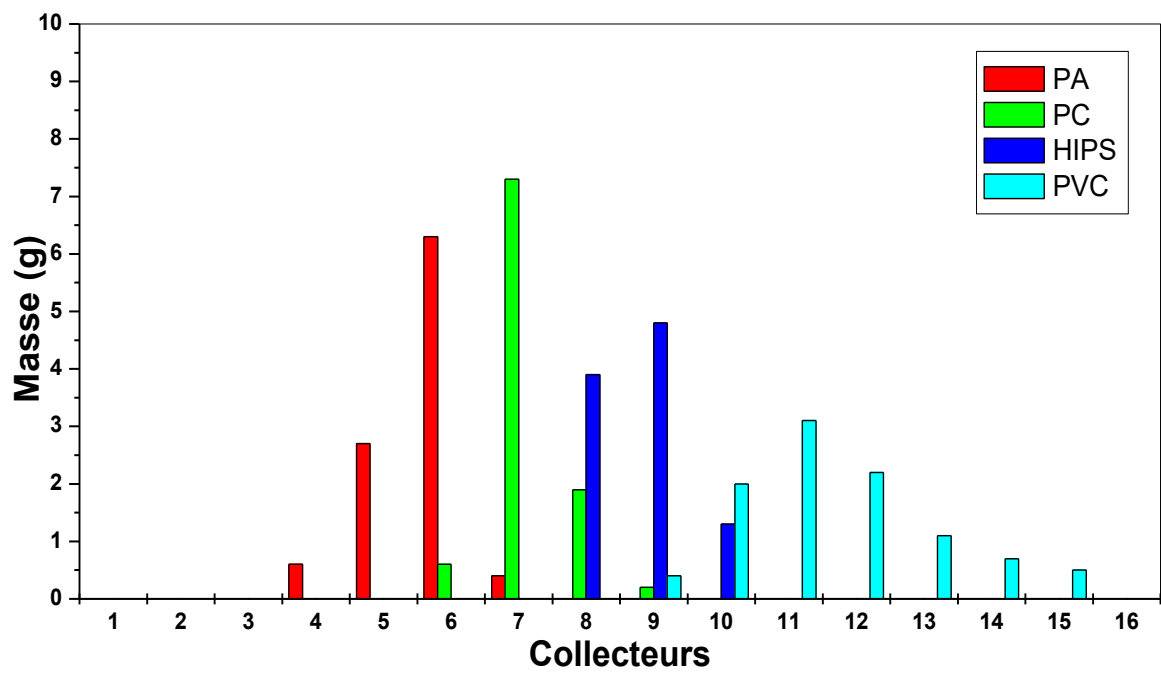
 Tube en INOX



a) n= 2 ; U=35 kV



b) n= 8 ; U= 35 kV

a) $n=2$; $U=30$ kVb) $n=8$; $U=30$ kV

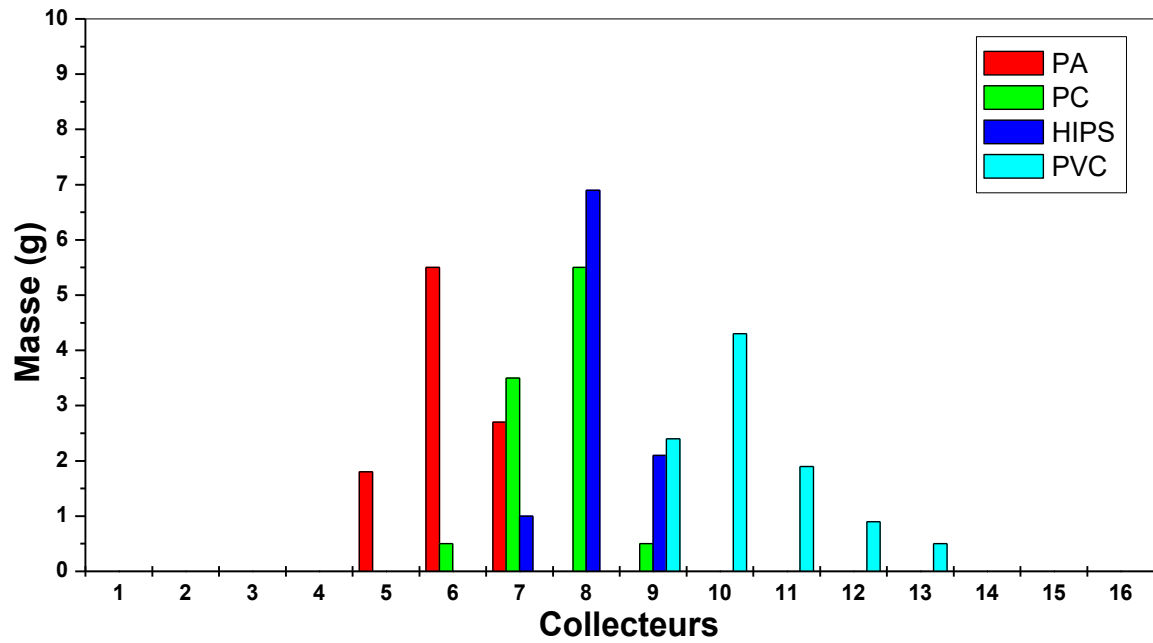
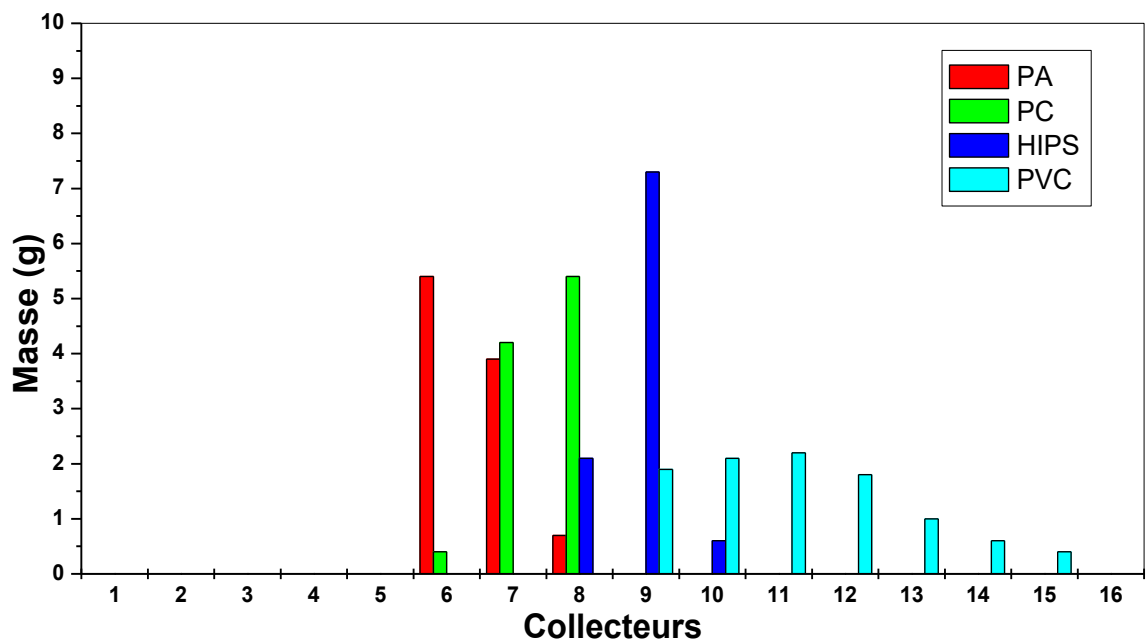
a) $n = 2$; $U = 25$ kVb) $n = 8$; $U = 25$ kV

Figure IV.8 Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon # 1(PA-PC-HIPS Blanc-PVC) en utilisant le tube en Inox

On constate que la tension est influente pour les deux tubes (INOX, ALUMINIUM), et pour 35 kV et un nombre de passage égale à 8 on obtient une bonne séparation contrairement au nombre de passage qui égale à 2.

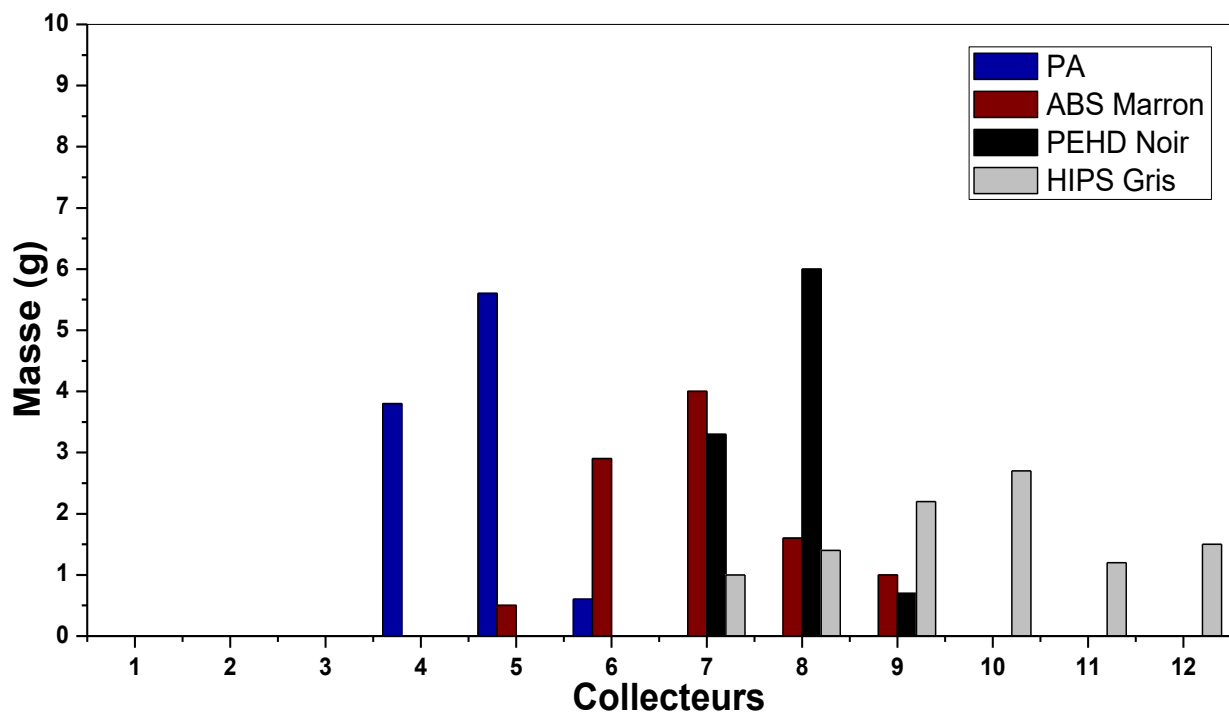
Echantillon # 2

Les essais ont été réalisés avec l'échantillon # 2 comprenant quatre types d'isolants (**PA**, **ABS_{Marron}**, **PEHD_{Noir}**, **HIPS_{Gris}**), en passant « n » fois le même échantillon dans le tube pour le chargement triboélectrique.

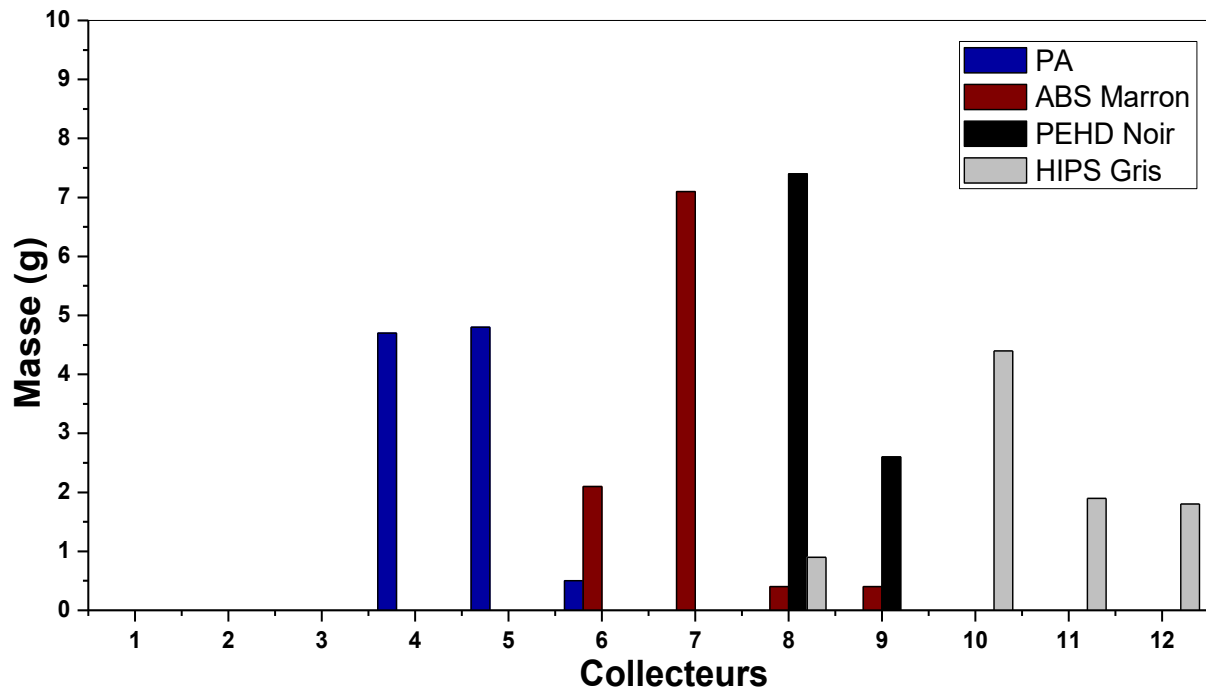
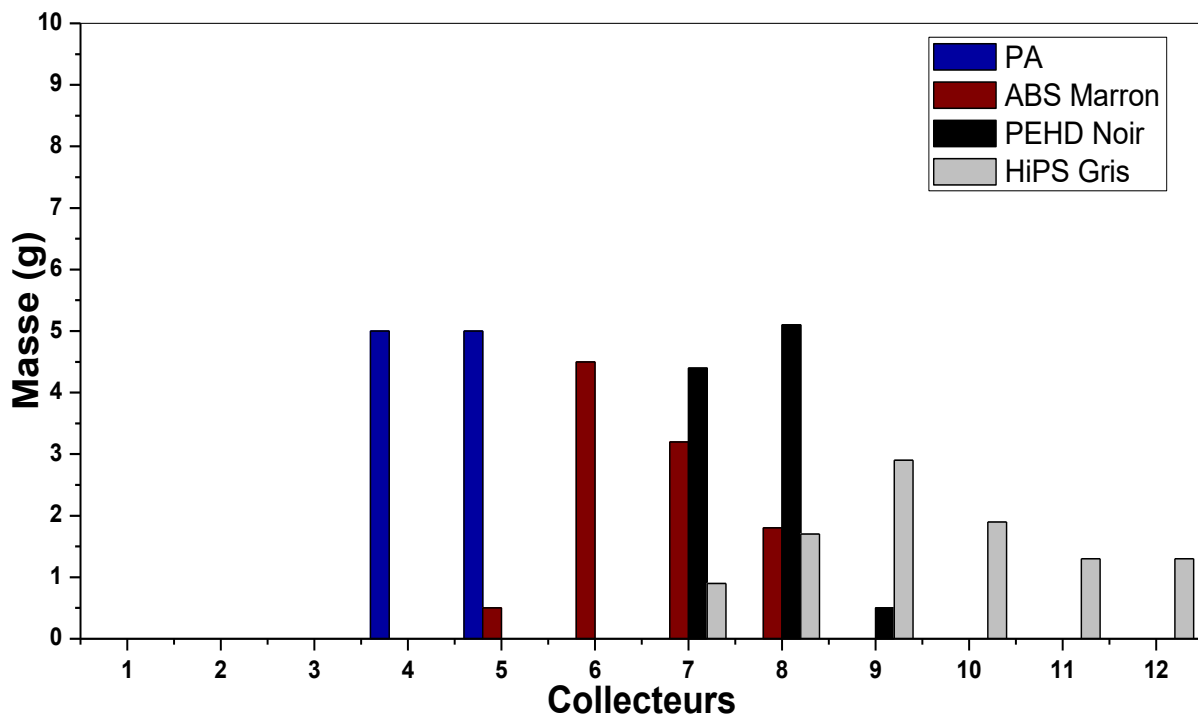
- Les paramètres de contrôle sont :
 - ✓ Nombre de passage durant chaque expérience [n] ;
 - ✓ Tension [kV] ;
 - ✓ Matière des parois (aluminium, inox).
- Le taux d'humidité HR pendant l'étude expérimentale était de l'ordre de 58 % à 63 %.

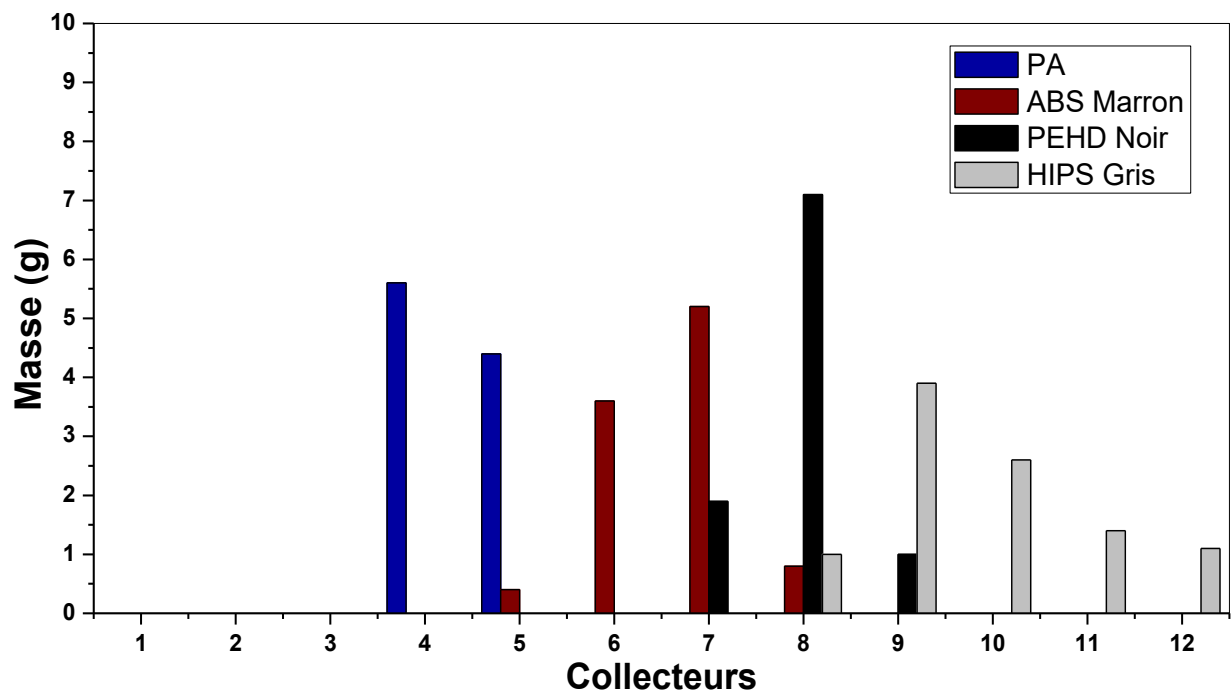
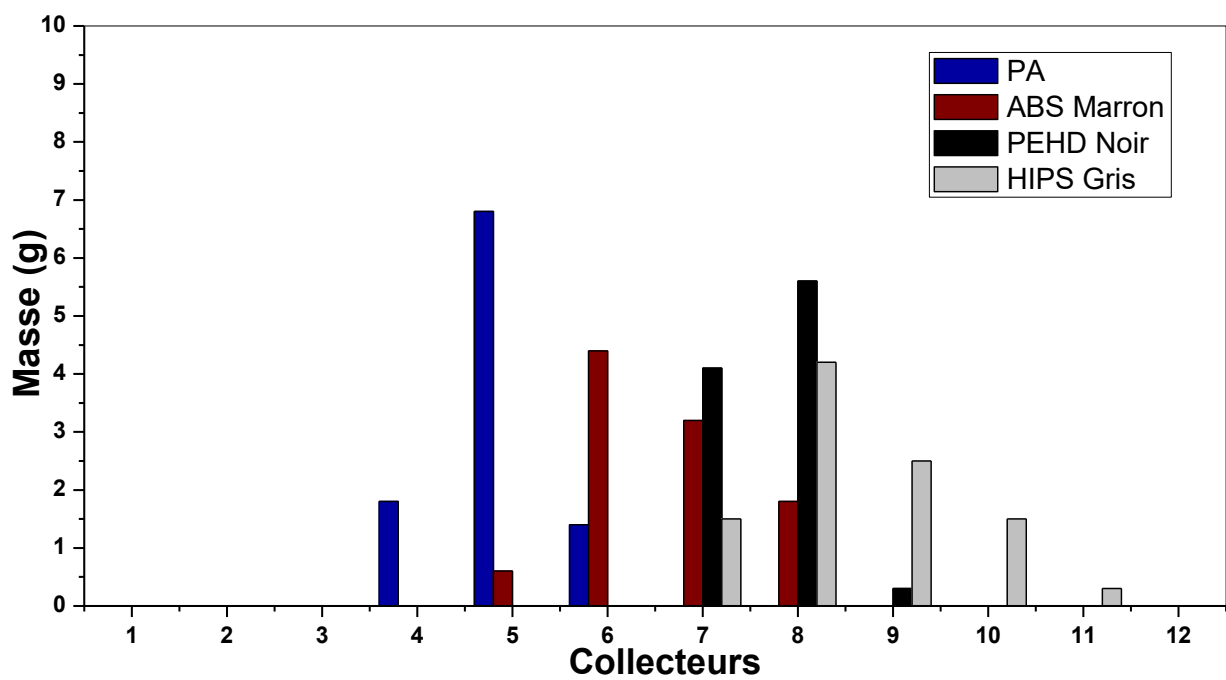
Les résultats obtenus sont représentés par des histogrammes à la **Figure IV.9** avec le tube en aluminium et à la **Figure IV.10** en utilisant le tube en Inox.

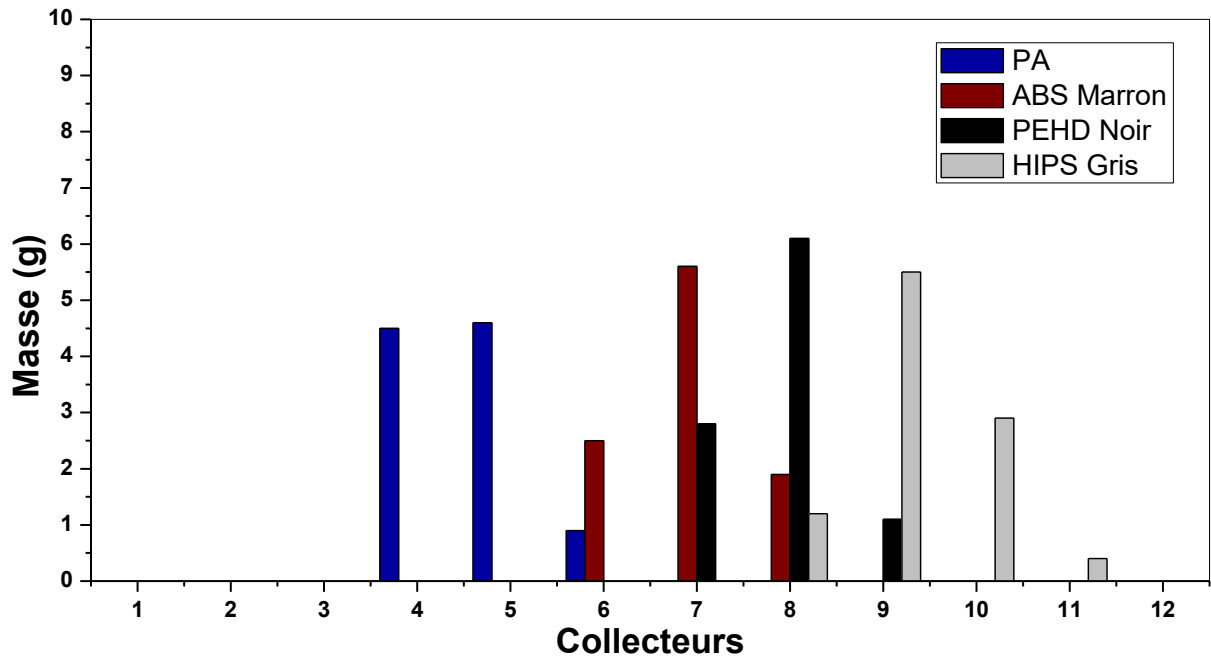
Tube en Aluminium



a) n = 2 ; U = 35 kV

b) $n = 8$; $U = 35$ kVa) $n = 2$; $U = 30$ kV

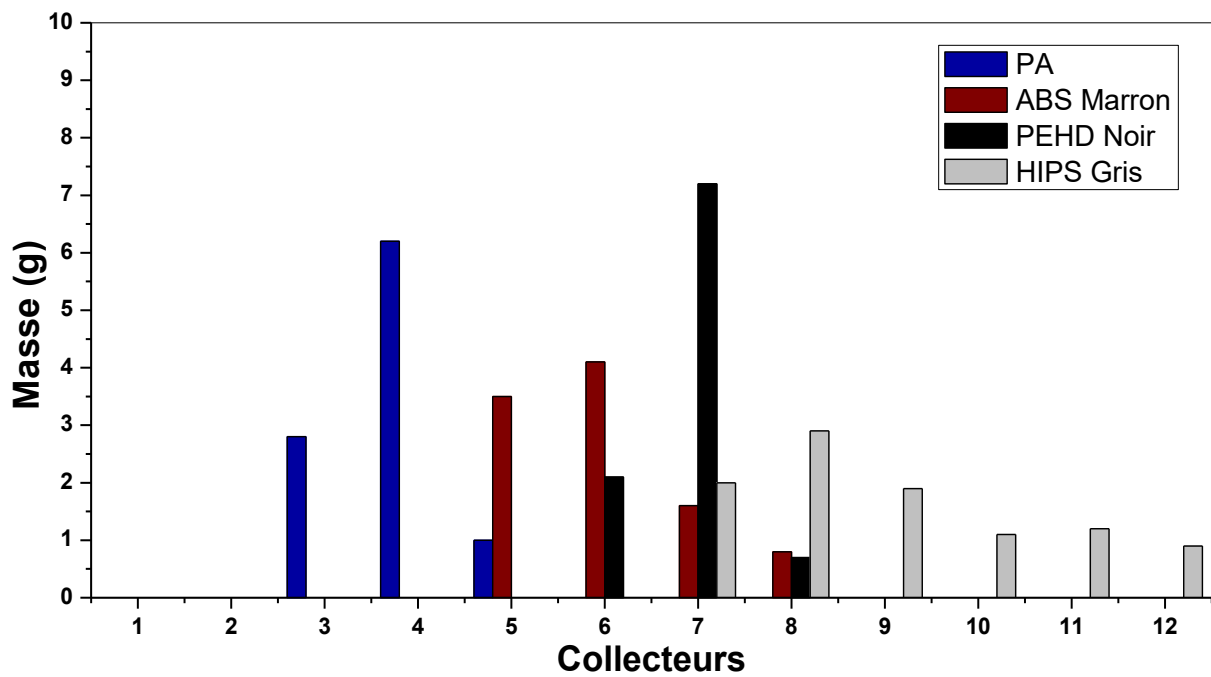
b) $n=8$; $U=30$ kVa) $n=2$; $U=25$ kV



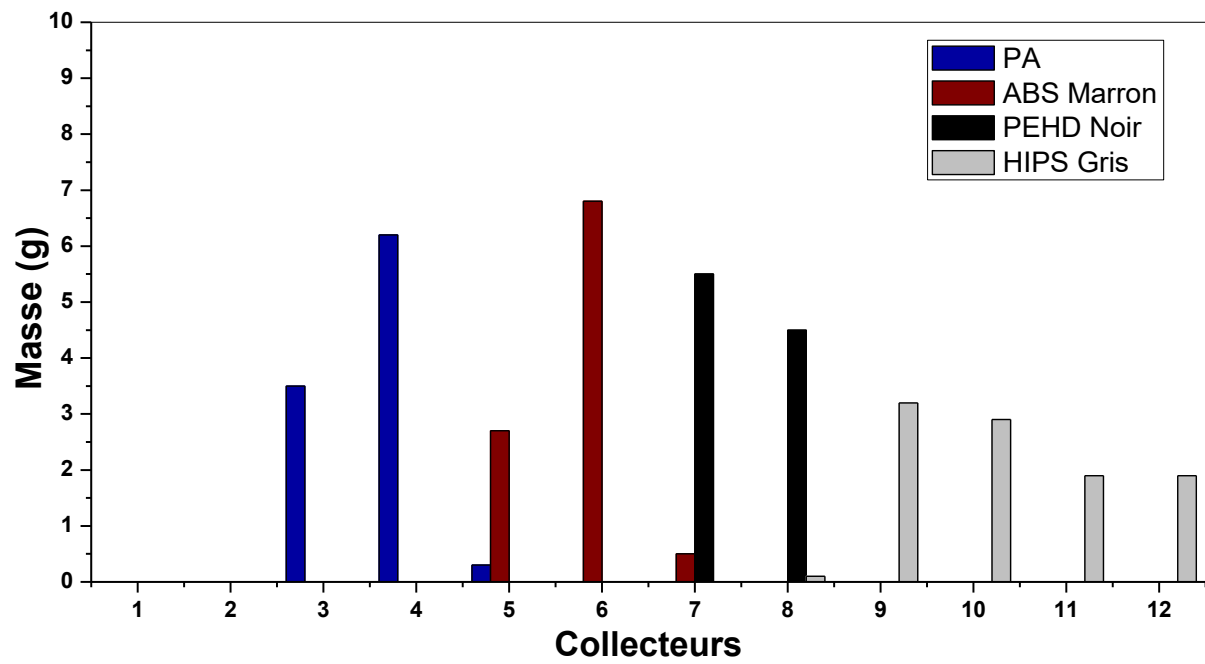
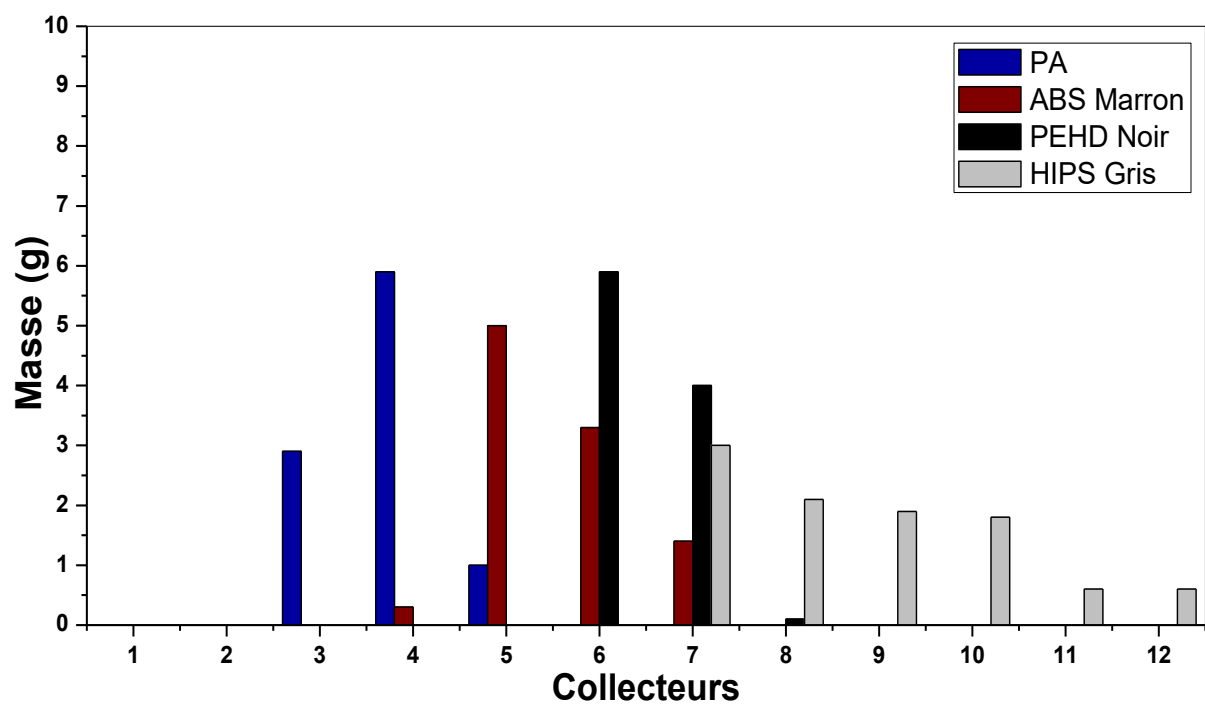
b) n= 8 ; U=25 kV

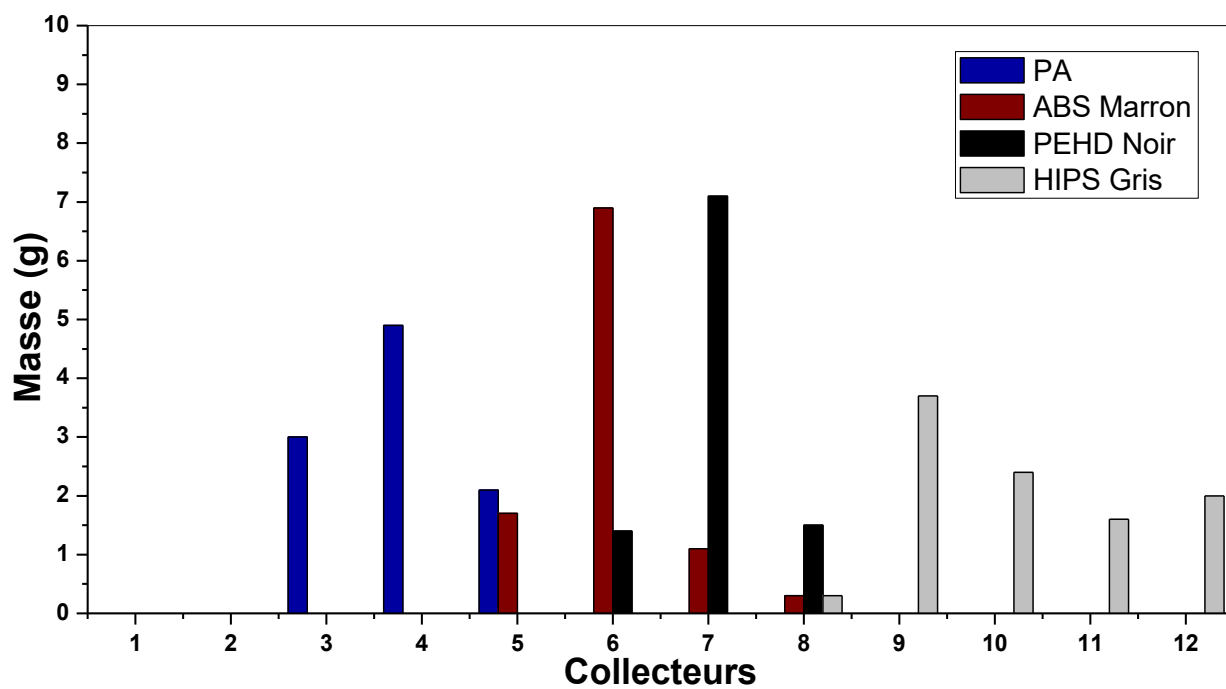
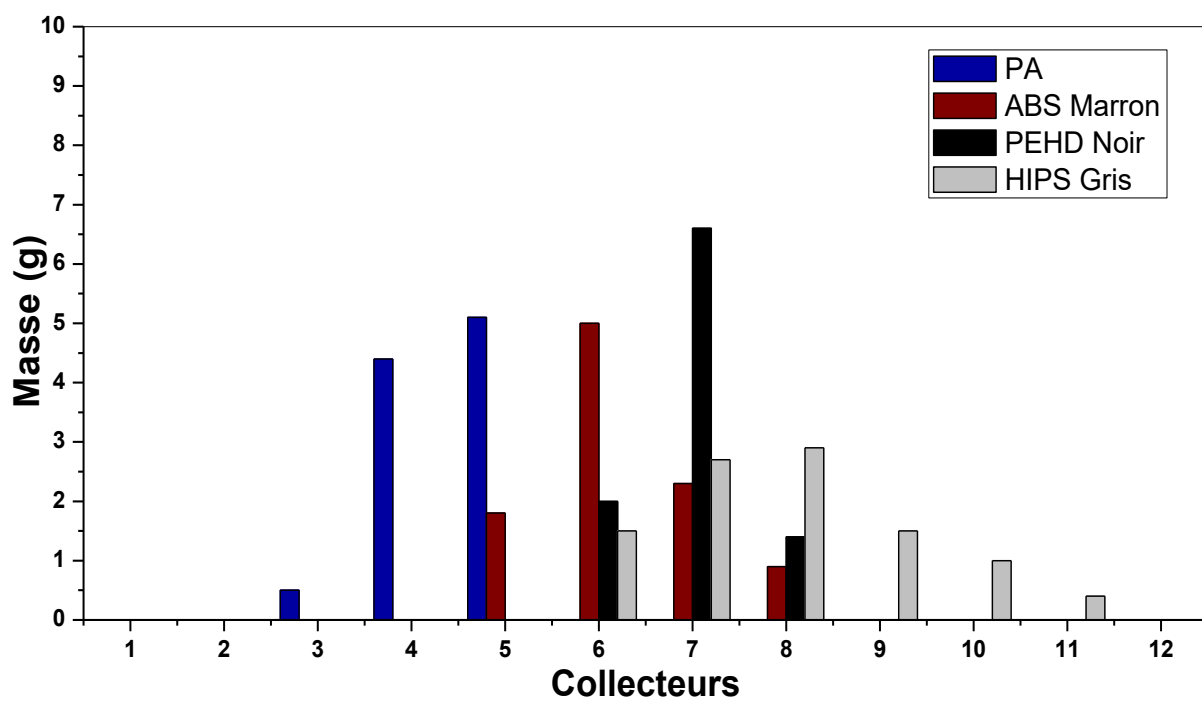
Figure IV. 9 Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon # 2 (PA-ABS Marron –PEHD Noir –HIPS Gris) en utilisant le tube en aluminium

✚ Tube en Inox



a) n= 2 ; U= 35 kV

b) $n=8$; $U=35$ kVa) $n=2$; $U=30$ kV

b) $n=8$; $U=30$ kVa) $n=2$; $U=25$ kV

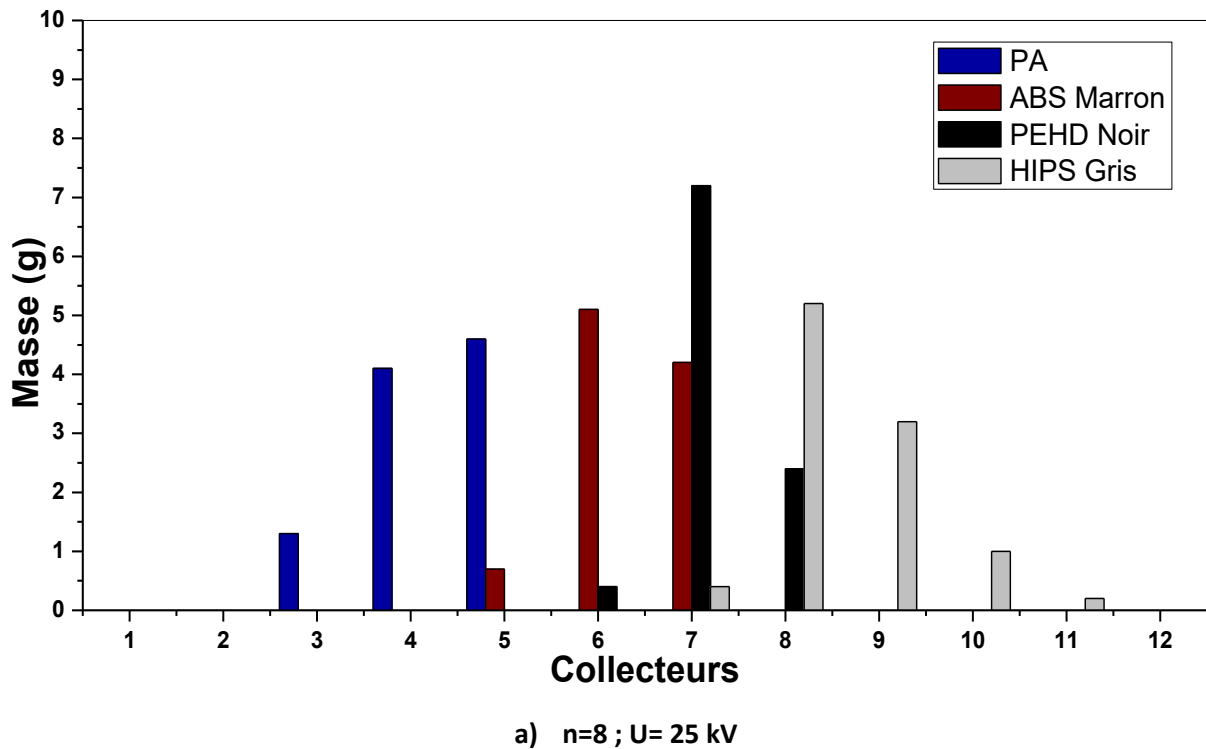


Figure IV.10 Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec le 2eme échantillon (PA-ABS Marron –PEHD Noir –HIPS Gris) (tube en Inox)

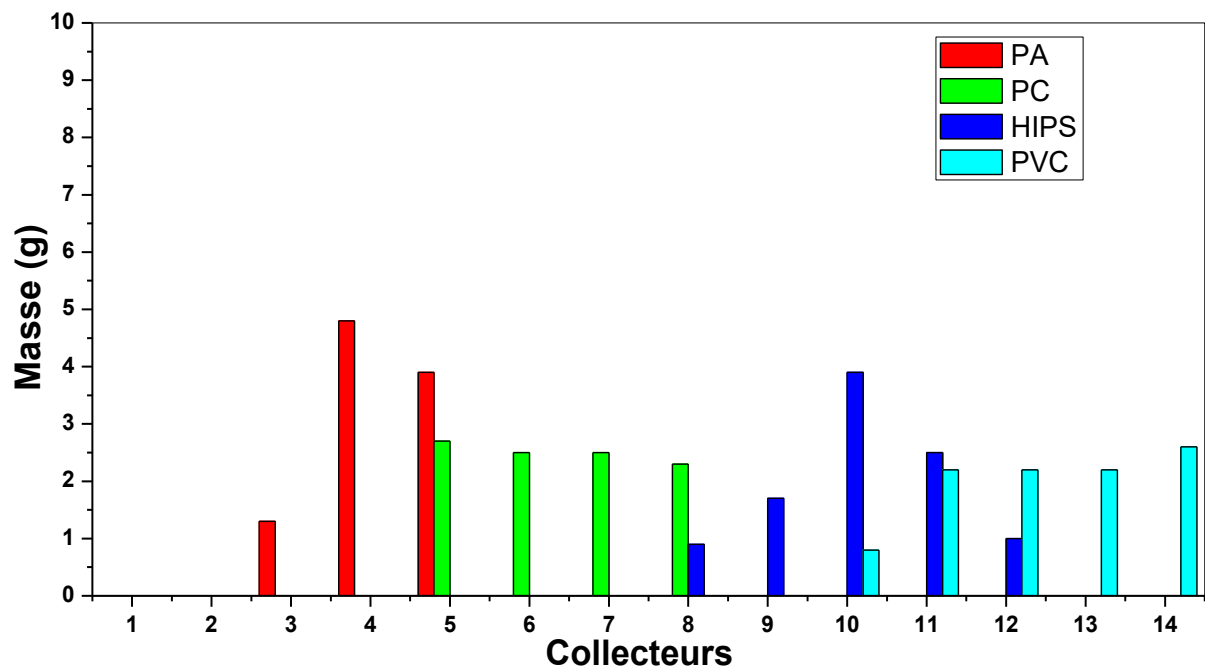
On déduit de ces figures ci-dessus que:

- la séparation d'un mélange quaternaire est possible.
- Lorsqu'on augmente le nombre de passage et la tension :
 - La pureté des produits augmente car le produit mixte diminue.
 - On obtient une bonne séparation, car les particules sont mieux chargées et sont soumises à une force électrique plus grande qui peut dévier et accélérer la trajectoire.
- l'utilisation de paroi en Inox pour notre installation est la plus avantageuse ; vu que la pureté des particules est plus élevée avec le tube en inox que l'aluminium.

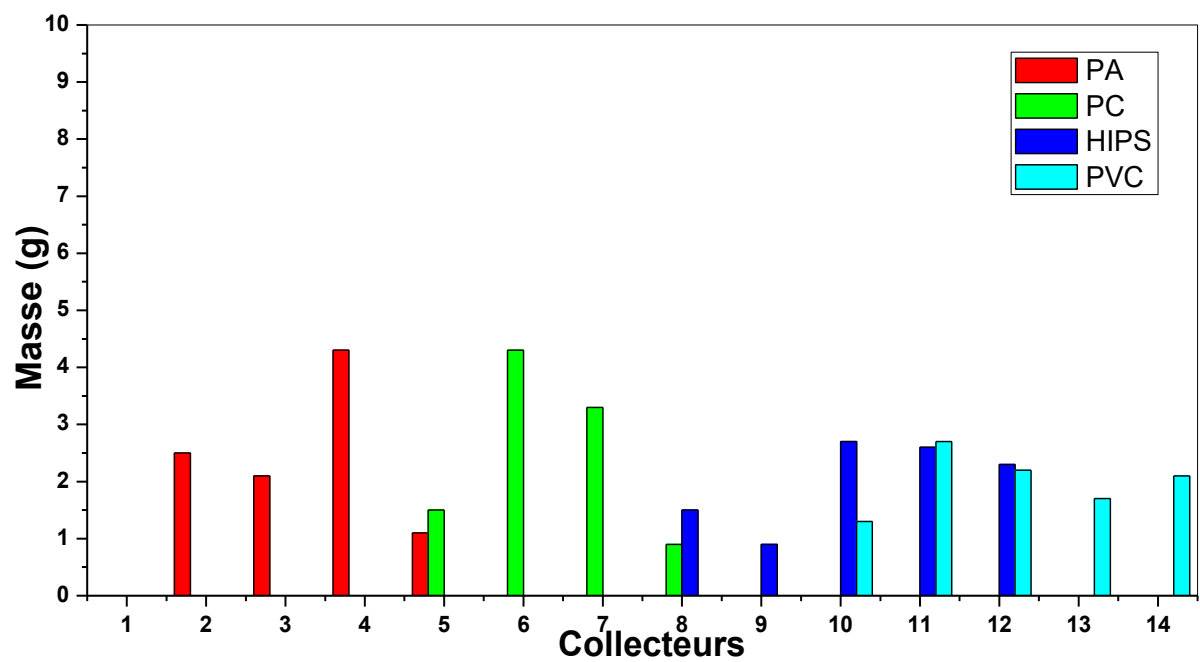
IV.2.2. Résultats de séparation électrostatique avec lit fluidisé

On a utilisé un dispositif de chargement à lit fluidisé qu'on a décrit avant. On a fixé le débit d'air puis on a introduit les échantillons ; Ensuite on introduit les mélanges de particules dans le convoyeur qui va les ramener vers l'électrode elliptique reliée à une haute tension pour la séparation. Le temps de chargement pour tous les essais est égal à 30s.

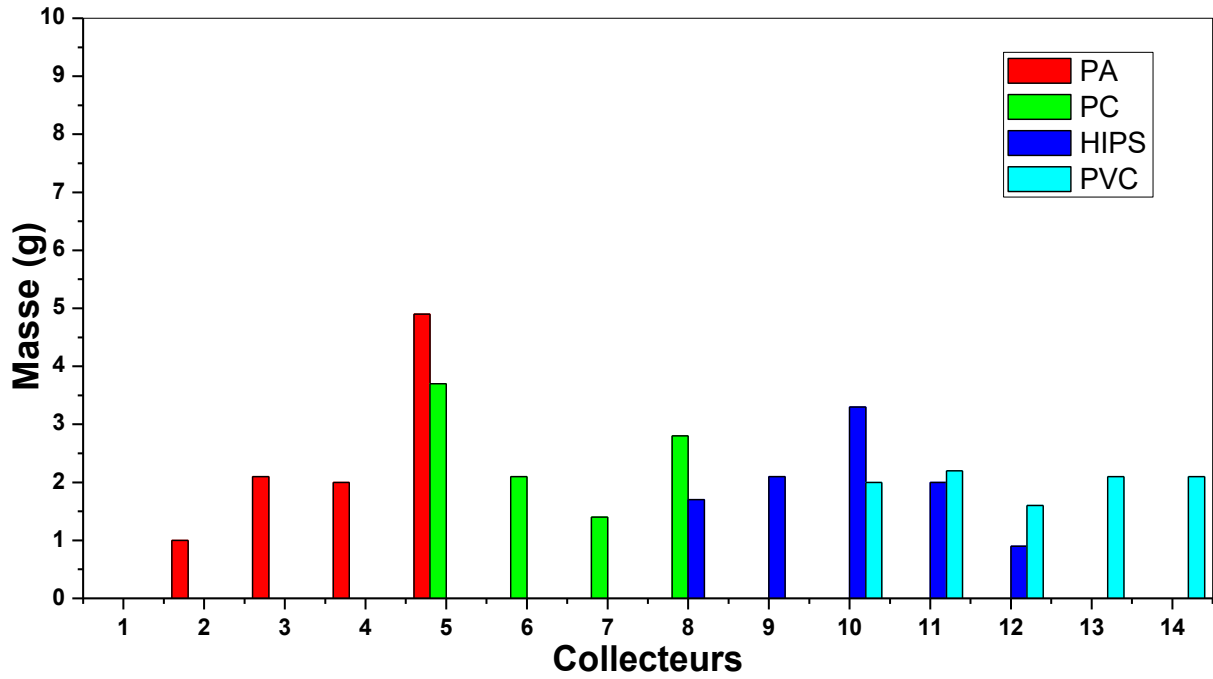
Ces histogrammes suivants représentent les résultats de séparation avec le dispositif de chargement à lit fluidisé. Les résultats obtenus avec l'échantillon # 1 sont représentés à la Figure IV.11 pour 3 valeurs de la tension.



a) U= 35 kV



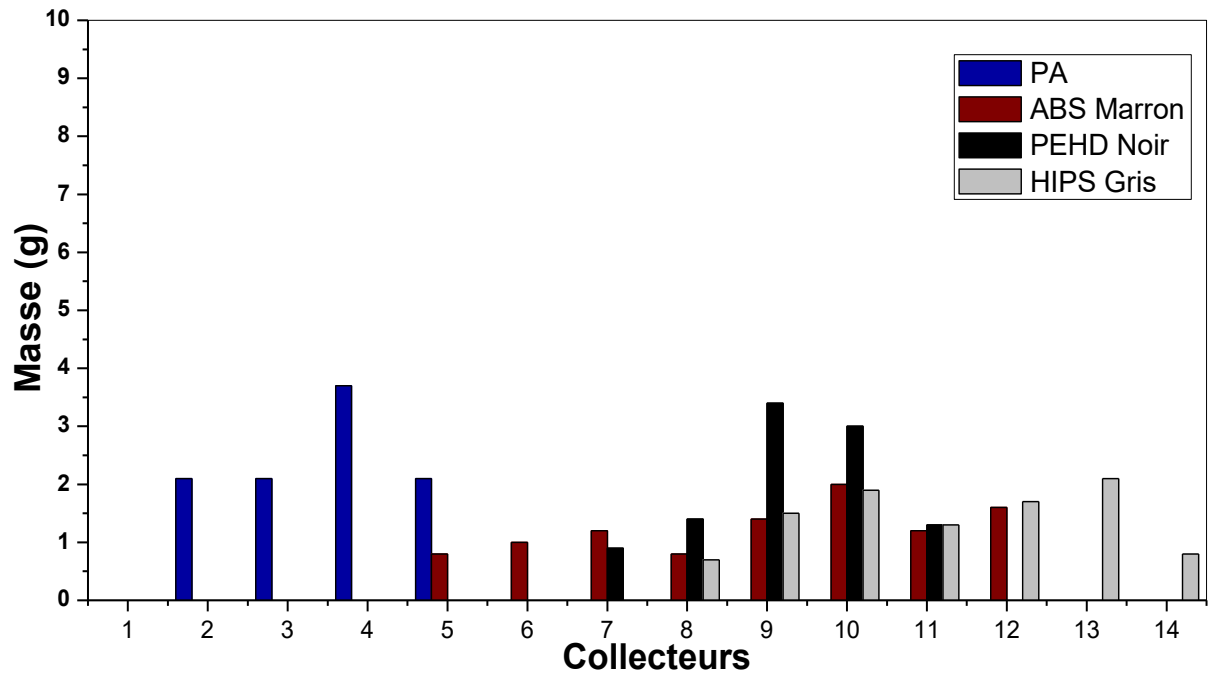
b) U= 30 kV



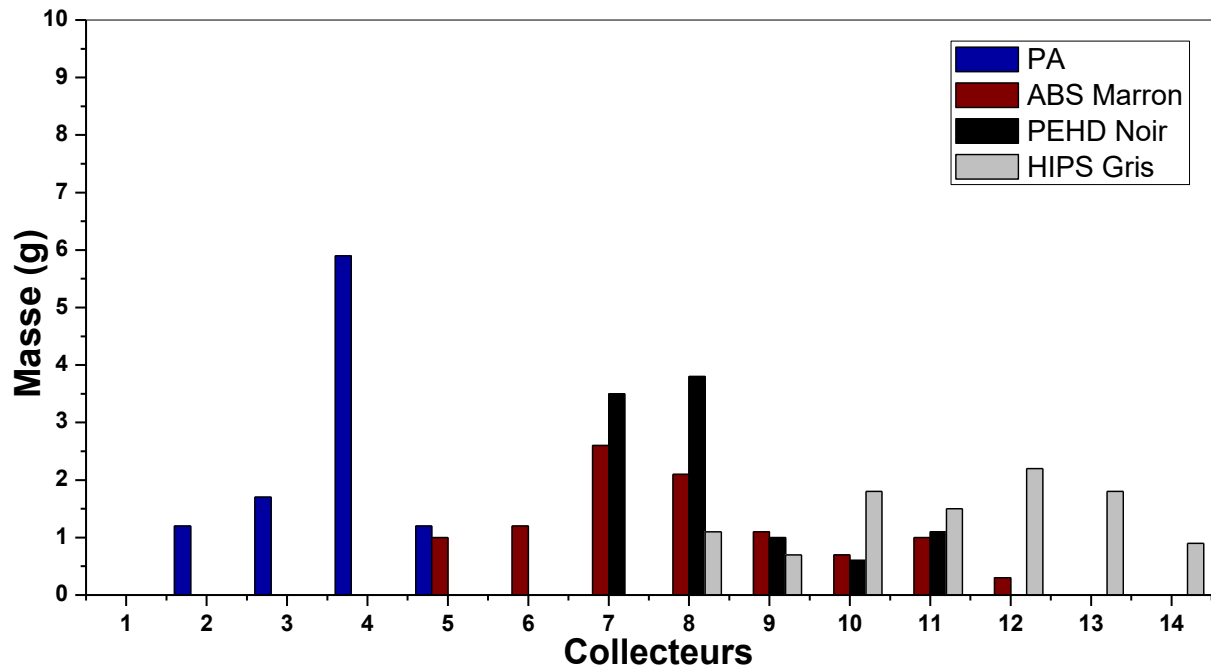
c) $U = 25 \text{ kV}$

Figure IV.11 Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon # 1 (PA, PC, HIPS_{Blanc}, PVC) en utilisant un lit fluidisé

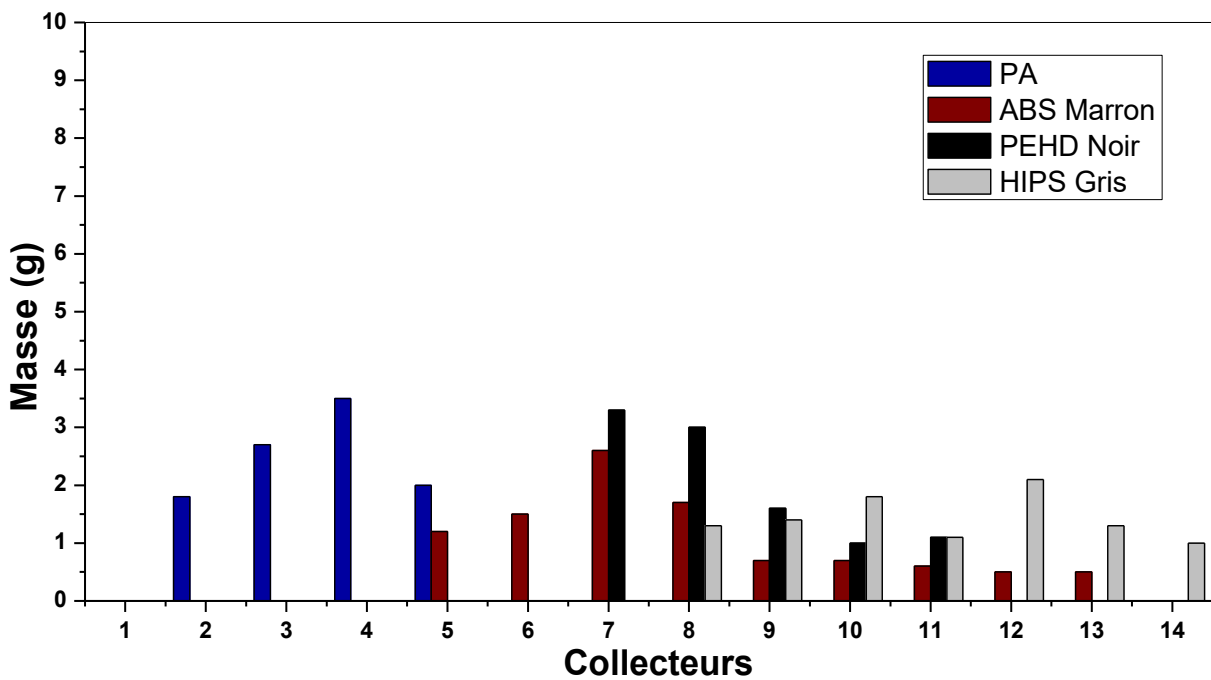
De même, Les résultats obtenus avec le 2ème échantillon sont représentés à la figure IV.12 pour 3 valeurs de la tension.



a) $U = 35 \text{ kV}$



b) U= 30 kV



c) U= 25 kV

Figure IV.12 Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon # 2 (PA, ABS_{Marron}, PEHD_{Noir}, HIPS_{Gris}) en utilisant un lit fluidisé

- Il se produit trois types de collisions dans le système de chargement tribo-électrique à lit fluidisé :

- ✓ Collisions entre particules de la même famille.
 - ✓ Collisions entre particules de famille différentes.
 - ✓ Collisions entre famille de particules et les parois de la chambre du dispositif.
- Avec le dispositif à lit fluidisé, on remarque qu'il y a une séparation moins bonne, ce qui montre qu'avec le glissement on contrôle plus le comportement des particules.
 - Le chargement par glissement peut séparer n'importe quelle combinaison de quatre particules, par contre le chargement à lit fluidisé a permis de séparer qu'une seule combinaison.

IV.2.3. Comparaison de la pureté et la récupération entre les deux dispositifs chargement (à lit fluidisé et glissement)

Les figures IV.13 et IV.14 représentent la pureté et la récupération du #1 échantillon (**PA**, **PC**, **HIPS_{Blanc}**, **PVC**) des deux dispositifs de chargement : le lit fluidisé et le tube en INOX pour une tension de 35kV.

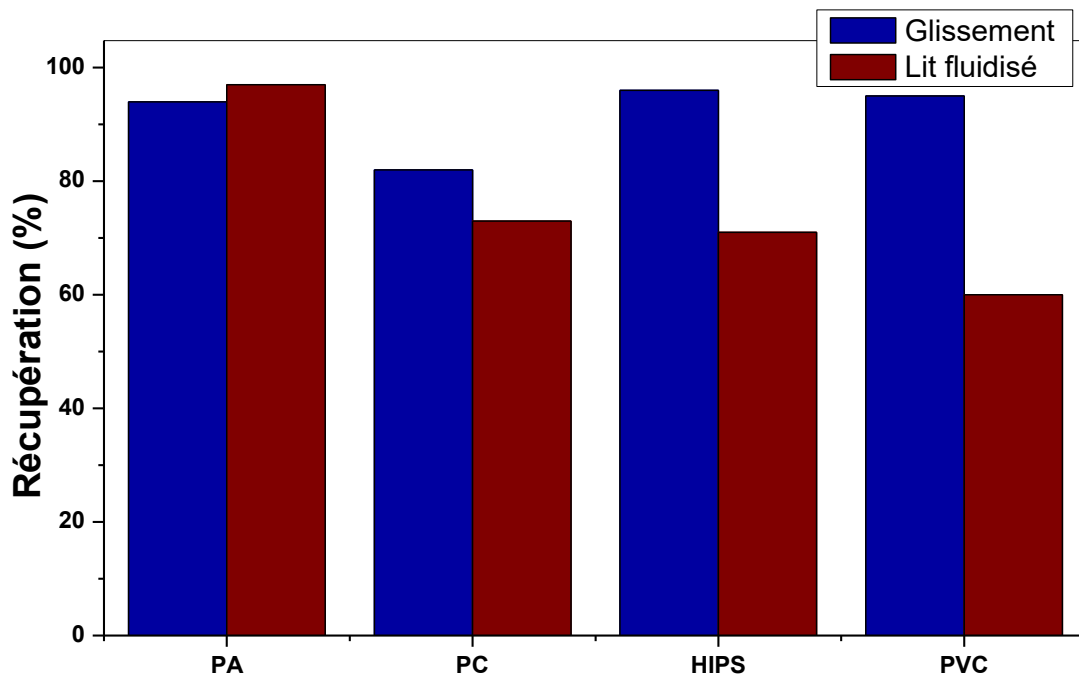


Figure IV.13 Récupération de chaque plastique obtenue en utilisant les systèmes de tribo- chargement à lit fluidisé et glissement

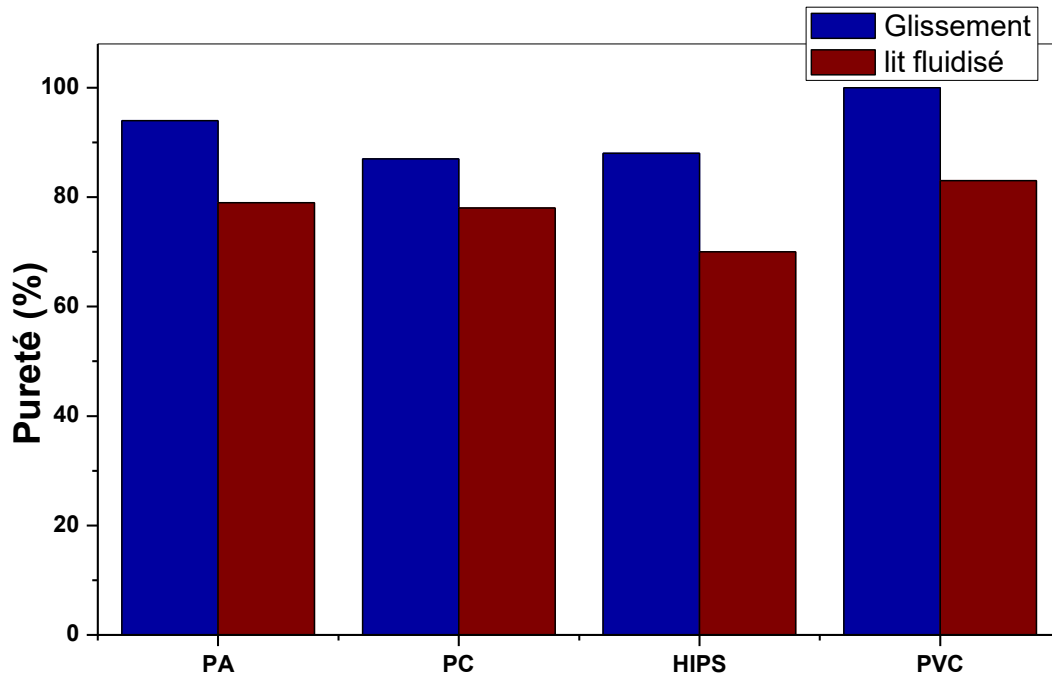


Figure IV.14 Pureté de séparation de chaque plastique en utilisant les systèmes de chargement à lit fluidisé et glissement

La comparaison entre les deux procédés de chargement triboélectrique, nous conduit à dire que trop chargé les particules granulaires avec le lit fluidisé ne signifie pas avoir un meilleur taux de récupération de produit ainsi que la pureté, puisque il y'a plus de contact entre « particule-particule » que « particule-parois ».

La pureté et la récupération de la première combinaison est considérable dans les deux dispositifs de chargement mais le rendement de glissement est supérieure à 80% pour le produit quaternaire.

Les figures IV.15 et IV.16 représentent la pureté et la récupération de l'échantillon # 2 (**PA**, **ABS_{Marron}**, **PEHD_{Noir}**, **HIPS_{Gris}**) des deux dispositifs de chargement : le lit fluidisé et le tube en INOX avec une tension de 35 kV.

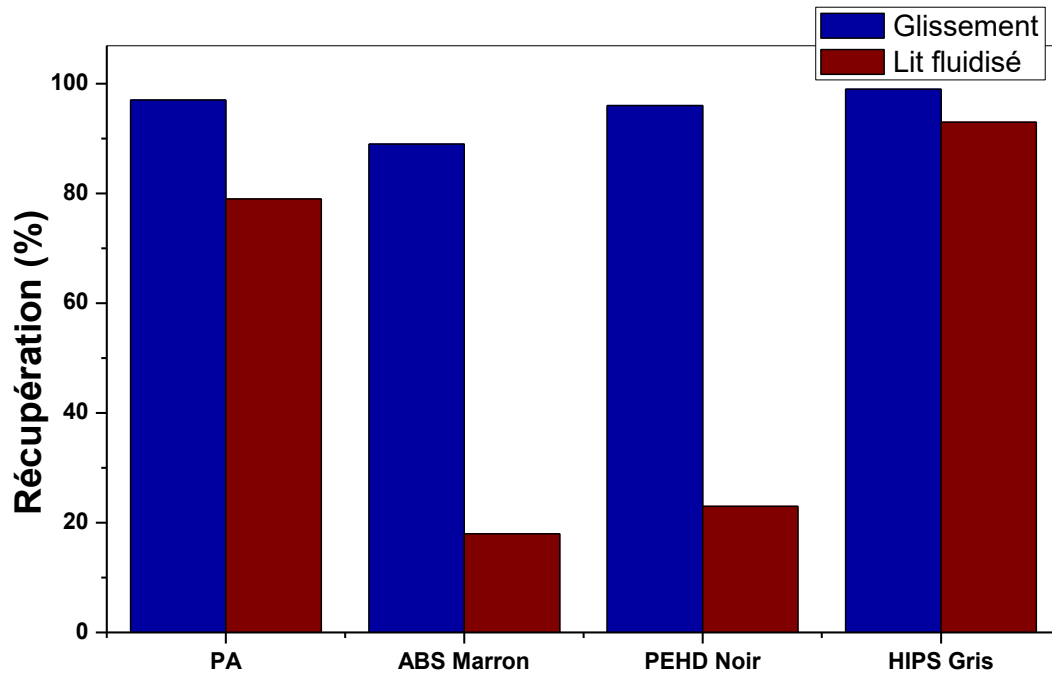


Figure IV.15 Récupération de chaque plastique obtenue en utilisant les systèmes de tribo-chargement à lit fluidisé et glissement

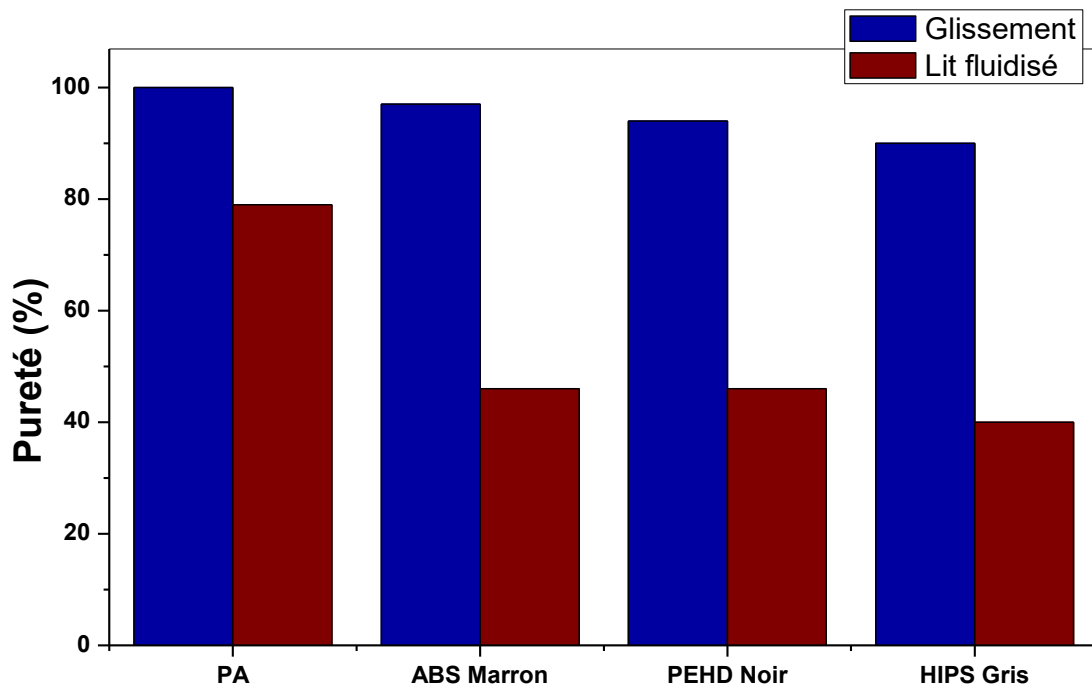


Figure IV.16 Pureté de séparation de chaque plastique en utilisant les systèmes de chargement à lit fluidisé et glissement

Par contre le rendement de la pureté et de la récupération est moins bonne pour le dispositif de lit fluidisé ça montre qu'il y'a une mauvaise séparation pour ce deuxième échantillon.

La récupération d'ABS_{Marron} et PEHD_{Noir} est entre les 20% et PA est moins de 80%, l' HIPS_{Gris} est à 92%, et pour la pureté le PA est à peu près à 80% et les autres trois particules sont inférieure à 50% en revanche pour le glissement on a récupéré environ 90% pour les quatre particules, de même pour la pureté qu'on un très bon rendement.

Conclusion

Le chargement par glissement peut séparer n'importe quelle combinaison de quatre types de particules par rapport au chargement à lit fluidisé qui a permis de séparer qu'une seule combinaison.

Les résultats obtenus confirment que les paramètres étudiés (tension appliquée, nombre de passages(n) et le type de tubes) ont une influence considérable sur l'efficacité de la séparation.

Les résultats obtenus avec le séparateur à tapis roulant sont très prometteurs et peuvent être exploités dans le futur en portant des améliorations à l'installation.

Le chapitre qui suit est consacré à la modélisation et optimisation d'un électro- séparateur à tapis conducteur dont on a utilisé une autre méthode de chargement.

CHAPITRE V :
MODELISATION ET
OPTIMISATION D'UN ELECTRO-
SEPARATEUR A TAPIS
CONDUCTEUR

CHAPITRE V : MODELISATION ET OPTIMISATION D'UN ELECTRO-SEPARATEUR A TAPIS CONDUCTEUR

Le présent chapitre est réparti en deux sections, la première nous allons présenter le dispositif de chargement à cylindre tournant, puis les différents résultats d'expériences de chargement triboélectrique.

Et la seconde partie décrit le séparateur électrostatique à tapis conducteur, et la modélisation de ce dispositif par la méthodologie des plans d'expériences ainsi que son optimisation. Pour cela des dizaines d'expériences sont indispensables. Ces dernières ont été toutes réalisées au sein du laboratoire IRECOM de l'Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbés.

Le but de ce travail est de formuler un ensemble de recommandations concernant le choix des différents facteurs qui peuvent influencer sur le processus de la séparation et de trouver un modèle mathématique qui peut relier entre ces facteurs choisis. La stratégie suivie est basée sur les cinq étapes suivantes :

- Choix des facteurs qui peuvent influencer sur le processus de la séparation ;
- Identification de l'intervalle de variation des différents facteurs ;
- Modélisation du processus expérimental ;
- Détermination du point de fonctionnement optimal ;
- Vérification expérimentale du point de fonctionnement optimal.

V.1. Description du dispositif de chargement par cylindre tournant

Comme le montre le schéma descriptif global de l'appareil de chargement représenté à la figure V.1 et la photographie de la figure V.2, l'appareil comprend dans sa conception la partie de chargement triboélectrique (un tube isolant creux en polyamide) où sont traités les mélanges granulaires pour l'acquisition de charges dans le tube tournant.

Le support mécanique du système de chargement triboélectrique représente une partie principale de ce dispositif. Cette partie est constituée essentiellement par une carcasse en tube carré en acier 30 × 30 mm, qui a le rôle d'un support y compris une roue entraînée par moteur à triphasé, et quelques accessoires mécaniques figure (V.3) [96-97].

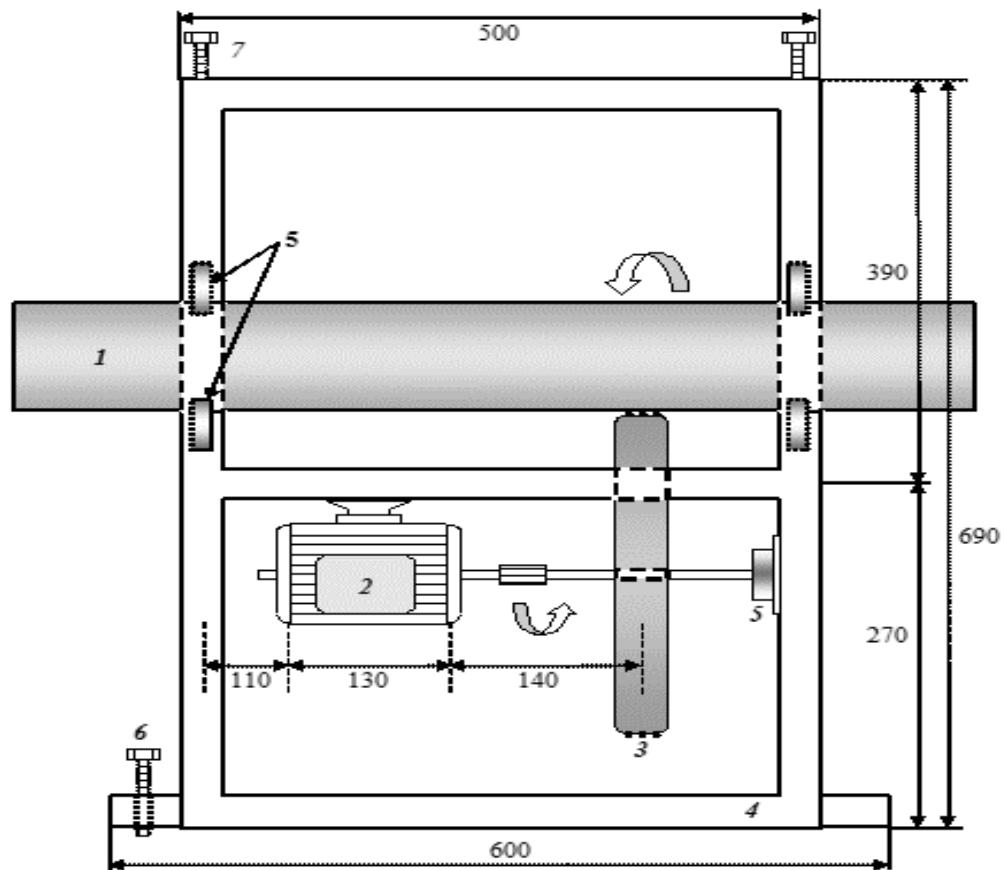


Figure V.1 Représentation schématique de la partie chargement triboélectrique (Vue de face)

- 1** Cylindre de chargement triboélectrique
- 2** Moteur triphasé à vitesse variable
- 3** Roue de transmission de mouvement
- 4** Socle en acier
- 5** Roulements
- 6** Boulon pour le réglage de l'inclinaison
- 7** Boulons pour le serrage des cylindres à différents diamètres

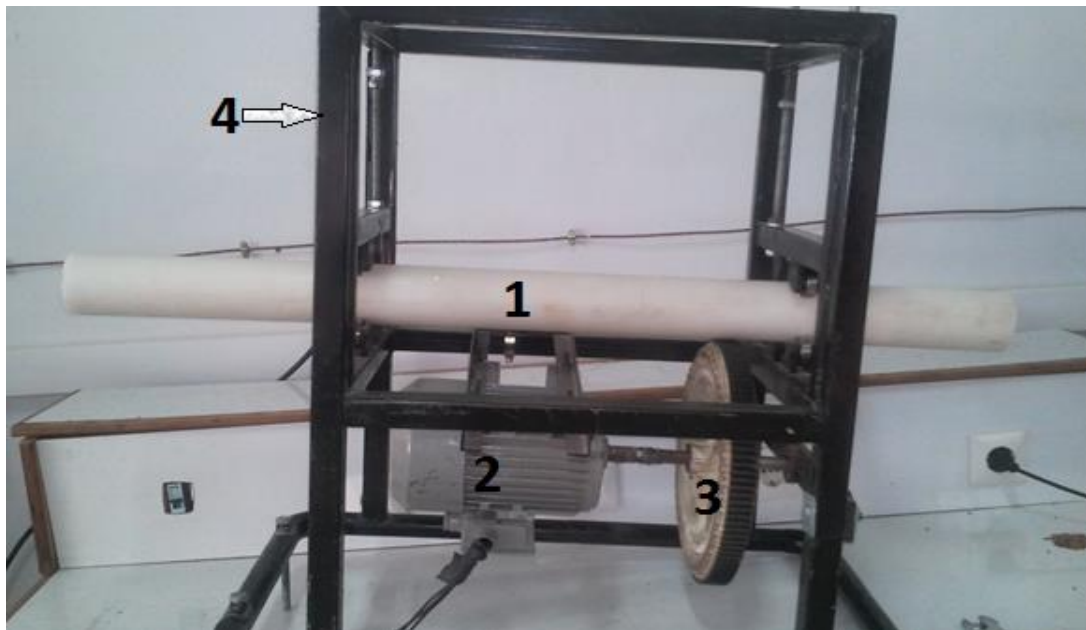


Figure V.2 Photographie de la partie chargement triboélectrique (Vue de face)

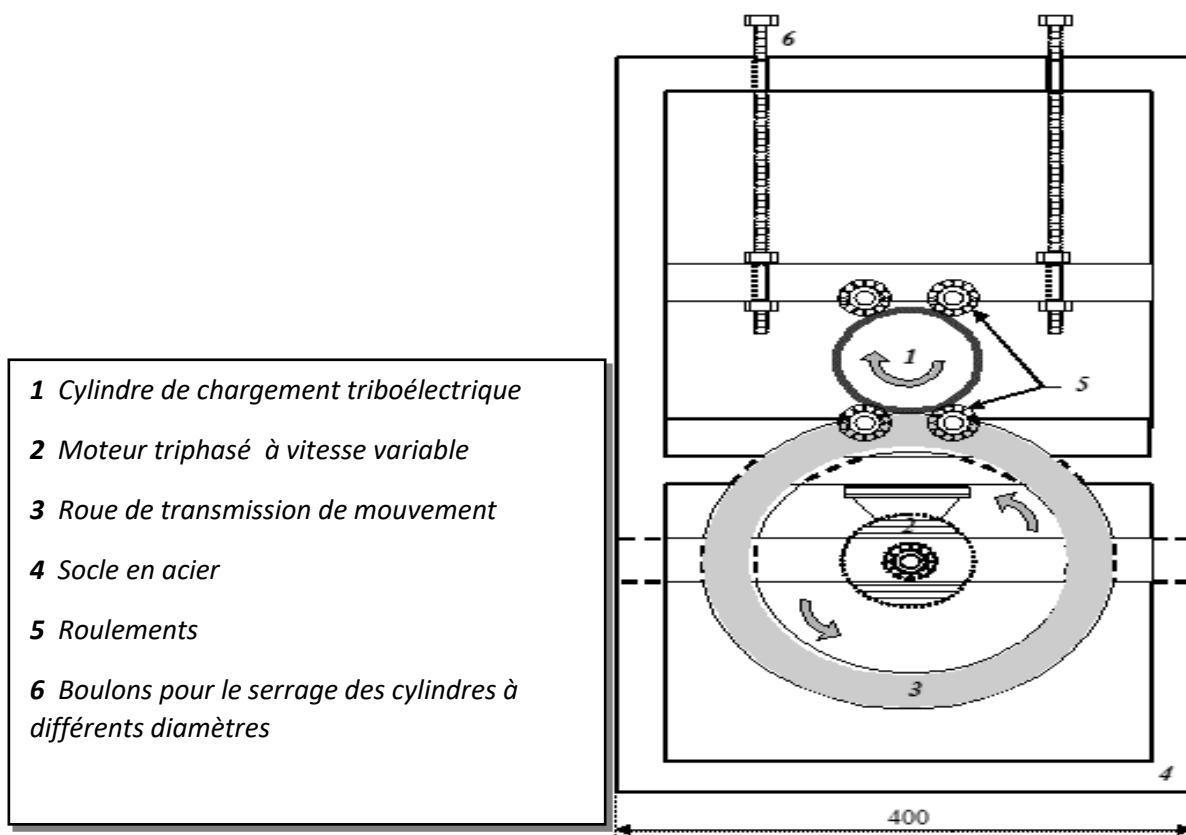


Figure V.3 Représentation schématique de la partie de chargement triboélectrique (Vue de profil)

En alimentant le moteur triphasé, il transmet le mouvement à l'axe solidaire à la roue, cette dernière tourne en entraînant avec elle la rotation du cylindre en Polyamide. Pour minimiser les frottements, le cylindre est supporté à ces deux côtés, par 4 roulements comme le montrent les figures V.4 et V.5. Les granules de plastiques sont introduits dans le cylindre

tournant, après un certain moment de collisions entre particules/parois, elles acquièrent des charges par effet triboélectrique. Elles sont donc chargées suivant leur ordre dans la série triboélectrique.

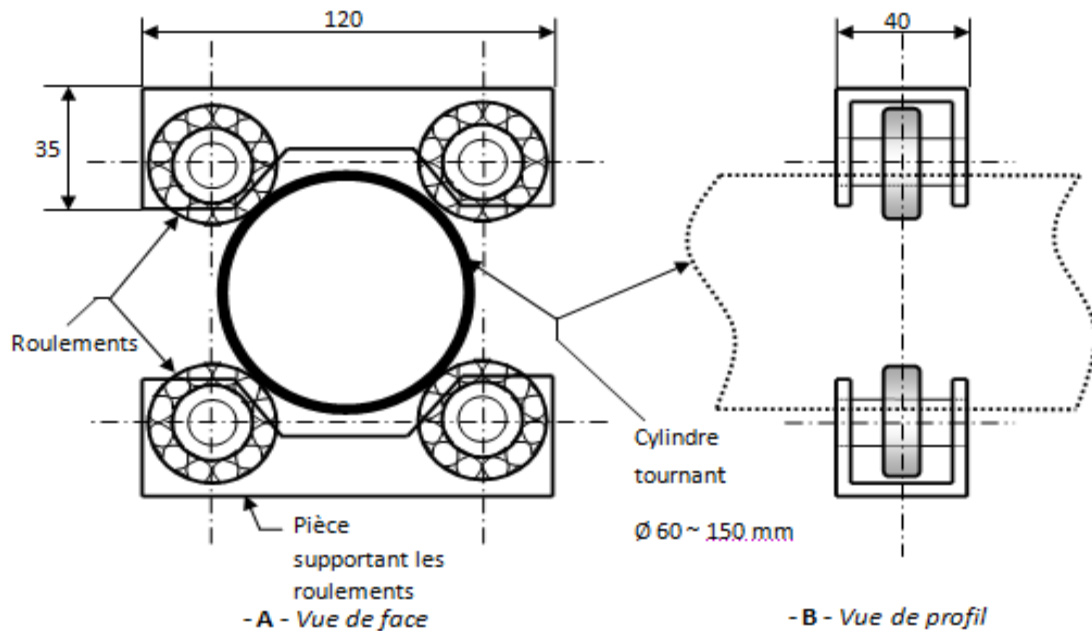


Figure V.4 Schémas des pièces mécaniques supportant les roulements



- A - Vue de face

- B - Vue de profil

Figure V.5 Photographie des pièces mécaniques supportant les roulements

V.1.1. Déroulement de l'expérience

Les expériences ont été effectuées sur quatre types des granules isolants utilisés dans la plasturgie : High Impact Polystyrène (HIPS Blanc), polyamide (PA), chlorure de polyvinyle (PVC) et Acrylonitrile Butadiène Styrene (ABS Marron), qui frottent avec un tube cylindrique en polyamide :

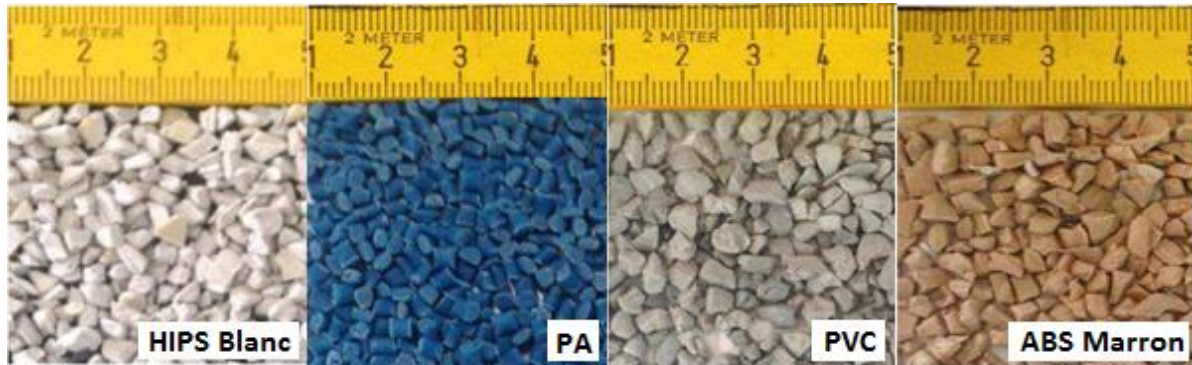


Figure V.6 Echantillon des granules (DEEE)

On prend l'échantillon de granules du plastique, on l'introduit dans le cylindre, ensuite on alimente le moteur triphasé durant un temps désiré et à une vitesse déterminée. Les particules de plastique se mettent en frottement et en collision avec les parois du cylindre.

Après avoir chargé ces particules tribo-électriquement, elles sont mises dans une cage de faraday pour estimer le taux de la charge acquise.

Les paramètres de contrôle sont :

- le temps de chargement durant chaque expérience [s] ;
- la masse du produit granulaire [g] ;
- la vitesse du cylindre [tr/min]

Le taux d'humidité HR pendant l'étude expérimentale était de l'ordre de 40 % à 47% et la température ambiante T était entre 25°C et 30°C.

Tous les résultats obtenus concernant le taux de chargement des particules sont divisé par la masse granulaire, autrement dit la charge acquise par le matériau granulaire s'exprime en nC/g.

V.1.2. Résultats et discussion

Le but de cette étude est, de déterminer les intervalles des paramètres, qui accordent le plus grand écart de la charge acquise, entre les quatre produits utilisés.

a. Influence du temps de chargement

La figure V.7 représente l'influence du temps de chargement sur la charge acquise par le produit granulaire, allant de $t = 10$ s jusqu'à $t = 40$ s, les autres paramètres sont maintenus constants :

- La masse du produit $m = 15$ g ;
- La vitesse du cylindre $V = 224$ tr/min ;

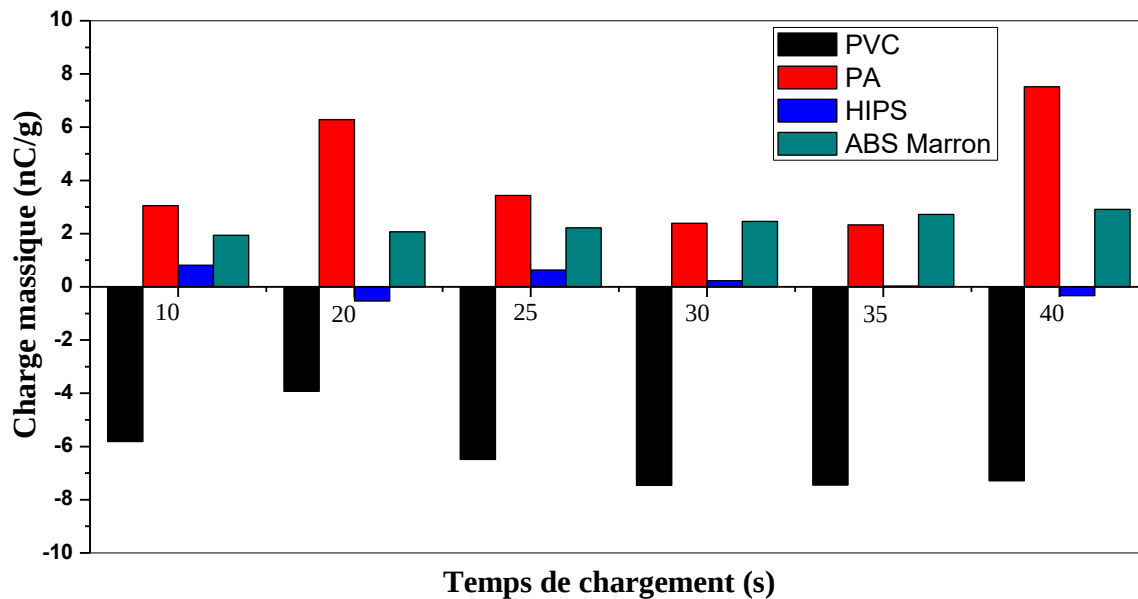


Figure V.7 Influence du temps de chargement sur la charge acquise par le : PA, PVC, HIPS et ABS

L'efficacité de la charge dépend considérablement du temps de chargement des plastiques traités, le chargement est optimal lorsque le temps est entre 25 à 40s.

b. Influence de la masse granulaire

La figure V.8 montre l'influence de la masse granulaire sur le chargement des particules, variant la masse de $m = 5$ g jusqu'à $m = 30$ g, le temps de chargement ainsi que la vitesse du cylindre sont constants : $t = 20$ s et $V = 224$ tr/min.

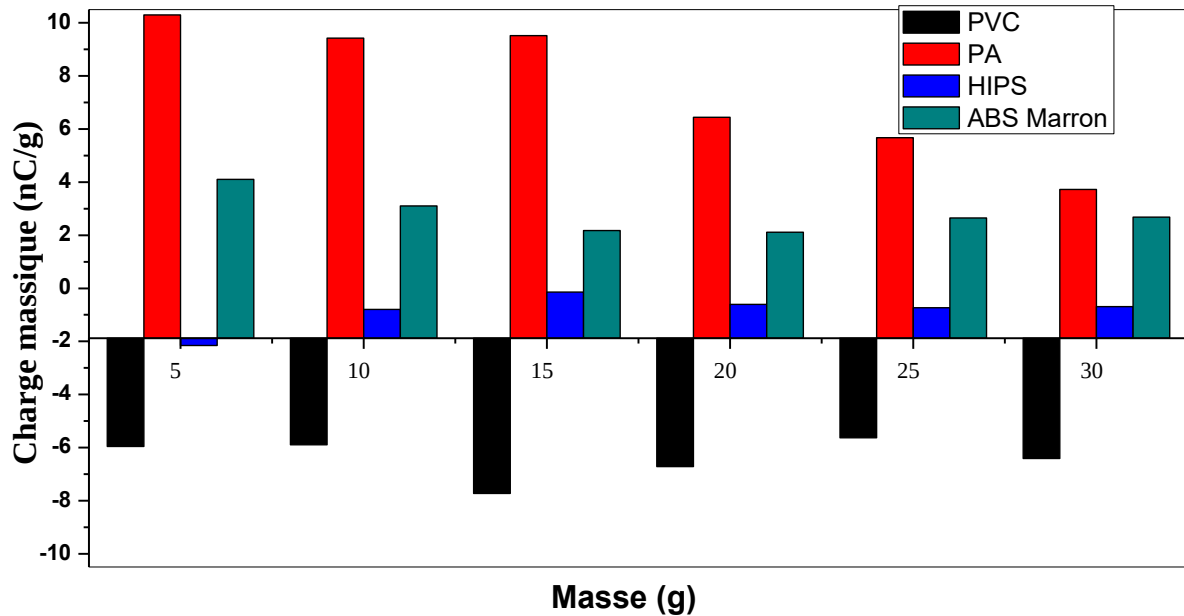


Figure V.8 Influence de la masse granulaire sur la charge acquise par le : PA, PVC, HIPS et ABS

On remarque que la masse influe sur l'efficacité de la charge notamment le PA et le PVC, on obtient un meilleur rendement entre 5 à 10 g.

c. Influence de la vitesse

L'influence de la vitesse du cylindre sur le chargement des particules est présentée dans la figure V.9, variant la vitesse de $v = 56$ tr/min jusqu'à $v = 392$ tr/min, les autres paramètres de réglage sont maintenus constants :

- Le temps de chargement $t = 20$ s ;
- La masse du produit $m = 10$ g ;

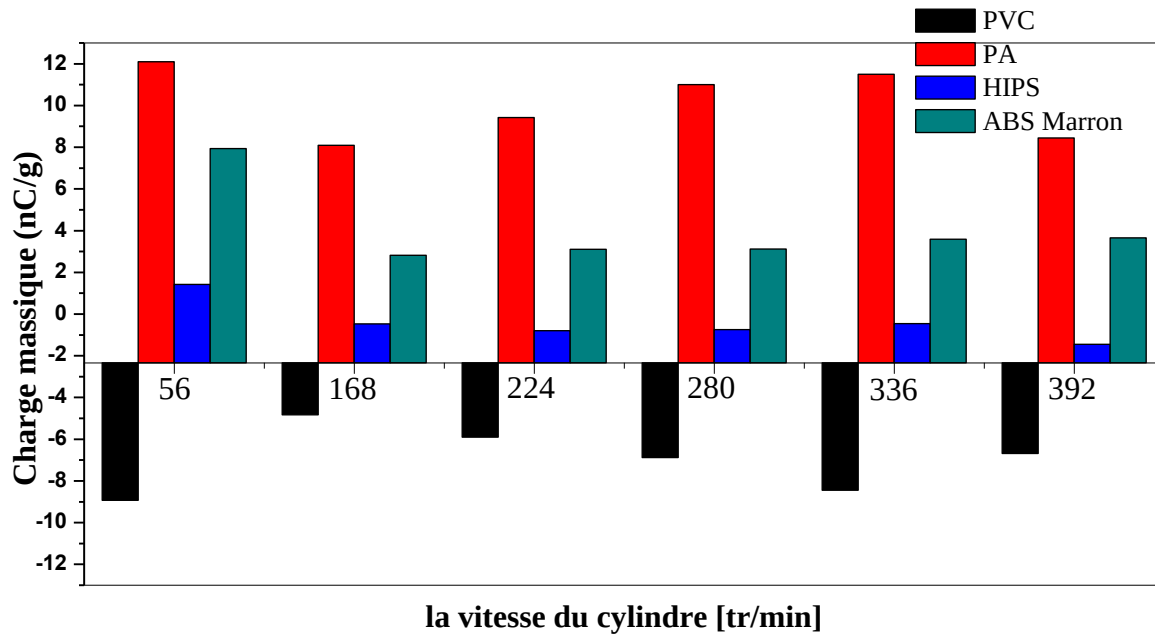


Figure V.9 Influence de la vitesse sur la charge acquise par le : PA, PVC, HIPS et ABS

L'influence de la vitesse de rotation du cylindre sur le chargement est considérable. Le meilleur chargement est autour d'une vitesse de 280 tr/min.

L'efficacité du procédé diminue lorsque la vitesse de rotation du cylindre est grande, car les granules se chargent rapidement et se saturent.

V.2. Séparateur à tapis roulant conducteur

L'installation contient deux éléments principaux : le tapis roulant (bande transporteuse conductrice liée à la terre) et l'électrode elliptique, qui sont reliés à un même support métallique. Notre bande a une longueur de 1060 mm et une largeur de 90 mm. Les dimensions de l'électrode elliptique sont : les rayons : 16cm, 8.5cm et la largeur 150 mm. L'électrode est soumise à une haute tension positive réglable (figure V.10).

Les matériaux chargés par le cylindre tournant sont disposés sur le convoyeur dont la vitesse est ajustée, d'une manière de former une monocouche sur la surface du tapis.

Pour une raison d'objectivité, notamment l'analyse des résultats, la récupération des produits est assurée par quinze bacs.



Figure V.10 Photos du séparateur à tapis roulant

V.2.1. Principe de la méthode des plans d'expériences

La méthode des plans d'expériences représente un outil parmi d'autres qui permet d'améliorer de façon importante la qualité des produits et des procédés.

C'est une méthode qui permet la modélisation ainsi que l'optimisation d'un processus [98-99]. Le procédé d'un système peut être défini, exprimant les n variables de sortie y_i , $i = 1, \dots, n$, comme fonctions des variables d'entrée u_i , $i = 1, \dots, m$, qui peuvent être contrôlées (figure V.11), [100-101].

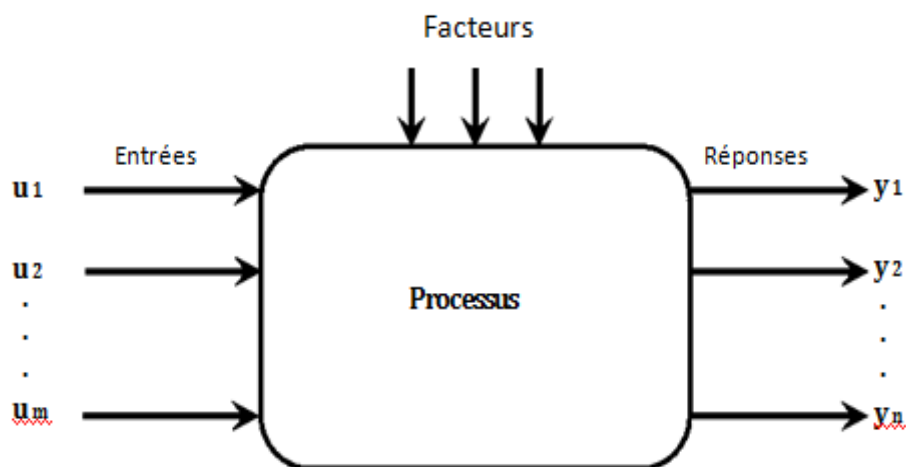


Figure V.11 Représentation schématique d'un processus

a) Modélisation des paramètres par la méthode des plans d'expériences

Les expériences ont été réalisées sur un mélange granulaire isolant de PVC, ABS marron, PA et HIPS. La haute tension appliquées à l'électrode elliptique U, compris entre $U_{\min} = 25$ kV et $U_{\max} = 35$ kV. L'angle d'inclinaison de l'électrode β varie entre $\beta_{\min} = 15^\circ$ et $\beta_{\max} = 45^\circ$. Tandis que l'angle d'inclinaison du bras de l'électrode α varie entre $\alpha_{\min} = 20^\circ$ et $\alpha_{\max} = 40^\circ$. L'intervalle de la distance d entre l'électrode et le tapis est $d_{\min}=11$ cm et $d_{\max}=15$ cm. Ces valeurs ont été choisies après plusieurs expériences préliminaires.

Les autres caractéristiques variables du système ont été maintenues constantes : la vitesse angulaire du tapis $\Omega = 100$ tr/min, l'humidité relative de l'air $HR = 45 \pm 1\%$, la température ambiante $T = 23 \pm 1^\circ\text{C}$, la masse du produit granulaire $m = 7$ g (PVC) + 7 g (ABS) + 7 g (PA) + 7 g (HIPS) = 28 g.

Après avoir séparé le produit granulaire, la masse des granules récupérés dans chaque compartiment a été mesurée en utilisant une balance électronique avec une résolution de 0,01g.

b) Application de la méthode du plan d'expérience composite

Un ensemble de 4 sets d'expériences préliminaires a été réalisé, un facteur a été varié tandis que les autres étaient maintenus constants. Le but de ces premières expériences est de déterminer l'intervalle de variation pour chaque facteur, en préparation d'un plan factoriel composite à faces centrées, qui devrait permettre la modélisation et l'optimisation du processus de séparation. Ce sont les plans les plus utilisés car ils présentent l'avantage de faciliter la construction. Ces plans sont construits en ajoutant des points de mesures à un plan factoriel complet [102].

Un plan composite centré est défini par :

- Un plan factoriel complet de 2^k expériences ;
- n_0 répétitions au centre du domaine expérimental, dédiées à l'analyse statistique ;
- $2k$ points en étoile positionnés sur les axes de chaque paramètre. Ces points contribuent à l'évaluation des termes quadratiques du modèle polynomial, c'est-à-dire qu'ils donnent des informations sur la courbure de la surface de réponse [103-105].

Donc le nombre totale d'essais devront être menés est :

$$N = 2^k + 2.k + n_0 \quad (V.1)$$

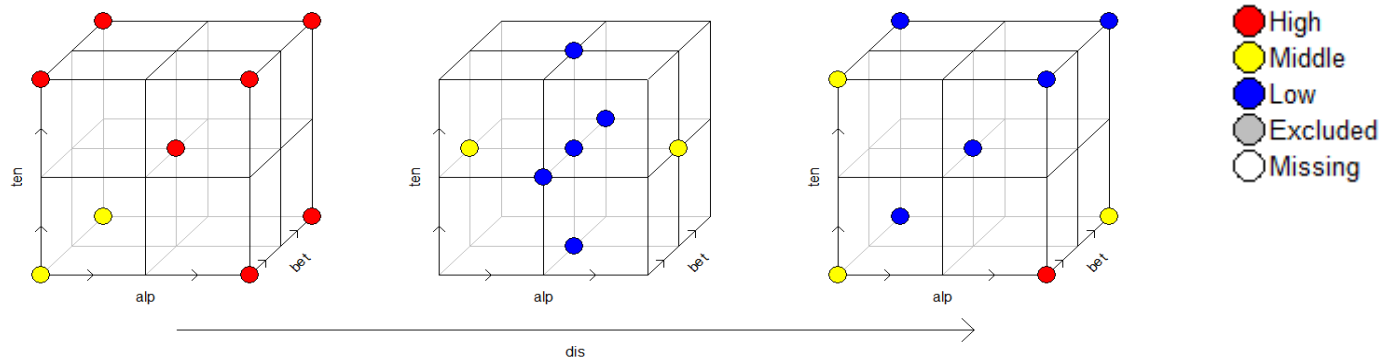


Figure V.12 Représentation graphique des 27 points expérimentaux du plan composite

Les résultats de ces expériences nous a permis de classifier les produits collectés dans chaque collecteur en quatre classes (**Tableau V.1**) :

- Produit PA récupéré dans les compartiments 1,2 et 3.
- Produit ABS Marron récupéré dans les compartiments 4 et 5.
- Produit HIPS récupéré dans les compartiments 6,7 et 8.
- produit PVC récupéré dans les compartiments 9 jusqu'à 15.

Pour le calcul de la récupération des produits, on a utilisé la formule suivante :

Exemple :

$$R_{PA} = \frac{\text{masse de PA dans les compartiments 1,2,3}}{\text{masse totale de PA dans les 15 compartiments}} \quad (V.2)$$

Tableau V.1 Récupération des produits PVC, ABS, HIPS et PA collectés dans les quinze compartiments [%].

tension	alpha	beta	distance	rec PA	recABS	rec HIPS	rec PVC
25	15	20	11	75	50	62	29
35	15	20	11	87	24	72	13
25	45	20	11	90	54	59	23
35	45	20	11	84	25	56	20
25	15	40	11	72	59	57	39
35	15	40	11	86	37	58	21
25	45	40	11	83	60	60	30
35	45	40	11	80	35	50	10
25	15	20	15	71	42	70	61
35	15	20	15	70	56	63	97
25	45	20	15	86	50	70	68
35	45	20	15	61	54	47	87
25	15	40	15	53	38	84	80
35	15	40	15	60	53	67	89
25	45	40	15	67	37	83	60
35	45	40	15	55	41	59	73
25	30	30	13	64	50	60	66
35	30	30	13	62	37	60	67
30	15	30	13	76	47	53	71
30	45	30	13	79	46	51	60
30	30	20	13	64	74	51	68
30	30	40	13	60	72	54	80
30	30	30	11	80	47	56	20
30	30	30	15	59	55	59	60
30	30	30	13	69	61	58	61
30	30	30	13	66	59	56	70
30	30	30	13	64	56	54	63

c) Représentation matricielle

La représentation matricielle d'un plan composite centré à quatre facteurs et trois mesures au centre définit les niveaux de chacun des paramètres à chaque expérience. Chaque colonne de cette matrice est associée à un facteur.

d) Calcul des coefficients

A partir de cette matrice d'expériences, il est possible de définir la matrice X permettant de calculer les coefficients du modèle. Cette matrice est une extension de la matrice d'expérience. Elle regroupe dans chaque colonne les niveaux de chacun des coefficients de l'équation du modèle pour chaque essai.

Ces nouvelles colonnes sont calculées par multiplication des colonnes de la matrice d'expérience.

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} (\sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j) \quad (V.3)$$

Il est commode d'écrire ce système sous forme matricielle sans tenir compte des erreurs expérimentales :

$$Y = X \cdot \hat{a} \quad (V.4)$$

Avec : $\hat{a} = (X^t X)^{-1} X^t Y \quad (V.5)$

Tableau V.2 Matrice d'expérience et résultats expérimentaux d'un plan composite centré

	U	α	β	d
Niveau -1	25	15	20	11
Niveau 0	30	30	30	13
Niveau 1	35	45	40	15

Les éléments du vecteur $\hat{a}$ vont être estimés en utilisant la méthode du moindre carré. Les résultats de calcul sont récapitulés dans le Tableau V.3.

Tableau V.3 Coefficients des modèles quadratiques des réponses

		Modèles			
Coefficients		Récup $R_{PA}[\%]$	Récup $R_{ABS}[\%]$	Récup $R_{HPS}[\%]$	Récup $R_{PC}[\%]$
Constante	a_0	66,18	57,34	55,49	65,06
U	a_1	-0,88	-4,33	-4,83	1,16
α	a_2	1,94	-0,22	-2,83	-3,83
β	a_3	-4	0,16	1,22	0,88
d	a_4	-8,61	1,94	4	26,11
U^2	a_{11}	-3,11	-13,18	11,75	1,24
α^2	a_{22}	11,38	-10,18	-3,24	0,24
β^2	a_{33}	-4,11	16,31	-2,74	8,74
d^2	a_{44}	3,38	-5,68	2,25	-25,25
$U \cdot \alpha$	a_{12}	-4,87	-1,68	-2,93	-0,12
$U \cdot \beta$	a_{13}	1,62	0,56	-1,68	-3,25
$U \cdot d$	a_{14}	-3	8,68	-4,31	8,37
$\alpha \cdot \beta$	a_{23}	-0,24	-1,56	1,31	-3,37
$\alpha \cdot d$	a_{24}	-0,12	-0,68	-0,06	-1,25
$\beta \cdot d$	a_{34}	-2,37	-4,43	4,18	-1,62

V.2.2. Analyse statistique des modèles

L'analyse statistique, dont la mise en œuvre est parfois redoutée par les expérimentateurs, apporte des éléments d'aide à la décision. L'analyse statistique devient donc une étape importante, les tests statistiques portent naturellement sur les résultats obtenus :

On appelle « effets » les coefficients des facteurs et ceux des interactions dans l'écriture du modèle général sur l'équation (V.10). Les calculs statistiques qui permettent de savoir si les effets sont significatifs, de calculer les intervalles de confiance ou de valider la linéarité du modèle font intervenir d'une part les résidus e_i , c'est-à-dire la différence entre la valeur expérimentale et la valeur prédite par le modèle, et d'autre part estimer sans biais de la variance commune des résidus. Cet estimateur est donné par :

$$S^2 = \frac{1}{n-p} \sum e_i^2 \quad (V.6)$$

Où : n est le nombre d'expériences réalisées et p le nombre de coefficients du modèle.

Dans ces conditions, on peut montrer que tous les effets ont la même variance donnée par :

$$S_i^2 = \frac{S^2}{n} \quad (V.7)$$

Cela apporte une grande simplification au niveau des calculs.

Le test utilisé est le test $\ll t \gg$ de *Student*. Un effet sera dit significatif (c'est-à-dire que la variable ou l'interaction qui lui est associée a une influence sur la réponse), s'il est, pour un risque donné, significativement différent de 0. On testera donc l'hypothèse :

$$H_0 = \ll a_i = 0 \gg \quad (V.8)$$

Contre l'hypothèse :

$$H_1 = \ll a_i \neq 0 \gg \quad (V.9)$$

Pour cela, on calcule :

$$t_{i=\frac{|a_i|}{s_i}} \quad (V.10)$$

On utilise alors une table dite de *Student* à $y = n-p$ degrés de liberté (n est le nombre d'expériences réalisées et p le nombre d'effets y compris la constante). On choisit un risque de première espèce α (le plus souvent 1% ou 5%) et on lit dans cette table la valeur tcrit (α , v), en utilisant la partie relative à un test bilatéral.

La règle du test est alors la suivante :

- Si $t_i > \text{tcrit}(\alpha, v)$: on rejette H_0 au risque toléré.
- Si $t_i < \text{tcrit}(\alpha, v)$ on accepte H_0 au risque toléré.
- Si l'hypothèse H_0 est acceptée, cela veut dire que l'effet en question n'est pas, au risque α significativement différent de 0 et donc que la variable qui lui est associée n'a pas d'influence sur la réponse.

La table de *Student* donne pour $v=12$, $F(crit)=2.17$, pour un risque de 5 %.

Les résultats du test pour les six modèles sont récapitulés dans les tableaux V.4, V.5, V.6, V.7 suivant :

Tableau V.4 Analyse de chaque effet du modèle pour les réponses des produits PA

Réponses	Variable	Effet	t_i	Résultats
Récupération du produit PA [%]	Constante	66,18	154,09>2.17	Significatif
	U	-0,88	2,0694<2.17	Non significatif
	α	1,94	4,5269>2.17	Significatif
	β	-4	9,3124>2.17	Significatif
	d	-8,61	20,048>2.17	Significatif
	U^2	-3,11	7,243>2.17	Significatif
	α^2	11,38	26,515>2.17	Significatif
	β^2	-4,11	9,5711>2.17	Significatif
	d^2	3,38	7,8897>2.17	Significatif
	U α	-4,87	11,35>2.17	Significatif
	U β	1,62	3,7832>2.17	Significatif
	U d	-3	6,9843>2.17	Significatif
	$\alpha \beta$	-0,24	0,582<2.17	Non significatif
	αd	-0,12	0,291<2.17	Non significatif
	βd	-2,37	5,5293>2.17	Significatif

Tableau V.5 Analyse de chaque effet du modèle pour les réponses des produits ABS Marron

Réponses	Variable	Effet	t_i	Résultats
Récupération du produit ABS Marron [%]	Constante	55,49	97,312>2.17	Significatif
	U	-4,83	7,2934>2.17	Significatif
	α	-2,83	5,0954>2.17	Significatif
	β	1,22	2,198>2.127	Significatif
	d	4	7,1935>2.17	Significatif
	U^2	11,75	12,289>2.17	Significatif
	α^2	-3,24	2,0981<2.17	Non significatif
	β^2	-2,74	1,1989<2.17	Non significatif
	d^2	2,25	7,793>2.17	Significatif
	U α	-2,93	5,2827>2.17	Significatif
	U β	-1,68	3,0348>2.17	Significatif
	U d	-4,31	7,7555>2.17	Significatif
	$\alpha \beta$	1,31	2,3604>2.17	Significatif
	αd	-0,06	0,1124<2.17	Non significatif
	βd	4,18	7,5307>2.17	Significatif

Tableau V.6 Analyse de chaque effet du modèle pour les réponses des produits HIPS

Réponses	Variable	Effet	t_i	Résultats
Récupération du produit HIPS [%]	Constante	55,49	97,312>2.17	Significatif
	U	-4,83	7,2934>2.17	Significatif
	α	-2,83	5,0954>2.17	Significatif
	β	1,22	2,198>2.127	Significatif
	d	4	7,1935>2.17	Significatif
	U^2	11,75	12,289>2.17	Significatif
	α^2	-3,24	2,0981<2.17	Non significatif
	β^2	-2,74	1,1989<2.17	Non significatif
	d^2	2,25	7,793>2.17	Significatif
	U α	-2,93	5,2827>2.17	Significatif
	U β	-1,68	3,0348>2.17	Significatif
	U d	-4,31	7,7555>2.17	Significatif
	$\alpha \beta$	1,31	2,3604>2.17	Significatif
	αd	-0,06	0,1124<2.17	Non significatif
	βd	4,18	7,5307>2.17	Significatif

Tableau V.7 Analyse de chaque effet du modèle pour les réponses des produits PVC

Réponses	Variable	Effet	t_i	Résultats
Récupération du produit PVC [%]	Constante	65,06	63,888>2.17	Significatif
	U	1,16	1,1456<2.17	Non significatif
	α	-3,83	3,7642>2.17	Significatif
	β	0,88	0,8729<2.17	Non significatif
	d	26,11	25,64>2.17	Significatif
	U^2	1,24	1,2184<2.17	Non significatif
	α^2	0,24	0,2364<2.17	Non significatif
	β^2	8,74	8,5831>2.17	Significatif
	d^2	-25,25	24,804>2.17	Significatif
	U α	-0,12	0,1227<2.17	Non significatif
	U β	-3,25	3,1914>2.17	Significatif
	U d	8,37	8,2239>2.17	Significatif
	$\alpha \beta$	-3,37	3,3141>2.17	Significatif
	αd	-1,25	1,2275<2.17	Non significatif
	βd	-1,62	1,5957<2.17	Non significatif

V.2.3. Analyse des variances des modèles

L'analyse de la variance consiste à comparer à l'aide d'un test F la somme des carrés des écarts due uniquement à la régression (donc au modèle), avec la somme des carrés des résidus.

On précise ces notions en introduisant un vocabulaire spécifique à l'analyse de variance. On notera par la suite Y_i les réponses observées lors de la réalisation des expériences et Y_i^{est} la réponse estimée à l'aide du modèle linéaire. On notera, de même, Y_{456} la moyenne des réponses. On définit alors trois types de "variations" :

a. Variation due à la liaison linéaire

$$SCEL = \sum (Y_i^{est} - Y_{moy})^2 \quad (V.11)$$

SCEL se lit : "somme des carrés des écarts dues à la liaison".

b. Variation résiduelle

$$SCER = \sum (Y_i - Y_i^{est})^2 \quad (V.12)$$

SCER se lit : "somme des carrés des écarts des résidus".

c. Variation totale

$$STCE = SCEL + SCER \quad (V.13)$$

STCE se lit : "somme totale des carrés des écarts".

On définit un "carré moyen" comme étant le quotient d'une somme de carrés par son degré de liberté.

SCEL aura $(p - 1)$ degrés de liberté (p est le nombre de coefficients estimé à partir du modèle).

SCER aura $(n - p)$ degrés de libertés (n est le nombre d'expériences réalisées).

SCET aura $(n - 1)$ degrés de liberté.

En outre, on note CML le carré moyen associé à SCEL, et CMR le carré moyen associé à SCER. Le tableau de l'analyse de variance se présente alors de la façon suivante :

Tableau V.8 Tableau de l'analyse de régression

Variation due a	Somme des carrés	DDL	Carré moyen	F
Liaison	SCEL	P-1	$\frac{SCEL}{P-1} = CML$	$F_{obs} = \frac{CML}{S^2}$
Résidus	SCER	n-p	$\frac{SCEE}{n-p} = S^2$	
Totale	SCET	n-1		

Le test F permet alors de comparer pour un risque fixé à l'avance le F_{obs} que l'on a calculé dans le tableau précédent avec un F (critique) lu dans la table de *Fisher-Snedecor* avec

($p-1$) et ($n - p$) degrés de liberté. Le test est le suivant :

- Hypothèse H_0 : " les deux carrés moyens sont de même grandeur" et donc la régression n'est pas significative.
- Hypothèse H_1 : " le carré moyen dû à la régression est significativement plus grand que le carré moyen dû aux résidus" donc la régression est globalement significative.

La règle du test est alors pour un risque α choisi:

- Si F_{obs} est inférieur au F (critique), on accepte l'hypothèse H_0 .
 - Si F_{obs} est supérieur au F (critique), on accepte l'hypothèse H_1 avec la confiance $1 - \alpha$.
- Pour l'analyse de la variance des modèles on trouve :

Tableau V.9 Analyse de variance pour les deux réponses

Réponses	Variation due à	Somme des	DDL	Carré moyen	F_{obs}
RPA [%]	Liaison	0.293	$v_1=1$	0.021	$F_{obs} = \frac{CML}{S^2}$ $= 29.187$
	Résidus	0.006	$v_2=1$	0.00	
	Totale	0.299	26	0.011	
RABS [%]	Liaison	0.383	$v_1=1$	0.027	$F_{obs} = \frac{CML}{S^2}$ $= 45.192$
	Résidus	0.007	$v_2=1$	0.001	
	Totale	0.390	26	0.015	
RHIPS [%]	Liaison	0.234	$v_1=1$	0.017	$F_{obs} = \frac{CML}{S^2}$ $= 36.064$
	Résidus	0.006	$v_2=1$	0.000	
	Totale	0.240	26	0.009	
RPVC [%]	Liaison	1.645	$v_1=1$	0.118	$F_{obs} = \frac{CML}{S^2} = 41.97$
	Résidus	0.034	$v_2=1$	0.003	
	Totale	1.679	26	0.065	

La table de Fisher- Snédecor donne pour $v_1=14$ et $v_2=12$, $F_{crit} = 2.17$, pour risque de 5%.

On a dans les six réponses : $F_{obs} > (F_{crit} = 2.17)$ donc on accepte l'hypothèse H_1 de quadratique du modèle.

V.2.4 Qualité descriptive du modèle

Le tableau de l'analyse de régression permet d'établir immédiatement le coefficient de détermination à partir de la relation suivante :

Ce coefficient traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, les coefficients de détermination appartiennent à l'intervalle suivant :

$$R^2 = \frac{SCEL}{STCE} = 1 - \frac{SCER}{STCE} \quad (V. 14)$$

$$Q^2 = 1 - \frac{PRESS}{STCE} \quad (V. 15)$$

PRESS est l'acronyme de la locution anglaise PRediction Error Sum of Squares. Plus la valeur de PRESS est faible, plus le modèle est prédictif.

Ces coefficients traduisent la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, le coefficient de détermination appartient à l'intervalle suivant :

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

$$-\infty \leq Q^2 \leq 1$$

Les coefficients trouvés sont mentionnés dans le tableau V.10.

Tableau V.10 Résultats des coefficients Q^2 et R^2

	Récup PA [%]	Récup HIPS [%]	Récup ABS [%]	Récup PVC [%]
Q^2	88.2	88.7	90.1	88.3
R^2	98	97.7	98.1	98

V.2.5 Influence des facteurs choisis sur la récupération

Le modèle mathématique proposé par MODDE.05 est un modèle du second degré qui obéit à l'équation suivante :

$$y = a_0 + a_1U + a_2\alpha + a_3\beta + a_4d + a_{12}U * \alpha + a_{13}U * \beta + a_{14}U * d + a_{23}\alpha * \beta + a_{24}\alpha * d + a_{34}\beta * d + a_{11}U^2 + a_{22}\alpha^2 + a_{33}\beta^2 + a_{44}d^2 \quad (V.16)$$

a. Récupération du produit PA

$$R_{PA} = 154 + 4.53\alpha + 9.31\beta + 20d + 7.24U^2 + 26.5\alpha^2 + 9.57\beta^2 + 7.89d^2 + 11.3U * \alpha + 3.78U * \beta + 6.98U * d + 5.53\beta * d \quad (V.17)$$

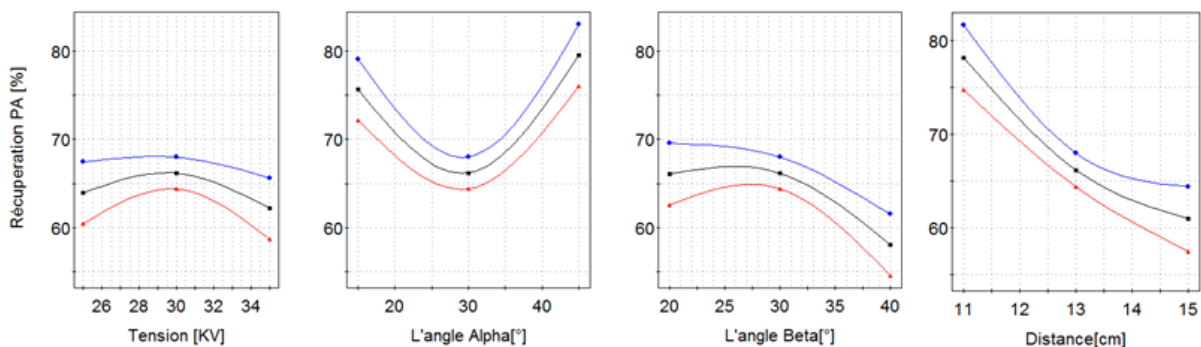


Figure V.13 Effets de chaque facteur sur la récupération du PA

D'après l'analyse de la figure V.13 on constate que :

- La variation de la tension n'influe pas sur le taux de récupération du PA.
- La récupération diminue on augmentant l'angle α , arrivant à 30°, elle devient proportionnelle.
- La récupération est inversement proportionnelle à la distance.

- Concernant l'influence de l'angle β , on a une bonne récupération à l'intervalle $20^\circ < \beta < 30^\circ$.

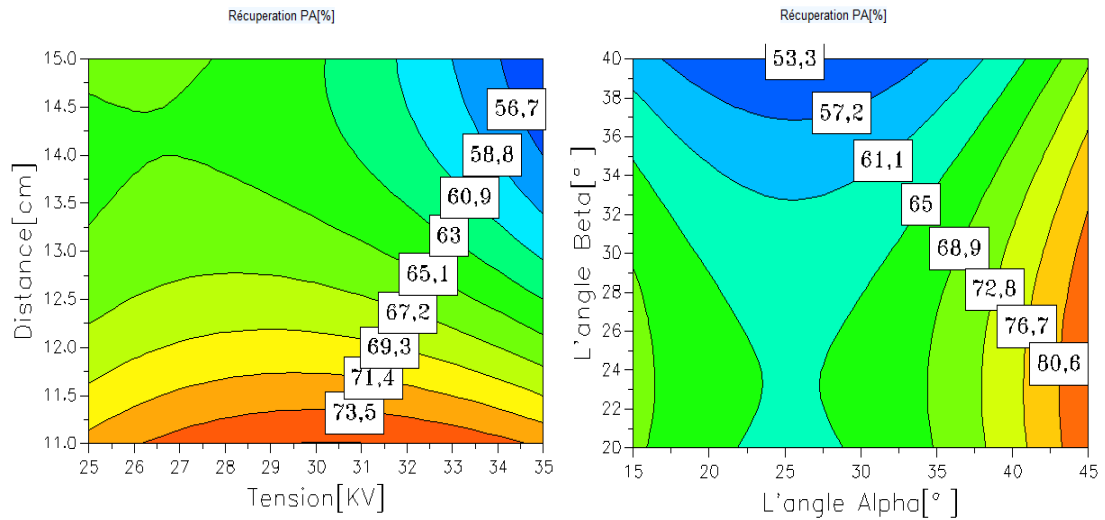


Figure V.14 Iso- contours de (PA) prédits par le logiciel MODDE 5.0 en fonction des paramètres (tensions et distances, l'angle alpha et beta)

- En fonction des facteurs tension distance la récupération du produit PA atteint une valeur maximale de 73.5% pour une distance de 11cm.
- La variation de la tension est non significative.
- Une récupération de 80.6 % est obtenue à un maximum de l'angle α et un angle β inférieur à 31° .

b. Récupération du produit HIPS

$$R_{HIPS} = 134 + 12.2U + 7.37\alpha + 2.41\beta + 10.2d + 28.6U^2 + 7.46\alpha^2 + 6.44\beta^2 + 5.63d^2 + 6.49U * \alpha + 3.47U * \beta + 11U + 3.77\alpha * \beta + 9.5\beta * d \quad (V.18)$$

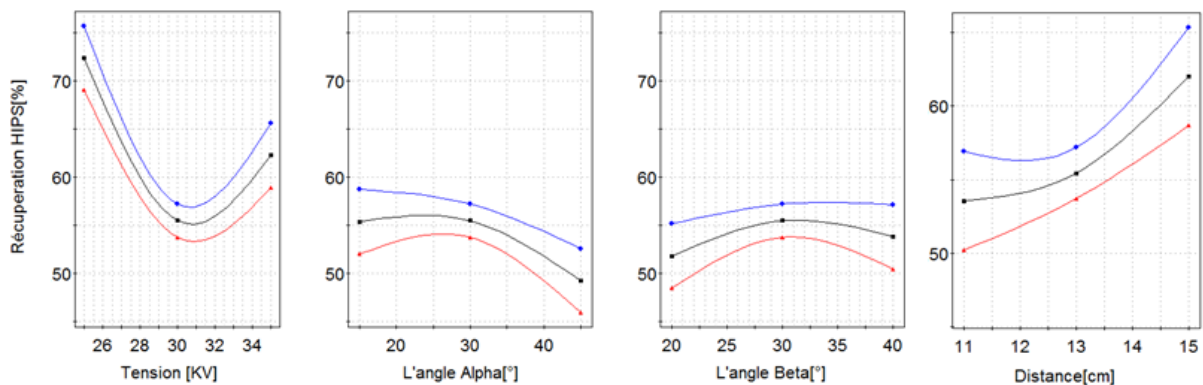


Figure V.15 Effets de chaque facteur sur la récupération du HIPS

D'après l'analyse de la figure V.15 on constate que :

- La meilleure récupération est obtenue par la plus faible tension 26 kV, et par la plus grande distance 15 cm.
- L'influence d'angles α et β est légèrement significative sur la réponse.

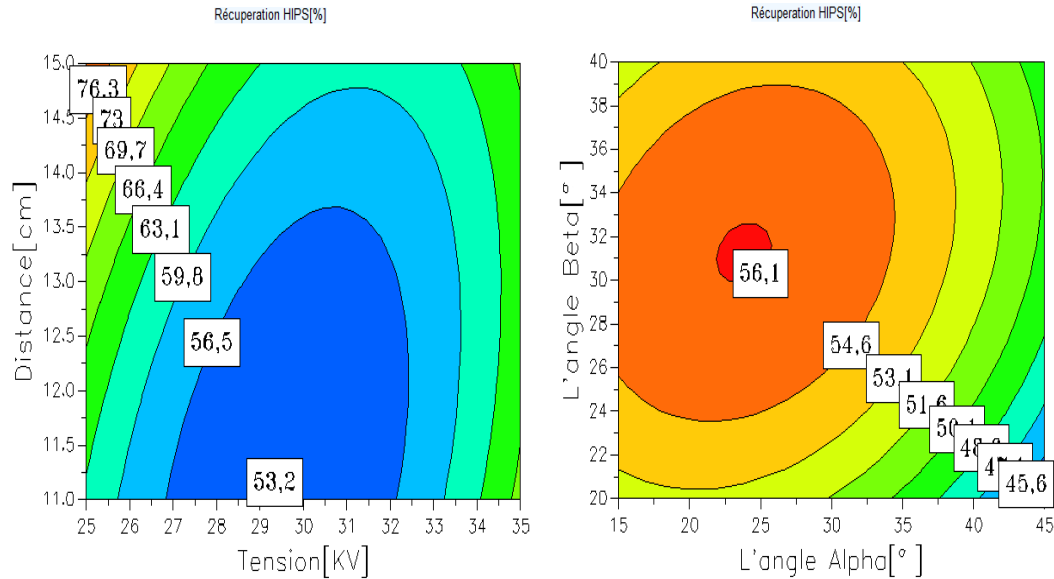


Figure V.16 Iso- contours de (HIPS) prédits par le logiciel MODDE 5.0 en fonction des paramètres (tensions et distance, l'angle alpha et beta)

D'après l'analyse de la figure V.16 on constate que :

- La plus grande récupération 76.3 % correspond à des basses valeurs de la tension et des grandes valeurs de la distance.
- L'angle α et β n'influent pas considérablement sur la récupération de l'HIPS.

c. Récupération du produit ABS Marron

$$R_{ABS} = 121 + 9.15U + 4.11d + 27.9U^2 + 21.5\alpha^2 + 34.5\beta^2 + 12d^2 + 3.56U * \alpha + 18.4U * d + 3.3\alpha * \beta + 9.37\beta * d \quad (V.19)$$

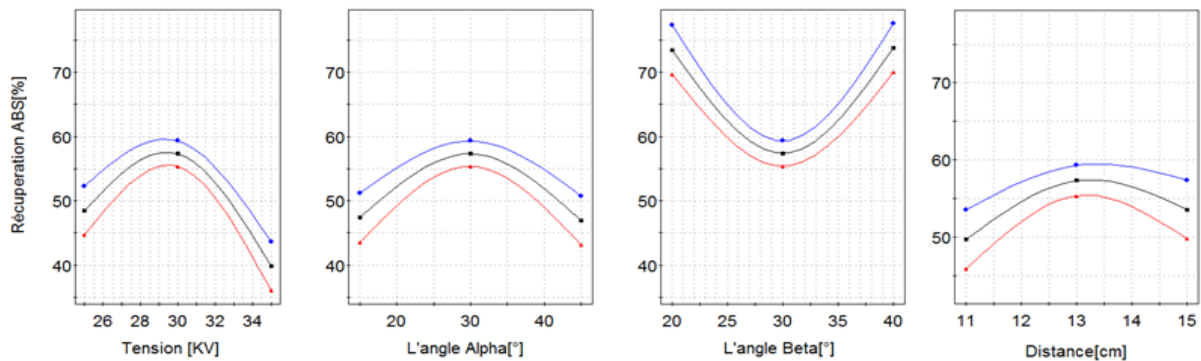


Figure V.17 Effets de chaque facteur sur la récupération d'ABS Marron

D'après l'analyse de la figure V.17 on constate que :

Le taux de la récupération est proportionnel avec la tension, l'angle α et la distance jusqu'à leur valeur centrale, subséquemment la récupération diminue. Contrairement à l'influence de l'angle β .

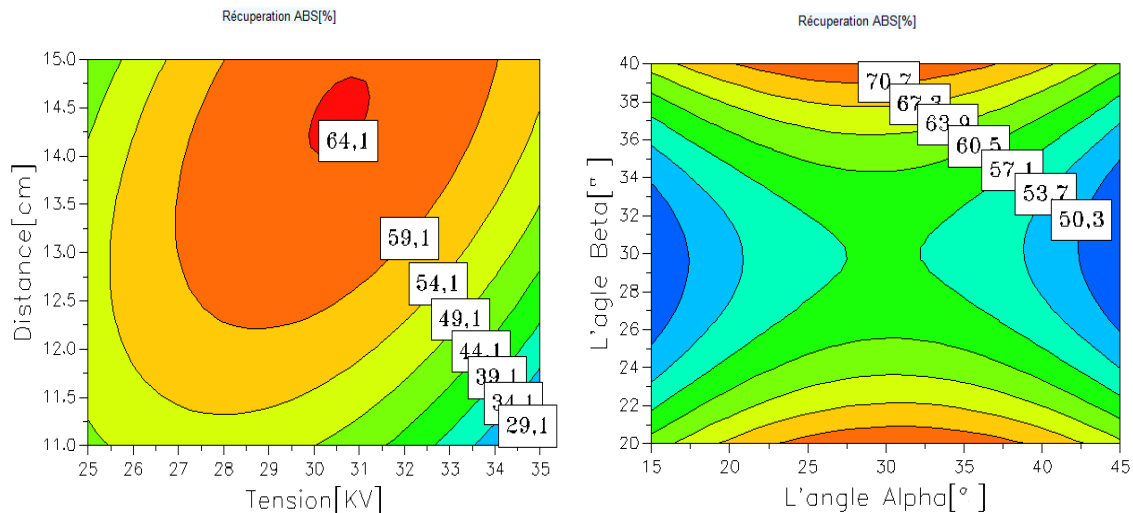


Figure V.18 Iso- contours (d'ABS) prédits par le logiciel MODDE 5.0 en fonction des paramètres (tensions et distance, l'angle alpha et beta)

- L'effet des facteurs tension, distance est visible comme montre la figure V.18 Une récupération de 64.1 % est obtenue pour une tension de 30 KV et une distance de 14cm.
- Concernant l'angle β les résultats montrent que la meilleure récupération est obtenue pour une inclinaison supérieure à 40° ou bien inférieure à 20°. par contre l'angle α est pratiquement non significatif.

d. Récupération du produit PVC

$$R_{PVC} = 63.9 + 3.76\alpha + 25.6d + 8.58\beta^2 + 24.8d^2 + 3.19U * \beta + 8.22U * d + 3.31\alpha * \beta \quad (V.20)$$

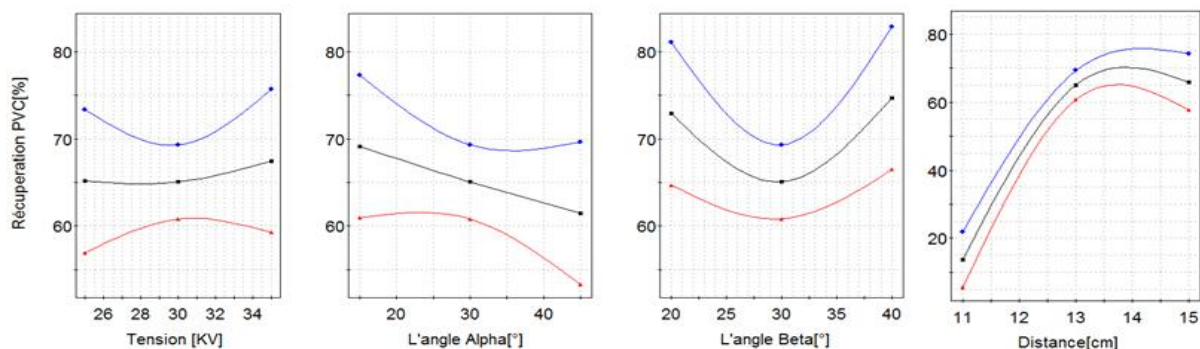


Figure V.19 Effets de chaque facteur sur la récupération du PVC

D'après la figure V.19 on constate que :

- La variation de la tension, l'angle α et l'angle β n'influe pas considérablement sur le taux de la récupération.
- La récupération est proportionnelle à la distance jusqu'à une valeur de 14cm.

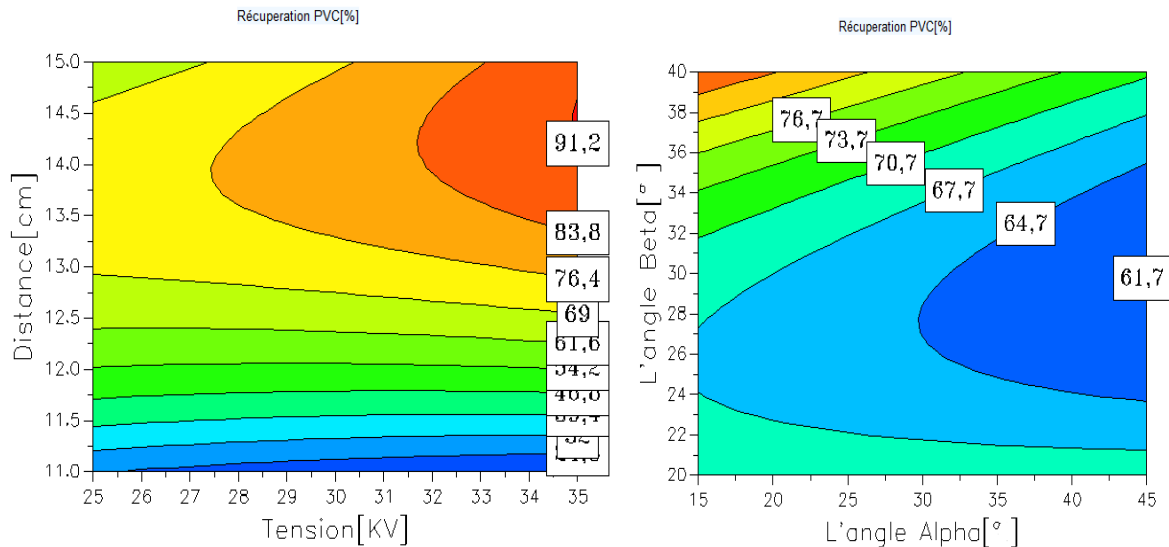


Figure V.20 Iso- contours de (PVC) prédits par le logiciel MODDE 5.0 en fonction des paramètres (tensions et distance, l'angle alpha et beta)

- Une meilleure récupération correspond à un maximum de tension, de distance et d'angle β , et un minimum d l'angle α .

V.2.6 Détermination du point de fonctionnement optimal

Le logiciel MODDE 5.0 (*MODELing and DESign*) qui est un programme exécutable sous Windows (réalisé par *Umetrics AB, Suède*) pour la création et l'évaluation statistique des plans d'expériences [106], propose des réponses prédites en fonction des paramètres étudiés :

- tension appliquée [Kv]
- L'angle Alpha [°]
- L'angle Beta [°]
- Distance [cm]

La meilleure séparation électrostatique correspond aux valeurs optimales suivantes (figure V.21):

- Tension= 32,92Kv
- L'angle Alpha= 18°
- L'angle Beta= 20°
- Distance= 14.46cm.

	Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
1	tension	Free		25	35
2	alpha	Free		15	45
3	beta	Free		20	40
4	distance	Free		11	15

	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1	rec PA	Maximize	1	88,8102	92,5602	
2	recABS	Maximize	1	71,3424	76,3119	
3	rec HIPS	Maximize	1	83,2475	87,0086	
4	rec PVC	Maximize	1	87,4162	95,5773	

Iteration: 5002 Iteration slider:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	tension	alpha	beta	distance	rec PA	recABS	rec HIPS	rec PVC	iter	log(D)
2	25	45	34,2718	11,0019	89,0379	45,5575	62,4792	22,6025	5000	1,6066
3	25	18,0112	40	14,9552	51,7806	42,1577	83,4812	76,4169	5000	1,6332
4	32,4204	25,3139	20	14,327	61,708	71,541	53,6847	85,76	5000	1,5698
5	28,306	25,43	40	13,4788	55,322	71,4384	59,8376	81,5713	5002	1,5874
6	32,9245	18	20	14,4693	67,3859	65,0755	55,5961	87,5777	5002	1,4803
7	32,7718	27,4519	20	14,359	60,3509	71,4285	53,5867	86,323	5001	1,5882
8	29,8136	23,6639	40	13,6572	56,0917	71,4152	57,2488	83,2464	5001	1,6032

Figure V.21 Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0

Les résultats expérimentaux obtenus en utilisant l'optimisation donnée par le logiciel sont comme dans le tableau V.11.

Tableau V.11 Comparaison entre les résultats prédits par le logiciel et les résultats expérimentaux

	Tension [kV]	Angle α [°]	Angle β [°]	Distance [cm]	Rec PA (%)	Rec ABS%	Rec HIPS%	Rec PVC%
Résultats du logiciel	32.92	18	20	14.46	67.38%	65.07%	55.59%	87.57%
Résultats expérimentaux	33	18	20	14	60.8%	58.89%	49.2%	81.3%

Conclusion

La majorité des particules chargées triboélectriquement par un dispositif à cylindre tournant, sont soumises à des collisions de type particule/paroi et particule /particule. Il suffit juste de bien choisir la nature du cylindre pour avoir le taux de chargement nécessaire à la séparation électrostatique.

Pour les quatre matériaux choisis PA, PVC, HIPS et ABS, la vitesse du cylindre est le facteur le plus influent sur la charge acquise. L'influence des deux autres paramètres (temps et masse) est relative au type du produit à charger.

Ces expériences ont pour but d'évaluer la charge acquise par les matériaux granulaires isolants dans le dispositif à cylindre tournant. Afin de l'optimiser, il s'agit de choisir le plus grand écart de la charge des quatre produits, et non pas de la plus grande charge acquise par ces derniers.

La méthode des plans d'expériences, permet de délimiter les intervalles de variation des facteurs variables et ensuite de modéliser le rendement du séparateur électrostatique en proposant un modèle mathématique qui est validé en vérifiant des critères bien définis. Les modèles obtenus ont été ensuite utilisés pour déterminer les valeurs optimales des différents facteurs et pour prédire le rendement du séparateur qui serait obtenu pour n'importe quelles valeurs de ces facteurs.

Les résultats obtenus confirment que les paramètres étudiés (la tension appliquée, l'inclinaison de l'électrode et du bras, la distance entre le tapis et l'électrode) ont une influence importante sur la récupération du produit quaternaire PA, HIPS Blanc, ABS Marron et PVC collectées et donc sur l'efficacité de notre système.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

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.

La première partie de l'étude nous avons défini l'effet tribo-électrique qui est un phénomène électrostatique difficilement contrôlable. Et pour éclairer cette présentation nous avons rappelé quelques dispositifs destinés au chargement ainsi que la séparation électrostatique.

Les déchets, et les DEEE en général, sont des mélanges de multiples conducteurs et isolants. C'est pourquoi, la séparation électrostatique de mélanges de plusieurs isolants a été étudiée. Les expériences montrent que de telles séparations sont faisables avec des procédés peu énergivores et efficaces comme le séparateur électrostatique à tambour Prodecologia qui nous a permis de séparer un mélange ternaire.

Nous sommes arrivés à séparer quatre types de produits de plastique avec le séparateur à tapis roulant, avec lequel on a associé une nouvelle technique de chargement triboélectrique par glissement à tube, dont on a utilisé principalement deux tubes métalliques en aluminium et en inox, avec lesquels nous avons pu mieux contrôler le comportement des granules et obtenir des résultats satisfaisants.

L'étude de la séparation électrostatique de mélanges de plusieurs isolants a mis en exergue la méthode de chargement est basée par glissement (par friction), son avantage est d'éviter les contacts entre les particules, donc il est plus de type « particule-particule » que « particule-parois ». Le rendement de séparation avec ce procédé de chargement est meilleur que le dispositif à lit fluidisé pour les deux échantillons utilisés.

La séparation d'un mélange comprenant des granules de PA, PC, HIPS et PVC et PA, ABS Marron, PEHD Noir et HIPS Gris sont meilleure en termes de pureté et de récupération lors du chargement des particules par contact glissant avec la paroi métallique que dans le cas d'un dispositif à lit fluidisé.

Il faut admettre comme habituellement que dans le cas de toute étude fondamentale que cette thèse pose plus de questions qu'elle n'en répond. Ce constat nous amène donc à suggérer plusieurs travaux futurs afin de résoudre les interrogations survenues au courant des travaux de cette thèse. Voici quelques propositions :

1. Tester d'autres types de matériaux en utilisant le même principe de chargement qui basé sur le glissement.
2. Créer d'autres dispositifs de chargement triboélectrique afin de mieux contrôler le comportement des granules.
3. Amélioration de l'installation de séparation tribo-aéro-électrostatique, en tenant compte de la valeur limite de la tension d'alimentation et les autres paramètres contrôlable.
4. Rendre les dispositifs semi-automatique en réalisant une partie commande et une partie analyse des données afin d'éviter les pertes dans les systèmes de chargement triboélectrique et séparation électrostatique.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] J.B.Bahers, Dynamique des filières de récupération-recyclage et écologie territoriale: l'exemple du traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) en Midi-Pyrénées, Toulouse: Université de Toulouse, 2012.
- [2] A. Deprouw, M. Jover, S. ADEME et E. Fangeat, «Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques. Données 2016,» Deloitte développement durable, 2017.
- [3] E. ADEME, « Enquête sur l'état de l'art et les perspectives des techniques de tri automatique des déchets,» 2003.
- [4] H. Pratt, « « Plastics from residential electronics recycling ». In: The report analyzes the types of plastics found in consumer electronics and the current technologies available to recycle these plastics» American Plastics Council, 2000.
- [5] M. Radu, L. Dascalescu, S. Cănanău et A. Rădulescu, «La séparation tribo-électrostatique des déchets électriques,» Revista constructia, 2003.
- [6] C. DRAGAN, Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aero-électrostatique de matériaux plastiques granulaires, 2010.
- [7] A. Iuga, R. Morar, A. Samuila et L. Dascalescu, «Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes» IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, vol. 148, pp. 47-54, 2001.
- [8] A. Tilmatine, S. Flazi, K. Medles, Y. Ramdani et L. Dascalescu, «Séparation électrostatique : complément des procédés mécaniques de recyclage des déchets industriels,» Journal of Electrostatics, vol. 61, pp. 21-30, 2004.
- [9] I. Inculet, G. Castle et J. Brown, «Electrostatic separation of plastics for recycling,» Science & Technology , vol. 16, pp. 1691-100, 1998.
- [10] L. Dascalescu, A. Samuila, A. Mihalcioiu, S. Bente et A. Tilmatine, «Robust design of electrostatic separation processes,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, pp. 715-720, 2005.
- [11] A. Tilmatine, S. Bendimered, F. Boukhoulda, K. Medles et L. Dascalescu, «Electrostatic separators of particles. Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures» Waste Management, vol. 29, pp. 228-232, 2009.
- [12] J. FOURNIER , N. HAVARD, M. LACRAMPE, M. RYCKEBUSCH et P. KRAWCZAK « Conduite adaptative du procédé d'injection des thermoplastiques» techniques-ingenieur,2006.
- [13] D. Taylor et P. Secker, «Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements» Baldock, UK: Research Studies Press, United kingdom, 1994.

- [14] W. R. Harper, «Contact and Frictional Electrification» Oxford University Press, London, 1967.
- [15] W. D. Greason, « Investigation of a test methodology for triboelectrification» Journal of Electrostatics, vol. 49, p. 245–256, 2000.
- [16] D. K. Davies, «Charge generation on dielectric surfaces,» Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 2, pp. 1533-1537, 1969.
- [17] L. Lee, «Dual mechanism for metal polymer contact electrification» Journal of Electrostatics , vol. 32, pp. 1-29, 1994.
- [18] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu et L. Dascalescu, «Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device» Journal of Electrostatics, vol. 63, pp. 937-942, 2005.
- [19] G. Buda, A. Samuila, S. Atroune, M. Bilici et L. Dascalescu, «Set point identification of a tribocharging process for mixed granular solids» Journal of Electrostatics, vol. 71, pp. 407-412, 2013.
- [20] G. S. P. Castle, «Contact charging between insulators» Journal of Electrostatics, vol. 40, pp. 13-20, 1997.
- [21] A. F. Diaz et 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.
- [22] C. H. Park, H. S. Jeon, B. G. Cho et J. K. Park, «Triboelectrostatic separation of covering plastics in chopped waste electric wire» Polymer Engineering and Science, vol. 47, pp. 1975-1982, 2007.
- [23] C. H. Park, J. K. Park, H. S. Jeon et 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.
- [24] É. Lévy, Dictionnaire de Physique, Paris, 1988.
- [25] F. ORTMANN, W. SCHMIDT, G. Wolf et F. BECHSTEDT, «Attracted by long-range electron correlation: adenine on graphite» Physical review letters, vol. 95, n° 118, p. 186101, 2005.
- [26] H. C. Hamaker, «The London-van der Waals attraction between spherical particles» Physica, vol. 4, p. 1058, 1937.
- [27] R. Pascoe et B. Connel, « Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation» Minerals Engineering, vol. 16, pp. 1205-1212, 2003.
- [28] M. Blajan, R. Beleca, A. Iuga et L. Dascalescu, «Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation» IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 46, p. 1558 – 1563, 2010.
- [29] L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila et L. Dascalescu, «Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation» IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 44, pp. 1044-1051, 2008.

- [30] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga et A. Samuila, «Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices» IEEE Trans. Diel. Electr. Insul, vol. 18, pp. 1476-1483, 2011.
- [31] L. Calin, A. Mihalcioiu, A. Iuga et L. Dascalescu, «Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification» Part.Sci. & Technol, vol. 25, pp. 205-211, 2007.
- [32] C. Dragan, O. Fati, M. Radu, L. Calin, A. Samuila et L. Dascalescu, «Tribocharging of mixed granular plastics in a fluidized bed device» IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 47, pp. 1922-1928, 2011.
- [33] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami et L. Dascalescu, «Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials» J. Electrostat, vol. 69, pp. 631-637, 2011.
- [34] M. Sarki et A. Masumoto, «Electrostatic separation of chopped waste electric cables» Journal of Environmental Engineering, vol. 2, pp. 227-236, 2007.
- [35] A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S. Bendimerad, M. Miloudi et K. Medles, «Experimental investigation of electrostatic separators of plastic particles using different charging devices» Separation Science and Technology, vol. 49, n° 13, pp. 464-468, 2014.
- [36] M. Zelmat, A. Rizouga, K. Medles et L. Dascalescu, «Experimental comparative study of different tri-bocharging devices for triboelectric separation of insulating particles» IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 49, pp. 1113-1118, 2013.
- [37] J. Li, G. Wu et Z. Xu, «Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation» Waste Management, vol. 35, pp. 36-41, 2014.
- [38] S. Masuda, M. Toraguchi, T. Takahashi et K. Haga, «Electostatic beneficiation of coal using a cyclone-tribocharger» IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 19, pp. 789-793, 1983.
- [39] 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(5), p.1584 -1589, October 2013.
- [40] Y. Higashiyama et K. Asano, «Recent progresses in electrostatic separation technology» Part. Sci. & Technol, vol. 16, pp. 77-90, 1998.
- [41] S. Kazmierczak, P. Anglaret et J. Filippi, Technologie génie chimique. Tome 3, Centre Régional De Documentation Pédagogique, 1989.
- [42] S. Escalante, G. Touchard et 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.
- [43] L. Dascalescu, M. Bilici, C. Dragan, A. Samuila, Y. Ramdani et 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.

- [44] C. Dragan, M. Bilici, S. Das, A. Samuila et L. Dascalescu., « Tribocharging of insulating powders in the annular ducts of pneumatic devices» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, pp. 1138-1143, 2010.
- [45] C. Dragan, A. Samuila, S. Das, D. Iancu, M. Bilici et 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.
- [46] Z. Chen, F. Liu, L. Wang, Y. Li, R. Wang et Z. Chen, «Tribocharging properties of wheat bran fragments in air-solid pipe flow» Food Research International, vol. 62, pp. 262-271, 2014.
- [47] F. S. Ali, I. I. Inculet et A. Tedoldi, «Charging of polymer powder inside a metallic fluidized bed,» Journal of Electrostatics, vol. 45, pp. 199-211, 1999.
- [48] W.Aksa, K.Medles, M.Rezoug, M.Miloudi et L. Dascalescu, « Procédé de séparation électrostatique à deux étages pour l'amélioration de la pureté des matériaux isolants obtenus des déchets d'équipements électriques et électroniques,» chez Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Genie Electrique (ConFrFGE), Montréal,Canada , Mai 2012.
- [49] W. Jing et M. Realff, « Design and optimization of free-fall electrostatic separators for plastics recycling,» AIChE Journal, vol. 49, pp. 3138-3149, 2003.
- [50] H. Daiku, T. Inoue, M. Tsukahara et 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, Tokyo, Japan, pp. 562-565, 2001.
- [51] Y. Fujita, M. Kumagai et Y. Aizawa, «Friction electrifying-type electrostatic sorting apparatus,» US Patent 5746320, vol. 1, pp. 1-8, 1998.
- [52] A. Tilmatine, A. Benabboun, Y. Brahami, A. Bendaoud, M. Miloudi et 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.
- [53] H. Ban, T. X. Li, J. C. Hower, J. L. Schaefer et J. M. Stencel, « Dry triboelectrostatic beneficiation of fly ash,» Fuel, vol. 76, pp. 801-805, 1997.
- [54] D. Tao et X. Jiang, «Electrostatic particle charger, electrostatic separation system and related methods », Patent Application Publication United States, vol. 10, pp. 1-7, 2006.
- [55] S. Messal, A. Mekhalef, K. Medles, T. Zeghloul et L. Dascalescu, «Factors that influence the efficiency of a tribo-aero-electrostatic separator for finely grinded matter,» chez Proc. Electrostatics Joint Conference, West Lafayette, USA, 2016.
- [56] S. Trigwell, N. Grable, C. U. Yurteri, R. Sharma et 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.

- [57] M. F. Boukhoulda, M. Miloudi, K. Medles, M. Rezoug, A. Tilmatine et L. Dascalescu, «Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, pp. 2375-2381, 2013.
- [58] A. Mekhalef, K. Medles, F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal et 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.
- [59] K. Freegard, G. Ant et S. Frisch, «WEEE Plastics Separation Technologies,» DEFRA Waste and Resources Evidence Program, 2007.
- [60] M. Younes, H. Sayah, M. Younes, A. Samuila et 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.
- [61] L. Brands, P. M. Beier et I. Stahl, «Electrostatic separation,» Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley, New York, 2000.
- [62] A. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, R. Morar, R. Belaca, S. Das et L. Dascalescu, «Removal of metallic particles from acrylonitrile butadiene styrene wastes using electrostatic separation methods,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, pp. 322-329, 2011.
- [63] A. Iuga, S. Vlad, M. Mihailescu et L. Dascalescu, «A laboratory plate/screen-type electrostatic separator for granular mixtures: design, engineering and application,» Particulate Science and Technology, vol. 22, pp. 275-283, 2004.
- [64] T. Zeghloul, S. Touhami, G. Richard, M. Miloudi, O. Dahou et 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.
- [65] L. Dascalescu, T. Zeghloul et 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, pp. 53-74, 2016.
- [66] S. Vlad, A. Iuga et L. Dascalescu, «Modelling of conducting particle behaviour in plate-type electrostatic separators,» Journal of Physics D : Applied Physics, vol. 33, pp. 127-133, 2000.
- [67] S. Vlad, A. Iuga et L. Dascalescu, «Numerical computation of conducting particle trajectories in plate-type electrostatic separators,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, pp. 66-71, 2003.
- [68] S. Das, K. Medles, M. Younes, C. Dragan et L. Dascalescu., «Separation of fine granular mixtures in S-plate-type electrostatic separators,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, pp. 1137-1143, 2007.
- [69] A. Samuila, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu et L. Dascalescu, «Electrostatic technologies for materials recovery in high-intensity electric fields,» 2006.

- [70] T. Butunoi, G. Gagi, A. Samuila, V. Neamtu, R. Morar, L. Dascalescu et A. Iuga, « Electric and electronic equipment of a research-oriented electrostatic separator,» chez 12th International Conference OPTIM 2010, Brasov, Roumanie, 2010.
- [71] A. Iuga, L. Dascalescu, R. Morar, I. Csorvassy et V. Neamtu, « Corona-electrostatic separators for recovery of waste non-ferrous metals,» Journal of Electrostatics, vol. 23, pp. 235-243, 1989.
- [72] L. Dascalescu, A. Mizuno, R. Tobazeon, A. Iuga, R. Morar, M. Mihailescu et 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.
- [73] L. Dascalescu, R. Tobazeon et P. Atten, « Behaviour of conductive particles in corona-dominated electric fields,» Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 28, pp. 1611-1618, 1995.
- [74] S. Das, A. Samuila, C. Dragan et L. Dascalescu, « Behaviour of charged insulating particles in contact with a rotating roll electrode,» Journal of Electrostatics, vol. 67, pp. 189-192, 2009.
- [75] A. Iuga, M. Mihailescu, A. Cocis et L. Dascalescu, «Particle charge neutralization in roll-type electroseparators,» Journal of Electrostatics, vol. 23, pp. 235-243, 1997.
- [76] L. Dascalescu, « Numerical analysis of the electric field of roll-type electrostatic separator,» Journal of Electrostatics, vol. 29, pp. 255-267, 1993.
- [77] A. Tilmatine, Z. Azzouz, M. Younes, M. Brahami, L. Dascalescu «Separation électrostatique des particules : une technologie efficace dans l'industrie de recyclage», Sciences & Technologie, B – N°22, pp. 42-46, Décembre (2004).
- [78] R. K. Dwari et K. Rao, «Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator,» Minerals Engineering, vol. 22, pp. 119-127, 2009.
- [79] S. Masuda, M. Toragushi, T. Takahashi et K. Haga, «Electrostatic beneficiation of coal, using a cyclone-tribocharger,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 19, pp. 789-793, 1983.
- [80] M. K. Mazumder, R. A. Sims, A. S. Biris, P. K. Srirama, D. Saini, C. U. Yurteri, S. Trigwell, S. Dea et R. Sharma, «Twenty-first century research needs in electrostatic processes applied to industry and medicine,» Chemical Engineering Science, vol. 61, pp. 2192-2211, 2006.
- [81] S. Bendimerad, A. Tilmatine, M. Ziane et L. Dascalescu, « Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator,» International Journal of Environmental Studies, vol. 66, pp. 529-538, 2009.
- [82] A. Tilmatine et L. Dascalescu, «Set-point identification of a free-fall electrostatic process for plastic particles,» International Journal of Environmental Studies, vol. 67, pp. 27-40, 2010.
- [83] C. Xiao, L. Allen, M. B. Biddle et M. Fisher, «Electrostatic separation and recovery of mixed plastics,» chez Society of Plastics Engineers (SPE) Annual Recycling Conference (ARC), Dearborn, Michigan (US), 1999.

- [84] R. Messafeur, I. Mahi, R. Ouidir, K. Medles, L. Dascalescu et A. Tilmatine, «Tribo-electrostatic separation of a quaternary granular mixture of plastics,» *Particulate Science and Technology*, pp. 1-6, 2018.
- [85] G. Richard, *Etude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires*, Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées, Université de Poitiers: Ecole Doctorale : Science et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Energétique et Aéronautique, 2018.
- [86] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine et L. Dascalescu, «Experimental study of the optimum operating conditions of a pilote-scale tribo-aero-electrostatic separator of mixed granular solids,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 699-706, 2013.
- [87] M. Miloudi; L. Dascalescu; J. Li; S. El-Mossouess; K. Medles, «Tribo-aero-electrostatic separator for coarse granular insulating materials,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, pp. 1510-1515, 2013.
- [88] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, K. Medles et A. Tilmatine, «Improved overall performances of a tribo-aero-electrostatic separator for granular plastics from Waste Electric and Electronic Equipment,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 4159-4165, 2015.
- [89] L. Calin, and L. Dascalescu, "method for electrostaticly separating a granular mixture made of different materials, and device for implementing same." Patent FR2943561/2009, WO2010109096/2010, 2009
- [90] Z. Chen, L. Wang, R. Wang, Y. Li et 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.
- [91] R. K. Dwari, S. K. Mohanta, B. Rout, R. K. Soni, P. S. R. Reddy et 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.
- [92] V. Starman, J. Kacerovsky, F. Mach, P. Karban et I. Dolezel, «Experimental study of triboelectric separator for mixture of plastic particles,» chez *International Symposium on Theoretical Electrical Engineering*, Pilsen, Czech Republic, 2013 .
- [93] J. Wang, M. D. Wit, R. M. Boom et 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.
- [94] Y. Endo, E. Hirose et S. Ogsawara, «Technology for recycling mixtures of residual plastics from household appliances,» *Mitsubishi electric technical report*, 2008.
- [95] D. Fekir, M. Miloudi, F. Miloua et K. Medles, «New Propeller-Type Tribocharging Device With Application to the Electrostatic Separation of Granular Insulating Materials,» *IEEE Transactions*, 2017.
- [96] J. D. Brown et P. Wynn, «Tribo-charging and Electrostatic Separation of Mixed Electrically Insulating Particles». U.S.A Brevet 6 927 354, 9 August 2005.

- [97] G. Wu, J. Li et Z. Xu, «Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review,» *Waste Management*, vol. 33, pp. 585-597, 2013.
- [98] G. Taguchi, «System of experimental designs,» chez Kraus international publications, new york, 1987.
- [99] S. Varet, «Développement de méthodes statistiques pour la prédiction d'un gabarit de signature infrarouge,» chez Thèse de doctorat. Mathématiques appliqués, université de Toulouse, 2010.
- [100] F. Turgis, «Amélioration de la fiabilité d'un système complexe, application ferroviaire : Accès voyageurs,» chez Thèse de doctorat. Sciences Pour l'Ingénieur (SPI), université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2013.
- [101] S. Vivier, «Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis,» chez Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2002.
- [102] A. Benabboun, «Contribution à l'étude de la séparation des particules fines pour application dans l'industrie alimentaire,» chez Thèse de doctorat, Département d'Électrotechnique, Université Djillali Liabes, Sidi bel-abbes, 2016.
- [103] A. Ismail, M. Linder et M. Ghoul, «Optimization of butylgalactoside synthesis by β -galactosidase form *Aspergillus oryzae*,» *Enz. Microbiol. Technol*, vol. 25, p. 208–213, 1999.
- [104] G. P. Box, W. G. Hunter et J. S. Hunter, «Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis and model building,» John Wiley & Sons, New York, États-Unis, 1978.
- [105] J. F. M. Burkert, F. Maugeri et M. I. Rodrigues, «Optimization of extracellular lipase production by *Geotrichum* sp. using factorial design,» *Bioresource Technol*, vol. 91, p. 77–84, 2004.
- [106] MODDE. 5.0, «User guide and tutorial,» Umetrics, 1999.

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

- **Messafeur, R.**, Mahi, I., Ouiddir, R., Medles, K., Dascalescu, L., & Tilmatine, A. «Tribo-electrostatic separation of a quaternary granular mixture of plastics », *Particulate Science and Technology*, pp. 1–6. Taylor and Francis Inc., 2018, April 28.
- Mahi, I., **Messafeur, R.**, Belgacem, A., Bellebna, Y., Louati, H., & Tilmatine, A. «New separation method of metal/plastic micronized particles using travelling wave conveyors », *International Journal of Environmental Studies*, pp. 1–12, 2018, February 17.
- Mahi, I. N., Senouci, K., Tilmatine, A., **Messafeur, R.**, Miloua, F., & Dascalescu, L, «Premises of using triboelectric charge for identification of the granular product flowing in a pneumatic transport system ». In *IEEE Industry Application Society - 51st Annual Meeting, IAS 2015, Conference Record*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015.

Résumé : Il y a 20 ans, l'industrie du recyclage était à peine intéressée par la valorisation des déchets plastique. Aujourd'hui, cette catégorie de déchets connaît la plus forte croissance en termes de volume à traiter. C'est pour cela que le problème de la récupération et du traitement des produits en fin de vie est devenue une préoccupation majeure pour toutes les entreprises qui travaillent dans ce secteur. Les méthodes de récupération de matériaux provenant des déchets industrielle en plastique sont variées. Les procédés gravitationnels ou par flottation étant moins efficaces, les technologies électrostatiques se sont imposés comme la solution de choix pour le recyclage des matériaux plastiques contenus dans ces déchets.

De nombreuses études de séparation tribo-électrostatique de mélanges binaires et ternaire de particules de plastique de taille millimétrique ont été réalisées. L'objectif de ce travail est une étude expérimentale pour la séparation d'un mélange quaternaire comprenant quatre types de plastiques différents issus d'équipements électriques et électroniques usagés. La faisabilité de la séparation de tels mélanges quaternaires par le tribocharging en mode coulissant avec une paroi métallique a été démontrée. La séparation d'un mélange comprenant PA, PC, polystyrène choc et polychlorure de vinyle est meilleure en termes de pureté et de récupération lors du chargement des particules par contact glissant avec la paroi métallique que dans le cas d'un dispositif à lit fluidisé.

Mots clés : Séparateur électrostatique, chargement triboélectrique, électrostatiques, mélanges en plastique; mélange quaternaire; séparateur à courroie rotatif; séparation tribo-électrostatique.

Abstract: 20 years ago, the recycling industry was barely interested in the recovery of plastic waste. Today, this category of waste is experiencing the greatest growth in terms of volume to be treated. This is why the problem of the recovery and processing of end-of-life products has become a major concern for all companies working in this sector. Methods of recovering materials from industrial plastic waste are varied. Because gravitational or flotation processes are less efficient, electrostatic technologies have emerged as the preferred solution for the recycling of plastic materials contained in these wastes. Many tribo-electrostatic separation studies of binary mixtures of millimeter-sized plastic particles have been performed. The objective of this work is an experimental investigation for separating a quaternary mixture comprising four different plastic types issued from waste electrical and electronic equipment. The feasibility of the separation of such quaternary mixtures by the sliding mode tribocharging with a metal wall was demonstrated. The separation of a mixture comprising PA, PC, high impact polystyrene, and polyvinyl chloride granules is better in terms of both purity and recovery when charging the particles by sliding contact with the metal wall, than in the case of a fluidized bed device.

Keywords: Electrostatic separator, triboelectric charging, electrostatic, plastic mixtures; quaternary mixture; rotating belt separator; tribo-electrostatic separation; tribocharging.

ملخص: قبل عشرين عاماً ، كانت صناعة إعادة التدوير بالكاد تهتم باستعادة النفايات البلاستيكية. واليوم ، تشهد هذه الفئة من النفايات أكبر نمو من حيث الحجم المطلوب معالجته. هذا هو السبب في أن مشكلة استرداد ومعالجة المنتجات الهالكة قد أصبحت مصدر قلق كبير لجميع الشركات العاملة في هذا القطاع. تتنوع طرق استعادة المواد من النفايات البلاستيكية الصناعية. وبما أن عمليات الجاذبية أو الطفو أقل كفاءة ، فقد برزت تكنولوجيات الإلكتروستاتيك كحل اختيار لإعادة تدوير المواد البلاستيكية الموجودة في هذه النفايات. تم إجراء العديد من دراسات الفصل القبلي الكهروستاتيكي للخليط الثنائي والثلاثي للجزيئات البلاستيكية بحجم ملليمتر. الهدف من هذا العمل هو دراسة تجريبية لفصل خليط رباعي يشتمل على أربعة أنواع مختلفة من اللدائن من المعدات الكهربائية والإلكترونية المستعملة. وقد ثبت جدوى فصل هذه المخاليط الرباعية عن طريق انزلاق الشاحن المتحرك مع جدار معدني. فصل من خليط يضم PA ، PC ، وارتفاع البوليسترين تأثير والبولي فينيل هو أفضل من حيث النقاء والانتعاش أثناء الشحن من الجسيمات عن طريق تحريك اتصال مع جدار معدني مما كانت عليه في حالة وجود جهاز ممیعة.

الكلمات المفتاحية: فاصل كهرباء ، شحنة كهربائية للكهرباء الساكنة ، مخاليط الكهروستاتيكية ، بلاستيكية. خليط رباعي فاصل الحزام الدوار. فصل قاطع كهرباء.