

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:...../2019



## MEMOIRE

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

**Domaine:** Sciences et Technologie

**Filière:** Electrotechnique

**Spécialité:** Réseaux électriques

**Par:** Bechkoura Hana et Mendjel Somia

Thème

**Etude et réalisation d'un procédé de tri des particules  
isolantes**

Soutenu publiquement, le 02/07 /2019 devant le jury composé de:

M. KACHI Miloud	Professeur	Univ. Guelma	Président/Encadreur
M. BELOUCIF Faissel	MCB	Univ. Guelma	Examinateur
M. REMADNIA Mokdad	MCA	Univ. Guelma	Examinateur

**Année Universitaire: 2018 /2019**

# Remerciements

Tout d'abord louanges et remerciements à **Dieu** pour m'avoir donné le courage et la force de terminer ce modeste travail.

Ce travail a été préparée au sein du laboratoire de Génie électrique (LGEG) de l'Université 8 mai 1945 de Guelma.

Nous tenons à remercier sincèrement notre encadreur **Pr. KACHI Miloud** pour le thème du sujet intéressant qu'il nous 'a proposé, son aide et ses encouragements au cours de ce travail et également pour ses précieux conseils qu'il nous 'a prodigué durant la réalisation de cette travaille.

Nous tiens tout particulièrement à remercier les enseignants du département génie électrotechnique et automatique pour leur disponibilité et encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma 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.

## *Dédicace*

*Savoir que l'on sait ce que l'on sait, et savoir que l'on ne sait pas ce que l'on ne sait pas : voilà la véritable intelligence*

*Confucius.*

On dit souvent que l'itinéraire est aussi important que la destination. Ces cinq années m'ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase toute simple.

Je ne sais comment exprimer ma gratitude à :

Mon père et ma mère qui m'ont toujours soutenu dans ma vie « Dieu les garde pour moi ».

Mes sœurs, ma famille ; mes chers ce qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

À tous mes amis qui m'ont toujours encouragé et à qui je souhaite plus de succès.

À tous ce que j'aime.

*HANA*

*Dédicace*

## **Je dédie ce projet**

**A ma chère mère**

**A mon cher père**

Qui n'ont jamais cessé de formier des pierres à mon égard de me soutenir et de m'épaulière  
pour que je puisse atteindre me objectif

**A mes grande parentes**

Qui je souhaite une bonne santé

**A mes frères**

**A ma chère amie « AMIN »**

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au longe de mes études

**A ma chère binôme « HANA »**

Pour sa entente et sa sympathie, pour leurs indéfendables soutiens et leurs patience infinie

**A mes chères amies**

**A tout ma famille**

**SOMIA**



# **Sommaire**

---

# Sommaire

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

## CHAPITRE I – Etat de l’art

I.1. Introduction	02
I.2. Recyclage	02
I.2.1. Définition	02
I.2.2. Principe de recyclage	03
I.2.3. La chaîne de recyclage	03
I.3. Catégorie des déchets	04
I.3.1. Les déchets inerte	04
I.3.2. Les déchets dangereux	05
I.3.3. Les déchets non dangereux	06
I.4. Recyclage des déchets d’équipement électrique et électronique (DEEE)	07
I.4.1. Définition	07
I.4.2. Les déchets plastiques	09
I.4.3. Les Catégories de plastiques	10
I.4.4. Les origines des déchets plastiques	11
I.5. Mécanisme de charge électrique	11
I.5.1. Effet couronne	11
I.5.1.1. Définition	12
I.5.1.2. L’effet couronne positive	13
I.5.1.3. L’effet couronne négative	14
I.5.1.4. L’effet couronne alternative	14
I.5.2. Chargement par effet tribo	16
I.5.2.1. Définition	16
I.5.2.3. Historique et mécanisme physique de charge	16
I.5.2.2. Série tribo électrique	19
I.6. Conclusion	20

## CHAPITRE II – Techniques de chargement et séparation électrostatique des matériaux

II.1. Introduction	21
--------------------	----

II.2. Dispositifs de chargement tribo électrique	21
II.2.1. Dispositif de charge par cyclone	21
II.2.2. Chargement statique	22
II.2.3. Dispositif à vibration	23
II.2.4. Lit fluidisées	23
II.2.5. Chargement par ventilateur	25
II.2.6. Chargement tribo aéro statique	25
II.2.7. Dispositif à cylindre rotatif	26
II.3. Technique de séparation basée sur l'électrostatique	27
II.3.1. Séparateur électrostatique chargées par l'effet couronne	27
II.3.2. Séparateur tribo électrostatique	28
II.3.2.1. Séparateur à chute libre	28
II.3.2.2. Séparateur triboélectrique à tapis roulant	29
II.3.2.3. Séparateur tribo aéro électrostatique	30
II.4. Conclusion	33

## **CHAPITRE III – Matériaux et installation expérimentale**

III.1. Introduction	34
III.2. Installation et expérimentale	34
III.3. Dispositif de chargement à lit fluidisée	36
III.3.1. Type de particule utilisée dans la séparation	37
III.3.2. Mesure de la charge triboélectrique	39
III.4. Etude des facteurs influents	41
III.4.1. Type des particules utilisées	41
III.4.2. Procédure de mesure	44
III.4.3. Résultats et discussion	44
III.4.4. Interprétation et Discussion	47
III.5. Conclusion	48

## **CHAPITRE IV – Le séparateur cylindrique unipolaire**

IV.1. Introduction	49
IV.2. Séparateur cylindrique unipolaire	49
IV.2.1. Principe de fonctionnement	49
IV.2.2. Procédure expérimentale	51

IV.2.3.Résultats de la séparation	51
IV.3. Calcul du champ électrique	53
IV .3.1. L'effet de la tension sans matériau chargé	54
IV .3.2. Effets de la présence de les particules chargées	55
IV .4. Interprétation et discussion	60
IV .5. Conclusion	61
Conclusion générale	62
Bibliographie	63

# Liste des figures



## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Schéma simplifié du processus de recyclage, qui va de la collecte à la fabrication d'un nouveau produit issu des déchets	02
<b>Figure I.2:</b> Taux de production des différents types de déchets de l'union européenne	04
<b>Figure I.3:</b> Photo sur la récupération des déchets inertes	05
<b>Figure I.4:</b> Quelques exemples sur les déchets dangereux	05
<b>Figure I.5:</b> Photos de déchets biodégradables	06
<b>Figure I.6:</b> Photos de déchets recyclables	07
<b>Figure I.7:</b> Décharge couronne dans une configuration pointe plan	12
<b>Figure I.8:</b> Génération d'une avalanche électronique et de la décharge couronne	12
<b>Figure I.9:</b> Description de la décharge couronne positive	13
<b>Figure I.10:</b> Description de la décharge couronne négative	14
<b>Figure I.11:</b> Différentes configurations d'électrodes couronnes	15
<b>Figure I.12:</b> L'échange de la charge électrique entre deux surfaces par effet triboélectrique	16
<b>Figure I.13:</b> Effets de la localisation et de la délocalisation des Electrons	17
<b>Figure I.14:</b> Diagrammes des niveaux d'énergie qui expliquent la triboélectrisation de deux granules de différents polymères par la théorie des niveaux superficiels de haute	18
<b>Figure I.15:</b> Mécanismes possibles de transfert de charge	19
<b>Figure I.16:</b> Série triboélectrique expérimentale pour différents matériaux plastiques utilisés dans la fabrication des équipements informatiques et électriques selon différents auteurs	20
<b>Figure II.1:</b> Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone	22
<b>Figure II.2:</b> Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique	22
<b>Figure II.3:</b> Dispositif à vibration	23
<b>Figure II.4:</b> Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation	24
<b>Figure II.5:</b> Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur	25
<b>Figure II.6:</b> Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aero-statique	26
<b>Figure II.7:</b> Représentation schématique du chargement triboélectrique par cylindre tournant	27
<b>Figure II.8:</b> Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour	28
<b>Figure II.9:</b> Séparateur tribo électrostatique à chute libre. (a): Schéma du dispositif. (b): Photographie du dispositif	29
<b>Figure II.10:</b> Séparateur triboélectrique à tapis roulant	29

<b>Figure II.11:</b> Séparateur tribo-aero-électrostatique a bandes transporteuses.	
(a): Schéma du dispositif. (b) : Photographie du dispositif	31
<b>Figure II.12:</b> Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à Tambours transporteurs ;(a): Schéma du dispositif. (b) : Photographie du dispositif	31
<b>Figure II.13:</b> Séparateur tribo-aero-électrostatique a disques tournant. (a) : Schéma du dispositif, (b) : Photographie du dispositif	32
<b>Figure II.14:</b> Séparateur tribo-aero-électrostatique a électrodes verticales. (a) : Schéma dispositif,(b) :Photographie du dispositif	33
<b>Figure III.1:</b> Photographie du dispositif de séparation triboélectrique	34
<b>Figure III.2:</b> Photographie des générateurs de haute tension négative (-) utilisé	35
<b>Figure III.3:</b> Photographie des générateurs de haute tension positive (+) utilisé	35
<b>Figure III.4:</b> Dispositif de triboélectrisation à lit fluidisé utilisé	36
<b>Figure III.5:</b> Aspect et dimension des granules d'Acrylonitrile Butadiène Styrène ABS	37
<b>Figure III.6:</b> Aspect et dimension des granules de polystyrène à fort impact HIPS	38
<b>Figure III.7:</b> La cage de Faraday utilisé	40
<b>Figure III.8:</b> Electromètre numérique Keithley modèle 6514	40
<b>Figure III.9:</b> Balance numérique	41
<b>Figure III.10:</b> Echantillon des granules de polycarbonate (PC) utilisés	42
<b>Figure III.11:</b> Echantillon des granules de polyamide (PA) utilisé	43
<b>Figure III.12:</b> Influence du temps de chargement sur la charge acquise par le : PC, PA,PC et PA	45
<b>Figure III.13:</b> Influence de la masse granulaire sur la charge acquise par le : Pc, Pa, PC et PA	46
<b>Figure III.14:</b> Influence de la vitesse de l'air de fluidisation sur la charge acquise par le : Pc, Pa, PA et PC	47
<b>Figure IV.1:</b> Séparateur électrostatique réalisé au laboratoire LGEG	49
<b>Figure IV.2:</b> Photographie montre les particules collent au surface intérieur du cylindre	50
<b>Figure IV.3:</b> Photographie montre les particules récupérées dans le bac collecteur	50
<b>Figure IV.4:</b> Photographie montre le mélange avant la séparation	52
<b>Figure IV.5:</b> Photographie montre les résultats de la séparation des produits récupérés dans les deux collecteurs	52
<b>Figure IV.6:</b> Distribution radiale avec un cylindre centrale complet.	53
<b>Figure IV.7:</b> L'effet de la tension sur le champ électrique	54
<b>Figure IV.8:</b> L'effet de changement de la valeur (k) sur le champ électrique	55
<b>Figure IV.9:</b> L'effet de la tension sur le champ à la présence de la charge positive	56

<i>Figure IV.10:</i> l'effet de la tension sur le champ à la présence de la charge négative	57
<i>Figure IV.11:</i> L'effet de la valeur (k) sur le champ électrique à la présence de la charge positive	58
<i>Figure IV.12:</i> L'effet de la valeur (k) sur le champ électrique à la présence de la charge negative	58
<i>Figure IV.13:</i> L'effet de changement de la valeur de la charge positive sur le champ électrique	59
<i>Figure IV.14:</i> L'effet de changement de la valeur de la charge négative sur le champ électrique	60

## Liste des tableaux

<i>Tableau I.1:</i> Catégories de DEEE selon la directive européenne sur les DEEE	08
<i>Tableau I.2:</i> Composition des équipements électriques et électroniques	09
<i>Tableau III.1:</i> Propriétés physique d'Acrylonitrile Butadiène Styrene ABS	38
<i>Tableau III.2:</i> Propriétés physique de polystyrène à fort impact HIPS	39
<i>Tableau III.3:</i> Caractéristique principales du polycarbonate (PC)	42
<i>Tableau III.4:</i> Caractéristique principales du polyamide (PA)	43
<i>Tableau III.5:</i> Influence du temps de chargement sur la charge acquise par le : PC, PA ,PC et PA	45
<i>Tableau III.6:</i> Influence de la masse granulaire sur la charge acquise par le : PC, PA ,PC et PA	46
<i>Tableau III.7:</i> Influence de la vitesse de l'air de fluidisation sur la charge acquise par le : Pc, Pa, PC et PA	47



# **Chapitre I**

## **Etat de l'art**

## I.1.Introduction

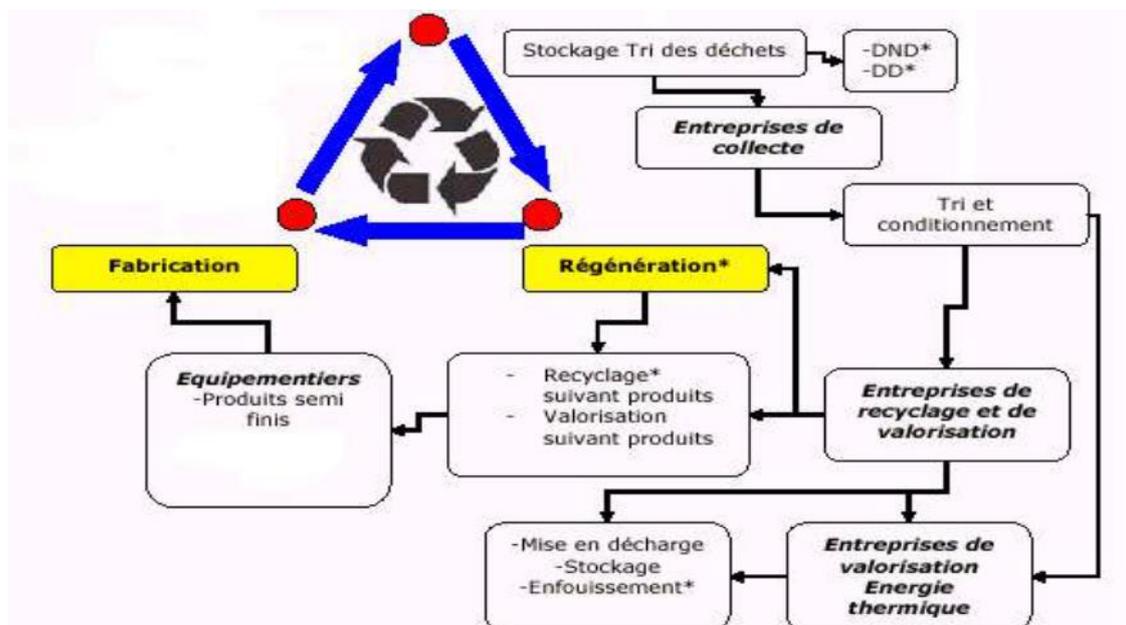
Les statistiques ont montré que les plastiques issus des DEEE possèdent un fort potentiel. De ce fait le recyclage de ce plastique est devenu une industrie qui consiste à récupérer les granules de polymère séparées afin de les réutiliser comme matière première secondaire. La première partie de ce chapitre sera consacré aux différentes catégories de déchets, et Plus particulièrement les déchets plastiques et les DEEE. La deuxième partie est une synthèse bibliographique sur les différents mécanismes physiques de chargement et nous avons parlés en détails sur le chargement triboélectrique par ce qu'elle est le plus utilisé.

## I.2.Recyclage et récupération

### I.2.1.Définition

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus dans le cycle de production d'autres produits équivalents ou différents. Le recyclage permet de réduire les volumes de déchets, et donc leur pollution, et de préserver les ressources naturelles en réutilisant des matières premières déjà extraites [1].

Le recyclage a une série d'avantages : usage rationnel des ressources naturelles, économie de matières premières, économie d'énergie, diminution de la quantité des résidus à éliminer .faire face à la raréfaction de certaines ressources et contrer les externalités négatives dues à la fois à l'utilisation des matières premières vierges et à l'accumulation des déchets [2].



**Figure I.1** : schéma simplifié du processus de recyclage, qui va de la collecte à la fabrication d'un nouveau produit issu des déchets [2]

### I.2.2.Principe de recyclage

La stratégie des « Trois R » constitue le modèle de gestion des déchets et des produits en fin de vie sur lequel repose son action :

- Réduire la quantité de produits qui arrivent en fin de vie.
- Réutiliser des produits ou certaines de leurs parties qui deviendraient autrement des déchets
- Recycler les matières premières [3].

### I.2.3.La chaîne du recyclage

#### a) Collecte de déchets

- Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets.
- Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques.
- Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence la collectes sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même. À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations.

#### b) Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

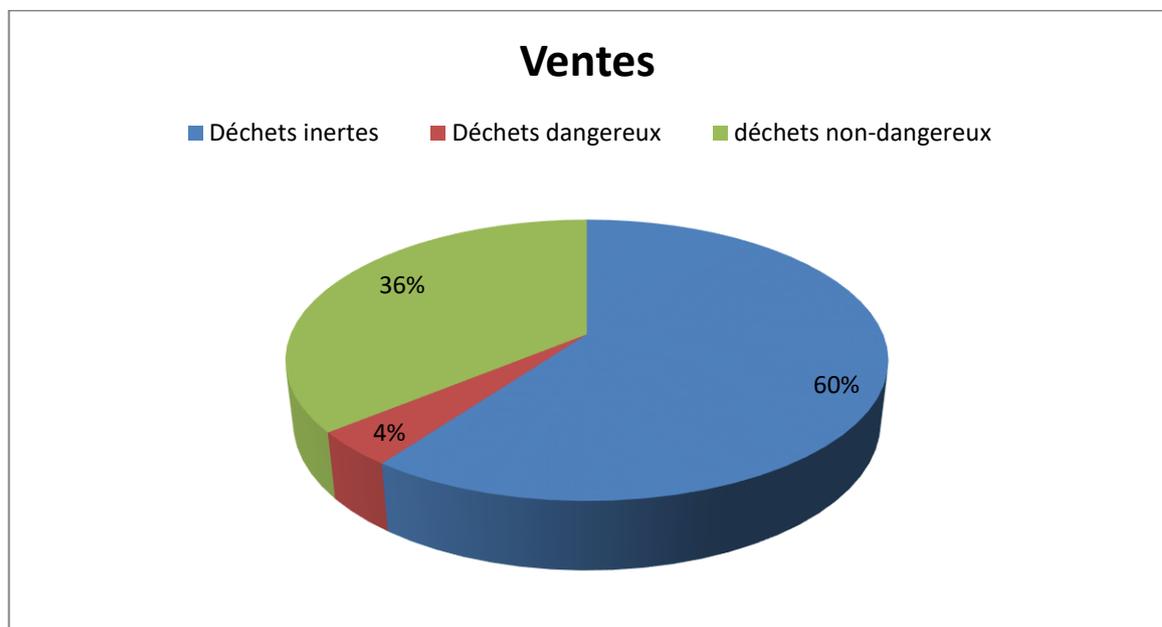
#### c) Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés [4].

### I.3.Catégorie des déchets

On peut classer les déchets en trois catégories :

1. Les déchets inertes qui représentent approximativement 60% de la production totale de déchets de l'Union Européenne.
2. Les déchets dangereux dont la production s'élevait à 94,5 millions de tonnes dans l'Union Européenne en 2010, soit un peu moins de 4% de la production totale de déchets.
3. Les déchets non-dangereux qui représentent environ 1/3 de la production de déchets de l'Union Européenne [5].



**Figure I.2 :** Taux de production des différents types de déchets de l'union européenne [6]

#### I.3.1.Les déchets inertes

Ce sont des déchets qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique avec l'environnement (Figure. I.3). Ils ne sont pas biodégradables et ne présentent pas de danger pour l'homme et l'environnement (remblais ou gravats). Ils sont issus soit de l'industrie extractive (exploitation des carrières ...), ou non extractive (déchets produits par le secteur de la construction tels que les matériaux minéraux : pierre, marbre, grès, ardoise...) [5].



**Figure I.3 :** Photo sur la récupération des déchets inertes [7-8].

### I.3.2. Les déchets dangereux

Ce sont des déchets qui contiennent, en quantité variable, des éléments toxiques ou dangereux nuisibles à la santé humaine et l'environnement (via leurs effets directs ou indirects). Ils sont de nature organique (solvants, hydrocarbures...), minérale (acides, boues d'hydroxydes métalliques...) ou gazeuse (Figure. I.4) [5].



**Figure I.4 :** Quelques exemples sur les déchets dangereux [9-10-5]

### I.3.3. Les déchets non-dangereux

Ce sont des déchets qui peuvent brûler, produire des réactions chimiques, physiques ou biologiques, mais sans présenter de caractère dangereux ou toxique vis-à-vis de l'environnement ou de la santé humaine. On distingue deux types :

- **Déchets biodégradables**

Les bio déchets sont des déchets biodégradables produits par les entreprises et les particuliers comme les résidus alimentaires (épluchures de légumes, coquilles d'œuf,..), de branchages, de feuilles, de papiers, de cartons. Ils sont générés par les collectivités, les grandes et moyennes surfaces, le secteur de la restauration et l'industrie agroalimentaire. Les boues de stations d'épurations sont également considérées comme des bio déchets (Figure. I.5) [5].



**Figure I.5 :** Photos de déchets biodégradables [11-12]

- **Déchets recyclables « déchets industriels banals (DIB) »**

Un déchet recyclable est un déchet qui peut être transformé en matières premières secondaires, permettant ainsi la production d'autres produits. Les déchets recyclables se répartissent en quatre grandes catégories : plastique, verre, papier/carton et métal (Figure. I.6). Ils comprennent également le bois, les déchets d'équipements électriques et électroniques, le caoutchouc [5].



Figure I.6 : Photos de déchets recyclables [13]

## I.4. Recyclage des déchets d'équipements électrique et électronique (DEEE)

### I.4.1. Définition

Les DEEE sont des appareils alimentés électriquement qui ne satisfont plus le propriétaire actuel pour leur but initial. Dans chaque état, les DEEE sont décrits différemment, au moyen de listes inclusives et / ou des définitions juridiques. L'ordonnance suisse sur la restitution, la reprise et l'élimination des équipements électriques et électroniques (1998) a discerné 4 groupes génériques :

- Appareils électroniques de divertissement.
- Appareils faisant partie du bureau, la communication et l'informatique.
- Les appareils ménagers.
- Les composants électroniques des appareils ci-dessus.

En 2004, il a été modifié pour correspondre à la classification de la directive européenne identifiant dix catégories (Tableau I.1) de déchets électroniques qui ne doivent pas être éliminés avec les déchets ordinaires. Le système de classification indienne est limité à 6 classes, alors que le système japonais a commencé sur une petite échelle, avec les téléviseurs, réfrigérateurs, machines à laver, climatiseurs et ordinateurs personnels ou PC.

Les appareils individuels sont très différents en tailles, poids et compositions ; par conséquent, citer des valeurs typiques n'a pas beaucoup de sens, sauf si le type d'appareils et

sa période de production sont donnés. Les ampoules d'éclairage sont plus grandes en nombre. Les catégories 1-4, dans le tableau 1 représentent près de 95% de la quantité de poids générée (93,3% en 2010) [14].

**Tableau I.1** : Catégories de DEEE selon la directive européenne sur les DEEE [14]

N	Catégorie
1	Cros appareils électroménagers
2	Petits appareils électroménagers
3	Equipements informatiques et de télécommunications
4	Matériel grand public
5	L'équipement d'éclairage
6	Outils électriques et électroniques (à l'exception des outils industriels fixes à grande échelle)
7	Jouets, équipements de loisir et de sport
8	Dispositifs médicaux (pas de produits implantés et infectés)
9	Instruments de surveillance et de contrôle
10	Distributeurs automatiques

Le recyclage des DEEE est important, non seulement pour réduire la quantité de déchets nécessitant un traitement, mais aussi pour promouvoir la récupération des matières précieuses, ainsi que l'élimination de la responsabilité de ses intrinsèques dangereux et les composants indésirables pour l'environnement.

Les DEEE sont principalement composées de métaux ferreux et non ferreux (Tableau I.2) viennent ensuite les matières plastiques [14].

**Tableau I.2 :** Composition des équipements électriques et électroniques [14]

Catégorie d'équipement	Métaux ferreux (%)	Métaux non-ferreux (%)	Verre (%)	Plastique (%)	Autre (%)
Cros appareils électroménagers	61	7	3	9	21
Petits appareils électroménagers	19	1	0	48	32
Equipements informatiques	43	0	4	30	20
Telecom	13	7	74	74	6
Tv, Radio, etc.	11	2	31	31	22

#### I.4.2. Les déchets plastiques

Les plastiques sont omniprésents dans notre vie : conception des ordinateurs, production d'une simple seringue médicale ou encore la mise au point d'un cœur artificiel... Au-delà de leurs atouts, une fois consommés, ils génèrent des déchets volumineux par rapport à leur poids. Ces déchets occupent un volume important dans les points de collecte et autres installations de gestion de déchets dont les centres d'enfouissements techniques. Leur dissémination dans la nature est durable et inesthétique car leur biodégradabilité est dans la plupart des cas faible. Il y a donc lieu d'encourager leur recyclage [5].

### I.4.3. Les catégories de plastiques

Il existe deux grandes catégories de plastiques :

#### 1. Les thermoplastiques

Tels que le polyéthylène haute densité (PEhd), le polyéthylène basse densité (PEbd), le polyéthylène téréphtalate (PET), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC), le polystyrène (PS), le polystyrène expansé (PSE) qui représentent plus de 80% du marché : ils fondent sous l'effet de la chaleur et reprennent leur rigidité en refroidissant. Techniquement ils peuvent être recyclés ou régénérés [15].

Quelques exemples des déchets thermoplastiques [5].

- PET : bouteilles de boisson gazeuse, d'huiles de cuisine, fils textiles,
- PEhd : bouteilles, bidons (huiles de moteur), caisses, casiers,
- PVC : barquettes, boîtes alimentaires, films alimentaires, tuyaux de canalisations, gaines électriques
- PEbd: sacs et emballages plastiques, palettes, films étirables, bouteilles (shampooing),
- PP : sachets et films transparents (emballages biscuits), automobiles (pare-chocs...),
- PS : pots de yaourts, gobelets, emballages [5].

#### 2. les thermodurcissables

Tels que les polyuréthanes réticulés, la bakélite, les polyesters insaturés sont des matières initialement liquides qui durcissent sous l'effet de la chaleur et de la pression. Leur transformation est irréversible, ils sont inaptes à la régénération, par exemple PC : casque, CD/DVD, prothèse, [5].

Il existe également des plastiques composites à base de thermoplastiques ou de thermodurcissables mélangés à d'autres pour en améliorer les propriétés mécaniques (fibres de verre) [15].

#### 3. Les élastomères

Les élastomères sont élastiques : ils se déforment et tendent à reprendre leur forme initiale et supportent de très grandes déformations avant rupture. Ce ne sont pas réellement des

«Plastiques». Issu du latex d'Hévéas (arbre d'Amazonie), le caoutchouc naturel est resté longtemps le seul élastomère connu mais les méthodes modernes de fabrication ont permis d'obtenir une grande diversité de matériaux en ajoutant des additifs, accélérateurs, agents protecteurs (anti UV, anti oxygène,...) et en les combinant à d'autres matériaux (métaux, textiles, autres plastiques...) [34].

#### **I.4.4. Les origines des déchets plastiques**

Les déchets d'emballages plastiques ont différentes origines :

- Les déchets de l'industrie du plastique (rebus et ratés de production et de transformation),
- Les plastiques contenus dans les ordures ménagères (bouteilles, flacons, gobelets, films...),
- Les déchets de démolition du bâtiment,
- Les emballages industriels et commerciaux,
- Les résidus de broyage automobiles,
- Les plastiques agricoles (films, paillages...),
- Les plastiques issus des déchets d'équipements électriques et électroniques [15].

### **I.5. Mécanismes de charge électrique**

La séparation électrostatique d'un mélange de matériaux granulaires est possible si les constituants de celui-ci portent des charges électriques différentes. Ces charges peuvent être générées par un ou plusieurs des mécanismes physiques différents Ils 'agit de l'effet couronne, l'effet tribo-électrique, et l'induction électrostatique.

#### **I.5.1.Effet couronne**

Longtemps observé lors des phénomènes météorologiques intenses, l'effet couronne a trouvé aujourd'hui des applications diverses dans le domaine de l'électrostatique et a fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques, il est utilisé pour la précipitation de poussières et la fabrication des films plastiques et textiles, ainsi que dans les processus de l'électrophotographie et la séparation des mélanges granulaires [16].

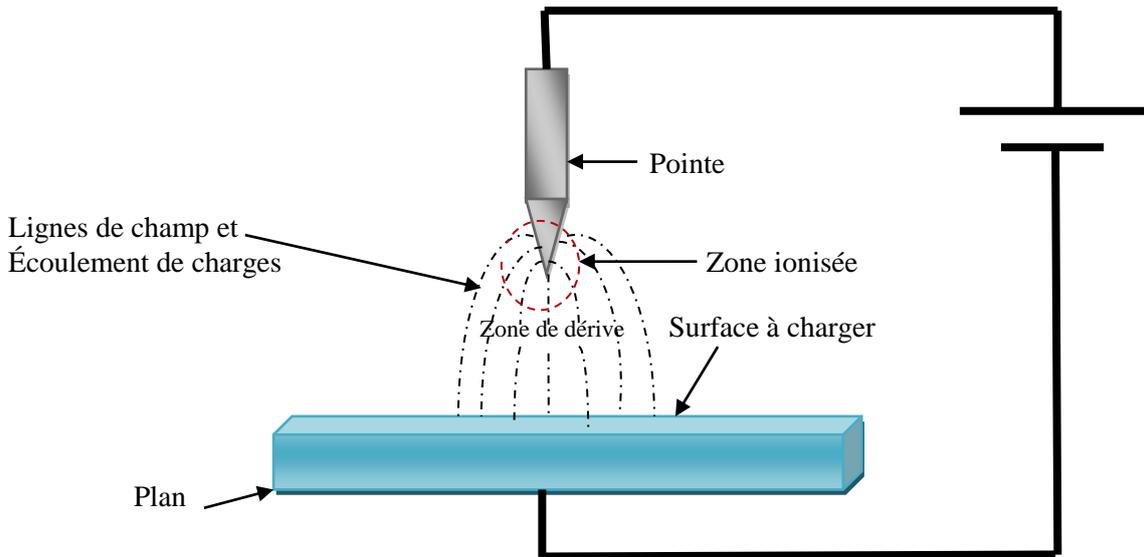


Figure I.7 : Décharge couronne dans une configuration pointe plan [17]

I.5.1.1. Définition

L'effet couronne est lié à l'ionisation de l'air dans une zone de champ électrique très intense produite entre deux électrodes métalliques: l'une dite active, se présente généralement sous la forme d'une pointe ou d'un fil de petit diamètre, et est reliée à une source de haute tension de plusieurs kilovolts, et l'autre passive qui n'est autre qu'une plaque ou une grille métallique reliée à la terre. À proximité de l'électrode active la tension varie fortement sur une courte distance créant ainsi un fort champ électrique, responsable de l'accélération des quelques électrons issus de l'ionisation naturelle de l'air. L'avalanche électronique a lieu à proximité de l'électrode active quelle que soit la polarité qui lui est appliquée (Figure I-8) [16].

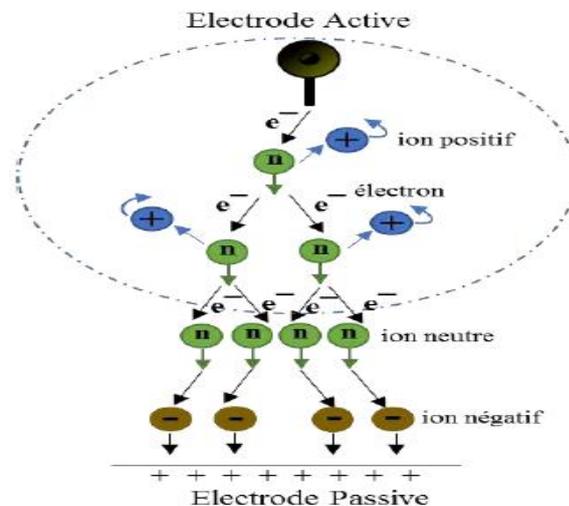


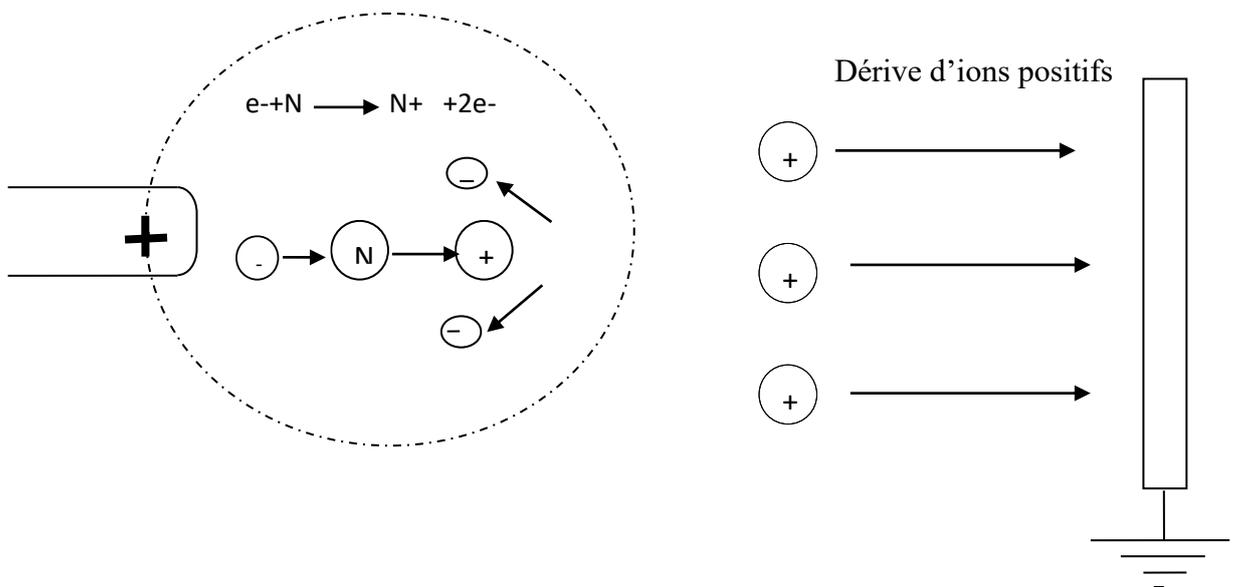
Figure I.8 : Génération d'une avalanche électronique et de la décharge couronne [16]

Le signe de la charge déposée sur l'isolant dépend de la tension appliquée à l'électrode active. Par conséquent, la décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de la tension appliquée à l'électrode à faible rayon de courbure.

### I.5.1.2. Décharge couronne positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand la pointe est portée à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour de la pointe, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l'anode (la pointe). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone en pointillé sur la figure 1.9. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieure au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ( $< 30 \text{ kV/cm}$  dans l'air à pression atmosphérique) ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque).

Différents régimes existent pour la décharge couronne. Juste au-delà du seuil d'apparition, la décharge couronne positive est pulsateur. En augmentant la tension, la décharge positive devient une décharge luminescente continue. Pour les tensions très élevées, la décharge se transforme en claquage (arc) [17].



**Figure I.9 :** Description de la décharge couronne positive [17]

### I.5.1.3. Décharge couronne négative

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe. Les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (figure I.10).

Au-delà du seuil d'apparition, la décharge couronne négative a un régime pulsateur. En augmentant la tension, la décharge négative atteint le régime d'impulsions de Trichel dont la fréquence dépend de la tension appliquée. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle entre deux pics de courant, impulsions de Trichel, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode [17].

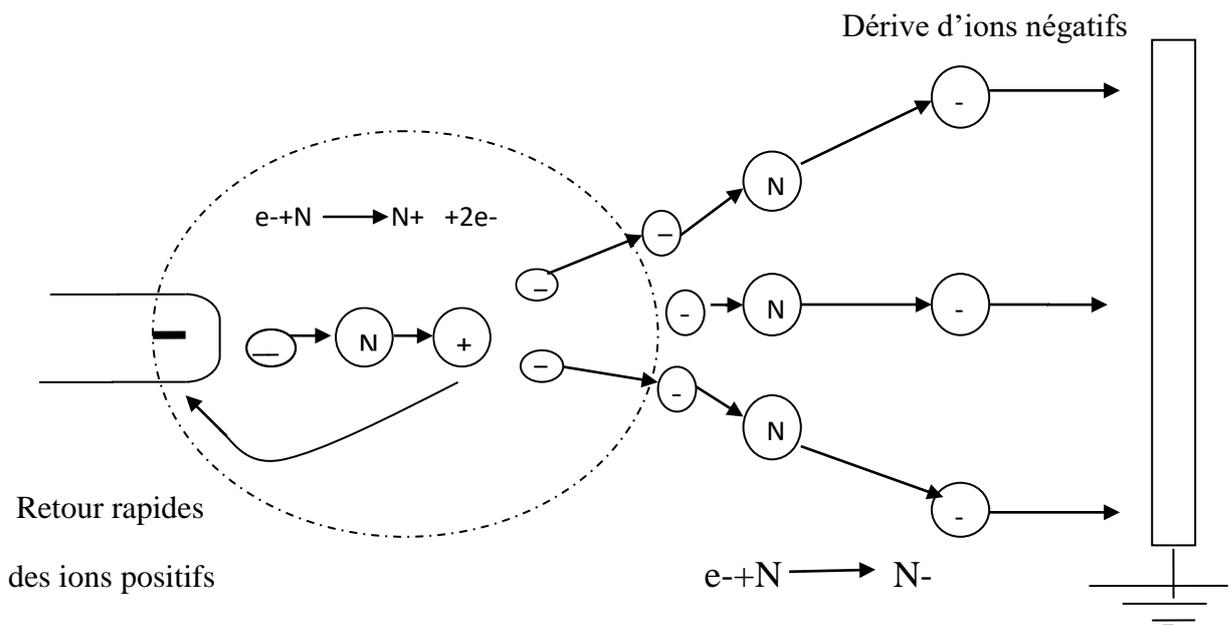


Figure I.10 : Description de la décharge couronne négative [17]

### I.5.1.4. Décharge couronne alternative

Dans ce cas, le processus de la décharge soumise à une excitation alternative est identique à ceux décrits pour une excitation continue, dans la mesure où l'intervalle de temps entre les inversions de polarité est suffisamment long pour que toutes les charges résiduelles de

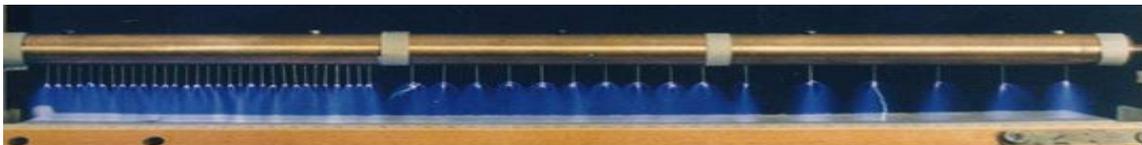
l'alternance précédente soient écoulées. Ceci implique l'existence d'une fréquence  $f$  et d'une distance inter-électrodes  $d$  limites reliées par l'expression suivante :

$$d_{max} = \frac{\mu E}{\pi f} \Rightarrow f_{max} = \frac{\mu E}{\pi d}$$

Avec  $\mu$  la mobilité des ions et  $E$  l'amplitude du champ électrique.

Tant que la fréquence est inférieure à  $f_{max}$  la décharge couronne alternative se comporte comme en continu. Par contre si l'excitation est supérieure à cette fréquence  $f_{max}$ , la charge d'espace va osciller et augmenter à chaque période. Cet effet cumulatif aura pour conséquence des passages à l'arc pour des potentiels plus faibles qu'en continu [17].

Une électrode couronne (figure I.11) charge les granules par bombardement ionique, leur utilisation n'est pas toujours optimale pour la séparation de mélanges conducteur – isolant. En effet, la présence dans le mélange des particules conductrices réduit la rigidité diélectrique de l'espace inter-électrode ce qui augmente le risque d'apparition d'arcs électriques entre l'électrode couronne et celle reliée à la terre sur laquelle sont placées les particules à charger. Ainsi, il est important d'utiliser une électrode couronne capable de bien charger les particules pour de faibles tension [18].



A



B



C

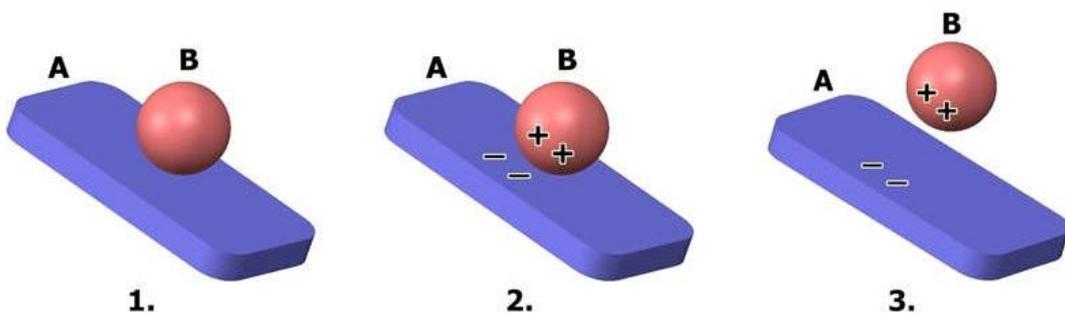
**Figure I.11 :** Différentes configurations d'électrodes couronnes. (a) Electrode à pointes (image fournie par le Professeur Alexandru Iuga, de l'Université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie) ; (b) Electrode à fil ; (c) Electrode peigne [18]

Alors que les conducteurs et les non-conducteurs se chargent par bombardement ionique, seules les particules non conductrices sont capables de préserver leurs charges.

## I.5.2.Chargement par effet triboélectrique

### I.5.2.1.Définition

L'électrification par contact aussi appelée effet triboélectrique du « grec tribein » signifiant frotter [18]. Désigne le phénomène électrostatique par lequel lorsque l'on frotte deux matériaux de nature différente, une partie des charges de la surface de contact d'un des deux matériaux est transféré à l'autre, et ce transfert subsiste lors de la séparation [19]. Ce transfert de charges entraine le chargement d'un matériau positivement et l'autre négativement. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation et de nouveaux contacts auront pour effet de produire de nouveaux transferts de charges [20].



**Figure I.12 :**L'échange de la charge électrique entre deux surfaces par effet triboélectrique:

1. Surface 'A' et la particule 'B' sont neutres;
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 [21]

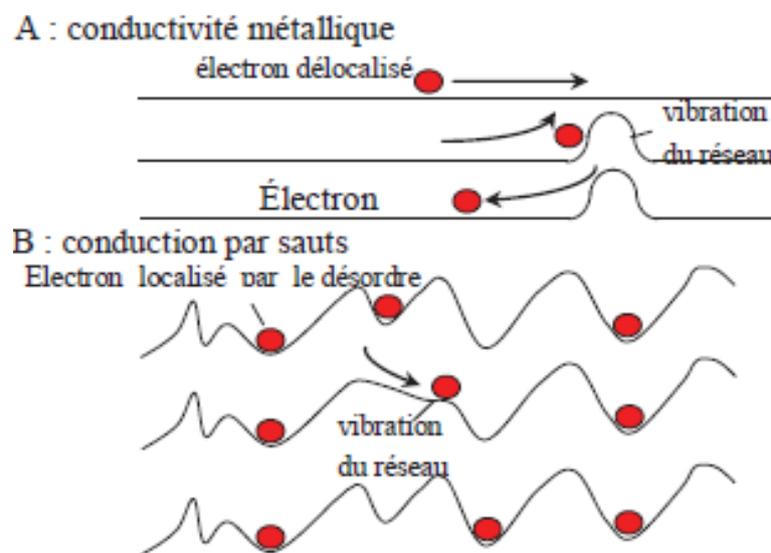
### I.5.2.2.Historique et mécanisme physique de charge

Certains des travaux expérimentaux de la triboélectricité sont très anciens, comme l'électrisation de l'ambre frottée avec une étoffe (Thalès, septième siècle avant J.C). L'étude qualitative débute au dix-septième siècle avec Gilbert, puis Boyle, qui appellent électricité la cause du phénomène. Au dix-huitième siècle on découvre l'électrisation des métaux tenus par un manche isolant, la transmission de l'électricité par contact, l'influence, etc. On construit des machines électrostatiques à triboélectricité [22].

Lorsque deux matériaux différents sont mis en contact (figure .I.12) ils acquièrent des charges électriques du au phénomène de triboélectrisation.

A l'échelle atomique, le mouvement des électrons obéit aux lois de la mécanique quantique. Il est caractérisé par le module au carré de la fonction d'onde de l'électron, représentant la probabilité de présence d'un électron en chaque point du milieu. Le concept de localisation ou délocalisation a des conséquences sur la conductivité du matériau. Elles sont montrées dans la figure I.13.

Les vibrations thermiques des atomes d'un cristal parfait entravent le déplacement des électrons et diminuent la conductivité ou augmentent la résistivité. Lorsque les électrons occupent des états localisés dans un matériau désordonné, les vibrations thermiques peuvent fournir une énergie suffisante à l'électron, pour quitter son site par l'effet tunnel. Ici la conduction augmente avec la température ( $T$ ), contrairement à celle des solides ordonnés, c'est ce que l'on appelle la conduction par sauts. Comme Touchard le précise, ce processus de conduction par saut résulte d'un transfert d'électrons entre les états localisés, dans la bande interdite ( $E_g$ ) au voisinage du niveau Fermi ( $E_f$ ). En particulier, lorsque la densité d'états près du niveau Fermi est élevée, la mobilité des porteurs augmente de façon importante. Ce mécanisme s'observe parfaitement dans les solides isolants [23].

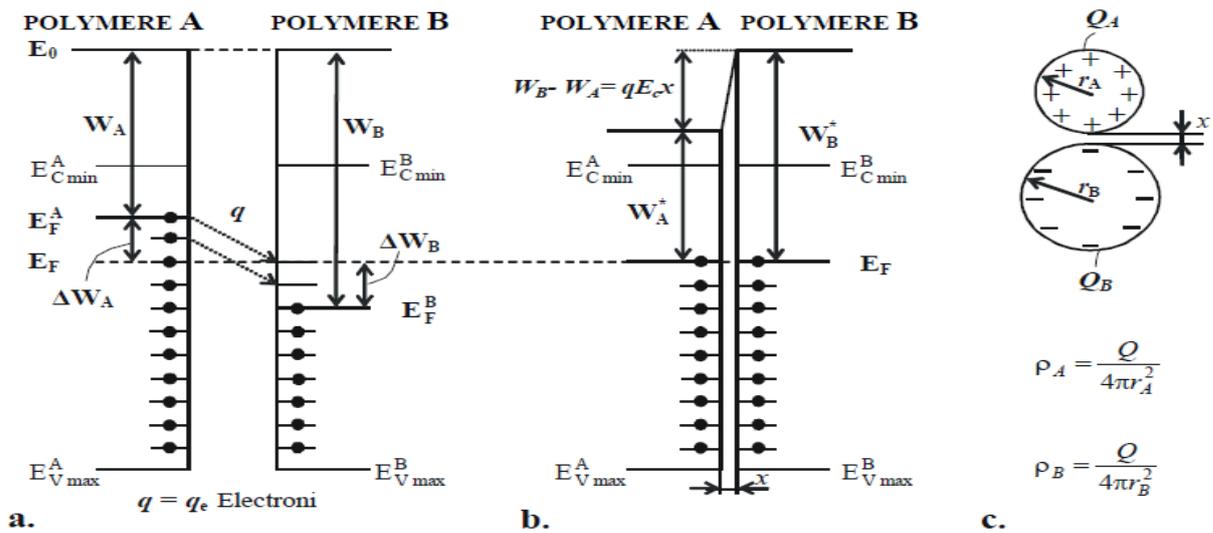


**Figure I.13:** Effets de la localisation et de la délocalisation des Electrons [23]

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  $N$  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

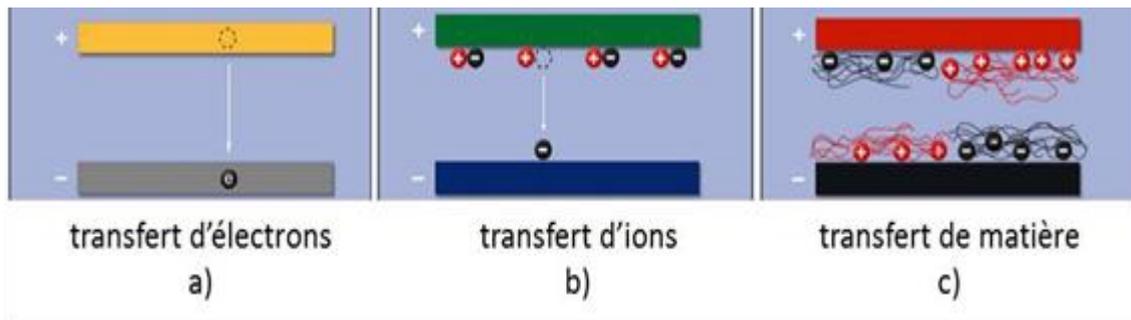
Si la densité des niveaux superficiels  $N$  de deux granules de polymères A et B est suffisamment élevée, un transfert d'électrons se produit entre les granules en contact jusqu'au moment où les niveaux Fermi s'égalisent (Figure I.14) [24].



**Figure I.14.** Diagrammes des niveaux d'énergie qui expliquent la triboélectrification de deux Granules de différents polymères par la théorie des niveaux superficiels de haute densité (a) polymères en contact (électronique). Le polymère A caractérisé par un travail d'extraction faible, transfère des électrons et se charge positivement par rapport au polymère B; (b) le processus de triboélectrification prend fin par l'accumulation de la charge  $Q$  à l'interface et par renforcement du champ électrique de contact  $EC$  dans l'intervalle  $x$ , jusqu'à l'équilibre thermodynamique (les niveaux Fermi  $E_F^A, E_F^B$  sont égaux); (c) les charges superficielles  $Q_A, Q_B$  acquises par les granules sphériques de polymères les densités de charge  $\rho_{A,B}$  [25]

Malgré les nombreuses recherches sur la compréhension du mécanisme d'électrification par contact, il y a peu de consensus sur la façon dont la charge électrostatique est transférée d'un matériau à un autre pendant le contact. Le transfert de charge a été attribué à trois mécanismes différents [26].

- Transfert de charge dû aux électrons
- Transfert de charge dû aux ions
- Transfert de charge dû au transfert de matière [26].

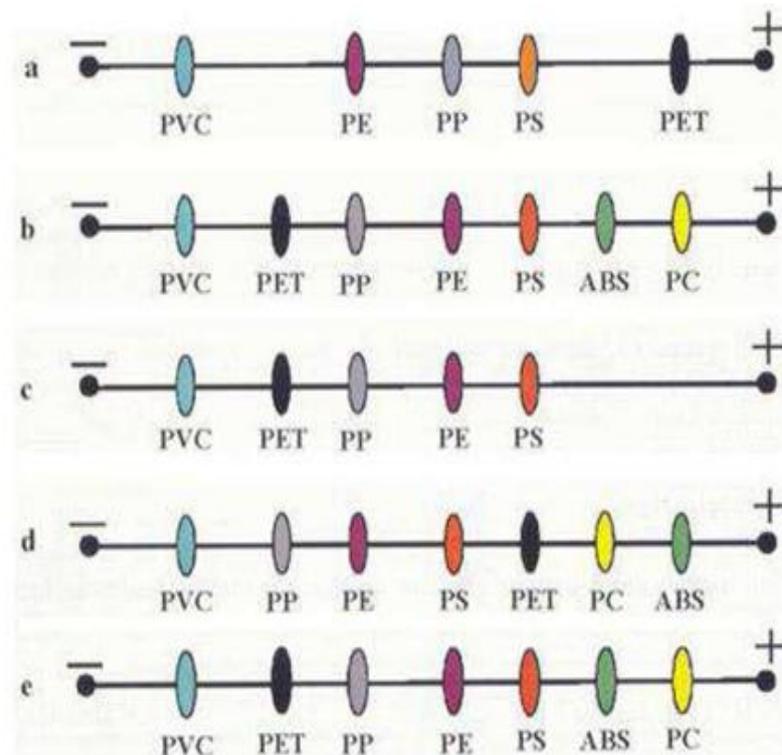


**Figure I.15** : Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ; Transfert d'ions ; c) Transfert de matière [26]

### I.5.2.3.Série triboélectrique

Afin de prédire la polarité des matériaux chargés par contact, un classement des matériaux, appelé « série triboélectrique » a été établi sur la base des expériences. Selon les observations, il était évident que la polarité de la charge était tributaire des propriétés du matériau. *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. Ce classement a permis de ranger les matériaux ayant la charge la plus positive jusqu'aux matériaux les plus négatifs. Plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre dans la liste triboélectrique, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée [20].

Alors il n'y a aucune série triboélectrique universelle, Un certain nombre de chercheurs ont élaborés des séries triboélectriques.



**Figure I.16 :** Série triboélectrique expérimentale pour différents matériaux plastiques utilisés dans la fabrication des équipements informatiques et électriques selon différents auteurs : a. Brown, b. Wei, c. Xiao, d. Dodbida, e. Ullmann's Encyclopedia [27]

## I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique relative aux recyclages et les catégories des déchets d'équipements électronique et électrique (DEEE) et les déchets plastiques. Les concepts du mécanisme de charge utilisé dans les processus de séparation électrostatique des matériaux sont également présentés.

**Chapitre II**

**Techniques de chargement et  
séparation électrostatique des  
matériaux**

### II.1.Introduction

La Séparation électrostatique est le terme générique pour une classe importante de technologies de traitement des matériaux, largement utilisés pour le tri sélectif des matériaux solides par des forces électriques qui agissent sur les particules chargés ou polarisées [28].

C'est une technologie caractérisée par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien et aussi par une faible consommation d'énergie. Les séparateurs électrostatiques sont des machines qui séparent les matériaux granulaires issues de déchet industriel [29].

Dans ce chapitre nous avons présenté les dispositifs de chargement qui est essentiel pour la séparation, dans la deuxième partie de chapitre nous avons parlées sur les déférentes techniques de séparation basées sur l'électrostatique.

### II.2.Dispositifs de chargement triboélectrique

La triboélectrisation regroupe deux causes d'électrisation : le frottement et le contact. Dans le chargement par frottement (cyclone, statique), c'est-à-dire quand les particules se frottent contre les parois du dispositif, il y a transfert d'électrons (charges).

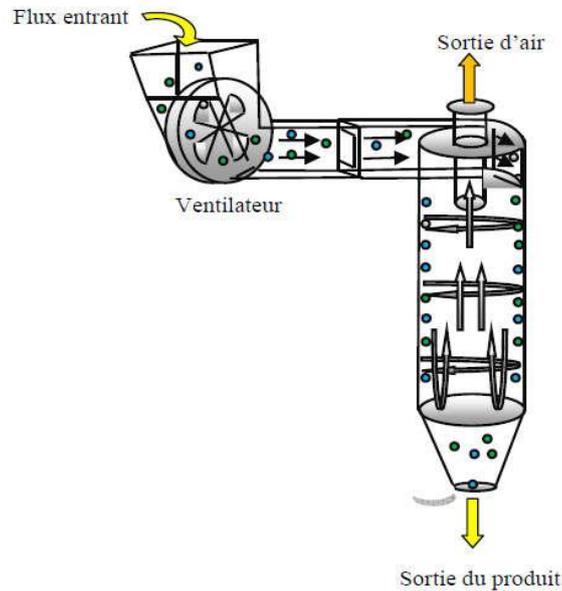
La charge par contact se produit pendant la séparation de particules sèches et non conductrices de surfaces solides. Dans ce processus, quand une particule touche une surface, des charges sont transférées, si bien que la particule acquiert une charge nette positive ou négative quand elle se sépare de la surface. La polarité de la particule chargée et le nombre de charge sur celle-ci dépendent des matériaux et de leurs positions relatives dans les séries triboélectriques.

Le frottement augmente le nombre de charges acquises. Il ya de nombreux dispositifs utilisés pour la triboélectrisation des particules, nous allons passer en revue ceux qui sont les plus fréquemment utilisés dans la séparation des particules

#### II.2. 1.Dispositif de charge par cyclone

Le dispositif est constitué d'un cylindre isolant (Figure II.1.), disposé en position verticale. Les matériaux granulaires ou pulvérulents à charger sont introduits en direction horizontale, normale à la paroi intérieure du cylindre, par un ventilateur, dont la vitesse de rotation peut être modifiée. Le frottement continu entre les particules et la paroi génère la majorité de la charge acquise dans un dispositif de ce type.

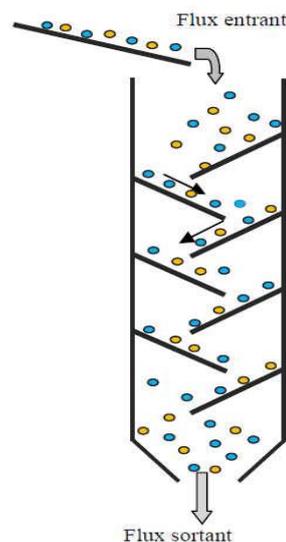
Le principe de fonctionnement de ce dispositif permet aussi une alimentation continue du séparateur tribo-aéro-électrostatique, mais son efficacité dans le cas des particules fines reste à tester [16].



**Figure II.1:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [16]

### II.2. 2.Chargement statique

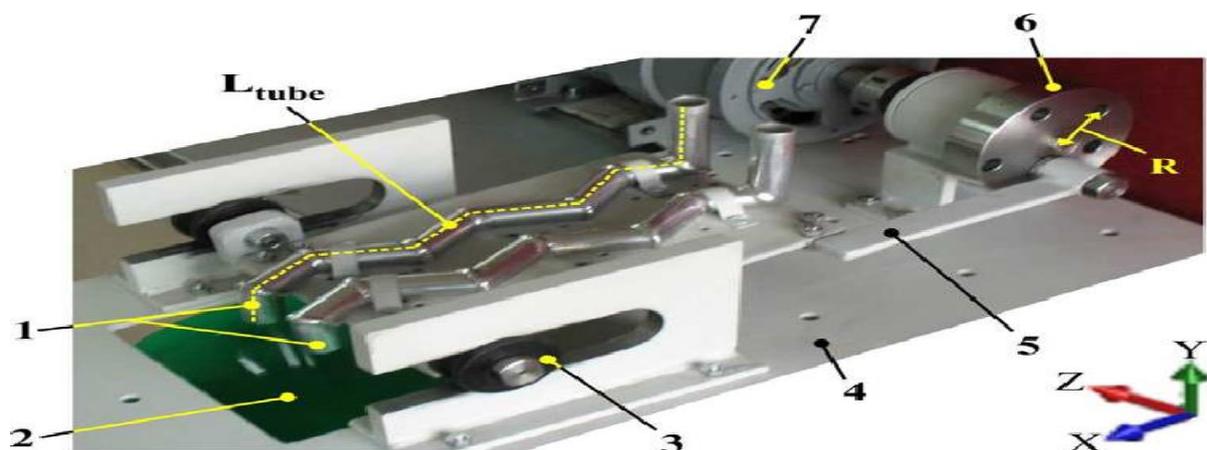
Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique isolante (figure. II.2), y compris des parois inclinées et détachables. Les particules tombent en chute verticale et glissent dans ce dispositif par gravitation. Le chargement de ces particules s'effectue par frottement avec les parois [19].



**Figure II.2:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [19]

### II.2.3. Dispositif à vibration

Les goulottes vibrantes électromagnétiques (ou tables vibrantes) sont le plus souvent utilisées pour le transport et la répartition uniforme de matières granulaires. Toutefois, des études ont été menées pour les utiliser en tant que dispositif de charge triboélectrique. Dans un tel dispositif, les particules acquièrent leur charge par contact, impact et frottement avec le plateau ou les tubes vibrants. La charge des granules va dépendre de la matière du plateau ou des tubes. Ce type de dispositif fonctionne mieux sur les particules sous-millimétriques car l'intensité des frottements est faible (figure II.3). Le matériau à charger glisse dans des canaux en zigzag mis en mouvement vibratoire, sur les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique et un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent avec les parois du dispositif. En changeant la vitesse de rotation du moteur, il est possible de modifier le mouvement oscillant du dispositif de charge [18].



**Figure II.3:** Dispositif à vibration ; 1 : tubes de charge ; 2 : sortie des particules chargées ; 3 : Glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ; R : rayon ; X, Y, Z : Direction du mouvement des particules ; L tube: longueur du tube [31]

### II.2.4. Lit fluidisé

Le dispositif est un tube cylindrique isolant, le mélange de particule est déposé sur le support (une plaque poreuse en matière isolante), on souffle de l'air à l'aide d'une soufflante au bas du cylindre. Les particules sont fluidisées, elles acquièrent des charges électriques de signe opposé grâce aux collisions entre elles. C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (figure. II.4). 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 :

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

**Formation** : le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques des fluides : ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation  $U_{mf}$ , le lit montre une certaine expansion de la couche, on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules [30].

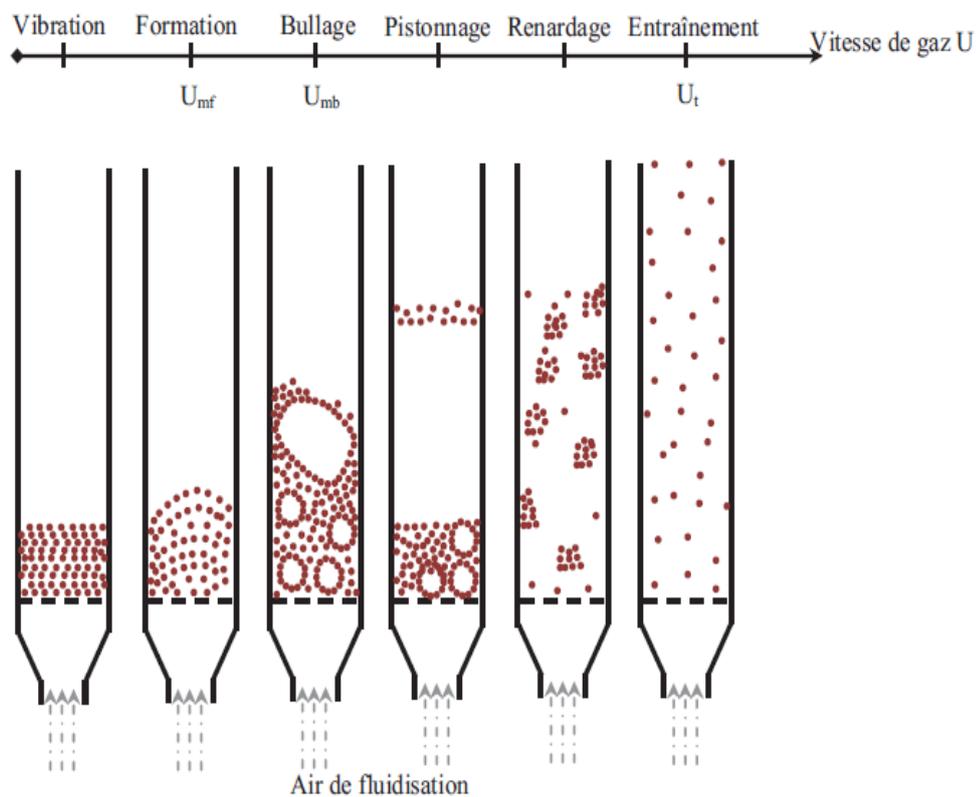


Figure II.4: Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation [30]

**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.

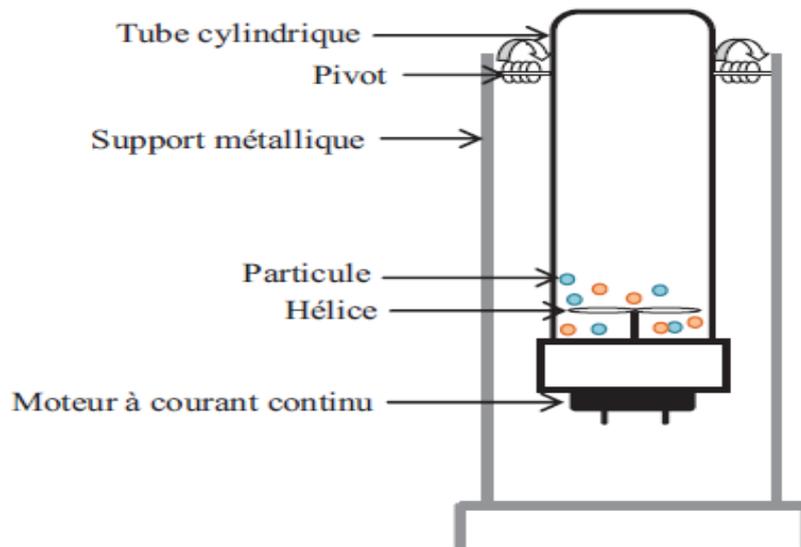
**Pistonnage** : en excès au-delà de  $U_{mb}$ , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit déphasage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.

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

**Entraînement** : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos  $U_t$ , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation : c'est le phénomène d'entraînement [30].

### II.2.5.Chargement par ventilateur

Les principaux éléments de cette installation sont (figure II.5) : un tube cylindrique isolant, un moteur à courant continu entraînant une hélice isolante et un support métallique. Le dispositif utilise l'air ascendant donnant naissance à des turbulences dans le récipient, cylindrique en PVC contenant le mélange granulaire, provoquant ainsi une triboélectrification des particules par des collisions entre elles ou bien entre les particules et les parois. La récupération du mélange chargé, s'effectue par le pivotement du cylindre du dispositif sans faire arrêter le moteur afin d'éviter le collage des particules contre les parois et aussi de vider tous le contenu[16].

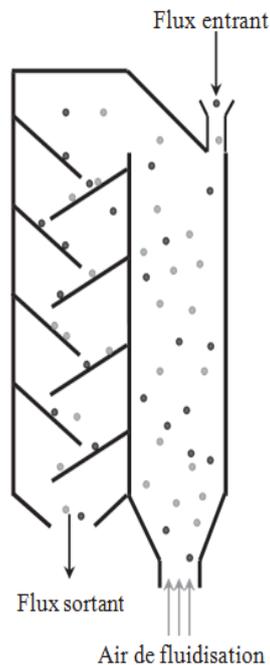


**Figure II.5:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur [16]

### II.2.6.Chargement tribo-aéro-statique

C'est une combinaison de deux modes de chargement en cascade, le procédé est un chambre parallélépipédique isolante comprend deux partie (figure. II.1) : la première pour le chargement aéro-triboélectrique (à lit fluidisé), après avoir mis les particules en agitation dans un lit fluidisé, elles sont dirigées 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[30].

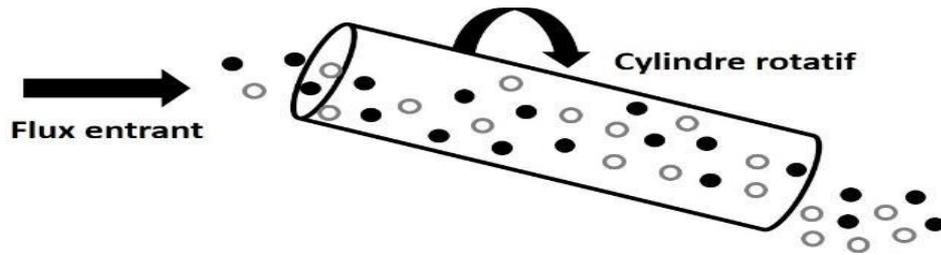


**Figure II.6:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aero-statique[30]

### II.2.7. Dispositif à cylindre rotatif

Le dispositif consiste en un cylindre tournant où les particules entrent d'un côté du cylindre et sortent de l'autre côté totalement chargées, la rotation du cylindre à une vitesse bien définie provoque des collisions à l'intérieur du cylindre entre les particules et entre les particules et les parois, comme l'explique si bien la figure II.7 qui résume le fonctionnement du chargement triboélectrique par cylindre rotatif.

Un flux de matériau granulaire isolant est introduit dans le cylindre en rotation où à l'intérieur duquel les particules culbutent ce qui engendre leur chargement par contacts répétés : c'est le phénomène de triboélectrisation [33].



**Figure II.7:**Représentation schématique du chargement triboélectrique par cylindre Tournant [33]

### **II.3. Techniques de séparation basées sur l'électrostatique**

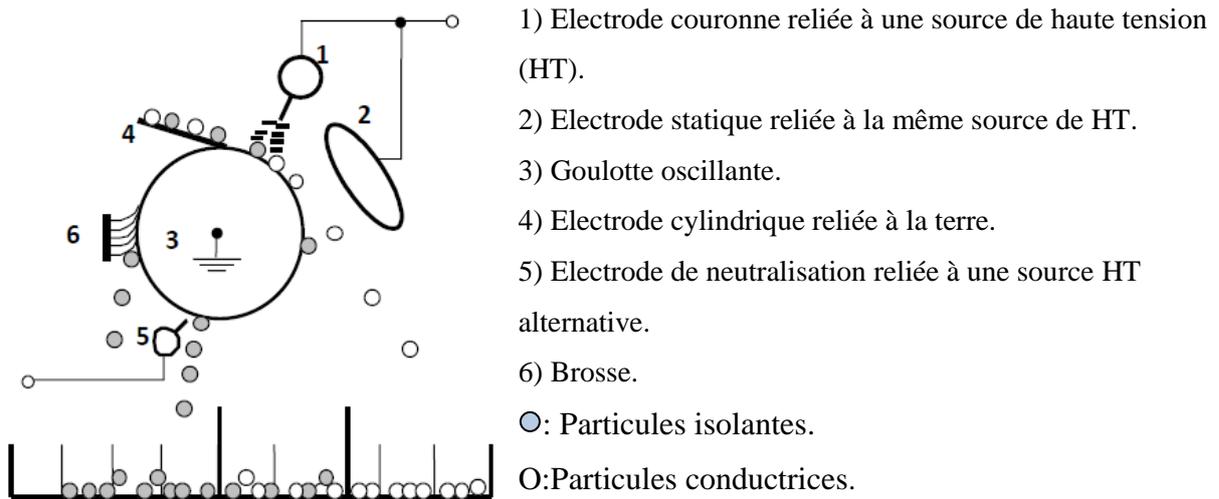
Les méthodes de séparation en champs électriques intenses peuvent être classifiées du Point de vue des mécanismes physiques utilisés pour la charge des matériaux:

- séparation en champ couronne;
- séparation triboélectrostatique.

Alors que le procédé couronne-électrostatique s'applique couramment pour des séparations conducteur/isolant, la séparation triboélectrostatique s'applique aux isolants [31].

#### **II.3.1. Séparateurs électrostatiques chargés par effet couronne**

Il existe une multitude de séparateurs avec différentes techniques, citerons en exemple le séparateur électrostatique à tambour, comme celui montré sur la figure (II.8), est le modèle le plus utilisé dans l'industrie. Son principe de fonctionnement consiste en la création de charges électriques par ionisation de l'air grâce à une électrode et ainsi les granules déposées par le vibro transporteur sur le cylindre tournant (tambour) acquièrent tous une charge électrique de même signe que le potentiel HT [32].



**Figure II.8:** Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour [32]

Les granules isolants adhèrent à la surface du tambour grâce à une force d'image électrique et finissent par tomber dans la partie gauche du collecteur, tandis que les granules conducteurs perdent rapidement leurs charges à travers le tambour relié à la terre, en arrivant dans la zone du champ électrostatique généré par l'électrode statique de forme elliptique, 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 [32].

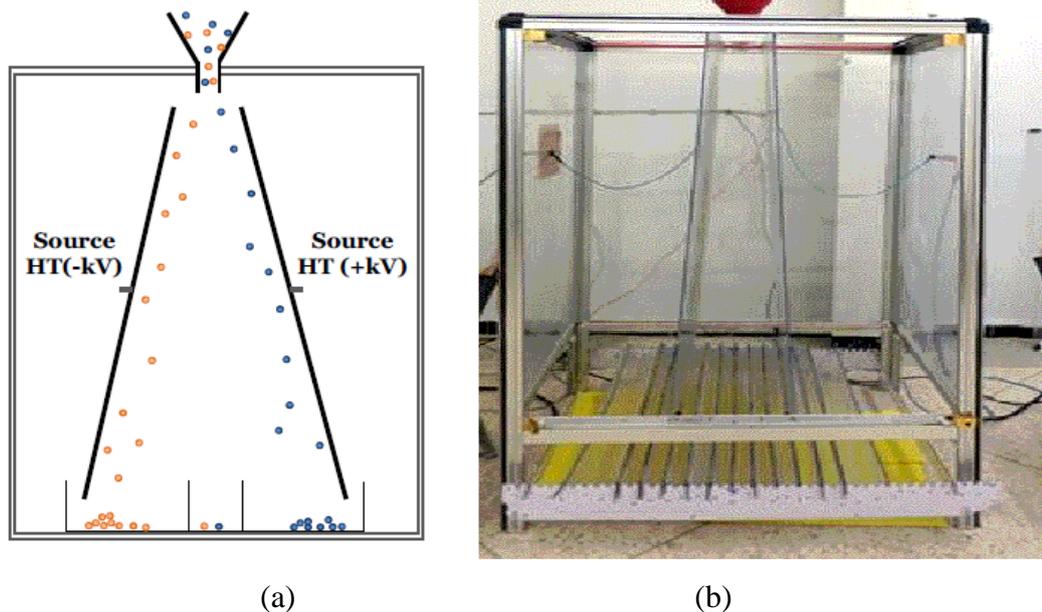
### II.3.2.Séparateur tribo-électrostatique

Les séparateurs triboélectriques qui reposent sur le principe du tri électrostatique permettent un tri entièrement automatisé d'un grand nombre de matériaux dont les plastiques en particulier. Plusieurs dispositifs ont été réalisés en vue de la séparation électrostatique des matériaux granulaires plastiques. Toutes ces installations comportent une partie de chargement triboélectrique et une région de séparation dans un champ électrique intense [6].

#### II.3.2.1.Séparateur à chute libre

Le séparateur électrostatique à chute libre est largement utilisé dans le tri et la purification des minerais de taille sous-millimétrique. Actuellement, le processus est appliqué avec succès dans le tri des produits granulaires en plastique issus des déchets d'équipement électriques et électroniques. Dans cette installation, le mélange granulaire est chargé par l'un

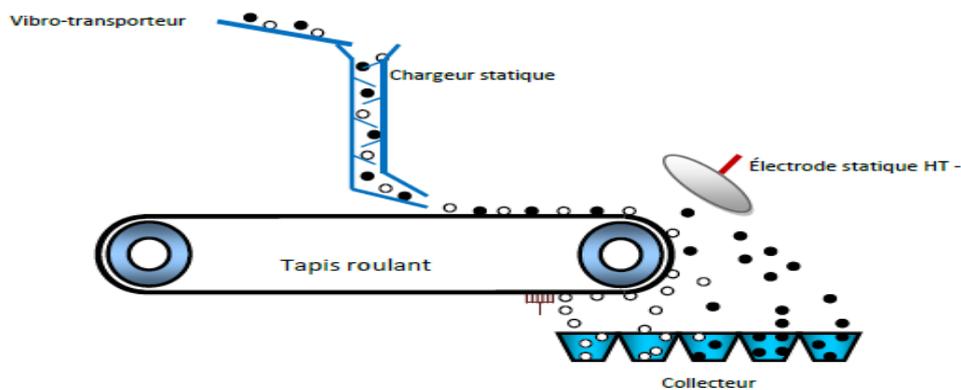
des dispositifs de chargement triboélectrique, tel que le convoyeur à vis ; chargeur à cylindre rotatif ; à cyclone .....etc. Les particules pré-chargées sont projetées en chute libre entre deux électrodes alimentées en haute tension continue. Dans cette zone les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge acquise [30].



**Figure II.9 :** Séparateur tribo électrostatique à chute libre. (a): Schéma du dispositif. (b): Photographie du dispositif [30]

### II.3.2.2. Séparateur triboélectrique à tapis roulant

Ce type de séparateur est destiné exclusivement à séparer deux plastiques. Les particules sont chargées dans un dispositif triboélectrique puis déposées sur un tapis roulant qui est mis à la terre. Ce dernier va les transporter jusqu'à l'électrode haute tension : les particules chargées de signe opposé à celui de l'électrode sont attirées et celles de même signe de charges sont repoussées [5].



**Figure II.10 :** séparateur triboélectrique à tapis roulant [5]

### II.3.2.3.Séparateur tribo-aéro-électrostatique

Plusieurs études ont été déjà faites sur cette gamme de séparateur électrostatique, le principe de fonctionnement de ces procédés est basé sur la triboélectricité et l'aérodynamique, en d'autre terme ce sont des dispositifs ayant le même mode de chargement (lit fluidisé), mais non pas la même technique de séparation. La particularité de ces dispositifs est la simultanéité des deux opérations : la charge triboélectrique des particules par collisions dans le lit fluidisé et la séparation électrostatique de celles-ci dans un champ électrique intense généré par des électrodes connectées aux générateurs de haute tension continue de polarités inversées, la séparation s'effectue par le fait que les électrodes attirent les particules contrairement polarisées.

Deux parties sont nécessaires pour la construction et la mise en marche d'un dispositif triboaéro-électrostatique :

- Une chambre d'air liée à la soufflante : son rôle est d'assurer la bonne diffusion, l'uniformisation et la quantité d'air injecté à l'aide d'un diffuseur placé à sa partie supérieur;
- Une chambre de fluidisation et de séparation où les particules simultanément :  
se chargent tribo-électriquement et se séparent dans un champ électrique intense sous l'action des forces d'attraction électriques [19].

#### 1. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses

Les électrodes qui vont attirer la matière granulaire fluidisée sont deux bandes transporteuses du tapis roulant, ils sont à base d'une matière conductrice (figure II.11), elles s'appuient à des tambours isolants, leur entrainement est assuré par des moteurs triphasés alternatifs, commandés par des variateurs de fréquence. Les particules chargées collent sur la surface des bandes contrairement polarisées, pour être transporté vers la zone de récupération [19].

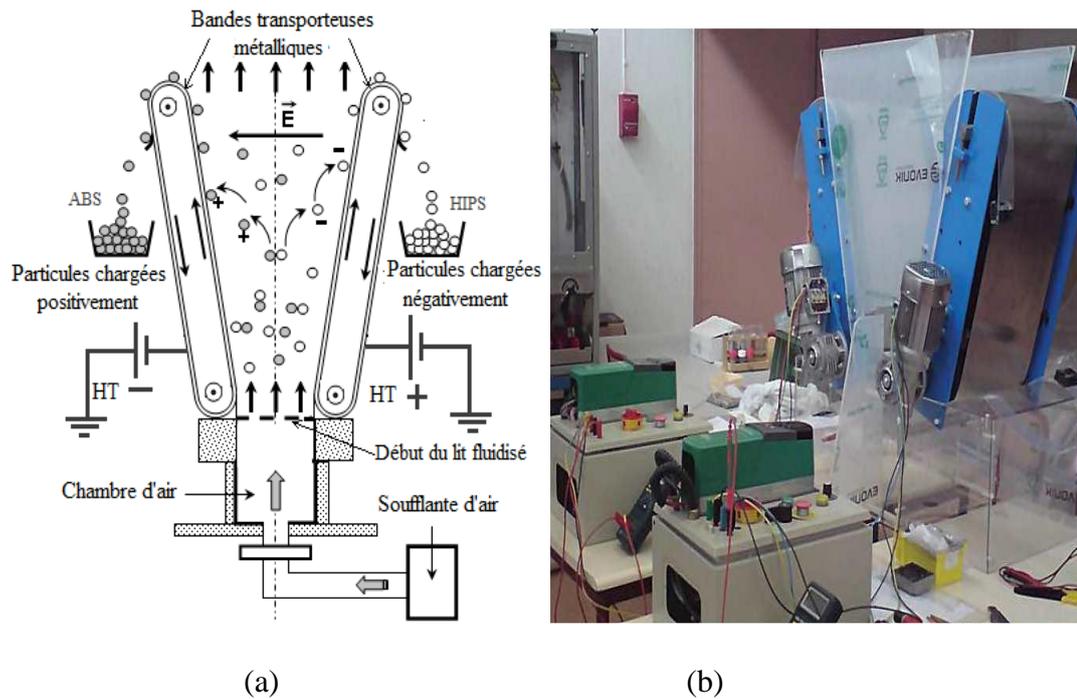


Figure II.11: Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses. (a): Schéma du dispositif. (b) : Photographie du dispositif [30]

## 2. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à tambours transporteurs

Ce dispositif a le même principe de fonctionnement de celui précédemment cité (Figure. II.11) la différence entre les deux procédés se manifeste par les électrodes utilisées. Cette installation utilise des tambours conducteurs reliés à des arbres entraînés par des moteurs dont le but de diminuer la traversée des particules, de réduire le coût du séparateur et d'augmenter sa robustesse [30].

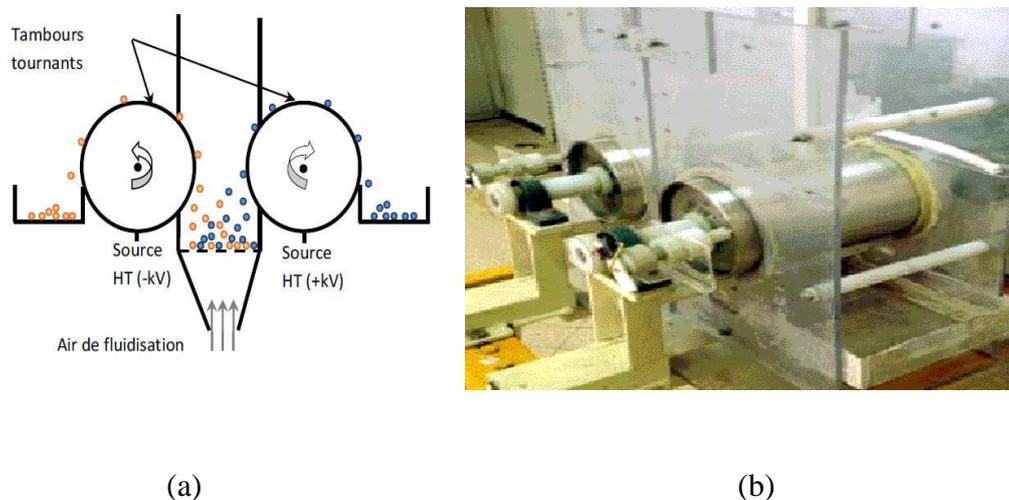
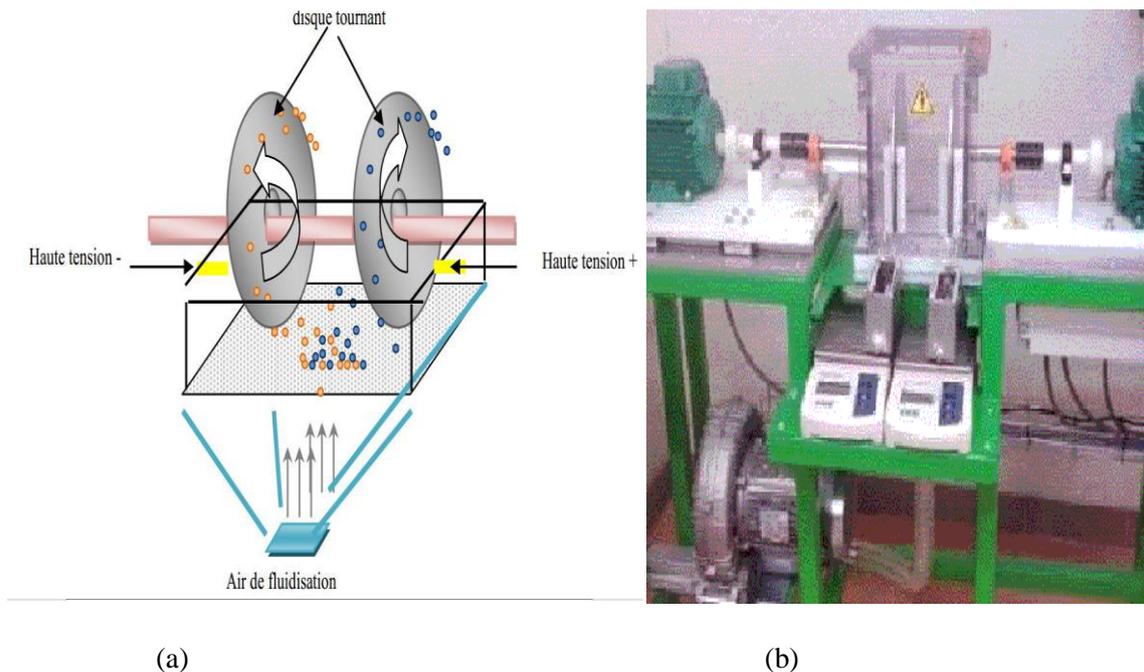


Figure II.12: Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à Tambours transporteurs ;(a): Schéma du dispositif. (b) : Photographie du dispositif [30]

### 3. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants

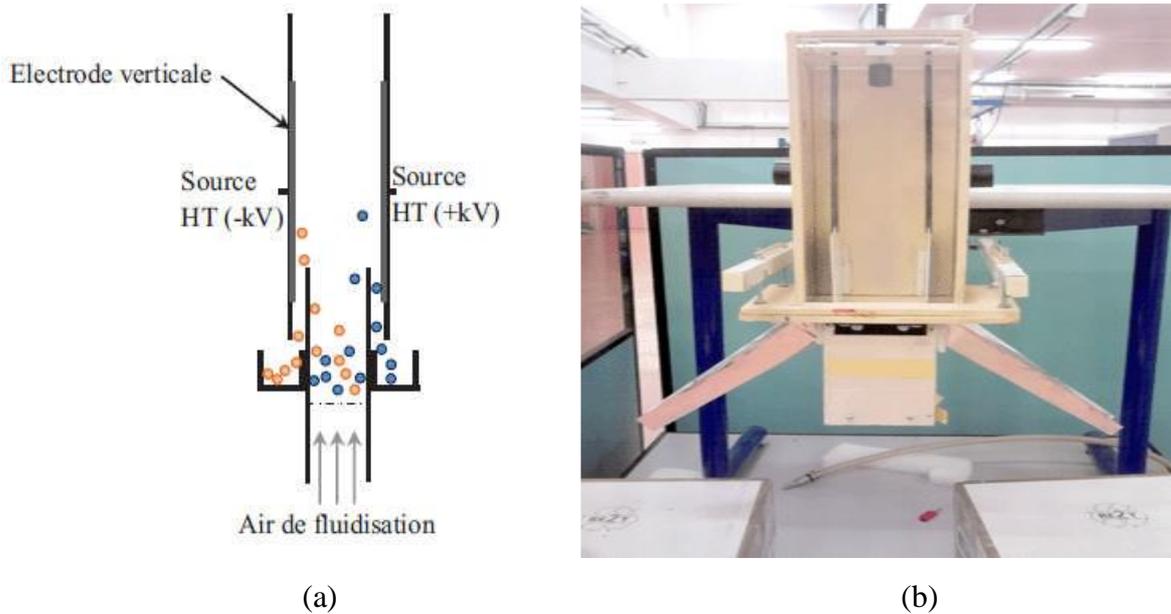
C'est une installation particulièrement adaptée à la séparation des particules de plastique fines. Deux disques métalliques sont montés sur un même arbre (Figure. II.13) entraînés par un moteur électrique afin de les tourner dans un mélange de particules fluidisé. Les deux disques qui sont alimentés à deux sources de haute tension et de polarités opposées soulèvent les particules chargées. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques [19].



**Figure II.13** : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants. (a) : Schéma du dispositif, (b) : Photographie du dispositif [30]

### 4. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales

Deux électrodes verticales collées à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique isolante (figure II.14), attirent les particules de signe opposé et repoussent celles de même signe, pour les dévier vers les collecteurs [19].



**Figure II.14:**Séparateur tribo-aero-électrostatique a électrodes verticales. (a): Schéma du dispositif, (b) : Photographie du dispositif [30]

## II.4.Conclusion

L'évolution très rapide des nouvelles technologies et l'augmentation des performances des équipements, a réduit la durée de vie de ces derniers.

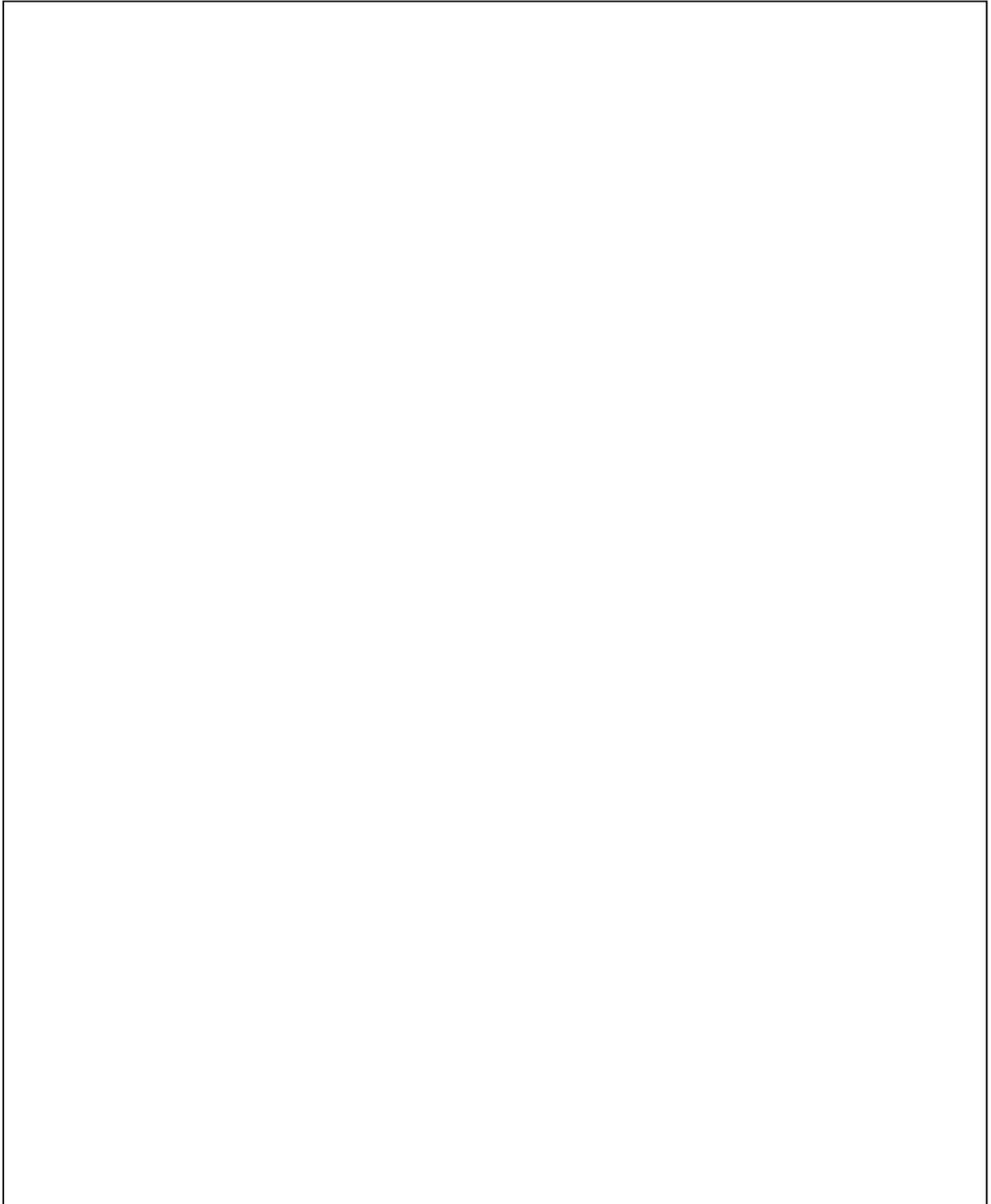
Afin de répondre aux besoins de l'industrie du recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques, multiples recherches ont été réalisées par des laboratoires américains, japonais, européens, canadiens et algériens sur la séparation électrostatique des matériaux plastiques granulaires ainsi que les principaux mécanismes de charge impliqués[30].

Les résultats de ces recherches ont permis l'établissement de plusieurs techniques où chacune est adaptée à une situation de tri particulière répondant à certains nombres de conditions mais imposant aussi des limitations.

**Chapitre III**  
**Matériaux et installation**  
**expérimentale**

### III.1. Introduction

Il y a plusieurs configurations des séparateurs électrostatiques qui ont été réalisées jusqu'à nos jours. La commune entre ces dispositifs est la nécessité d'avoir deux parties successives, la première celle de chargement triboélectrique des granules et l'autre destinée à leur séparation. Le but de ce chapitre est de présenter une description d'un nouveau séparateur et la détermination des différents facteurs qui peuvent influencer son fonctionnement.





**Figure III.2 :** Photographie de générateur de haute tension négative (-) utilisé

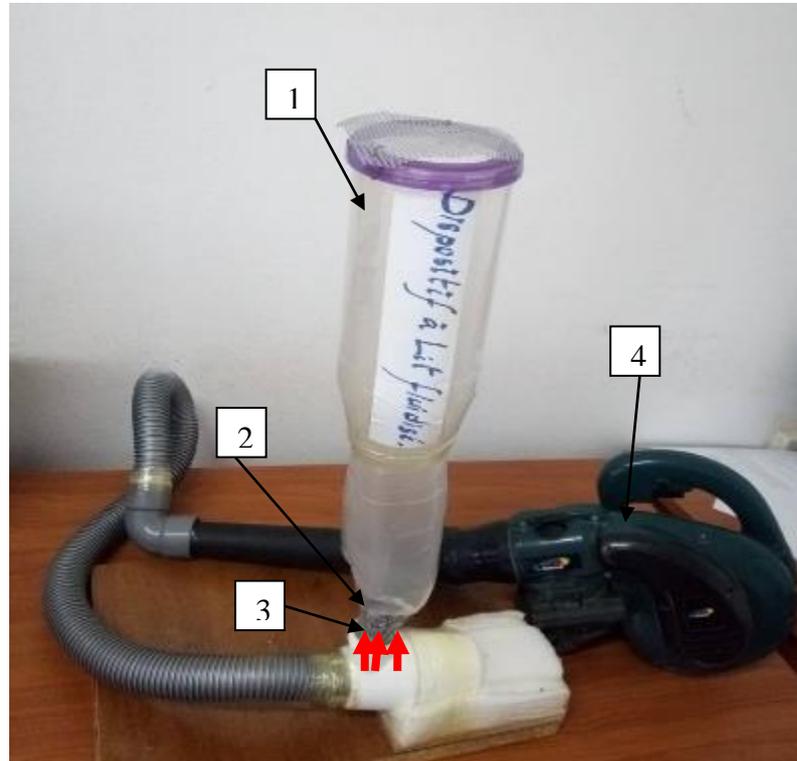


**Figure III.3 :** Photographie de générateur de haute tension positive (+) utilisé

### III.3 .Dispositif de chargement à lit fluidisé

Le dispositif représenté à la (figure III.4) est destiné à l'analyse expérimentale de l'acquisition de charge triboélectrique sur des petites quantités de matériaux granulaires isolants. Il utilise la force aérodynamique pour le chargement des particules, la charge

provenant principalement à la suite des contacts entre particules et entre les particules et les parois du dispositif. Il est composé de deux parties détachables, la chambre de fluidisation avec des parois transparentes en polyéthylène téréphtalate (PET), afin de permettre la visualisation des phénomènes et un système d'injection d'air à l'aide d'une soufflante[21].



**Figure III.4:** Dispositif de triboélectrisation à lit fluidisé utilisé

(1) chambre de fluidisation ;(2) mélange granulaire ;(3) air de fluidisation ;(4) souffleur.

Ce dispositif est capable de charger des mélanges granulaires isolants grâce à l'utilisation de trois types de collisions :

- (1) Collision des particules de même matière.
- (2) Collision des particules de matière différente.
- (3) Collision entre les particules et les parois interne de la chambre de fluidisation.

### III.3.1.Types de particules utilisées dans la séparation

#### III.3.1.1.Acrylonitrile Butadiène Styène (ABS)

L'acrylonitrile butadiène styène (ABS) est un polymère amorphe fabriqué par émulsion ou polymérisation en masse d'acrylonitrile et de styrène en présence de polybutadiène. Les

propriétés les plus importantes de l'ABS sont la résistance aux chocs, la dureté et une bonnerigidité. L'ABS se caractérise par sa bonne résistance à la déformation thermique et aux chocs même à basse température. Il est dur, résistant à l'abrasion et présente une bonne stabilité dimensionnelle.

Les résines ABS représentent l'un des mélanges les plus précieux de résine et d'élastomère et leur succès est dû aux excellentes propriétés provenant de cette alliance. Leurs propriétés fondamentales étant la ténacité, la résistance aux chocs et la dureté superficielle, elles sont surtout employées dans la fabrication de meubles, éléments pour l'industrie automobile, châssis de téléviseurs, panneaux et autres[33].



**Figure III.5 :** Aspect et dimension des granules d'Acrylonitrile Butadiène Styrène(ABS)

Tableau III.1 : Propriétés physique d'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS)[33]

Propriétés physiques	
Couleur	Noir
Forme	Aléatoire
Taille	$\Phi 2.5 \times 3.4$ mm
Masse	20 mg
Densité	1.05 g/cm <sup>3</sup>
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 %	0.3-0.7 %
Résistance à la traction	41-45 N/mm <sup>2</sup>
T°C d'utilisation en continu	-40/+100 °C
Rigidité diélectrique	20-25 KV/mm
Résistivité transversale	10 <sup>15</sup> Ω. Cm

### III.3.1.2. High Impact Polystyrène (HIPS)

Le HIPS appartient à la famille des polystyrènes compacté à haute densité, il est à faible coût et facile à usiner, il est souvent spécifié pour des applications structurales de faible résistance lorsque la résistance aux chocs, l'usinabilité, et le faible coût sont nécessaires. Il est fréquemment utilisé pour l'usinage des prototypes de pré-production, car il a une excellente stabilité dimensionnelle et facile à fabriquer. est généralement utilisé pour des appareils ménagers, des composants électriques et électroniques[33].



Figure II.6: Aspect et dimension des granules de polystyrène à fort impact (HIPS)

**Tableau III.2:** Propriétés physique de polystyrène à fort impact (HIPS)[33]

Propriétés physiques	
Couleur	Blanc
Forme	Aléatoire
Taille	$\Phi 2.5 \times 3.4$ mm
Masse	20 mg
Densité	1.04 g/cm <sup>3</sup>
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 %	0.05-0.6 %
Résistance à la traction	40 N/mm <sup>2</sup>
T°C d'utilisation en continu	-40/+75 °C
Rigidité diélectrique	40 KV/mm
Résistivité transversale	10 <sup>17</sup> Ω. Cm

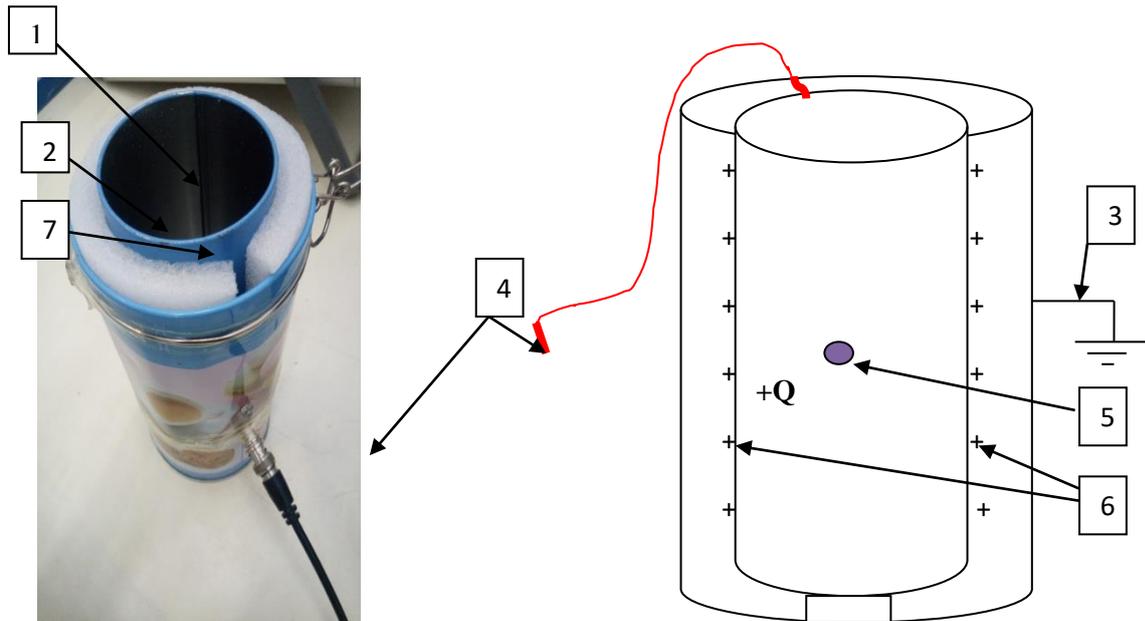
### III.3.2. Mesure de la charge triboélectrique

La séparation électrostatique de mélanges des matériaux granulaires ne peut se faire que si leurs composants portent des charges électriques différentes. C'est pour ça la mesure de la charge triboélectrique est important pour assurer le chargement des particules et connaître l'influence des plusieurs facteurs sur la charge.

La méthode que nous avons utilisée pour déterminer la valeur et la polarité de la charge est basée sur l'utilisation de la cage de faraday et un électromètre numérique.

#### 1) La cage de Faraday

Les cages de Faraday sont nommées d'après le scientifique anglais Michael Faraday, qui les a inventées en 1836, c'est l'un des dispositifs les plus utilisé pour mesurer la charge des particules tribo-électrisées. Elle est composée de deux cylindres concentriques conducteurs séparés électriquement par un matériau isolant. Dans le cylindre intérieur on introduit le produit que nous devons mesurer, ce cylindre est isolé de la terre et connecté à un électromètre pour mesurer et afficher la charge électrique qui s'y répartit sur la surface extérieure par répulsion électrostatique. L'enceinte extérieure de protection est reliée à la terre pour éviter que les charges extérieures ne soient mesurées et pour réduire les perturbations électriques extérieures.



**Figure III.7 :** La cage de Faraday utilisé

(1)Cylindre extérieur ; (2) Cylindre intérieur ;(3) Connexion vers la terres ;(4) Connexion vers l électromètre ; (5) Une particule chargé + ; (6) Réparation de la charge Sur la surface extérieur ; (7) isolant

Afin de mesurer précisément la charge acquise, Un électromètre numérique Keithley modèle 6514 (figureIII.8) a été utilisé, ayant les avantages principaux suivants[21].

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



**Figure III.8:** Electromètre numérique Keithley(modèle 6514)

## 2) Mesure de la masse granulaire

Mesurer la masse granulaire avant chaque expérience est nécessaire, pour cela on utilise une balance électronique modèle (figure III.9).



Figure III.9: Balance numérique

## II.4. Etude des facteurs influents

### III.4.1. Types de particules utilisées

#### 1. Polycarbonate (PC)

C'est un isolant à très haute résistance aux chocs même à basse température, il maintient sa rigidité dans une large plage de température. Très souvent utilisé dans le Capotage de machines, les vitres de protection[21]. Le (tableau III.3). Présente ses principales caractéristiques

Tableau III.3 : Caractéristique principales du polycarbonate (PC)[21]

Propriétés physiques	
Couleur	Orange
Forme	Cylindrique
Taille	$\Phi$ 3 x 3.6 mm
Masse	25 mg
Densité	1.2 g/cm <sup>3</sup>
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 %	0.15 %
Résistance à la traction	70 N/mm <sup>2</sup>
T°C d'utilisation en continu	-60/+115 °C
Rigidité diélectrique	30 KV/mm
Résistivité transversale	10 <sup>15</sup> Ω. Cm
Constante diélectrique	3

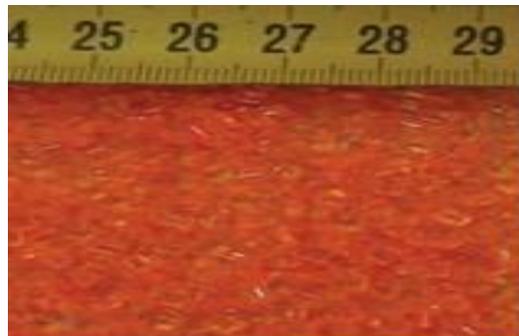


Figure III.10 : Echantillon des granules de polycarbonate (PC) utilisés

## 2. Polyamide (PA)

Il se caractérise par une haute résistance mécanique, rigidité, dureté, une faible reprise d'humidité, des bonnes propriétés de glissement, et une excellente résistance à l'usure. Ses bons caractéristiques permettent de l'utiliser dans les équipements chirurgicaux, le matériel informatique, les éléments d'accouplements, la construction mécanique, et même dans des milieux aqueux. Ces principales caractéristiques sont représentées dans le (tableau III.4)[21].

**Tableau III.4:** Caractéristique principales du polyamide (PA)[21]

Propriétés physiques	
Couleur	Bleu
Forme	Cylindrique
Taille	$\Phi$ 2.5 x 3.4 mm
Masse	20 mg
Densité	1.15 g/cm <sup>3</sup>
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 %	2.5 %
Résistance à la traction	80 N/mm <sup>2</sup>
T°C d'utilisation en continu	-40/+120 °C
Rigidité diélectrique	15 KV/mm
Résistivité transversale	10 <sup>13</sup> Ω. Cm
Constante diélectrique	3.7

**Figure III.11:** Echantillon des granules de polyamide (PA) utilisés

### III.4.2. Procédure de mesure

Il y a plusieurs paramètres qui ont une grande influence sur le contrôle de dispositif de chargement.

Les essais ont été réalisés sur les deux types des particules (PC, PA) séparément, et le mélange (PCet PA).

Les paramètres de contrôle sont :

- le temps de chargement durant chaque expérience [s].
- La vitesse de l'air de fluidisation [ $\text{m}^3/\text{min}$ ].
- la masse du produit granulaire [g].

Après chaque opération de chargement, on mesure premièrement la charge des particules à l'aide d'un amplificateur de mesure et une cage de Faraday.

La charge acquise par le matériau granulaire s'exprime en nC/g.

### III.4.3. Résultat et discussion

#### III.4.3.1. Influence du temps de chargement

Le (tableau III.5) et la (figure III.12) représentent les résultats expérimentaux de l'influence du temps de chargement sur la charge acquise par des produits granulaires, allant de  $t = 1$  min jusqu'à  $t = 10$  min, les autres paramètres sont maintenus constants :

- La masse du produit  $m = 40$  g ;
- La vitesse de l'air de fluidisation  $V = 1,4 \text{ m}^3/\text{min}$ ;
- Des parois internes en PET.

Tableau III.5 : Influence du temps de chargement sur la charge acquise par le : PC, PA, PC et PA

La masse 40 g			
La charge massique nc/g			
Particule Le temps(min)	PA	PC	PA+PC
1 min	0.16	1.06	1.35
2 min	0.37	1.51	1.83
3 min	0.75	1.75	1.5
5 min	1.21	2.7	1.15
10 min	1.12	1.91	1.38

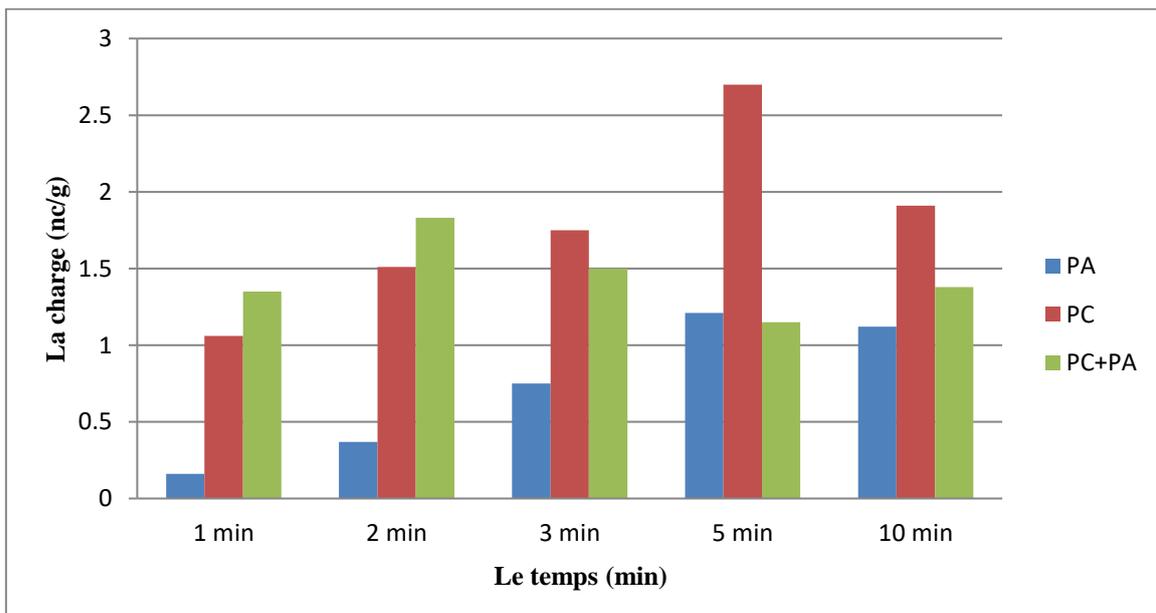


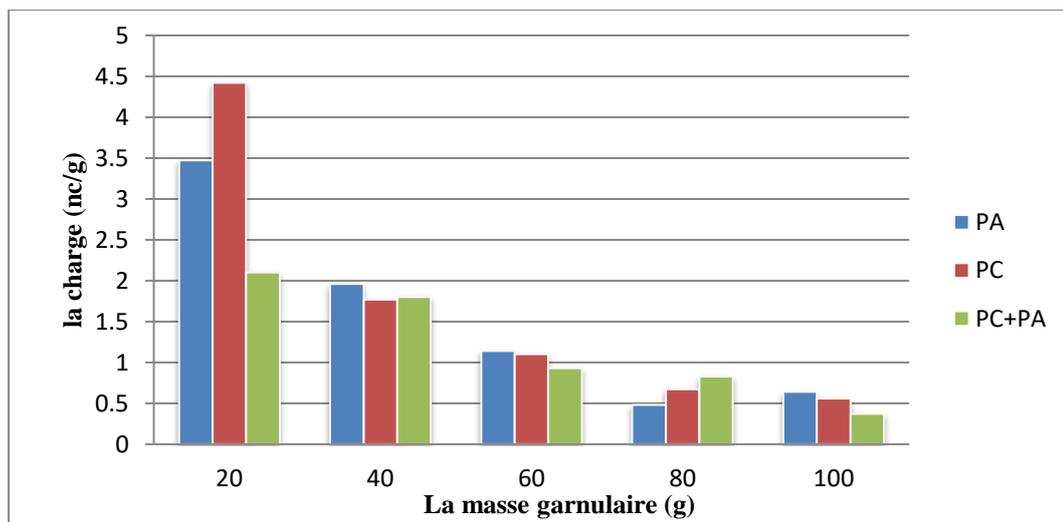
Figure III.12: Influence du temps de chargement sur la charge acquise par le : PC, PA, PC et PA

## III.4.3.2. Influence de la masse granulaire

Le (tableau III.6) et la (figure III.13) montrent l'influence de la masse granulaire sur le chargement des particules, variant la masse de  $m = 20$  g jusqu'à  $m = 100$  g, avec un pas de 20, les parois sont en PET, le temps de chargement ainsi que la fréquence du souffleur sont constants :  $t = 4$  min et  $V = 1,4$  m<sup>3</sup>/min.

**Tableau III.6 :** Influence de la masse granulaire sur la charge acquise par le : PC, PA, PC et PA

Le temps 4 min			
La charge massique nc/g			
particule La masse(g)	PA	PC	PA+PC
20 g	3.47	4.42	2.1
40 g	1.96	1.77	1.8
60 g	1.14	1.1	0.93
80 g	0.48	0.67	0.83
100 g	0.64	0.56	0.37



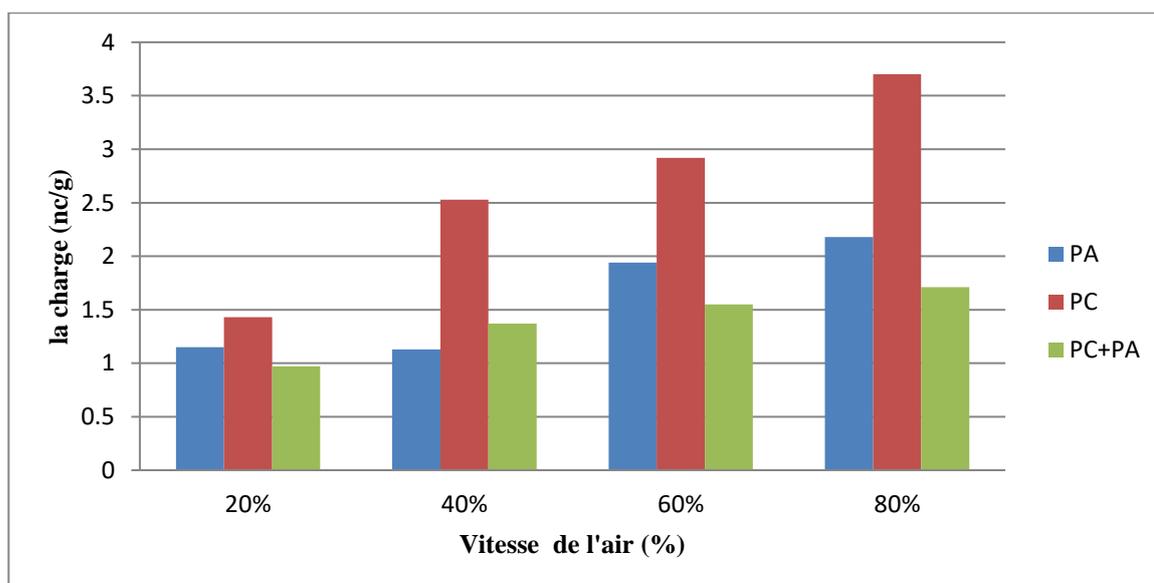
**Figure III.13 :** Influence de la masse granulaire sur la charge acquise par le : Pc, Pa, PC et PA

III.4.3.3. Influence de la vitesse de l'air de fluidisation

Le résultat de la charge acquise en fonction de vitesses de fluidisation, les parois sont en PET, le temps de chargement et la masse granulaire sont constant :  $t=3$  min et  $m= 50g$ .

**Tableau III.7:** Influence de la vitesse de l'air de fluidisation sur la charge acquise par le :  
Pc, Pa, PC et PA

Lamasse 50 g			
Le temps 3 min			
La charge massique nc/g			
Particule La vitesse	PA	PC	PA+PC
20 %	1.15	1.43	0.97
40 %	1.13	2.53	1.37
60 %	1.94	2.92	1.55
80 %	2.18	3.70	1.71
100 %	2.00	4.10	1.60



**Figure III.14 :** Influence de la vitesse de l'air de fluidisation sur la charge acquise par le :  
PC, PA, PA et PC

#### III.4.4. Interprétation et Discussion

Les trois matériaux (PC,PA et le mélange PC et PA) se chargent positivement dans toutes les expériences, donc les parois des dispositifs de chargement se chargent négativement (PET).

La charge acquise par les granules de PC, PA et le mélange est proportionnelle au temps de leurs chargements et la vitesse de fluidisation à cause d'une élévation du nombre de chocs entre particules et entre particules et paroi. La masse aussi influe sur la charge dans le cas de PA et PC mais pas considérablement dans le mélange PC et PA.

La charge triboélectrique change d'un matériau à l'autre, ceci revient à la différence entre les constantes diélectriques (permittivité relative).

#### III.5.Conclusion

Le dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé est un moyen essentiel dans la séparation électrostatique.

L'étude expérimentale sur ce dispositif montre que le temps de chargement et la vitesse de l'air de fluidisation influent sur la charge.

## **Chapitre IV**

# **Le séparateur cylindrique unipolaire**

**IV.1.Introduction**

Dans ce chapitre nous présentons les résultats préliminaires du fonctionnement du séparateur cylindrique réalisé au laboratoire.

Vu de l'importance de l'étape de chargement sur les résultats de séparation, nous présentons dans le chapitre précédent également l'étude de la charge triboélectrique sur les matériaux granulaires. Enfin, le calcul du champ électrique, et l'effet de certains paramètres, sera également présenté dans ce chapitre.



IV.2.2. Procédure expérimentale

IV.2.3. Résultats de la séparation



Figure IV.4: photographie montre le mélange avant la séparation

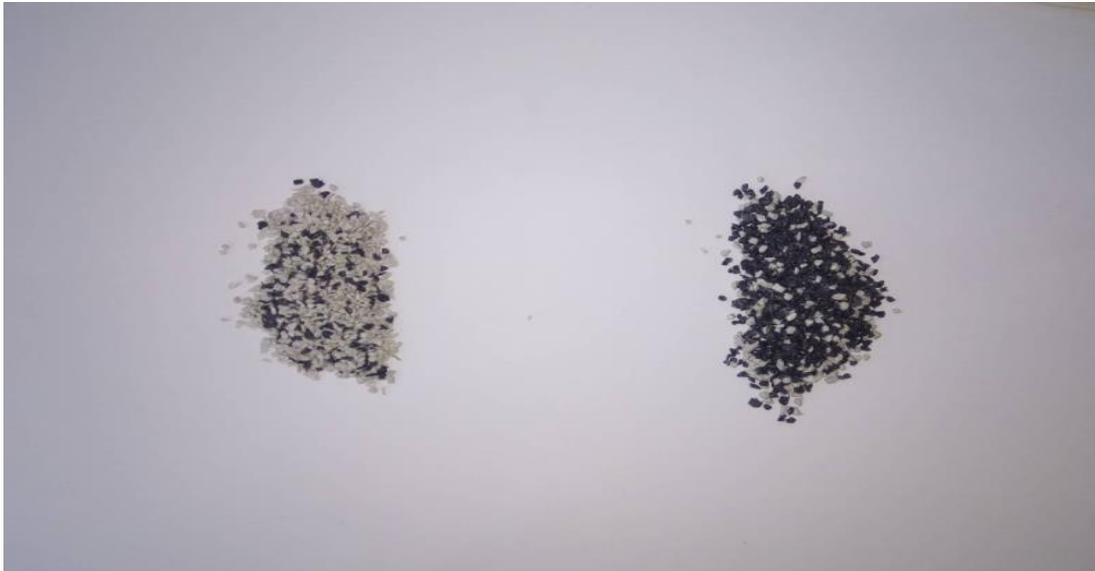


Figure IV.5: photographie montre les résultats de la séparation des produits récupérés dans les deux collecteurs

L'efficacité de l'installation de séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants dépend fortement du champ électrique c'est pour cela nous avons étudié plusieurs facteurs influent sur le champ électrique.

### **IV.3.Calcul du champ électrique**

Dans le cas de notre séparateur, nous cherchons à augmenter le champ électrique sans avoir besoin d'augmenter la tension à une valeur élevée, qui provoquerait des décharges inutiles.

A

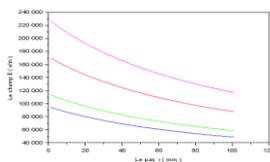
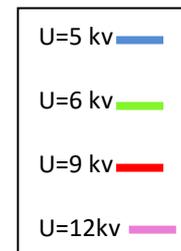
### IV.3.1.L'effet de la tension sans particules chargées

#### A. L effet du changement de la tension

La (figure IV.7) montre le calcul de la distribution du champ électrique à l'intérieur du cylindre pour 4 valeurs de la tension appliquée.

Les données :

- $R1= 0.08$  m
- $R2=0.155$  m
- $U= 5, 6, 9, 12$  kV.



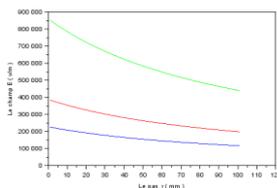
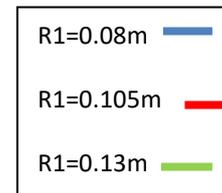
**Figure IV.7:**L'effet de la tension sur le champ électrique

**B. L'effet du changement du rapport R2/R1**

La (figure IV.8) montre l'influence de la dimension du cylindre sur la valeur et la distribution du champ électrique à travers le rapport R2/R1.

Les données :

- R1= 0.08; 0.105 ; 0.13 ; 0.155 m
- R2=0.155 m
- U= 12 kv
- K=R2/R1



**Figure IV.8:** l'effet de changement de la valeur (k) sur le champ électrique

**IV.3.2.Effet de la présence des particules chargées**

l'équation du champ électrique devient comme suit :

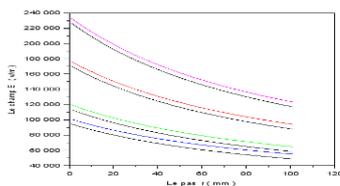
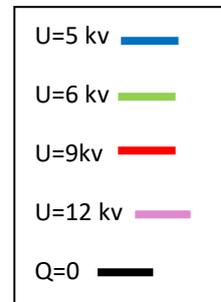
**A.**

**B. L'effet de la tension**

La (figure IV.9) montre la distribution du champ en présence des particules chargées positivement et comparée au cas sans particules.

Les données :

- $R1=0.08m$ .
- $R2=0.155m$ .
- $U= 5 ; 6 ; 9 ; 12kv$ .
- $Q= 350nc$ .



**Figure IV.9:** l'effet de la tension sur le champ à la présence de la charge positive

Pour le cas des particules chargées négativement avec  $Q = -350 \text{ nC}$ , les résultats sont les suivants :

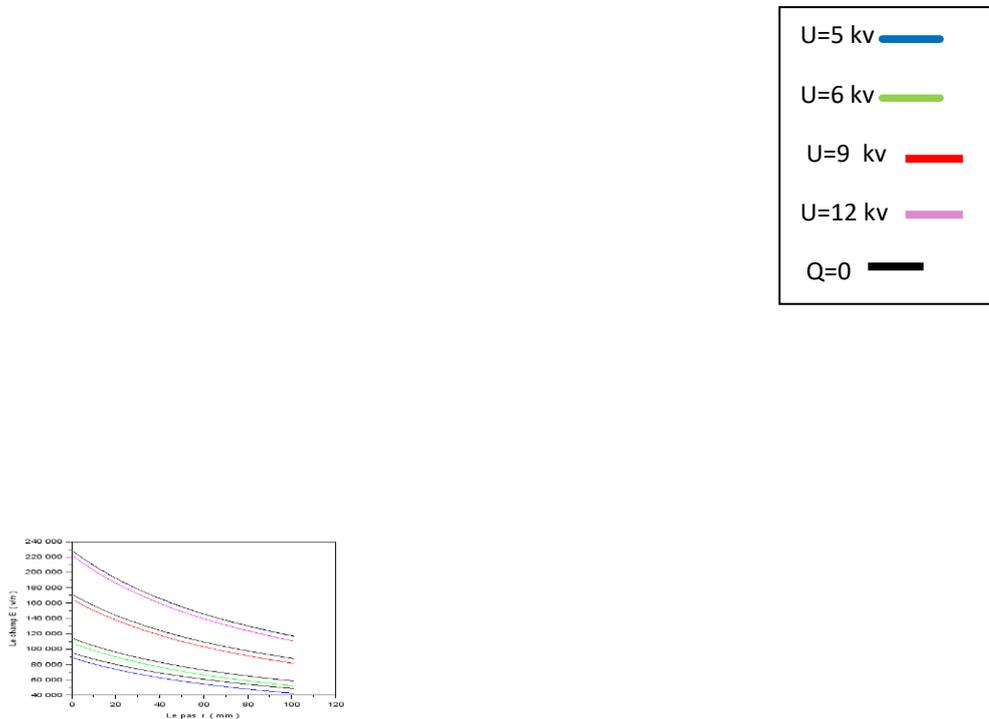


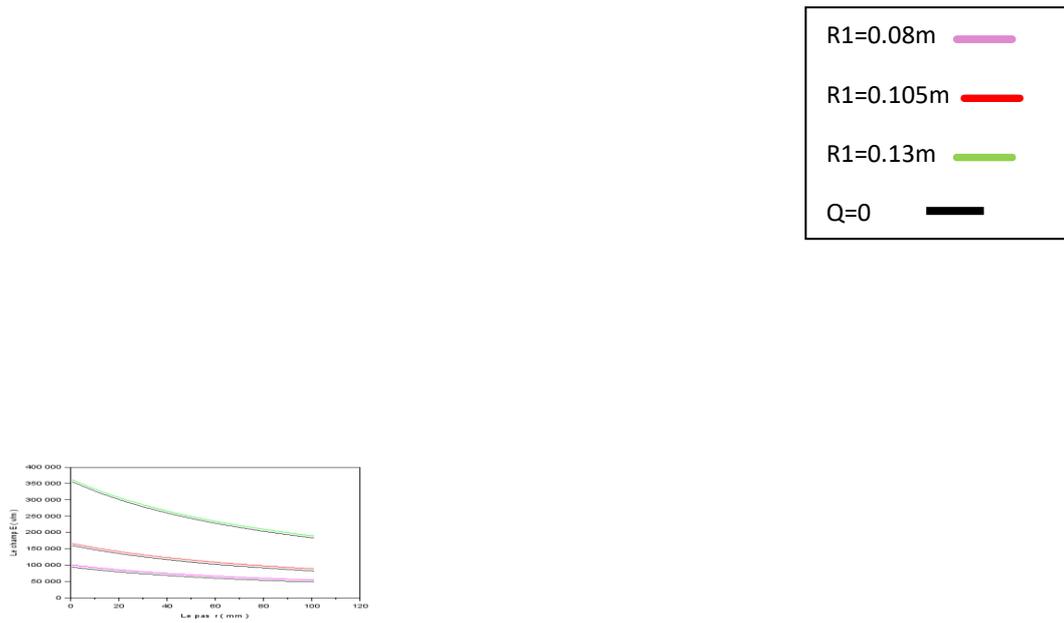
Figure IV.10: l'effet de la tension sur le champ à la présence de la charge négative

### C. L'effet de la dimension (rapport $R2/R1$ )

La (figureIV.11) montre l'influence du rapport  $R2/R1$  sur la distribution du champ mais en présence des particules chargées positivement.

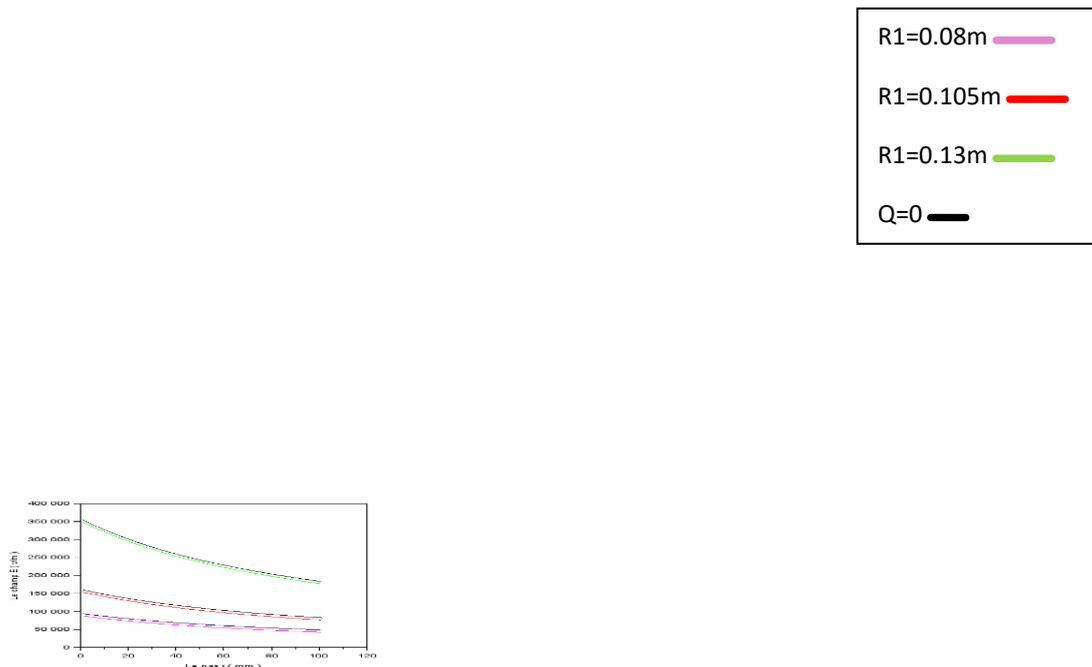
Les données :

- $R1 = 0.08 ; 0.105 ; 0.13 ; 0.155 \text{ m}$
- $R2 = 0.155 \text{ m}$
- $U = 5 \text{ kv}$
- $K = R2/R1$
- $Q = 350 \text{ nc}$



Cas d'une charge négative

- $Q = - 350 \text{ nc}$



A. L'effet de la valeur de la charge

La (figure IV.13) montre la variation du champ avec la valeur de la charge des particules.

Les données :

- $R1=0.13 \text{ m}$
- $R2=0.155 \text{ m}$
- $U= 5\text{kv}$
- $K=R2/R1$
- $Q= 50 ; 150 ; 250 ; 350\text{nc.}$

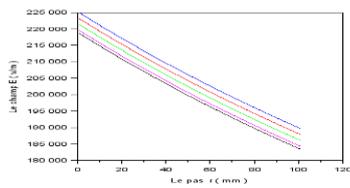
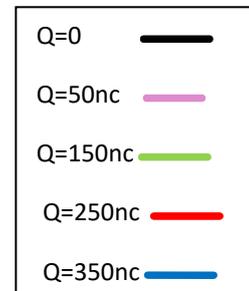


Figure IV.13: l'effet de changement de la valeur de la charge positive sur le champ électrique

Cas d'une charge négative

- $Q = -350 \text{ nc}$

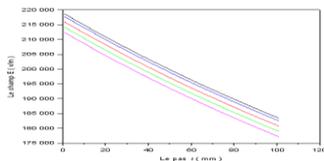
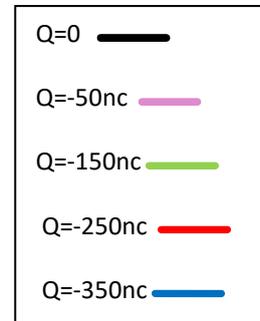


Figure IV.14: l'effet de changement de la valeur de la charge négative sur le champ électrique

#### IV.4. Interprétation et Discussion

Avant l'addition de la charge nous avons remarqués que le champ électrique est proportionnel à la tension. Plus on diminue la valeur de  $R_2/R_1$  le champ électrique augmente. Dans le cas  $R_2=R_1$  le champ électrique est nul.

Après l'addition d'une charge positive, le champ électrique est diminué en présence des particules négatives. Inversement, la présence de particules positives favorise le champ électrique et sa valeur devient supérieure.

En conclusion, pour augmenter le champ électrique sans augmenter la tension à des valeurs élevées, les particules doivent être bien chargées et la distance entre les deux cylindres doit être diminuée mais pas trop pour éviter les décharges.

### **IV.5.Conclusion**

Le principe de l'installation conçu et réalisée s'est avéré correct et fonctionne convenablement et comme prévu. Des améliorations sont encore nécessaires pour arriver à des taux de récupération et une pureté des matériaux acceptables.

Le rendement du séparateur électrostatique est lié au champ électrique qui est aussi influencé par plusieurs facteurs : les dimensions des particules chargées et la tension.

Les résultats obtenus de notre séparateur sont très prometteurs et peuvent être exploités dans la future après avoir ajouté des améliorations à l'installation.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail a été focalisé sur la réalisation et la présentation d'une nouvelle installation de séparation électrostatique, conçue et mise au point au sein du laboratoire de Génie Electrique (LGEG) de l'Université 8 mai 1945 de Guelma.

Ainsi, les principales conclusions sont comme suit :

- L'idée de base du séparateur s'est avérée correcte. Les résultats préliminaires obtenus montrent que le dispositif est capable de séparer un mélange d'isolants avec la nécessité de son amélioration.
- Le rendement du séparateur électrostatique est lié au champ électrique, qui lui aussi influencé par plusieurs facteurs.
- L'analyse des résultats expérimentaux en fonction des différents paramètres physiques, nous a permis de montrer que l'augmentation de la tension et la charge électrique des particules granulaire augmentent le champ électrique.

Le travail ouvre des perspectives sur des nouveaux problèmes de recherche :

- Étudier l'influence d'autres paramètres. Ceci permettra de généraliser les conclusions sur le rendement de la séparation dans notre séparateur.
- L'amélioration des performances des séparateurs électrostatiques en jouant sur les dimensions, la configuration elle-même et la recherche des valeurs optimaux.

# **Bibliographie**

### Bibliographie

- [1] Recyclage: <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-recyclage-5774/>
- [2] Le recyclage : <http://chemphys.ustrasbg.fr/mpb/teach/LeRecyclage/LeRecyclage2008Corrige.pdf>
- [3] Récupération, recyclage et revalorisation des « cyberdéchets » : <http://www.recycordi.com/RecycOrdi2014.pdf>
- [4] Saadani S., “Comportement des bétons a base de granulats recyclés”, Memoire de magister en génie civil, Université Mentouri de Constantine, 2014.
- [5] Bouanani A., Bendida M., “Contribution a l’étude de la séparation électrostatique d’un mélange de trois matériaux isolants”, Mémoire de Master en Électrotechnique, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2014
- [6] Rezoug M. , “ Contribution à l’étude de la neutralisation des charges électriques dans les particules isolantes”, Thèse de Doctorat université de Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2015.
- [7] Déchets inertes : <http://www.emag.suez-environnement.com/dechets-inertes-13587>
- [8] <http://www.aridosrecicladados.com/contenido.html>
- [9] Déchets : <https://www.strasbourg.eu/dechets-pratique>
- [10] Déchets dangereux : <https://www.gradignan.fr/index.php?type=404>
- [11] valclos venelles : <http://valclos.venelles.free.fr/?cat=10>
- [12] Déchet biodégradable : [http://p3nlhclust404.shr.prod.phx3.secureserver.net/SharedContent/redirect\\_0.html](http://p3nlhclust404.shr.prod.phx3.secureserver.net/SharedContent/redirect_0.html)
- [13] Recyclage de déchet de chantier : [http://www.jjkphoto.ch/dechet\\_de\\_chantier.htm](http://www.jjkphoto.ch/dechet_de_chantier.htm)
- [14] Mekhalef benhafssa A., “Etude d’un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges des matériaux poudreux”, Thèse de Doctorat université de Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [15] <http://www.dechets.picardie.fr/spip.php?rubrique66>
- [16] 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, 2016.
- [17] Kachi M., “ Caractérisation et contrôle de l’état de charge des matériaux polymères granulaires,” Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2012.
- [18] Gontran Richard, “étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires”, Thèse de Doctorat université de Poitiers, 2018.

- [19] AKSA. W, " Réalisation et étude d'un séparateur aérodynamique semi-industriel pour la récupération de particules isolantes", Thèse en sciences en Électrotechnique, Université de SBA, 2013
- [20] Nadjem A., "Étude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques", Thèse de Doctorat université de Guelma, 2018.
- [21] Bensouileh Z., "Étude expérimentale d'un séparateur à plan incliné", Mémoire de Master en Electrotechnique université de Guelma, 2017.
- [22] Geneviève Sutra « la triboelectricite », le journal de physique et le radium, tome 11, 8-9. août-septembre 1950
- [23] Dragan C., "Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéro-électrostatique de matériaux plastiques granulaires". Thèse de Doctorat Université de Poitiers, 2010.
- [24] Remadnia M., " Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants, " Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2012.
- [25] 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.
- [26] Marian-Bogdan Neagoe, "Modélisation expérimentale de phénomènes électrostatiques et tribo logiques aux interfaces solide/solide", Thèse de Doctorat université de Poitiers, Mai 2016.
- [27] CALIN L, DASCALESCU L. "Procédé de séparation électrostatique d'un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en œuvre", Brevet FR2943561, Oct.1, 2010.
- [28] <https://www.ctp.be/fr/expertises/mineralprocessing/separationsphysiques/separations-electrostatiques>
- [29] Benadla k., Benamara N., "Approche floue sur un séparateur électrostatique a cylindre tournant", Mémoire de Master en Electrotechnique université de Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2015.
- [30] Zelmat mohammed el mouloud, "Étude expérimentale sur les dispositifs d'acquisition de charge triboélectrique des particules de plastique en vue de la séparation électrostatique", Thèse de Doctorat université de Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2013.
- [31] Labair H., "Simulation Des Trajectoires Des Particules Isolantes Dans Les Séparateurs Triboélectriques à Chute Libre et à cylindre tournant", Thèse de Doctorat université de Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2017.

[32] A. Tilmatine, K. Medles, S.-E. Bendimerad, F. Boukholda and L. Dascalescu, "Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 1, pp. 228-232, 2009

[33] Fekir Djamel eddine, "Chargement triboélectrique et séparation électrostatique pour deux types de mélange granulaire binaire isolants de taille fine et ceux de grosse taille", Thèse de Doctorat université de Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2017.

[34] Familles de plastiques et leurs usages : <http://www.septiemecontinent.com/pedagogie/wp-content/uploads/2014/11/Familles-de-plastiques-et-usages.pdf>