

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2021



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

**Domaine:** Sciences et Technologie

**Filière:** Electrotechnique

**Spécialité:** Réseaux électriques

**Par:** SEDDIKI Youssouf et MIHOUB Achraf Aba El Qassim

### Thème

**Etude expérimentale d'un séparateur électrostatique  
à chute libre**

Soutenu publiquement, le 14 Juillet 2021 devant le jury composé de:

M. REMADNIA Mokdad	MCA	Univ. Guelma	Président/Encadreur
M. BOUCHEKHA Abdelhafid	MAA	Univ. Guelma	Examineur
M. GOUAIDIA Said	MAA	Univ. Guelma	Examineur

**Année Universitaire: 2020/2021**

## Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience durant ces années d'étude.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur **Dr. Mokdad REMADNIA**, pour sa patience, son soutien, ses précieux conseils, son aide, sa disponibilité tout au long de nos études et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nous tenons tout particulièrement à remercier les enseignants du département de **Génie Électrotechnique et Automatique** et du **Laboratoire de Génie Électrique** de l'Université **8 Mai 1945 Guelma** pour leur disponibilité et encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nos reconnaissances vont aussi à messieurs les membres de jury, pour l'honneur qu'ils auront fait en acceptant de juger ce travail.

Nous remercions enfin tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.

# Sommaire

Introduction générale	01
-----------------------	----

## CHAPITRE 1 – LE PLASTIQUE

I.1. Introduction	02
I.2. Les matériaux plastiques	02
I.2.1. Définition de la matière plastique	02
I.2.2. Différents types de plastiques (polymères)	02
I.2.3. Plastiques et environnement	03
I.3. Déchets plastiques	03
I.3.1. Déchets plastiques industriels	04
I.3.2. Déchets plastiques de post-consommation	04
I.4. Recyclage du plastique	05
I.4.1. Recyclage mono-matière	05
I.4.2. Recyclage des mélanges de matières plastiques	05
I.5. Conclusion	06

## CHAPITRE II – TECHNIQUES DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DES MATERIAUX ISOLANTS

II.1. Introduction	07
II.2. Chargement par effet triboélectrique	07
II.2.1. Phénomène physique	07
II.2.2. Série triboélectrique	09
II.3. Dispositifs de chargement triboélectrique	10
II.3.1. Dispositif de charge par ventilateur	10
II.3.2. Dispositif de charge par cyclone	11
II.3.3. Dispositif de chargement statique	12
II.3.4. Dispositif de charge à cylindre rotatif	12
II.3.5. Dispositif de charge à lit fluidisé	13
II.3.6. Chargement tribo-aéro-électrostatique	14
II.4. Conclusion	15

## CHAPITRE III – INSTALLATIONS DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MATERIAUX GRANULAIRES ISOLANTS

III.1. Introduction	16
III.2. Dispositifs de séparation tribo-électrostatiques de matériaux granulaires isolants	16
III.2.1. Séparateur tribo-électrique à tapis roulant	16
III.2.2. Séparateur tribo-électrique à chute libre	17
III.2.3. Séparateur tribo-électrostatique à tambour	18
III.3. Dispositif de séparation tribo-aéro-électrostatique de matériaux granulaires isolants	18
III.3.1. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales	18
III.3.2. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants	19
III.3.3. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux bandes transporteuses	20
III.3.4. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages	21
III.4. Performances des séparateurs électrostatiques	22
III.5. Conclusion	23

## CHAPITRE IV – REALISATION ET ETUDE D'UN SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE A CHUTE LIBRE

IV.1. Introduction	24
IV.2. Présentation du séparateur à chute libre	24
IV.2.1. Description	24
IV.2.2. Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé	26

IV.2.3. Forces exercées sur les particules	28
IV.3. Techniques de mesure et procédures expérimentales	29
IV.3.1. Procédure de déroulement des expériences	29
IV.3.2. Taux de récupération de produit	30
IV.3.3. Taux de pureté de produit	30
IV.3.4. Mesure de la température et de l'humidité relative	30
IV.3.5. Mesure de la masse granulaire	31
IV.3.6. Mesure de la charge triboélectrique	31
IV.4. Matériaux utilisés	33
IV.4.1. Le Polycarbonate (PC)	34
IV.4.2. Le Polyamide (PA)	34
IV.5. Résultats et discussion	36
IV.5.1. Mesure de la charge électrique	36
IV.5.2. Résultats du séparateur à chute libre à électrodes parallèles	36
IV.5.2.1. Influence de la distance inter-électrodes	36
IV.5.2.2. Influence de la tension appliquée	37
IV.5.3. Résultats du séparateur à chute libre à électrodes en position "V" inversé	39
IV.5.3.1. Influence de la distance inter-électrodes inférieurs	39
IV.5.3.2. Influence de la tension appliquée	41
IV.6. Conclusion	43
Conclusion générale	44
Bibliographie	45

## Introduction générale

L'exploitation massive du plastique, non biodégradable, est un problème environnemental majeur. Une grande partie des plastiques utilisés ou stockés dans le monde sont détruits ou sont actuellement inutiles. Ces déchets plastiques constituent une source très importante, distribuée du secteur industriel au niveau des consommateurs, en passant par les différents réseaux de distribution et de commercialisation. Cette masse mondiale de plastique usagé ne cesse de croître et le nombre de ses déchets augmente. Le recyclage est un mode de gestion des déchets et une source d'économie non négligeable de ressources naturelles, dont la préservation est aujourd'hui un enjeu majeur.

La séparation électrostatique des divers constituants des mélanges de matériaux plastiques est une technique de plus en plus utilisée dans l'industrie du recyclage des déchets. Le principe de fonctionnement de ce type de séparateurs consiste à charger les particules du mélange par effet triboélectrique à l'aide d'un dispositif de chargement qui seront par la suite soumises à un champ électrique intense.

L'objectif principal de ce travail consiste à étudier la faisabilité du processus de séparation électrostatique d'un mélange granulaire isolant (PA/PC) par la réalisation d'un séparateur électrostatique à chute libre associé à un dispositif de chargement tribo-électrique à lit fluidisé. Le mémoire comporte quatre chapitres qui se présentent comme suit:

**Le premier chapitre** renferme des généralités sur le plastique, les sources de déchet plastique et le recyclage de la matière plastique.

Dans **le deuxième chapitre** nous avons présenté quelques notions sur les techniques de chargement tribo-électrique des matériaux granulaires isolants et les différents dispositifs utilisés pour le chargement triboélectrique.

**Le troisième chapitre** est consacré à la description et la présentation du principe de fonctionnement des différents dispositifs de séparation électrostatique, appliquées au recyclage de matériaux granulaires isolants.

**Le quatrième chapitre** est consacré à la réalisation et l'étude d'un séparateur tribo-électrostatique à chute libre, conçu au Laboratoire de Génie Électrique de Guelma de l'Université 8 mai 1945.

# **Chapitre I**

## **Le Plastique**

## **I.1. Introduction**

Les matières plastiques ou polymères s'inscrivent dans une progression de consommation flatteuse, comparativement aux autres matériaux. Le champ couvert par les polymères est prospère, aussi bien pour les plastiques de grande consommation que pour les produits plus techniques. Cependant, la prolifération des déchets plastiques qui sont des produits non biodégradables pose des problèmes pour l'environnement qu'il faut absolument résoudre. Une solution serait le recyclage de ces déchets. Ce chapitre fait un point bibliographique sur le plastique et des définitions à la compréhension de ce travail.

## **I.2. Les matériaux plastiques**

### **I.2.1. Définition de la matière plastique**

Le terme matière plastique se définit de la manière suivante: Matière synthétique constituée de macromolécules et qui peut être moulée ou modelée. Se sont des matériaux organique constitués de macromolécules obtenues par polymérisation de monomère, elles sont produites par transformation des substances naturelle, ou par synthèse directe à partir de substance extraites d'un pétrole, du gaz naturel, de charbon ou d'autres matière minérales [1]. Les matières plastiques sont employées dans tous les secteurs de consommation avec une production mondiale dépassant les 400 millions de tonne par an depuis 2015 [2].

### **I.2.2. Différents types de plastiques (polymères)**

Il existe trois grandes catégories de polymères: les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

#### **a. les thermoplastiques**

Les thermoplastiques se déforment sous l'action de la chaleur et gardent cette forme en refroidissant et ils ne sont pas biodégradables et ont une « durée de vie » de plusieurs centaines d'années. En fonction de la polymérisation on obtient différents produits qui sont [3]:

- les PVC (Chlorure de Polyvinyle),
- les polyéthylènes,
- les polystyrènes,
- les polypropylènes

**b. les thermodurcissables**

Qualifie un polymère ne pouvant être mis en œuvre qu'une seule fois et qui devient infusible et insoluble après polymérisation. Une fois durci, leur forme ne peut plus être modifiée. Les thermodurcissables sont des polymères «alvéolés» [4]. Les plus connus sont les phénoplastes (ou bakélite) (PF21), les polyesters (UP), les époxydes (araldite) (EP), les polyuréthanes (PUR)...

**c. les élastomères**

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Les élastomères sont caractérisés par leur grande déformabilité (6 à 8 fois leur longueur initiale), et sont obtenus à partir de polymères linéaires caractérisés par des liaisons extrêmement faibles [3]. A côté du caoutchouc naturel, il existe de nombreuses nuances obtenues à partir de dérivés du pétrole: butyle (IIR), Silicone (SI), polyacrylate (ACM), butadiène acrylonitrile (NBR), élastomère fluoré (FKM)... [5].

**I.2.3. Plastiques et environnement**

La fin de vie du plastique peut être particulièrement nocive pour l'environnement. On le trouve partout car il sert à de multiples usages. En le rejetant dans la nature, il la pollue et induit des risques pour la santé. Les préoccupations concernant son utilisation et son élimination sont diverses. Elles comprennent [6]:

- l'accumulation de déchets dans les décharges et les habitats naturels,
- l'ingestion ou l'enchevêtrement de plastiques par diverses espèces terrestres et marines,
- le lessivage,
- la contamination de la chaîne alimentaire par le transfert des micro-plastiques de la faune à l'humain.

**I.3. Déchets plastiques**

On entend par déchet plastique, les résidus de processus de production, de transformation et de consommation, ou encore les produits plastiques destinés à l'abandon. Il existe donc plusieurs types de déchets plastiques.

### **I.3.1. Déchets plastiques industriels**

Il s'agit de l'ensemble des déchets issus des processus de production des résines (essentiellement trouvés dans les sites pétrochimiques) et de transformation des résines en objets finis (principalement trouvés dans la filière de la plasturgie):

#### **❖ Les déchets de production**

Ils proviennent des arrêts de réacteur de polymérisation, des purges de réacteurs et des lots déclassés. Ils sont homogènes et présentent la particularité d'avoir un degré de pollution faible, voire inexistant. On y retrouve, en très grande majorité, les polymères de grande diffusion (PE, PP, PS et PVC) [7].

#### **❖ Les déchets de transformation**

Ils proviennent de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage,...). On y retrouve, précisément, les lisières et bordures de ces opérations de thermoformage, les pièces présentant des défauts, ou encore, les chutes de démarrage et d'arrêt de machine. Ces déchets peuvent être homogènes comme fortement hétérogènes (mélanges provenant de la Co-extrusion, Co-injection, ...) sont, en général, très peu souillés [7].

### **I.3.2. Déchets plastiques de post-consommation**

Comme leur nom l'indique, il s'agit de l'ensemble des déchets issus de la consommation industrielle ou des particuliers. On distingue:

#### **❖ Les déchets agricoles**

On retrouve essentiellement les films, sacs, liens, fûts et bidons de produits phytosanitaires. La particularité de ce gisement réside dans ses fortes contamination (terre, cailloux) et pollution. Il s'agit pour l'essentiel de polyoléfines (PE-bd, PE-hd et PP) [7].

#### **❖ Les déchets commerciaux ou de distribution**

Il s'agit des emballages industriels et commerciaux qui sont en général de bonne qualité. Il y a également les fûts, sacs de grande contenance, conteneurs présents dans les secteurs de la chimie, l'agroalimentaire, le bâtiment et les travaux publics, pour le conditionnement et le transport de divers autres produits. Ces deux premiers gisements sont le domaine prépondérant des polyoléfines en majorité écrasante. Enfin, on peut aussi citer le cas des emballages en polystyrène expansé utilisés pour le calage lors du

transport de produits fragiles, et dans une proportion moindre, pour les caisses à poisson et les plateaux horticoles [7].

❖ **Les déchets électriques et électroniques**

C'est un gisement issu de la filière de tous les produits électriques et électroniques tels que les ordinateurs, téléphones, appareils électroménagers et câbles en tout genre [7].

❖ **Les déchets ménagers**

Ils sont essentiellement constitués par les emballages. Pour ce gisement, trois matières principales sont concernées: le PET (bouteilles de boissons gazeuses, eaux minérales,...), le PE-hd (bouteilles de lait, produits lessiviels,...), et le PVC (bouteilles d'eau minérale,...) [7].

## **I.4. Recyclage du plastique**

Le recyclage du plastique est un enjeu de plus en plus crucial au fil du temps. Du fait des volumes impliqués à l'échelle mondiale, recycler le plastique devient une industrie. Parmi la masse des déchets plastiques, nous retrouvons pratiquement toujours les mêmes polymères qui sont, en toute logique, les thermoplastiques de grande diffusion les plus produits. Les déchets thermoplastiques sont traités et transformés en granulés par triage, broyage, lavage, séchage et fonte dans une extrudeuse pour être régénérés.

### **I.4.1. Recyclage mono-matière**

Il s'agit, la plupart du temps, de séparer les matières plastiques des autres matériaux tels que le verre, le sable, les métaux, les papiers et cartons... mais, également, de séparer les matières plastiques par famille. Généralement, les installations de tri assurent ces deux aspects de la question par une cascade d'opérations unitaires débouchant sur un flux de matières purifiées et un flux de sous-produits, considérés comme des déchets du processus et qu'il convient d'éliminer (incinération, mise en décharge, voire valorisation matière dans certains cas). Les méthodes de tri sont relativement nombreuses mais les méthodes couramment appliquées sont en nombre plus restreint, certains procédés s'avérant pour l'instant peu économiques [8].

### **I.4.2. Recyclage des mélanges de matières plastiques**

Il peut s'avérer pratiquement (séparation délicate) ou économiquement (diminution du coût de recyclage en évitant l'étape de tri) intéressant de recycler des déchets plastiques sous

forme de mélanges contenant deux produits ou plus; le problème est que les polymères impliqués sont généralement incompatibles, lorsqu'on veut faire un mélange, on essaye de disperser au mieux une phase dans l'autre. Pour cela, on est parfois amené à utiliser un composé supplémentaire qui permettra de comptabiliser le mélange en améliorant ses propriétés [9].

## **I.5. Conclusion**

Les substances utilisées dans la production de plastiques sont des produits naturels tels que la cellulose, le charbon, le gaz naturel, le sel et, bien entendu, le pétrole brut. En raison des propriétés qu'on leur connaît, les matières plastiques occupent une place dominante dans l'ensemble des produits de consommation. Leur présence dans la nature et la longévité qui leur est associée créent des impacts sur les écosystèmes. Leur recyclage s'avère être nécessaire afin de protéger notre environnement.

## **Chapitre II**

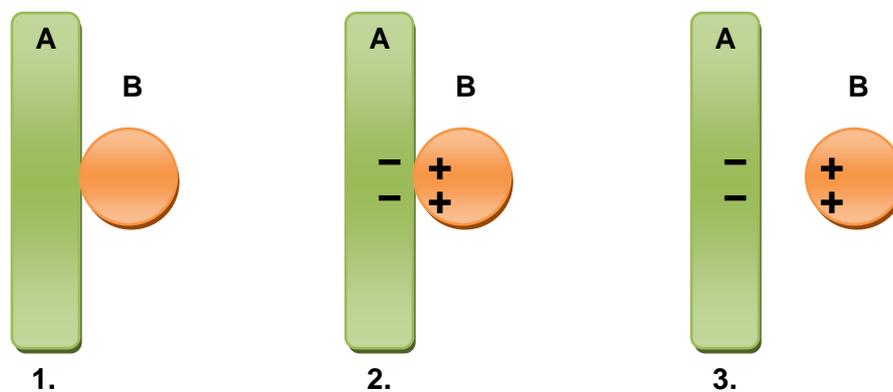
# **Techniques de chargement triboélectrique des matériaux isolants**

## II.1. Introduction

La séparation électrostatique d'un mélange de matériaux granulaire isolant dans un champ électrique intense est possible si les constituants de celui-ci portent des charges électriques différentes. Deux mécanismes sont généralement utilisés pour charger les matériaux isolants en vue de leur séparation dans un champ électrique intense: la décharge couronne [10] et l'effet triboélectrique [11]. C'est ce dernier mécanisme qui nous intéresse dans ce chapitre.

## II.2. Chargement par effet triboélectrique

Le chargement par effet triboélectrique, ou par frottement, est un phénomène caractérisé par le transfert de charges électriques entre différents matériaux: lorsque deux matériaux électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charge qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement [12]. Ce phénomène est influencé par le couple frotteur / frotté.



**Figure II.1:** L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux surfaces:

1. Surface A neutre, particule B est neutre; 2. La surface A et la particule B sont en contact; 3. Après la séparation, la surface A a la tendance de se charger négativement, et la particule B positivement [13].

L'effet triboélectrique permet le chargement électrique des matériaux isolants à l'aide d'une grande variété de dispositifs mécaniques ou aérodynamiques (alimentations vibrantes, tubes rotatifs, lits fluidisés, ...).

### II.2.1. Phénomène physique

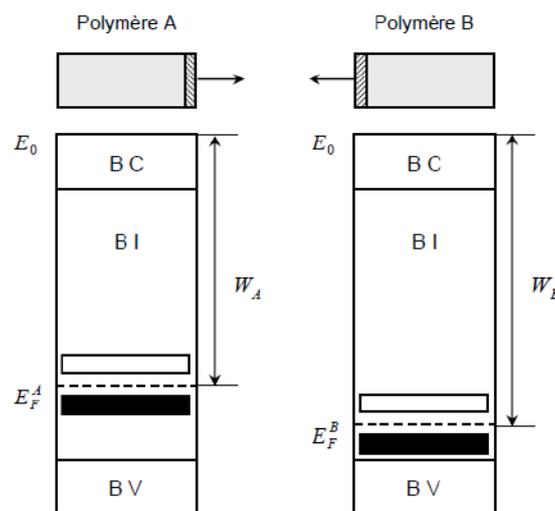
L'effet triboélectrique est associé à l'apparition de charges électriques lorsque deux surfaces initialement neutres entrent en contact. Un transfert de charge s'opère et aboutit à des matériaux chargés positivement et négativement les uns par rapport aux autres. Si le matériau

n'est pas conducteur (cas des isolants), ces charges générées persisteront dans le temps et autoriseront une séparation en soumettant les granules chargés à un champ électrique à fort potentiel qui attirera les particules de charges opposées et repoussera celles de même signe que le champ [14].

Le phénomène de charge de deux polymères par impact est basé sur la physique des surfaces [15] qui prend en compte l'existence de deux niveaux d'énergie des électrons situés dans la bande interdite du polymère (Figure II.2), niveaux d'énergie localisés à la surface du matériau.

Les niveaux énergétiques des électrons dans la bande interdite sont générés par la discontinuité du réseau à la surface du matériau et par la présence des atomes d'impuretés. La densité des niveaux superficiels dans la bande interdite par unité d'énergie et unité de surface  $N$  [15] prend des valeurs d'ordre de grandeur  $(1030...1033) \text{ m}^{-2} \text{ J}^{-1}$ . Une faible quantité (quelques) d'atomes d'impuretés pour un million d'atomes à la surface du polymère peuvent modifier, d'une façon significative, les niveaux énergétiques de la bande interdite et, par conséquent, la valeur et la polarité de la charge triboélectrique générées à la surface du matériau.

Si la densité des niveaux superficiels  $N$  de deux granules de polymères A et B est suffisamment élevée, un transfert d'électrons se produit entre les granules en contact jusqu'au moment où les niveaux Fermi s'égalisent.



**Figure II.2.** La modélisation des niveaux superficiels qui explique le processus de tribo-électrisation est basé sur le transfert de charge entre les surfaces de contact et la présence des niveaux d'énergie dans la bande interdite des polymères. Les bandes noires situées au dessous des niveaux Fermi représentent des niveaux d'énergie occupés tandis que les bandes blanches, des niveaux d'énergie libres.  $E_F^A, E_F^B$  sont les niveaux Fermi superficiels et  $W_A, W_B$  représentent le travail d'extraction superficiel de deux polymères [15].

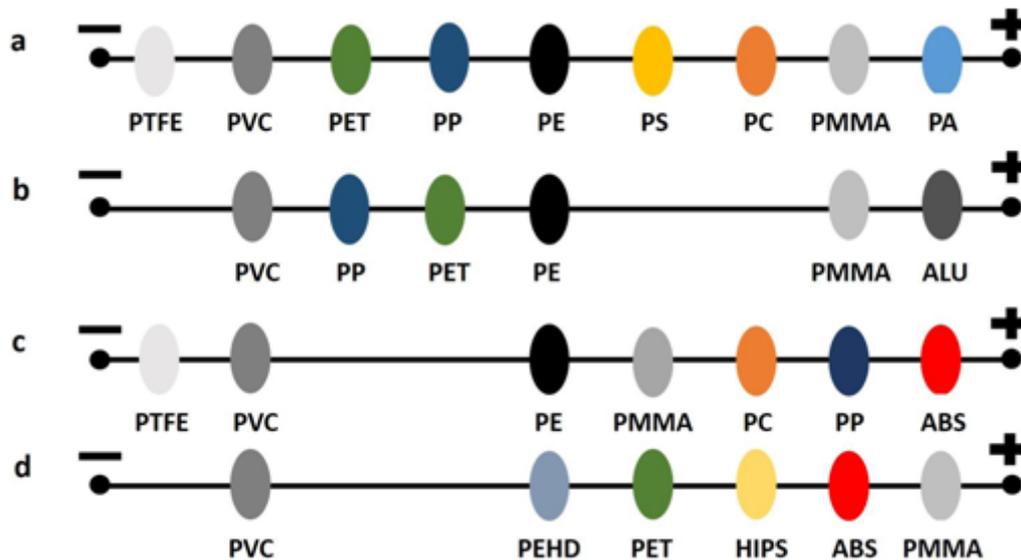
### II.2.2. Série triboélectrique

Deux corps frottés l'un sur l'autre s'électrisent l'un positivement et l'autre négativement. On appelle série triboélectrique un classement des diverses matières dans un ordre tel que, de deux matières qui se suivent, la première est positive. Plus les deux matériaux frottés sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée [11]. Cette série est déterminée par la permittivité, les permittivités les plus élevées appartenant aux polymères les plus fortement donneurs. D'une manière plus rigoureuse, le caractère donneur ou accepteur peut être lié au travail d'extraction, les polymères donneurs étant ceux dont le travail d'extraction est le plus faible. Le tableau II.1 indique que la corrélation entre ces deux paramètres n'est pas aussi parfaite [14].

*Tableau II.1: Travail d'extraction et constante diélectrique de quelques polymères (d'après Van Krevelen 1990) [14].*

Polymère	Travail d'extraction (eV)	$\epsilon$
Polytétrafluoroéthylène (PTFE)	5,75	2,1
Polychlorure de vinyle (PVC)	5,13	2,8-3,05
Polystyrène (PS)	4,90	2,55
Polyéthylène (PE)	4,90	2,5
Polycarbonate (PC)	4,80	2,6-3,0
Poly méthacrylate de méthyle (PMMA)	4,68	2,6-3,7
Polyamide 6,6 (PA)	4,3	4

Shaw a déterminé expérimentalement la première série triboélectrique en 1917. Il a mesuré la charge sur les surfaces des divers matériaux chargés par le frottement en utilisant un électroscope [16]. Ce classement a permis de ranger les matériaux ayant la charge la plus positive jusqu'aux matériaux les plus négatifs. A travers les années, plusieurs séries triboélectriques ont été établies (Figure II.3). Les séries triboélectriques varient en tout cas d'un chercheur à l'autre et chaque série reflète la culture matérielle de son moment historique. En effet une différence dans le frottement, des facteurs externes peuvent inverser les signes obtenus, il semble donc impossible de réaliser une liste avec un ordre fiable; le fait que les signes peuvent s'inverser de manière si facile, est très surprenant [11].



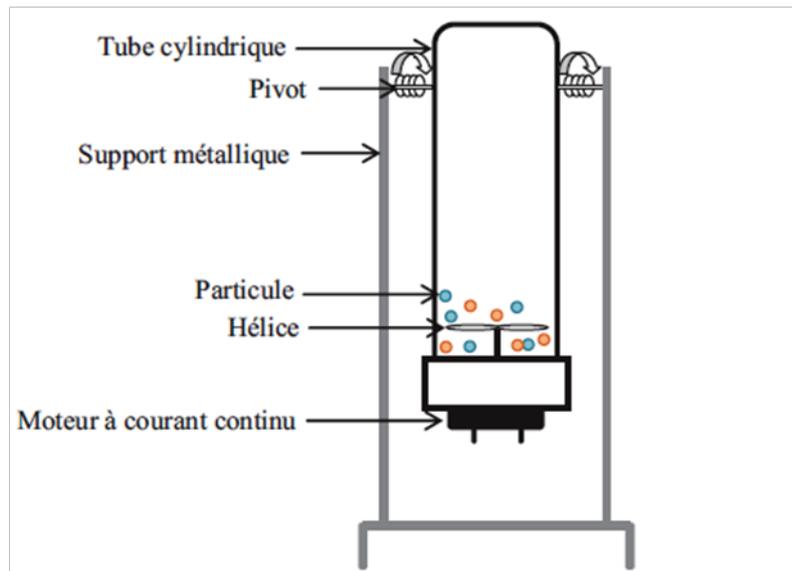
**Figure II.3:** Série triboélectrique expérimentale pour différents matériaux plastiques utilisés dans la fabrication des équipements informatiques et électriques selon différents auteurs: a [17], b [18], c [19], d [20].

### II.3. Dispositifs de chargement triboélectrique

La charge statique acquise par effet triboélectrique se produit dans un système où généralement la conductivité du matériau est faible, ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés. Cette charge importante est nécessaire pour le tri des granules dans un champ électrique intense. Plusieurs travaux ont été réalisés sur les installations de chargement triboélectrique utilisant: des ventilateurs, des tubes rotatifs, des lits fluidisés (créés par des souffleurs et des compresseurs), des micros-cyclones, des chargeurs statiques [11,21-22].

#### II.3.1. Dispositif de charge par ventilateur

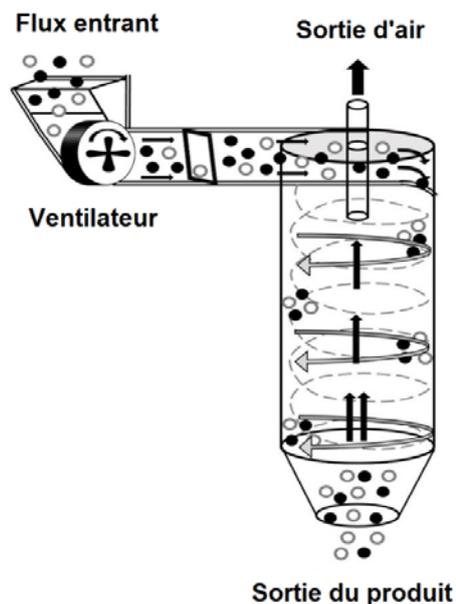
Les principaux éléments de cette installation sont: un tube cylindrique isolant, un moteur à courant continu entraînant une hélice isolante et un support métallique (Figure II.4). Le dispositif utilise l'air ascendant donnant naissance à des turbulences dans la chambre cylindrique isolante en polyvinyle chlorure PVC contenant le mélange granulaire, provoquant ainsi une tribo-électrification des particules par des collisions entre elles ou bien entre les particules et les parois [23-24]. La récupération du mélange chargé, s'effectue par le pivotement du cylindre sans faire arrêter le moteur afin d'éviter le collage des particules sur les parois et aussi de vider tous le contenu du récipient.



**Figure II.4:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur [24].

### II.3.2. Dispositif de charge par cyclone

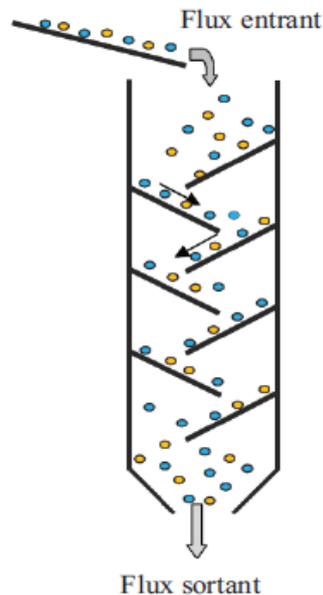
Le dispositif est constitué d'un cylindre isolant et un ventilateur dont la vitesse de rotation peut être modifiée (Figure II.5). Le dispositif permet de souffler les particules à charger par frottement avec les parois internes du cylindre, où elles subissent un frottement continu contre la paroi interne. La majorité de charge acquise s'effectue lors du contact des particules avec cette paroi [25].



**Figure II.5:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [14].

### II.3.3. Dispositif de chargement statique

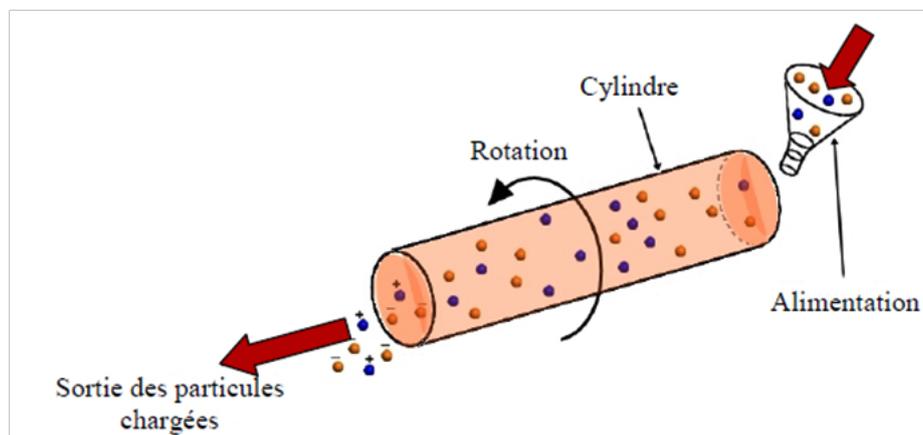
Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique en matière isolante (Figure II.6), à l'intérieur de laquelle sont disposées plusieurs plaques inclinées et détachables. Les particules glissent le long de ces plaques par gravitation et se chargent par frottement avec celles-ci [24-25].



**Figure II.6:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [24].

### II.3.4. Dispositif de charge à cylindre rotatif

Le dispositif consiste en un tube isolant utilisé comme installation de chargement triboélectrique. Le mélange granulaire est mis en mouvement à l'intérieur du cylindre, qui tourne autour d'un axe horizontal légèrement incliné (Figure III.7), les particules passent à travers le tube par la force de la pesanteur.



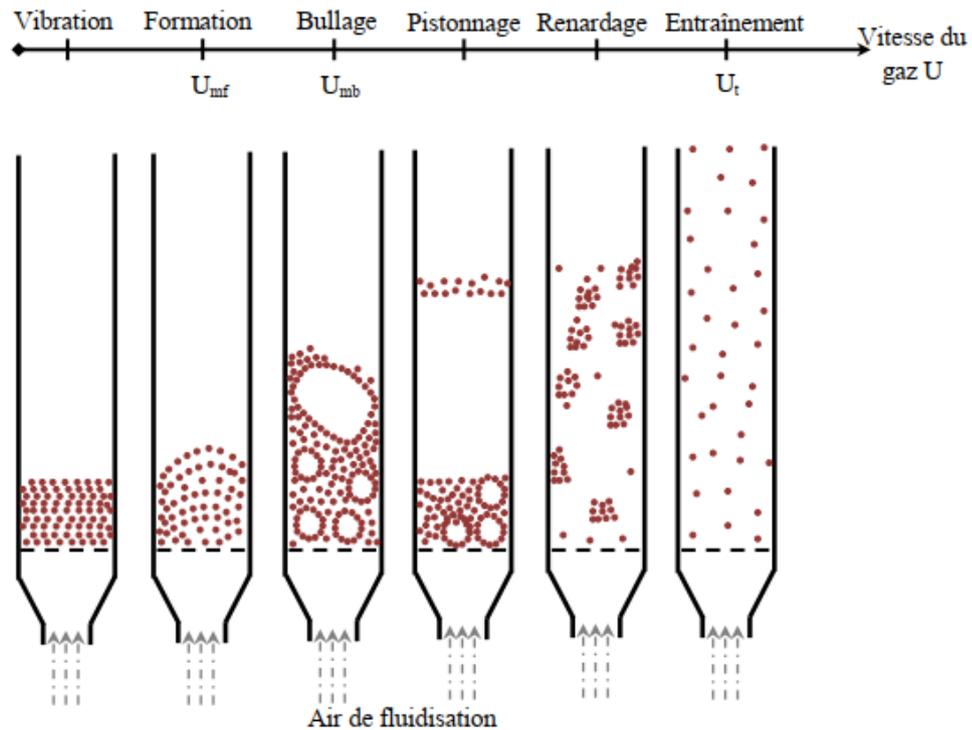
**Figure II.7:** Dispositif de tribo-charge à cylindre rotatif [22].

Afin de créer l'agitation du mélange granulaire, dans le tube il y a des nervures faites de la même matière que le tube lui-même. Ils se prolongent radialement vers l'intérieur de la paroi du tube. L'accumulation de la charge par les particules est due aux deux mécanismes: la collision entre particules et entre particules et la paroi du cylindre [22, 26].

### II.3.5. Dispositif de charge à lit fluidisé

Le lit fluidisé est la solution la plus utilisée pour le chargement tribo-électrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (Figure II.8) [27]. On considère une couche de particules solides reposant sur une plaque poreuse horizontale à l'intérieur d'un cylindre vertical. On injecte un gaz à travers la plaque dans le sens ascendant:

- ❖ **La vibration:** pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le tamis sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.
- ❖ **La formation:** le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques similaires aux fluides: ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation  $U_{mf}$ . Le lit montre une certaine expansion de la couche de particules, la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules est alors atteinte.
- ❖ **Le bullage:** à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage  $U_{mb}$ , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse permettant la distribution du gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide en ébullition.
- ❖ **Le pistonnage:** en excès au-delà de  $U_{mb}$ , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.
- ❖ **Le renardage:** les particules s'accrochent 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.

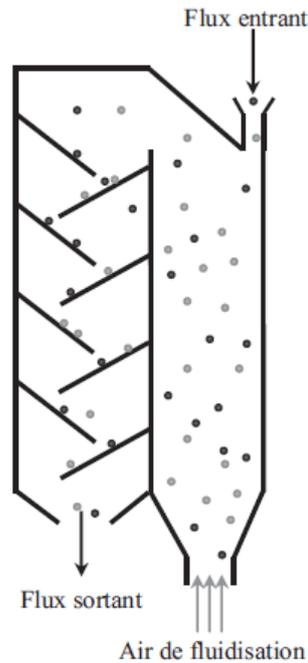


**Figure II.8:** Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation [11].

Un dispositif à lit fluidisé possède souvent la forme d'un tube cylindrique isolant, en position verticale. Le mélange de particules est déposé sur un support (un diffuseur d'air, en tamis isolant), situé en bas du cylindre. L'air de fluidisation est produit d'une soufflante connectée au bas du cylindre. Les particules fluidisées acquièrent des charges électriques de signes opposés grâce aux collisions entre elles. Le dispositif est particulièrement efficace pour les particules fines, car l'air de fluidisation empêche leur agglomération et favorise le chargement par effet triboélectrique [11].

### II.3.6. Chargement tribo-aéro-électrostatique

Cette technique est une combinaison de deux modes de chargement en cascade, le procédé est une chambre parallélépipédique isolante (Figure II.9) comprend deux parties: la première pour le chargement aéro-triboélectrique (à lit fluidisé), après avoir mettre les particules en agitation dans un lit fluidisé, elles sont dirigés vers la deuxième partie du dispositif destiné au chargement statique par des parois inclinées, dont le but de pouvoir mieux contrôler la charge acquise, multipliant les paramètres de chargement [28].



**Figure II.9:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-statique [24].

#### II.4. Conclusion

Les phénomènes tribo-électriques sont extrêmement complexes et mal expliqués, et sont influencés par plusieurs facteurs externes et internes, il s'agit de l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux, Plusieurs travaux de recherche ont été effectués sur des dispositifs de chargement triboélectrique utilisant des ventilateurs, des tubes rotatifs, des lits fluidisés, des micros-cyclones, des chargeurs statiques, dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières.

## **Chapitre III**

# **Installations de séparation électrostatique de matériaux granulaires isolants**

### III.1. Introduction

La séparation électrostatique s'est imposée comme la solution de choix pour le recyclage des déchets plastiques. Elle représente la classe la plus importante pour le tri sélectif des mélanges granulaires isolants par des forces électriques qui agissent sur les particules chargées. Il existe une multitude d'installations destinées à la séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants chargés par effet triboélectrique.

### III.2. Dispositifs de séparation tribo électrostatiques de matériaux granulaires isolants

La variété des installations conçues pour la séparation tribo-électrostatiques des mélanges granulaires peut être perçue en examinant les nombreux travaux techniques et scientifiques publiés durant ces dernières décennies. Le point commun entre ces dispositifs est la nécessité de réaliser deux opérations successives, le chargement triboélectrique de matériaux suivi de leur séparation.

#### III.2.1. Séparateur tribo-électrique à tapis roulant

Le fonctionnement de séparateur triboélectrique à tapis roulant est décrit par le schéma de la figure III.1. Le dispositif comprend pour son fonctionnement deux phases: une phase de chargement statique où l'introduction du mélange granulaire s'effectue par un vibro-transporteur; les particules sont soumises à la pesanteur et entrent en collision avec les différentes parois entraînant leur chargement triboélectrique et une phase de séparation électrostatique où les particules chargées tombent sur un tapis roulant reliée à la terre qui les transportent vers la zone de séparation.

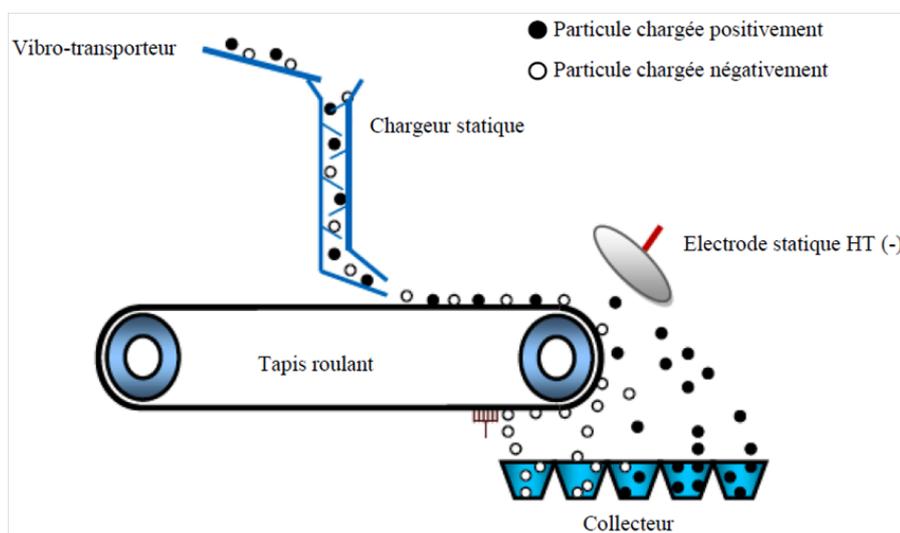
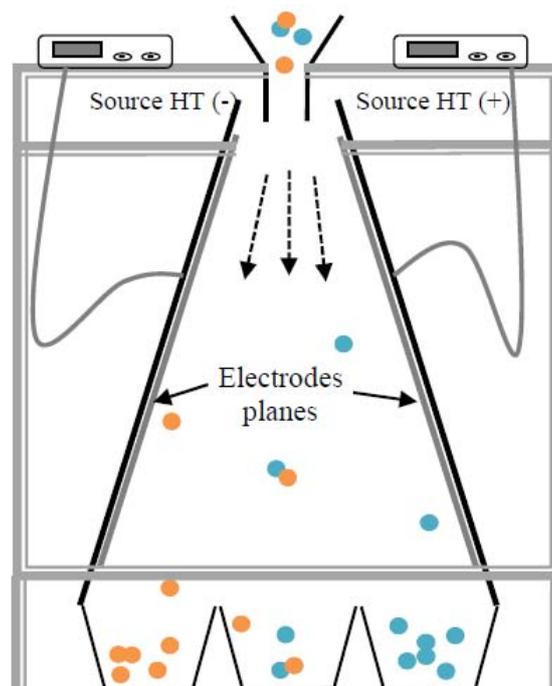


Figure III.1: Représentation schématique d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant [11].

La séparation est réalisée par une électrode haute tension qui attire les particules d'une polarité et repousse les particules de polarité opposée, grâce aux forces électriques d'attraction et de répulsion, permettant ainsi la séparation.

### III.2.2. Séparateur tribo-électrique à chute libre

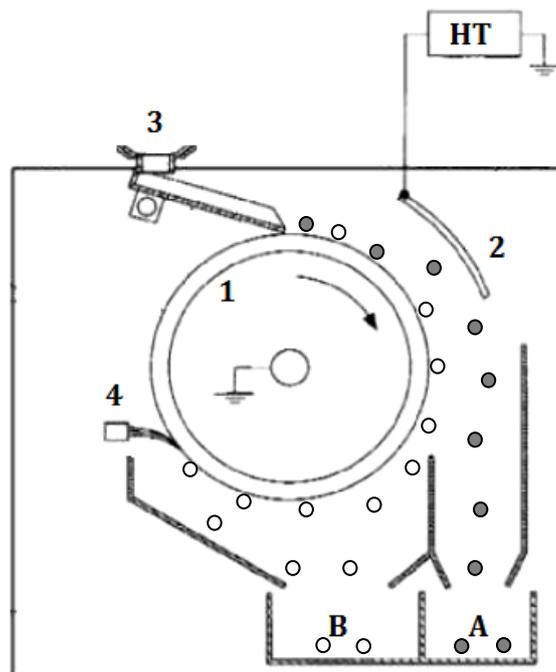
Le séparateur électrostatique à chute libre présenté sur la figure III.2 a été conçu pour la recherche fondamentale et applicative dans le domaine de la tribo-électrisation, de la séparation des matériaux granulaires plastiques et de la purification des minerais [29-31]. Dans un séparateur électrostatique à chute libre, les deux produits composant le mélange granulaire sont préalablement chargés par un dispositif de chargement triboélectrique, l'un avec une charge négative et l'autre avec une charge positive. Le mélange tombe ensuite dans une zone inter électrodes où un champ électrique intense est créé par les électrodes reliées à des sources de haute tension de polarités opposées. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode de signe opposé à leur charge acquise [11].



**Figure III.2:** Schéma du séparateur tribo-électrostatique à chute libre [22].

### III.2.3. Séparateur tribo-électrostatique à tambour

Dans cette installation, 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 A. Celles chargées négativement vont être repoussées par l'électrode HT et rester collées sur l'électrode cylindrique. Un balai les décollera afin qu'elles atterrissent dans le bac numéro B [32].



**Figure III. 3:** Schéma du séparateur tribo-électrostatique à tambour: (1) Electrode cylindrique reliée à la terre, (2) Electrode HT, (3) Vibro-transporteur, (4) Brosse.

### III.3. Dispositifs de séparation tribo-aéro-électrostatique de matériaux granulaires isolants

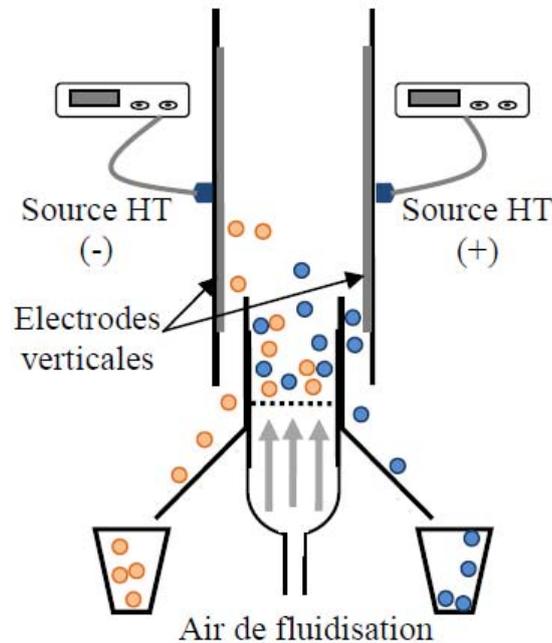
Avec ces séparateurs, le chargement et la séparation sont combinées en une seule opération. Les granules sont chargés et séparés simultanément.

#### III.3.1. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales

Dans ce dispositif, les deux opérations de chargement et séparation sont combinées en une seule opération. Les granules sont chargés et séparés simultanément. Un des avantages de cette solution réside dans le fait que les particules moins chargées ne quitteront pas la zone

active du séparateur jusqu'à ce qu'ils acquièrent une charge suffisante pour permettre aux forces électriques de les conduire à l'électrode de polarité opposée [11].

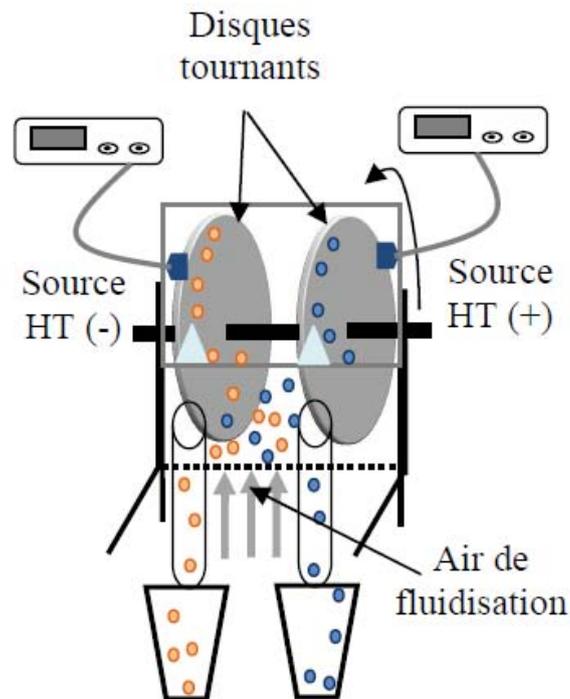
Le dispositif se compose de deux électrodes verticales à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique isolante, reliées à deux alimentations haute tension continue de polarités opposées. La fluidisation est réalisée par injection d'air en utilisant un souffleur d'air à vitesse variable. Les deux électrodes attirent les particules chargées de signe opposé et repoussent celles de même signe, pour les dévier vers les collecteurs [33].



**Figure III.4:** Schéma du séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales. [22].

### III.3.2. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants

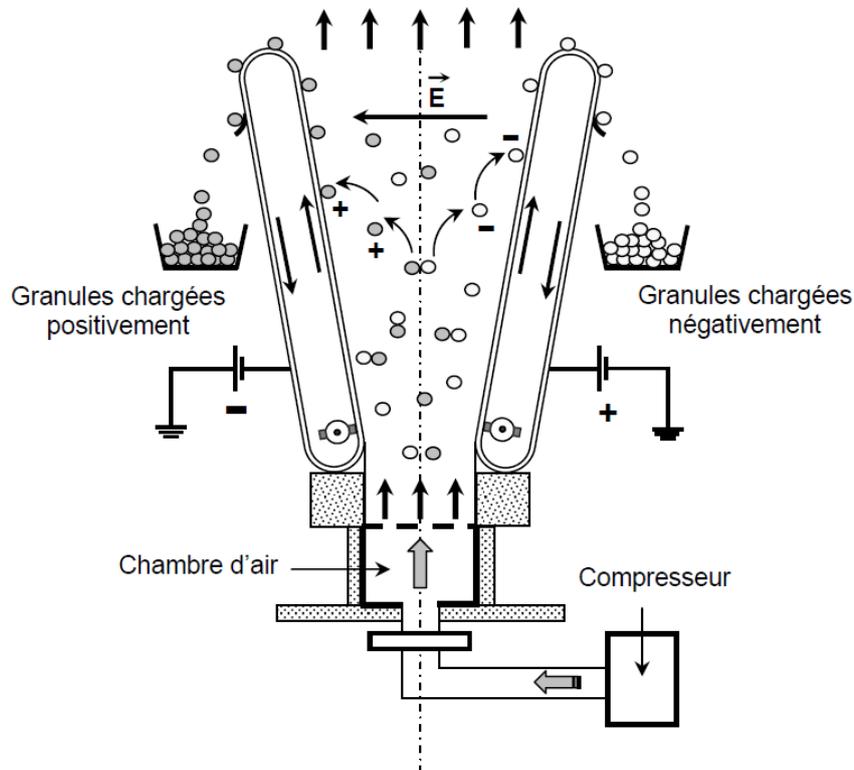
C'est une installation adaptée particulièrement à la séparation des particules fines de plastique. Deux disques métalliques sont montés sur le même arbre (Figure III.5), entraîné par un moteur électrique, afin de les tourner dans un mélange de particules fluidisé. Les deux disques qui sont alimentés par deux sources de haute tension de polarités opposées, soulèvent les particules chargées. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques [11, 22, 34].



**Figure III.5:** Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants [22].

### III.3.3. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux bandes transporteuses

Le mélange de matériaux isolants granulaires est introduit dans un modèle de laboratoire du séparateur tribo-aéro-électrostatique (Figure III.6). Le diffuseur et le filtre permettent respectivement l'admission et l'évacuation de l'air comprimé utilisé pour créer un gradient négatif de pression en direction verticale. Les granules à l'intérieur de la chambre de séparation forment 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 chargée 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 métalliques. Les deux électrodes sont alimentées par des générateurs de haute tension continue et ajustable. Les granules chargées positivement se déplacent dans le sens du champ électrique, vers l'électrode négative et les granules chargées négativement sont dirigés vers l'électrode positive. Soumis à l'action de la force d'image électrique, les granules chargés adhèrent à la surface des électrodes de polarités opposées, qui les entraînent vers le collecteur de produits [35].

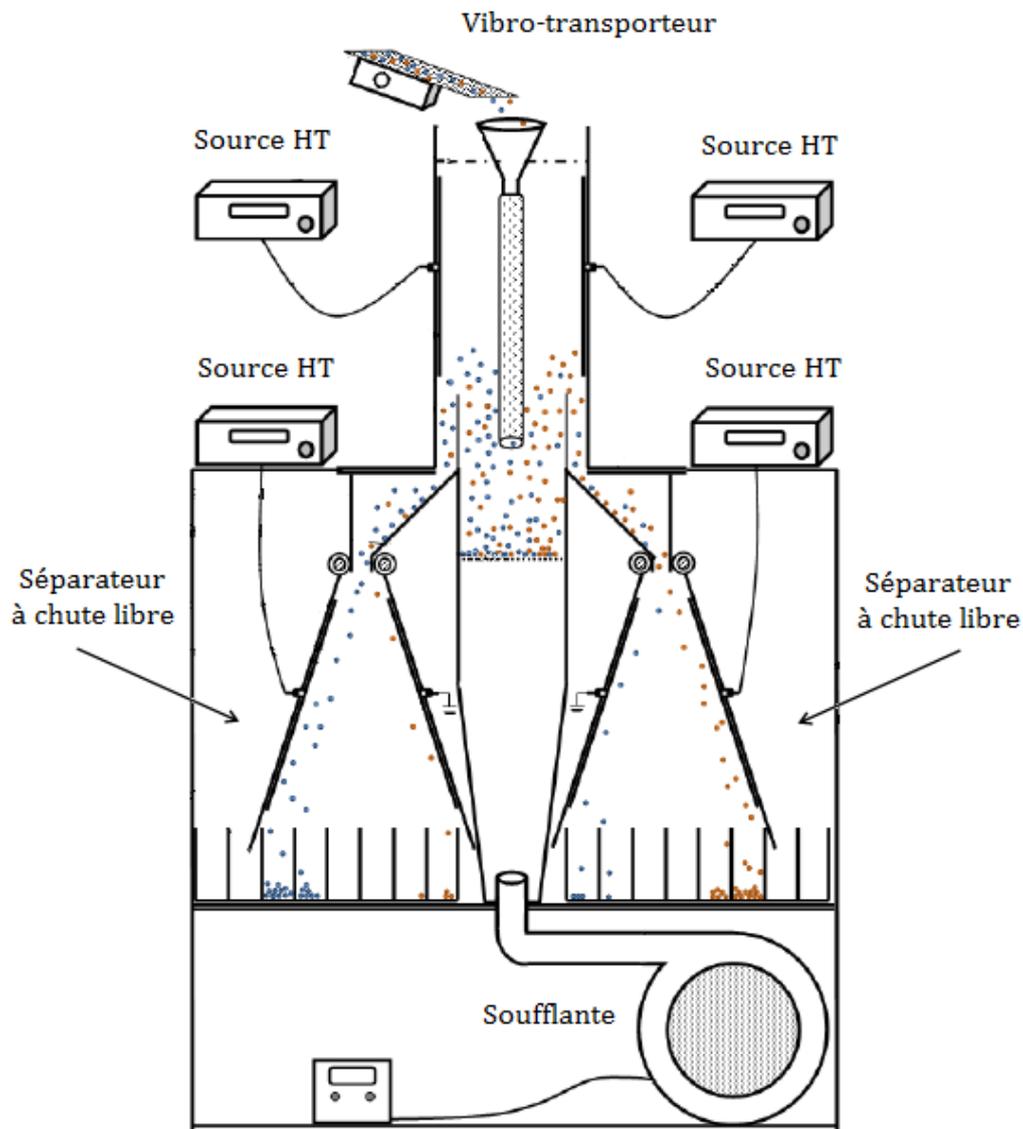


**Figure III.6:** Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux bandes transporteuses [35].

### III.3.4. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages

L'installation est composée de deux étages superposés, détachables, attachés à un même support vertical (Figure III.7). Le séparateur tribo-aéro-électrostatique, situé à l'étage supérieur, est une enceinte parallélépipédique. 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 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.

Deux chambres dirigent les deux flux de granules ainsi créés vers l'étage inférieur de l'installation, composé de deux séparateurs électrostatiques à chute libre. Les électrodes de ces séparateurs sont collées sur quatre plaques isolantes en plexiglas. 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 [36-37].



**Figure III.7:** Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages [14].

### III.4. Performances des séparateurs électrostatiques

La séparation tribo-électrostatique est solution appropriée pour le recyclage des déchets plastiques grâce à des forces électriques agissant sur des particules chargées. C'est une technique multifactorielle difficilement contrôlable. Le résultat final de cette technologie est

donc fortement lié aux plusieurs paramètres, y compris les caractéristiques des mélanges isolants à séparer, comme: la taille, la forme, la masse et la rugosité de surface ...etc, l'efficacité du dispositif de chargement, les paramètres du séparateur lui-même, et l'humidité relative. L'application industrielle d'une telle technologie a toujours des difficultés en raison de la multitude des paramètres de contrôles, et le mauvais ajustement de ces paramètres pourrait avoir des conséquences indésirables pour ce processus. La majorité des travaux (considérations théoriques, investigations expérimentales et modélisations numériques) ont été menés afin de trouver des solutions techniques et ajuster des divers paramètres contrôlables permettant l'amélioration des performances globales des séparateurs électrostatiques en termes de récupération et pureté des produits séparés [22].

### **III.5. Conclusion**

Les séparateurs triboélectriques à lit fluidisé apportent beaucoup d'avantages à la séparation électrostatiques des mélanges granulaires isolants. Ce type d'installation est particulier, le fait qu'il combine le chargement des particules et leur séparation en régime continu.

## **Chapitre IV**

### **Réalisation et étude d'un séparateur électrostatique à chute libre**

## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de la séparation d'un mélange granulaire isolant (PA/PC), par l'emploi d'un séparateur électrostatique à chute libre associé à un dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé. Le séparateur est le plus basique des dispositifs de séparation. Son principe inclut l'action combinée des forces gravitationnelle et électrique afin de séparer un mélange granulaire isolant.

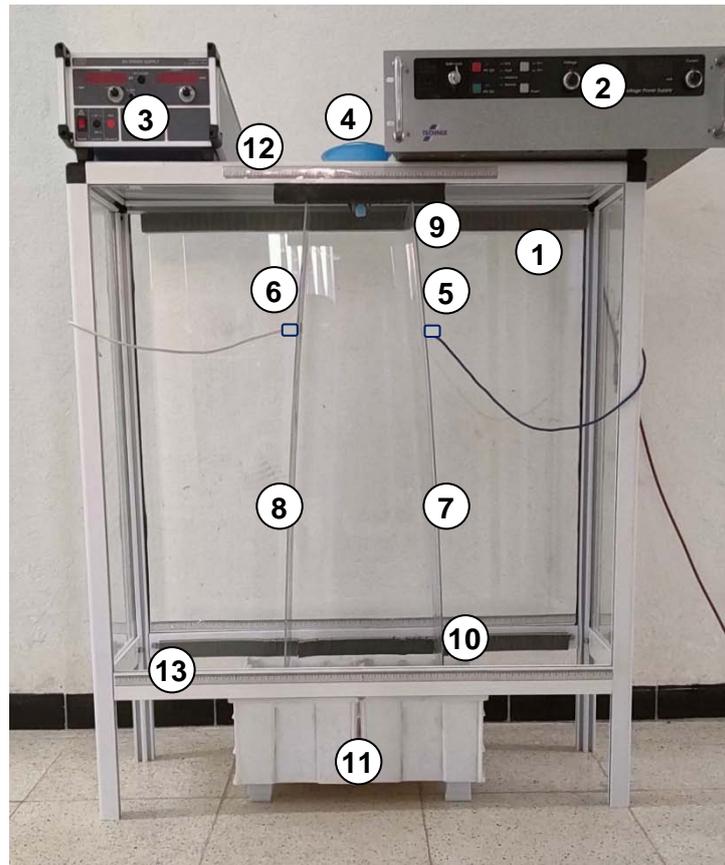
## IV.2. Présentation du séparateur à chute libre

### IV.2.1. Description

Le séparateur électrostatique à chute libre conçu au sein de laboratoire LGEG, de l'université 8 Mai 1945 de Guelma, est présenté sur la figure IV.1. Ce procédé est utilisé pour la séparation des matériaux granulaires plastiques.

Cette installation est composée essentiellement des éléments suivants:

- 1- Une chambre de séparation en verre de dimensions (85 × 30 × 75) cm, elle nous permet d'observer le déroulement des essais.
- 2- Deux électrodes planes en aluminium de dimensions (71 × 20) cm, collées sur deux plaques détachables en plexiglas de dimensions (75 × 26) cm (Figure IV.2). Les deux plaques sont attachées intentionnellement à l'intérieur de la chambre de séparation par ses quatre côtés, ce qui va nous permet d'ajuster la distance horizontale entre les électrodes et en même temps l'inclinaison des électrodes par rapport à l'axe vertical. Les deux électrodes sont reliées, aux sources de haute tension à courant continu de polarité inverse (Figure IV.3). La tension des sources utilisées dans cette étude varie de 0 à ± 10 kV.
- 3- Un entonnoir de forme conique terminé par un tube qui serve à verser le mélange granulaire dans la chambre de séparation, il reçoit les particules chargées venant du dispositif de chargement à lit fluidisé afin de les guider en chute libre sous l'action de la force de la pesanteur dans la zone de séparation électrostatique.
- 4- Un collecteur à six compartiments: Les particules chargées sont attirées par l'électrode de polarité opposée, et sont récupérées ensuite dans les compartiments situés à gauche et adroite comme étant les produits A et B (Figure IV.4). Tandis que, les particules non-chargées ou faiblement chargées ne sont pas affectées par les forces électrostatiques et tombent sous l'action de la force de la pesanteur vers les compartiments situés au centre destinés au produit mixte.



**Figure IV.1:** Photographie du séparateur tribo-électrique à chute libre: (1) Chambre de séparation, (2) Source haute tension négative, (3) Source haute tension positive, (4) Entonnoir, (5-6) Raccord haute tension, (7-8) Electrode plane, (9) Porte électrode supérieur, (10) Porte électrode inférieur, (11) Collecteur, (12-13) Règle graduée.



**Figure IV.2:** Photographie de l'électrode plane.



**Figure IV.3:** Photographies des générateurs de haute tension: (a) HT positive, (b) HT négative.

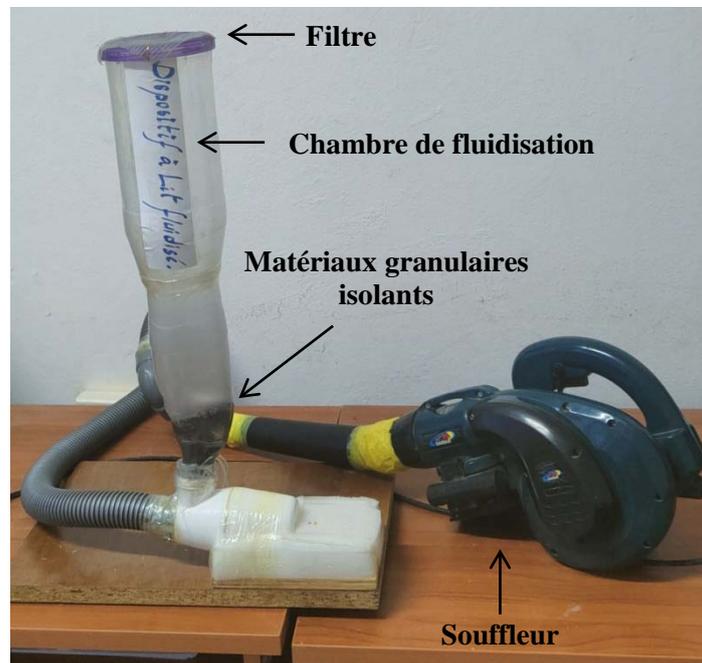


**Figure IV.4:** Photographie du collecteur de produit.

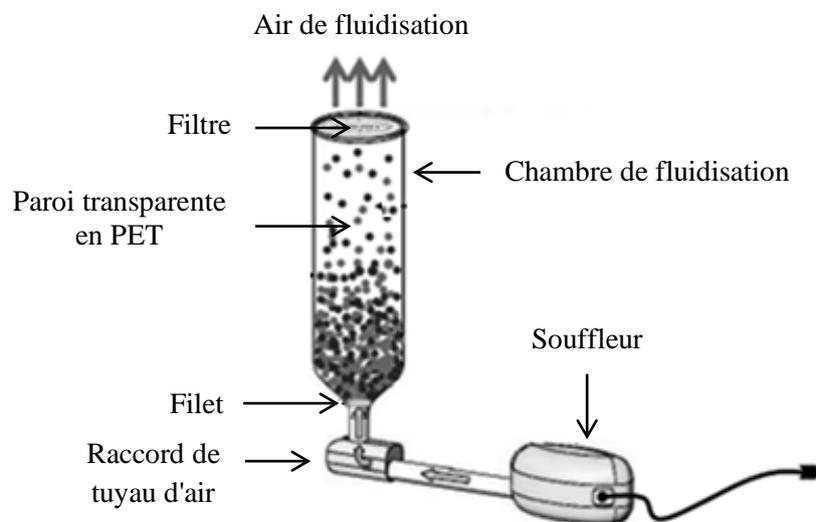
#### IV.2.2. Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé

Le dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé présenté sur les figures IV.5 et IV.6 est utilisé pour le chargement tribo-électrique des mélanges granulaires isolants de tailles millimétriques. L'air de fluidisation est fourni par une soufflante. Un diffuseur d'air assure l'uniformité de fluidisation de particules, qui est une plaque en plastique perforée située au fond de la chambre. À l'extrémité supérieure, la chambre est équipée d'un filtre qui empêche

les granules de s'échapper. Les particules acquièrent des charges triboélectriques d'une part par collision entre-elles et d'autre part avec les parois de la chambre cylindrique en polyéthylène téréphtalate. Certains granules obtiennent alors une charge positive, tandis que les autres acquièrent une charge négative.



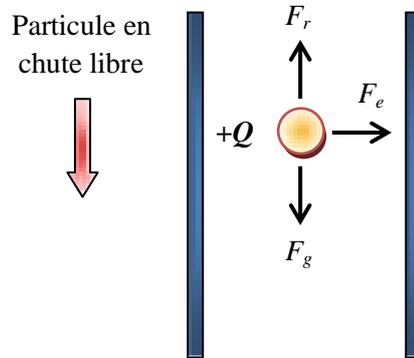
**Figure IV.5:** Photographie du dispositif expérimental de chargement tribo-électrique à lit fluidisé.



**Figure IV.6:** Représentation schématique du dispositif expérimental de chargement à lit fluidisé [22].

### IV.2.3. Forces exercées sur les particules

Les forces électrostatiques et mécaniques qui agissent sur les particules durant le processus de séparation dans un séparateur à chute libre sont illustrées sur la figure IV.7. La particule de masse  $m$ , portant une charge  $Q$  et évoluant dans un champ électrique uniforme d'intensité  $E$ .



**Figure IV.7:** Représentation schématique des forces agissant sur une particule chargée en chute libre dans un champ électrique.

Le mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique intense créé entre les deux électrodes du séparateur à chute libre est affecté par l'action de la force du champ électrique  $F_e$  et la force gravitationnelle  $F_g$ , selon l'équation de la deuxième loi de Newton:

$$\sum F = m \cdot a = F_e + F_g \quad (\text{IV.1})$$

avec:

$$F_e = Q \cdot E \quad (\text{IV.2})$$

$$F_g = m \cdot g \quad (\text{IV.3})$$

$$E = \frac{\Delta U}{d} \quad (\text{IV.4})$$

$F_r$ : La force de l'air supposée négligeable;

$m$ : La masse de la particule [Kg];

$g$ : L'accélération de la pesanteur [ $\text{m/s}^2$ ];

$Q$ : La charge de la particule [C];

$E$ : Le champ électrique [kV];

$\Delta U$ : La différence de potentiel [kV];

$d$ : La distance entre les électrodes [m].

### IV.3. Techniques de mesure et procédures expérimentales

L'étude expérimentale porte sur l'évaluation de l'efficacité de l'installation de séparation. Les grandeurs d'évaluation du procédé électrostatique sont le taux de récupération et la pureté des deux produits récupérés. Elles sont étudiées en fonction des paramètres de contrôle suivants:

- ❖ La configuration des électrodes haute tension;
- ❖ La distance inter-électrodes;
- ❖ La tension appliquée.

#### IV.3.1. Procédure de déroulement des expériences

Nous avons réalisé nos expériences sur un mélange granulaire isolant de 100g (50% PC + 50% PA). Toutes les expériences ont été réalisées à l'air ambiant (Température:  $26\pm 1^\circ\text{C}$ , Humidité relative de l'atmosphère:  $52\pm 1\%$ ). L'analyse des résultats a été facilitée par le fait que les particules granulaires ont des couleurs différentes. La procédure expérimentale se déroule en quatre étapes:

##### 1. La première étape: Préparation des échantillons

- Mesurer les quantités prescrites de matériau;
- Introduire le mélange granulaire dans le dispositif de tribo-électrisation.

##### 2. La deuxième étape: Chargement triboélectrique

- Lancer et chronométrer la durée de chargement;
- Retirer le produit tribo-chargé.

##### 3. La troisième étape: Séparation électrostatique

- Fixer l'amplitude de la tension à appliquer;
- Introduire le produit à séparer dans l'entonnoir du séparateur;
- Lancer la séparation électrostatique;
- Eteindre les sources hautes tension après séparation.

##### 4. La quatrième étape: Analyse des résultats, en effectuant les opérations suivantes:

- Retirer les produits récupérés dans chaque compartiment du collecteur;
- Evaluer le taux de récupération des produits séparés;
- Evaluer la pureté des produits séparés.

### IV.3.2. Taux de récupération de produit

La performance du processus de séparation est estimée après le pesage des quantités des produits collectées dans chaque compartiment afin de calculer les taux de récupération de chaque matériau. Cet indicateur détermine l'efficacité du processus et permet d'évaluer le taux (en pourcentage) du produit récupéré en rapport avec le produit total introduit.

Le taux de récupération des produits séparés à été calculé par la formule suivante:

$$Rec (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \times 100 \quad (IV.5)$$

avec:

$m_{ic}$ : La quantité du produit  $i$  considéré collecté dans la partie qui lui est destinée.

$m_{it}$ : La quantité totale du même produit  $i$  introduit dans le séparateur.

### IV.3.3. Taux de pureté de produit

Le taux de pureté est un autre indicateur qui détermine l'efficacité du processus. Ce paramètre permet d'évaluer le taux de la pureté (en pourcentage) du produit collecté, il est calculé par la formule suivante :

$$Pur (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \times 100 \quad (IV.6)$$

avec :

$m_{ic}$ : La quantité du produit  $i$  considéré collecté dans la partie qui lui est destinée.

$m_{tc}$ : La quantité totale (des deux produits) collectée dans la même partie du collecteur.

### IV.3.4. Mesure de la température et de l'humidité relative

La mesure de la température et de l'humidité relative avant les expériences de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique est indispensable, les processus de chargement tribo-électrique et de séparation électrostatique sont très influencés par les conditions ambiantes. Avant les expériences expérimentales on a mesuré la température et l'humidité relative en utilisant un thermo-hygromètre numérique modèle LUTRON AM-4205A (Figure IV.8).



**Figure IV.8:** Photographie du thermo-hygromètre numérique (Modèle Lutron AM-4205A).

### IV.3.5. Mesure de la masse granulaire

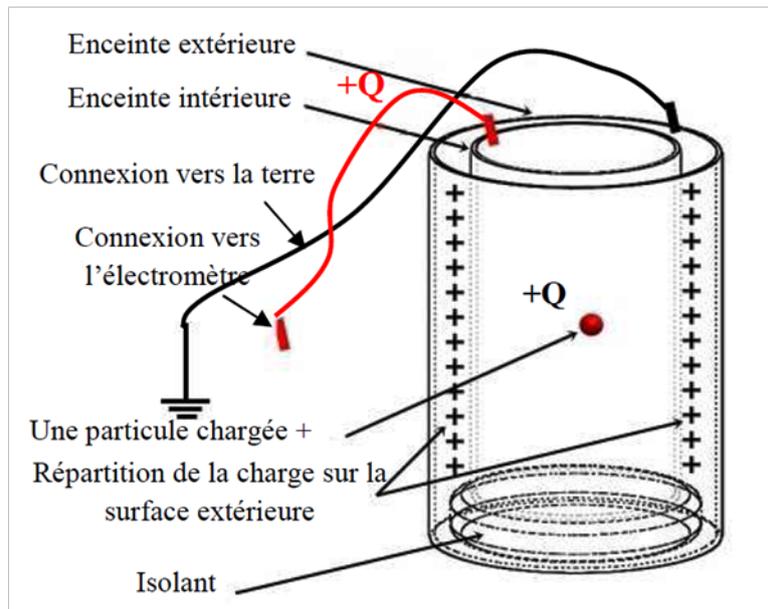
Afin d'obtenir des résultats expérimentaux précises et comparables entre eux, la masse des particules a été pesée avec une balance électronique (précision de 0,01g).



**Figure IV.9:** Balance électronique (Précision de 0,01g).

### IV.3.6. Mesure de la charge triboélectrique

Le dispositif utilisé pour la mesure de la charge est un seau de Faraday. Le seau de Faraday est constitué de deux enceintes séparées par un isolant (Figure IV.10).



**Figure IV.10:** Représentation schématique de seau de faraday utilisé pour la mesure de la charge [22].

L'enceinte extérieure est reliée à la terre pour réduire les perturbations électriques extérieures tandis que l'enceinte intérieure est connectée à un électromètre (Type Keithley modèle 6514) (Figure IV.11) permettant la mesure de la valeur et le signe de la charge, le produit granulaire est introduit dans l'enceinte intérieure.



**Figure IV.11:** Photographie du montage de mesure de la charge électrique: (1) Seau de Faraday, (2) Electromètre numérique (Keithley - modèle: 6514).

#### IV.4. Matériaux utilisés

Nous avons réalisé nos expériences sur des échantillons constitués en proportions égales (50% + 50%) de particules de polyamide (PA) et polycarbonate (PC). Ces échantillons se présentent sous forme sphérique. L'aspect de matériaux granulaires étudiés est présenté sur la figure IV.12. Les principales caractéristiques de matériaux granulaires utilisés dans nos expériences sont données dans le Tableau IV.1 [13,22].



**Figure IV.12:** Photographie du mélange granulaire étudié (PA/PC).

**Tableau IV.1:** Caractéristique principales des matériaux granulaires utilisés [3,22].

Matériau	PC	PA
Densité [g/cm <sup>3</sup> ]	1.2	1.14
Couleur	Orange	Bleu
Forme	Sphérique	Sphérique
Taille [mm]	Ø ≈ 3	Ø ≈ 3
Masse [mg]	25	20
Absorption d'eau à 23°C et RH 50% [%]	0.15	3
Résistance à la traction [N/mm <sup>3</sup> ]	70	70
Rigidité diélectrique [kV/mm]	28	28-30
Résistivité transversale [Ω/cm]	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>
Constante diélectrique	3	3.7

#### IV.4.1. Le Polycarbonate (PC)

Le polycarbonate est un matériau plastique caractérisé par une surface lisse, une très bonne tenue aux chocs, une grande rigidité dans une large plage de température, des excellentes propriétés électriques et diélectriques. Le Polycarbonate est généralement utilisé dans la fabrication de certains composants extérieurs des automobiles, l'électromécanique et l'électroménager.

Le polycarbonate contenu dans les DEEE (Déchets d'équipements électriques et électroniques) est présent soit sous forme pure, soit principalement sous forme de mélanges (ABS/PC,...) [38]:

- 13% du PC issus des déchets plastiques provient des DEEE;
- 3% des matières plastiques contenus dans les DEEE est du PC;
- 38% du tonnage du PC contenu dans les DEEE provient de produits de télécommunication.



**Figure IV.13:** Aspect des granules de Polycarbonate (PC).

#### IV.4.2. Le Polyamide (PA)

Le polyamide est un polymère thermoplastique représente approximativement 4% de la consommation totale des polymères [39]. La résistance mécanique, la rigidité et le pouvoir amortissant combinés à une excellente résistance à l'usure en font le matériau de référence pour la construction mécanique et l'entretien. Il associe de bonnes propriétés mécaniques, électriques et chimiques. Ses bonnes caractéristiques permettent de l'utiliser dans des domaines industriels de plus en plus variés, tels que l'électronique, l'automobile, l'industrie des sports et des loisirs.



**Figure IV.14:** Aspect des granules de Polyamide (PA).

## IV.5. Résultats et discussion

### IV.5.1. Mesure de la charge électrique

Les charges massiques acquises par les particules de PA et PC, dans cette installation sont respectivement:  $+1,78\eta\text{C/g}$  et  $-3,00\eta\text{C/g}$ .

Ces valeurs enregistrées après séparation électrostatique pour les deux matériaux sont relativement faibles. Ceci peut être expliqué par le fait que nos échantillons sont vieillis. Par ailleurs, dans cette étude nous n'avons pas utilisé des échantillons neuf.

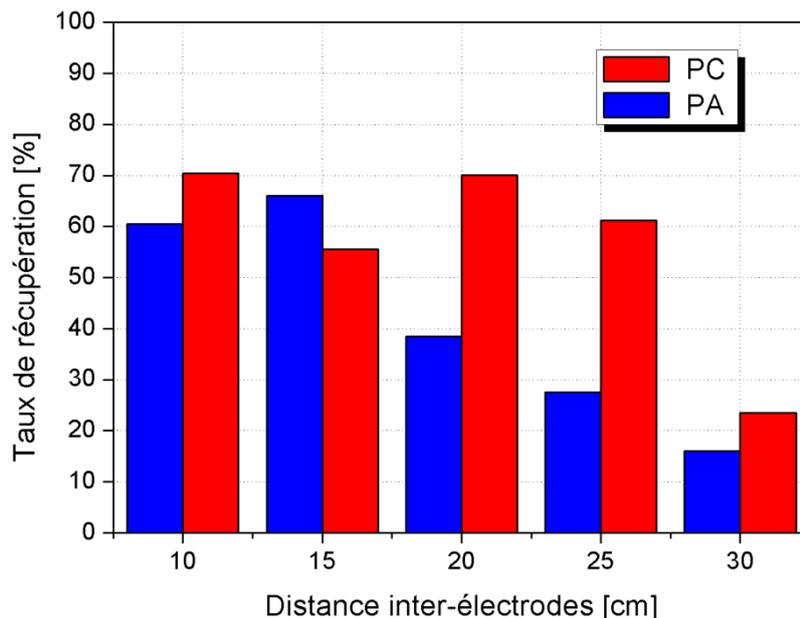
### IV.5.2. Résultats du séparateur à chute libre à électrodes parallèles

#### IV.5.2.1. Influence de la distance inter-électrodes

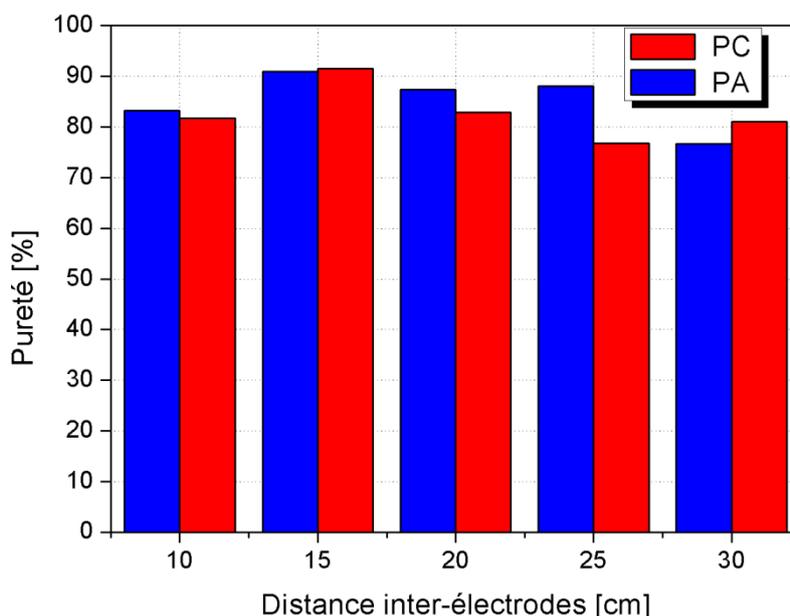
Les résultats des expériences de séparation en termes de taux de récupération et de taux pureté des deux produits en fonction de la distance inter-électrodes sont montrés dans le tableau IV.2 et les figures IV.15 et IV.16, pour une tension appliquée (10 kV) et un temps de chargement des particules (5min). D'après ces résultats, le meilleur résultat de séparation, déterminé par les expériences, a été de 15cm. Comme nous pouvons le constater, pour une distance inter-électrodes de 15cm, le taux de récupération des particules de PA et PC égal 66,02%, 55,6% et le taux de pureté des deux produits est égal: 90,98% et 91,47% respectivement.

*Tableau IV.2: Influence de la distance inter-électrodes sur le taux de récupération et le taux de pureté des deux produits récupérés.*

Distance inter-électrodes (cm)	Taux de récupération (%)	Taux de récupération (%)	Taux de pureté (%)	Taux de pureté (%)
	PA	PC	PA	PC
10	60,46	70,38	83,27	81,81
15	66,02	55,6	90,98	91,47
20	38,44	70,04	87,4	82,88
25	27,52	61,18	88,05	76,82
30	16,02	23,56	76,65	81,01



**Figure IV.15:** Taux de récupération des produits en fonction de la distance inter-électrodes (configuration parallèle: tension appliquée = 10kV).



**Figure IV.16:** Taux de pureté des produits en fonction de la distance inter-électrodes (configuration parallèle: tension appliquée = 10kV).

#### IV.5.2.2. Influence de la tension appliquée

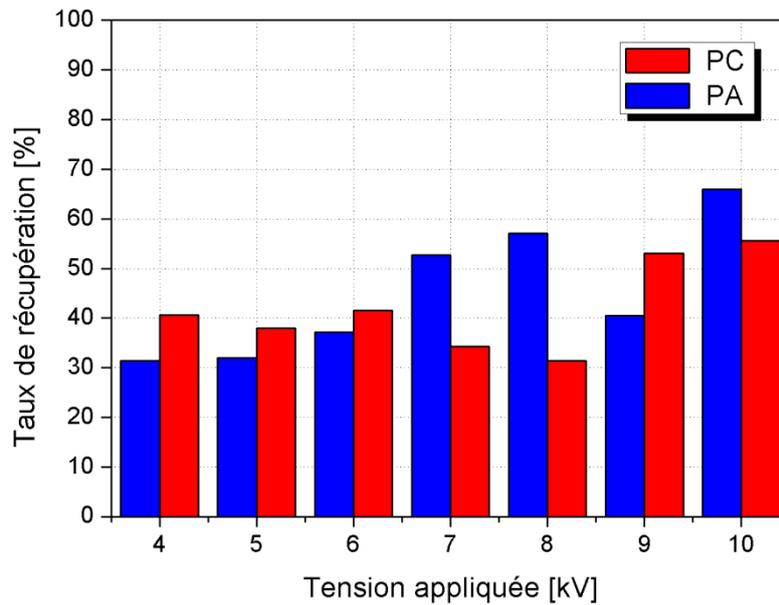
Les résultats des expériences de séparation en fonction de la tension appliquée sont montrés dans le tableau IV.3 et les figures IV.17 et IV.18, la distance entre les électrodes est maintenue constante et égale à 15cm. D'après les résultats, le meilleur résultat de séparation, déterminé par les expériences, a été obtenu pour une tension appliquée égale à 10kV.

Si on considère les deux résultats des figures IV.17 et IV.18, on peut observer l'effet de la tension appliquée sur la variation de la récupération et la pureté et des deux matériaux. Il apparaît que l'augmentation de la tension (de 4kV à 10kV) a été accompagnée par une augmentation de taux de récupération et de pureté des deux matériaux récupérés.

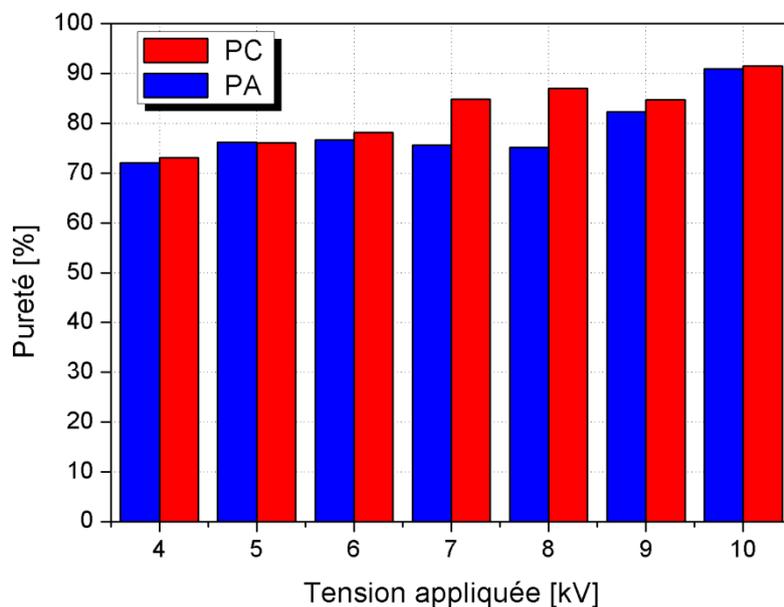
Ces résultats montrent clairement que l'efficacité du procédé de séparation croît avec l'augmentation de la tension appliquée sur les électrodes planes. Cela est dû tout naturellement à l'augmentation du champ électrique horizontal créé entre les deux électrodes et qui est proportionnel à la tension appliquée.

**Tableau IV.3:** Influence de la tension appliquée sur le taux de récupération et le taux de pureté des deux produits récupérés (Configuration parallèle: distance entre les électrodes = 15cm).

Tension appliquée (kV)	Taux de récupération (%)	Taux de récupération (%)	Taux de pureté (%)	Taux de pureté (%)
	PA	PC	PA	PC
4	31,44	40,66	72,11	73,07
5	32,02	38,02	76,16	76,07
6	37,24	41,52	76,68	78,16
7	52,74	34,3	75,66	84,9
8	57,16	31,38	75,21	87,11
9	40,54	53,08	82,33	84,79
10	66,02	55,6	90,98	91,47



**Figure IV.17:** Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée sur les électrodes (configuration parallèle: distance entre les électrodes = 15cm).



**Figure IV.18:** Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée sur les électrodes (configuration parallèle: distance entre les électrodes = 15cm).

### IV.5.3. Résultats du séparateur à chute libre à électrodes en position “V” inversé

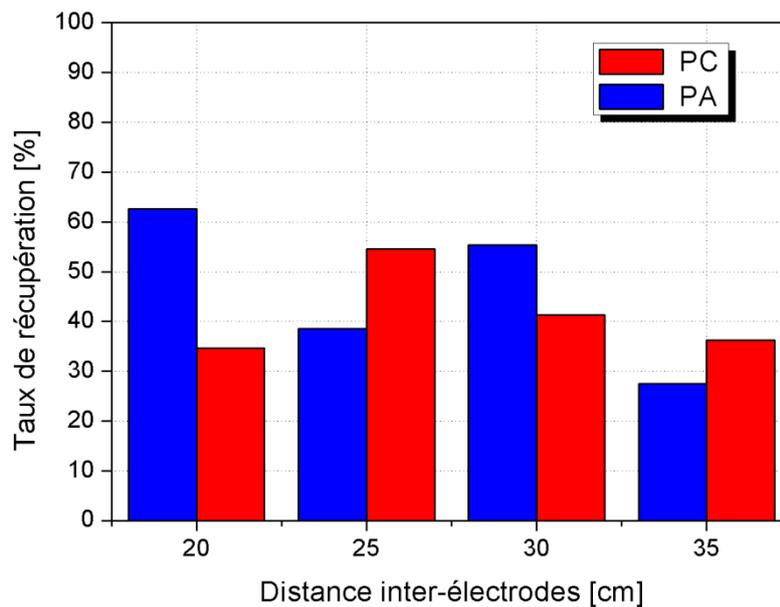
#### IV.5.3.1. Influence de la distance inter-électrodes inférieurs

Dans cette partie, nous allons représenter les résultats du séparateur à chute libre pour une configuration des électrodes en position “V” inversé en fonction de la distance entre les bords inférieurs des électrodes. Les résultats de la séparation des deux produits en termes de taux de récupération et de pureté sont présentés dans le tableau IV. 4 et les figures IV.19 et

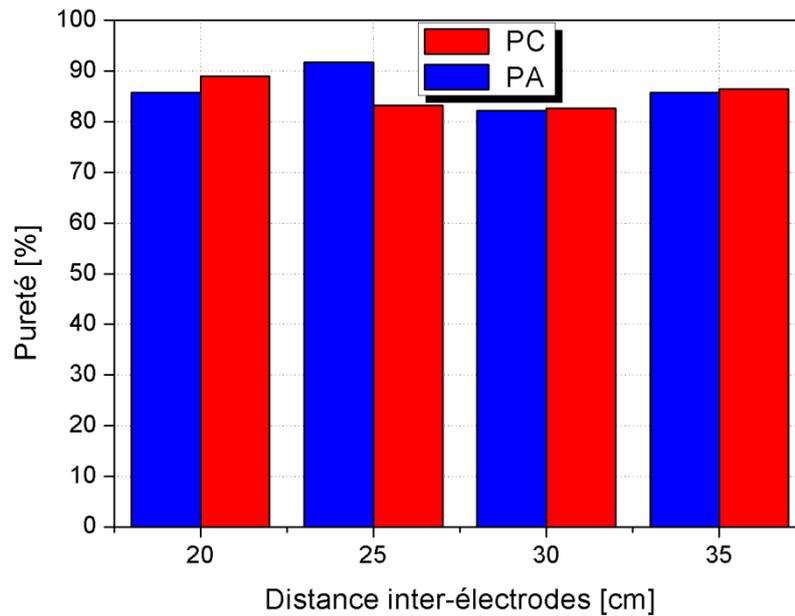
IV.20, la distance entre les bords supérieurs des électrodes est maintenue constante égale à 15cm et la tension appliquée égale 10kV.

**Tableau IV.4:** Influence de la distance entre les bords inférieurs des électrodes sur le taux de récupération et le taux de pureté des deux produits récupérés (configuration "V" inversé: distance entre les bords supérieurs = 15cm, tension appliquée = 10kV).

Distance entre les bords supérieurs des électrodes (cm)	Distance entre les bords inférieurs des électrodes (cm)	Taux de récupération (%)	Taux de récupération (%)	Taux de pureté (%)	Taux de pureté (%)
		PA	PC	PA	PC
15	20	62,58	34,68	85,79	88,96
	25	38,56	54,54	91,72	83,31
	30	55,42	41,34	82,22	82,71
	35	27,42	36,32	85,74	86,47



**Figure IV.19:** Taux de récupération des produits en fonction de la distance entre les bords inférieurs des électrodes (configuration "V" inversé: distance entre les bords supérieurs = 15cm, tension appliquée = 10kV).



**Figure IV.20:** Taux de pureté des produits en fonction de la distance entre les bords inférieurs des électrodes (configuration “V” inversé: distance entre les bords supérieurs = 15cm, tension appliquée = 10kV).

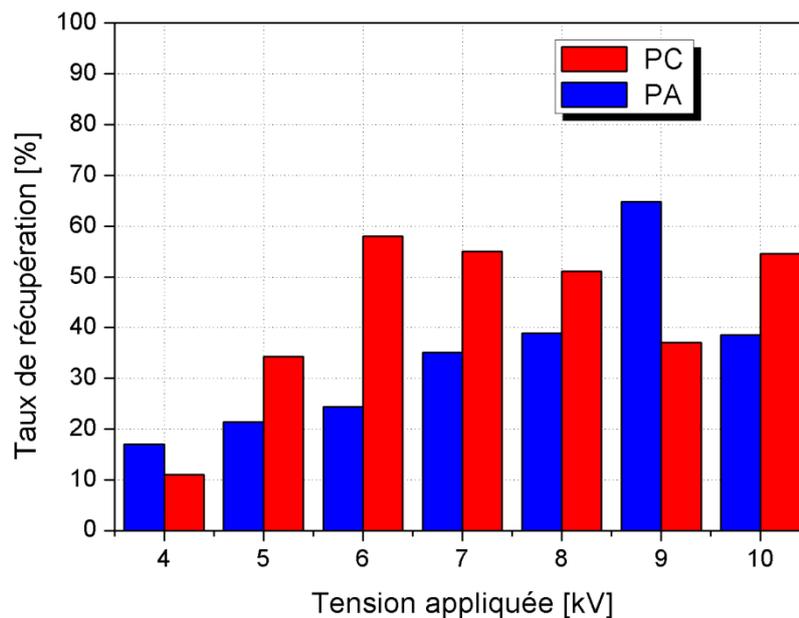
Le meilleur résultat de séparation électrostatique dans une configuration des électrodes en “V” inversé, déterminée par les expériences, a été 15 cm entre les bords supérieurs et 25cm entre les bords inférieurs des électrodes. En conséquence, pour ces distances, le taux de récupération était environ 38% pour le PA et 54 pour le PC, et la pureté des produits était supérieure à 91% pour le PA et 83% pour le PC.

#### IV.5.3.2. Influence de la tension appliquée

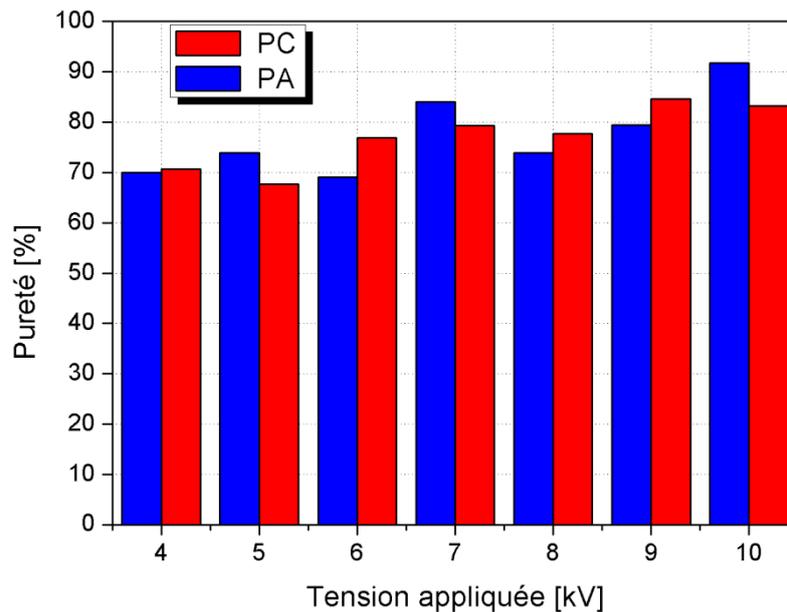
Les résultats des expériences effectués dans une configuration “V” inversé en fonction de la tension appliquée sur les électrodes sont présentés dans le tableau IV.5 et les figures IV.21 et IV.22. La distance entre les bords supérieurs des électrodes est 15cm et la distance entre les bords inférieurs est 25cm.

**Tableau IV.5:** Influence de la tension appliquée sur le taux de récupération et le taux de pureté des deux produits récupérés (Configuration "V" inversé: distance entre les bords supérieurs des électrodes = 15cm, distance entre les bords inférieurs des électrodes = 25cm).

Tension appliquée (kV)	Taux de récupération (%)	Taux de récupération (%)	Taux de pureté (%)	Taux de pureté (%)
	PA	PC	PA	PC
4	17	10,96	70,01	70,7
5	21,4	34,26	73,89	67,68
6	24,38	58,02	69,08	76,95
7	35,1	55,04	84,05	79,33
8	38,86	51,06	73,95	77,72
9	64,82	37,06	79,51	84,57
10	38,56	54,54	91,72	83,31



**Figure IV.21:** Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée (configuration "V" inversé: distance entre les bords supérieurs des électrodes 15cm, distance entre les bords inférieurs 25cm).



**Figure IV.22:** Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée (configuration “V” inversé: distance entre les bords supérieurs des électrodes 15cm, distance entre les bords inférieurs 25cm).

Le meilleur résultat de séparation électrostatique dans une configuration des électrodes en “V” inversé en fonction de la tension appliquée, a été 10kV. En conséquence, pour cette valeur de la tension appliquée sur les électrodes, le taux de récupération était environ 38% pour le PA et 54% pour le PC, et la pureté des produits était supérieure à 91% pour le PA et 83% pour le PC.

## IV.6. Conclusion

Les résultats obtenus dans cette partie expérimentale montrent clairement qu’il existe une différence des résultats obtenus avec des électrodes parallèles et des électrodes en position “V” inversé. Dans le cas d’une configuration parallèle, les résultats sont nettement meilleurs comparativement au cas “V” inversé en terme de récupération et pureté. A partir de là, la disposition des électrodes du séparateur à chute libre et la tension appliquée ont un effet très important sur l’efficacité du processus de séparation.

## **Conclusion générale**

Le plastique est présent dans de multiples applications en raison notamment de sa facilité de mise en œuvre, de sa résistance et de sa légèreté, il reste malgré tout l'un des matériaux les moins recyclés, avec un taux d'incorporation de l'ordre de 5%. La valorisation et le recyclage de ces matériaux qui arrivent en fin de vie utile s'imposent afin de valoriser cette ressource peu coûteuse comparativement aux coûts des matières premières. L'opération de valorisation par laquelle les déchets plastiques sont retraités nécessite la recherche et le développement de nouvelles technologies de séparation physique.

Les technologies électrostatiques se sont imposées comme la solution de choix pour le recyclage des matériaux isolants contenus dans ces déchets. D'autant plus que la séparation électrostatique est une technologie non-polluante, caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien.

Dans ce travail nous avons réalisé une étude expérimentale d'un séparateur électrostatique à chute libre associé à dispositif de chargement tribo-électrique à lit fluidisé. Les résultats obtenus montrent clairement que les paramètres étudiés (la tension appliquée, la distance inter-électrodes et la configuration des électrodes) influent considérablement sur le taux de récupération et le taux de pureté des produits séparés d'un mélange granulaire binaire de polyamide (PA) et polycarbonate (PC).

## Bibliographie

- [1] Adjoudj F., Mohammedi D., “ Etude du comportement de nouvelles formulations à base de polychlorure de vinyle (PVC)”, Mémoire de Master Protection de l’environnement, Université de Tizi-Ouzou, 2017.
- [2] <http://fr.boell.org/fr/atlas-du-plastique>  
Atlas du plastique: faits et chiffres sur le monde des polymères synthétiques
- [3] Traore B., “Elaboration et caractérisation d’une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés) : amélioration de la résistance par des charges en argiles”, Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny, République de Côte d’Ivoire, 2018.
- [4] <https://www.naga44.org/IMG/pdf/plastiques.pdf>  
Les plastiques
- [5] Chala K., “Elaboration et caractérisation d’un matériau à base de Polyéthylène basse densité recyclé et chargé par le Talc”, Mémoire de Master, Génie des Procédés, Université de Biskra, 2016.
- [6] Bissagou K.G., “Fragmentations chimique et physique de plastiques et micro-plastiques en eau douce sous irradiation UV-visible”, Thèse de Doctorat, Université Clermont Auvergne, 2018.
- [7] Coulibaly M., “Modélisation micromécanique et caractérisation expérimentale du comportement des matériaux hétérogènes élastoviscoplastiques: application à la valorisation des polymères recyclés”, Thèse de Doctorat en mécanique des matériaux, Université Paul Verlaine de Metz, France, 2008.
- [8] Robin J.J., “Recyclage des thermoplastiques”, Techniques de l’Ingénieur, Réf : AM3832 v1, 2003.
- [9] Kossentini Kallel T., “Etude de mélanges PE/PS Contribution au recyclage”, thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.
- [10] Das S., Samuila A., Dragan C., and Dascalescu L., “Behaviour of charges insulating particles in contact with a rotating roll electrode”, Journal of Electrostatics, vol. 69, pp. 189-192, 2009.
- [11] Mekhalef Benhafssa A., “Etude d’un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges des matériaux poudreux”, Thèse de Doctorat en électrotechnique, Université de Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [12] Hammi T., “ Etude de méthodes de mesures et réalisation d’un banc de test pour l’évaluation des propriétés électrostatiques des textiles”, Thèse de Doctorat en micro-

ondes et micro-technologies, Université des sciences et technologies de Lille, France, 2005.

- [13] Hanafi Z., Allele S., “Etude expérimentale d’un séparateur incliné à deux étages”, Mémoire de Master en électrotechnique, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2019.
- [14] Fekir D. E., “Chargement triboélectrique et séparation électrostatique pour deux types de mélange granulaire binaire isolants de taille fine et ceux de grosse taille”, Thèse de Doctorat en électrotechnique, Université de Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [15] Calin L., “Séparation électrostatique des matériaux plastiques provenant d’équipements informatiques, en utilisant la triboélectrisation en lit fluidisé”, Thèse de Doctorat Université de Poitiers, Juin 2008.
- [16] Shaw, P. E., “Experiments on tribo-electricity. I. - The tribo-electric series”, Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 94(656), pp. 16-33, 1917.
- [17] Diaza A. F., Felix-Navarro R. M., “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.
- [18] Iuga A., Calin L., Neamtu V., Mihalcioiu A., Dascalescu L., “Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device”, Journal of Electrostatics, vol. 63, pp. 937-942, 2005.
- [19] Fujita T., Kamiya Y., Shimizu N., Tanaka T., “Basic study of polymer particles separation using vibrating feeder and electrostatic high voltage generator”, Proceedings of the Third International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology, pp. 155–164, 1995.
- [20] Hyun Park C., Koo Park J., Seok Jeon H., Chul Chun B., “Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger”, Journal of Electrostatics, vol. 66, pp. 578–583, 2008.
- [21] Messal S., “Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l’industrie agro-alimentaire”, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, Décembre 2016.
- [22] Nadjem A., “Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques”, Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2019.
- [23] Miloudi M., Medles K., Tilmatine A., Brahami M., Dascalescu L., “Modeling and Optimization of a Peopeller-type Tribocharger for Granular Materials”, Journal of Electrostatics, vol 69, 2011.
- [24] Aksa W., “Réalisation et étude d’un séparateur aérodynamique semi-industriel pour la récupération de particules isolantes”, Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2014.

- [25] Benabboun A., Tilmatine A., Medles K., Miloudi M., Dascalescu L., “Etude expérimentale des procédés d’acquisition de charge triboélectrique pour séparateurs électrostatiques de particules de déchets en plastique”, Conférence Francophone sur l’Eco-conception en Génie Electrique (CONFREG-2012), Montréal, 28-30 Mai 2012, Canada.
- [26] Dragan C., “Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéro-électrostatique de matériaux plastiques granulaires”, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2010.
- [27] Escalante S.L., Touchard G., Dominguez G., “Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes”, Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, pp. 694-697, 2002.
- [28] Rezoug M., Ouiddir R., Aksa W., Medles K., Bilici M., Dascalescu L., “Tribo-aeroelectrostatic separator for ternary mixtures of granular plastics”, IEEE/IAS annual meeting, October 6-10, 2013 Orlando, USA.
- [29] Calin L., Caliap L., Neamtu V., Morar R., Iuga A., Samuila A., Dascalescu L., “tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation”, In: IEEE Transactions on Industries Applications, vol. 44, pp. 1045-1051, 2008.
- [30] Calin L., Mihalcioiu A., Das S., Neamtu V., Dragan C., Dascalescu L., Iuga A., “Controlling particle trajectories in free-fall separators”, In: IEEE Transactions on Industries Applications, vol. 44, pp. 1038-1044, 2008.
- [31] Calin L., Dragan C., Iuga A., Samuila A., Dascalescu L., “Influence of the air humidity and temperature on fluidised bed triboelectrostatic separation”, MmdE-2008&ROMSC-2008 Conference at “Politehnica” University of Bucharest, 16-18 June, 2008.
- [32] Gontran R., “Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires”, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2018.
- [33] Bilici, M., Dascalescu, L., Dragan, C., Fati, O., Iuga, A., Samuila, A., “Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, pp. 1476-1483, 2011.
- [34] Boukhoulda, M. F., Miloudi, M., Medles, K., Rezoug, M., Tilmatine, A., Dascalescu, L. “Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, pp. 2375-2381, 2013.
- [35] Remadnia M., “Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants”, Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2012.
- [36] Messafeur R., “Etude d’un procédé de séparation d’un mélange de particules isolantes issues de plusieurs matériaux”, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2018.

- [37] Aksa W., Medles K., Rezoug M., Miloudi M., Dascalescu L., “Procédé de séparation électrostatique à deux étages pour l’amélioration de la pureté des matériaux isolants obtenus des déchets d’équipements électriques et électroniques”, Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Génie Electrique (CONFREGÉ), Montréal, Canada, Mai 2012.
- [38] Barthes M.L., “ Régénération d’ABS et de PC issus de DEEE sous forme d’alliages de polymères techniques ou de nano-composites”, Thèse de Doctorat en Mécanique et Ingénierie, Université Bordeaux 1, France, 2010.
- [39] Gonçalves, E. S., Poulsen, L., Ogilby, P. R., “Mechanism of the temperature-dependent degradation of polyamide 66 films exposed to water”, Polymer Degradation and Stability, vol. 92, pp. 1977-1985, 2007.