

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:...../2020



MEMOIRE

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

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Réseaux électriques

Par: KHIROUNI Yassmina

Thème

**Etude expérimentale d'un séparateur électrostatique
à plan incliné**

Soutenu publiquement, le 03 Octobre 2020 devant le jury composé de:

M. KACHI Miloud	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. GOUAIDIA Said	MAA	Univ. Guelma	Examineur
M. REMADNIA Mokdad	MCA	Univ. Guelma	Encadreur

Année Universitaire: 2019/2020

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

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

Je souhaite remercier tout particulièrement 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.

Mes remerciements vont également aux **membres du jury** pour avoir accepté d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

En fin, je remercie 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 – GENERALITES SUR LES MATERIAUX PLASTIQUES	
I.1. Introduction	02
I.2. Les matériaux plastiques	02
I.2.1. Définition du plastique	02
I.2.2. Différents types de matières plastiques	02
I.2.2.1. Les thermoplastiques	02
I.2.2.2. Les thermodurcissables	03
I.2.2.3. Les élastomères	03
I.2.3. Production mondiale du plastique	03
I.3. Généralités sur les déchets plastiques	04
I.3.1. Source des déchets plastiques	04
I.3.1.1. Les déchets plastiques industriels	04
I.3.1.2. Les déchets plastiques de post-consommation	05
I.3.2. Plastiques et environnement	06
I.4. Conclusion	07
CHAPITRE II – RECYCLAGE DE MATERIAUX PLASTIQUES	
II.1. Introduction	08
II.2. Gestion des déchets solides	08
II.3. Le recyclage	09
II.3.1. Recyclage des matériaux	11
II.3.2. Recyclage des déchets plastiques	11
II.3.2.1. Recyclage sous forme de mélanges de déchets de polymères	12
II.4. Quelles perspectives pour le recyclage ?	12
II.5. Conclusion	12
CHAPITRE III – TECHNIQUES DE CHARGEMENT ET SEPARATION ELECTROSTATIQUE DES MATERIAUX ISOLANTS	
III.1. Introduction	13
III.2. Etat de charge des matériaux isolants	13
III.2.1. Chargement par la décharge couronne	13
III.2.2. Chargement par effet triboélectrique	14
III.2.2.1. Mécanisme physique de charge	14
III.2.2.2. Série triboélectrique	16
III.2.3. Dispositifs de chargement triboélectrique	16
III.2.3.1. Dispositif de charge par ventilateur	16
III.2.3.2. Dispositif de charge par cyclone	17
III.2.3.3. Dispositif de chargement statique	18
III.2.3.4. Dispositif de charge à cylindre rotatif	18
III.2.3.5. Dispositif de charge par vibrations	19
III.2.3.6. Dispositif de charge à lit fluidisé	19
III.2.4. Forces exercées sur les matériaux granulaires	21
III.2.4.1. Forces de la pesanteur	21
III.2.4.2. Forces de London-Van der Waals	21
III.2.4.3. Forces de Coulomb	22
III.2.4.4. Forces aérodynamiques	24
III.3. Installations de séparation tribo-électrostatique des mélanges granulaires isolants	25
III.3.1. Séparateurs tribo-électrostatiques des mélanges granulaires	25
III.3.1.1. Séparateur tribo-électrique à chute libre	25

III.3.1.2. Séparateur tribo-électrique à tapis roulant	26
III.3.2. Séparateurs tribo-aéro-électrostatique pour les mélanges granulaires	27
III.3.2.1. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales	27
III.3.2.2. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournant	27
III.3.2.3. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux bandes transporteuses	28
III.4. Conclusion	29

CHAPITRE IV – REALISATION ET ETUDE D’UN SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE A PLAN INCLINE

IV.1. Introduction	30
IV.2. Présentation du séparateur à plan incliné	30
IV.2.1. Description	30
IV.2.2. Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé	33
IV.2.3. Forces exercées sur les particules	34
IV.3. Techniques de mesure et procédures expérimentales	36
IV.3.1. Procédure de déroulement des expériences	36
IV.3.2. Taux de récupération	37
IV.3.3. Taux de pureté	37
IV.3.4. Mesure de la température et de l’humidité relative	37
IV.3.5. Mesure de la masse granulaire	38
IV.3.6. Mesure de la charge triboélectrique	38
IV.4. Matériaux utilisés	39
IV.5. Résultats et discussion	41
IV.5.1. Mesure de la charge électrique	41
IV.5.2. Résultats du séparateur incliné à électrodes parallèles	41
IV.5.3. Résultats du séparateur incliné à électrodes en position “V” inversé	42
IV.5.3.1. Influence de la distance entre les bords supérieurs des électrodes	42
IV.5.3.2. Influence de la distance entre les bords inférieurs des électrodes	44
IV.6. Conclusion	46
Conclusion générale	47
Bibliographie	48

Introduction générale

Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) sont une catégorie de déchets constituée d'équipements en fin de cycle de vie. Ce terme regroupe un grand nombre d'appareils aux dimensions et poids très variés: ordinateur, imprimante, photocopieur, téléphones portable, réfrigérateurs, outil de mesure, télévision, etc. Dans une société où le taux d'équipement est de plus en plus élevé et où les produits sont très rapidement obsolètes avec l'évolution rapide des technologies, les quantités de DEEE augmentent aussi rapidement d'année en année. Ces DEEE sont composés d'une grande diversité de matériaux plastiques. Ceux-ci sont triés par nature (ABS, PC, PA, PP, etc.) et granulés avant d'être extrudés et utilisés pour fabriquer de nouvelles pièces. Le recyclage des polymères issus de DEEE c'est l'opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités. 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, les technologies de traitement des matériaux sont largement utilisées pour le tri sélectif des matériaux solides par des forces électriques qui agissent sur les particules chargées.

L'objectif principal de ce travail consiste à améliorer le séparateur électrostatique à plan incliné par l'étude de l'influence de la disposition des électrodes haute tension et la distance inter-électrodes sur le rendement de la séparation et la pureté des produits récupérés. Le mémoire comporte quatre chapitres qui se présentent comme suit:

Le premier chapitre renferme des généralités sur les matériaux plastiques ainsi les sources des déchets plastiques.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du contexte du recyclage des matières plastiques.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de quelques notions sur les techniques de chargement des matériaux isolants et les différents dispositifs utilisés pour le chargement triboélectrique, de même que les différentes techniques et installations de séparation électrostatique.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et l'étude d'un séparateur triboélectrostatique à plan incliné, conçu au Laboratoire de Génie Électrique de Guelma de l'Université 8 mai 1945 – Guelma.

Chapitre I

Généralités sur les matériaux plastiques

I.1. Introduction

Les matériaux de base durables, dites traditionnels comme les céramique et les métaux et également les matériaux organiques tels que le bois, le cuir, le lin ou la laine, jouaient un rôle important et une grande consommation dans la société. Pour répondre à la demande croissante de ces matières, les XIXe et XXe siècles ont vu l'émergence et le début du développement de nouveaux produits a nommé plastique. Ces derniers sont principalement des matériaux synthétiques issus du charbon et du pétrole et résultent des avancées impressionnantes de la chimie. Il possède des propriétés très diverses et parfois incomparables.

I.2. Les matériaux plastiques

Les matériaux plastiques jouent un rôle très important dans notre vie quotidienne, leurs applications sont de plus en plus vaste, la demande mondiale de ces matières augmente d'une année à une autre.

I.2.1. Définition du plastique

Le plastique est une matière synthétique composée de polymères, qui a la propriété d'être moulée ou modelée facilement après chauffage et qui peut être souple ou rigide. On appelle polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes. La majorité des plastiques (99%) utilisés dans le monde est fabriqués à partir de pétrole et de gaz naturel [1].

I.2.2. Différents types de matières plastiques

On trouve plusieurs variétés de plastiques, qui peuvent être regroupées en trois catégories: les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

I.2.2.1. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur et deviennent souples. Ils prennent alors une forme qu'ils garderont en refroidissant. Cette transformation est réversible et renouvelable un grand nombre de fois, ainsi les thermoplastiques sont facilement recyclables. Par contre ils ne sont pas biodégradables et ont une durée de vie de plusieurs centaines d'années [2].

I.2.2.2. Les thermodurcissables

Au premier refroidissement ces plastiques prennent une forme définitive: ils deviennent durs et ne se ramollissent plus une fois moulés. C'est une technique de fabrication difficile à mettre en œuvre mais les matériaux produits sont très solides et très résistants à la chaleur et aux agressions chimiques [2].

I.2.2.3. Les élastomères

Les élastomères ne sont pas réellement des « plastiques », ils sont élastiques qui se déforment et tendent à reprendre leur forme initiale et supportent de très grandes déformations avant rupture. Issu du latex d'Hévéas, 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...).

Les élastomères présentent des caractéristiques bien spécifiques: grande élasticité, bonne étanchéité, fort pouvoir amortissant. Ils sont employés essentiellement en tant que pneumatiques, on les utilise également sous la forme de joints, de tubes et tuyaux, de membranes, de dispositifs antivibratoires,...dans de nombreux domaines d'activités: automobile, industrie, aéronautique, médecine [2].

I.2.3. Production mondiale du plastique

En 1968, ce furent les premières bouteilles en plastique (Vittel en France). En 1980, le monde produisait 60 millions de tonnes de plastiques (Figure I.1), 187 en 2000, 265 en 2010 et 348 millions de tonnes en 2017, soit une croissance moyenne de 8,5 % par an depuis 1950 et sa production de 1,5 million de tonnes. Aujourd'hui, la Chine réalise le tiers de la production mondiale, une proportion plus faible que pour les autres industries de base comme l'acier ou l'aluminium. Au total depuis 1950, ce sont 8,3 milliards de tonnes de plastiques qui ont été produites. L'Agence Internationale de l'Énergie, dans une étude de 2018, anticipe une production annuelle de l'ordre de 600 millions de tonnes au milieu du siècle [3].

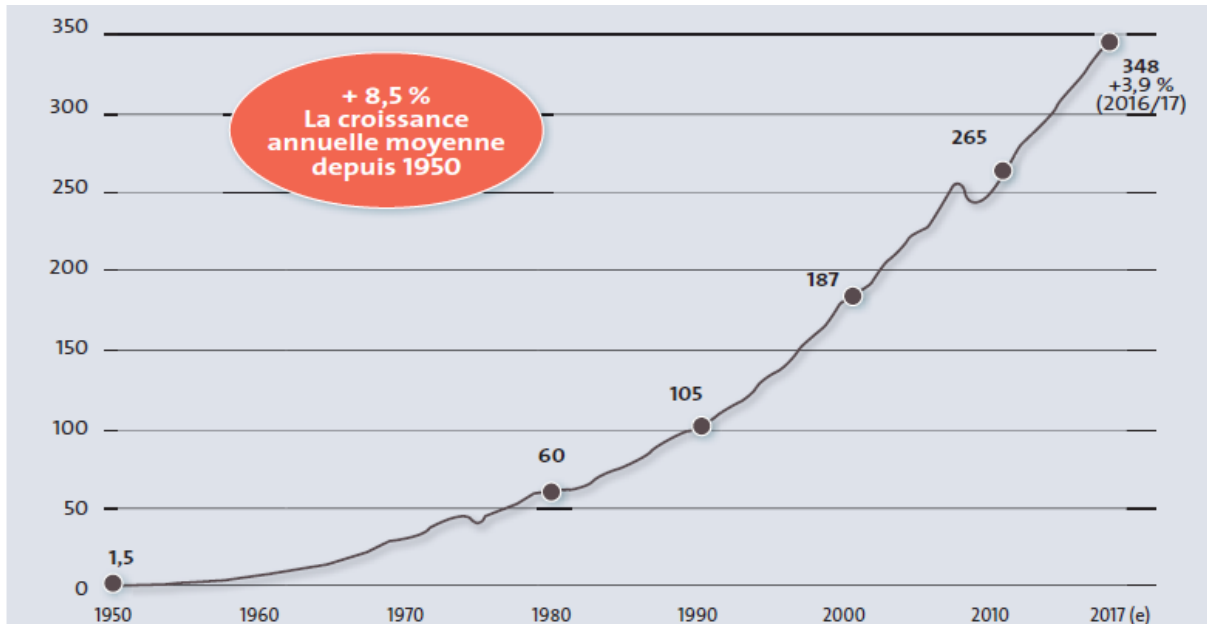


Figure I.1: Production mondiale de plastique (en millions de tonnes) entre 1950-2017 [3].

I.3. Généralités sur les 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 sources de déchets plastiques.

I.3.1. Source des déchets plastiques

I.3.1.1. Les 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) [4].

❖ **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 [4].

I.3.1.2. Les 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) [4].

❖ **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 [4].

❖ **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 [4].

❖ **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,...) [4].

I.3.2. 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. Il est retrouvé partout et sous toutes formes: emballages, bouteilles, sachets, pare-chocs de voiture... En principe c'est un matériau simple à fabriquer, économique, solide, léger et résistant à la corrosion. Il favorise notre hygiène de vie grâce à la conservation des aliments et permet d'économiser de l'énergie pour le transport grâce aux matériaux compactés. La fabrication intensive du plastique dès 1970 apporte de nombreux avantages pour la société, et offre un avenir technologique et médical avancé. Mais le problème principal du plastique est souvent celui de son usage unique: une fois dans la nature, il peut mettre jusqu'à plusieurs centaines d'années pour se décomposer. Toutefois, les préoccupations concernant son utilisation et son élimination sont diverses. Elles comprennent:

- ❖ 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 microplastiques de la faune à l'humain.

En termes de volume, le plastique serait le déchet le plus rencontré, avec une importante quantité qui se retrouverait dans la mer [5].



Figure I.2: Déchets équipements informatiques.

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté un aperçu général sur la matière plastique, sa définition, ses différents types, aussi quelques statistiques concernant la production, ainsi que l'impact des déchets plastiques sur l'environnement.

Chapitre II

Recyclage de matériaux plastiques

II.1. Introduction

Le recyclage est utilisé dès l'âge du bronze. À cette époque, les objets usagés en métal sont fondus afin de récupérer leur métal pour la fabrication de nouveaux objets. Dans toutes les civilisations, l'art et la manière de « faire du neuf avec du vieux » existent. Par exemple, les vieux chiffons, puis les papiers et cartons, sont récupérés pour faire de la pâte à papier. La situation change avec le développement progressif puis massif de l'industrialisation et de la consommation. Le recyclage contribue à diminuer les quantités de déchets à stocker en décharge ou incinérer, mais il reste insuffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets.

II.2. Gestion des déchets solides

La nouvelle notion à appliquer dans la gestion des déchets est basée sur le principe connu actuellement sous l'appellation des « 3RV-E » avec, par ordre de priorité:

- ❖ la réduction à la source;
- ❖ le réemploi;
- ❖ le recyclage;
- ❖ la valorisation;
- ❖ l'élimination.

Cette nouvelle conception de la gestion des déchets vise l'économie de ressources, leur mise en valeur avec un impact minimum sur l'environnement et la santé humaine [6].

Réduction à la source

Elle consiste à générer le moins de déchets lors de la fabrication, de la distribution et de l'utilisation du produit. Le citoyen peut contribuer à cette réduction en diminuant la quantité de déchets produits par l'utilisation de produits en vrac plutôt qu'emballés, des produits durables plutôt que jetables, etc.

Réemploi ou réutilisation

On définit maintenant la réutilisation ou le réemploi par “ l'utilisation répétée du produit sans modification de son apparence ou de ses propriétés”. C'est une méthode qui consiste à prolonger la durée de vie d'un produit en l'utilisant plusieurs fois. Par exemple, les bouteilles consignées qui peuvent être de nouveau utilisées après nettoyage.

Recyclage

La notion de recyclage consiste à réintroduire les matériaux provenant de déchets dans un cycle de production ou processus de fabrication en remplacement total ou partiel d'une matière première vierge.

Valorisation

La valorisation des déchets est définie comme un mode de traitement qui consiste dans "le réemploi, le recyclage ou autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie".

Elimination

- Toute opération ou traitement qui aboutit à des substances qui peuvent être soit restituées sans effet nocif au milieu naturel (air, eau, sol), soit réinsérées dans les circuits économiques à des fins de valorisation (cas des déchets solides).
- Dépollution, enlèvement, réduction du pouvoir toxique ou stockage.

II.3. Le recyclage

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 (Figure II.1). 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 [7]. 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 [8].

La figure II.2 représente le symbole universel du recyclage depuis 1970, cette représentation de l'infini conçue par le mathématicien allemand August Ferdinand Möbius signifie que votre emballage est recyclable.

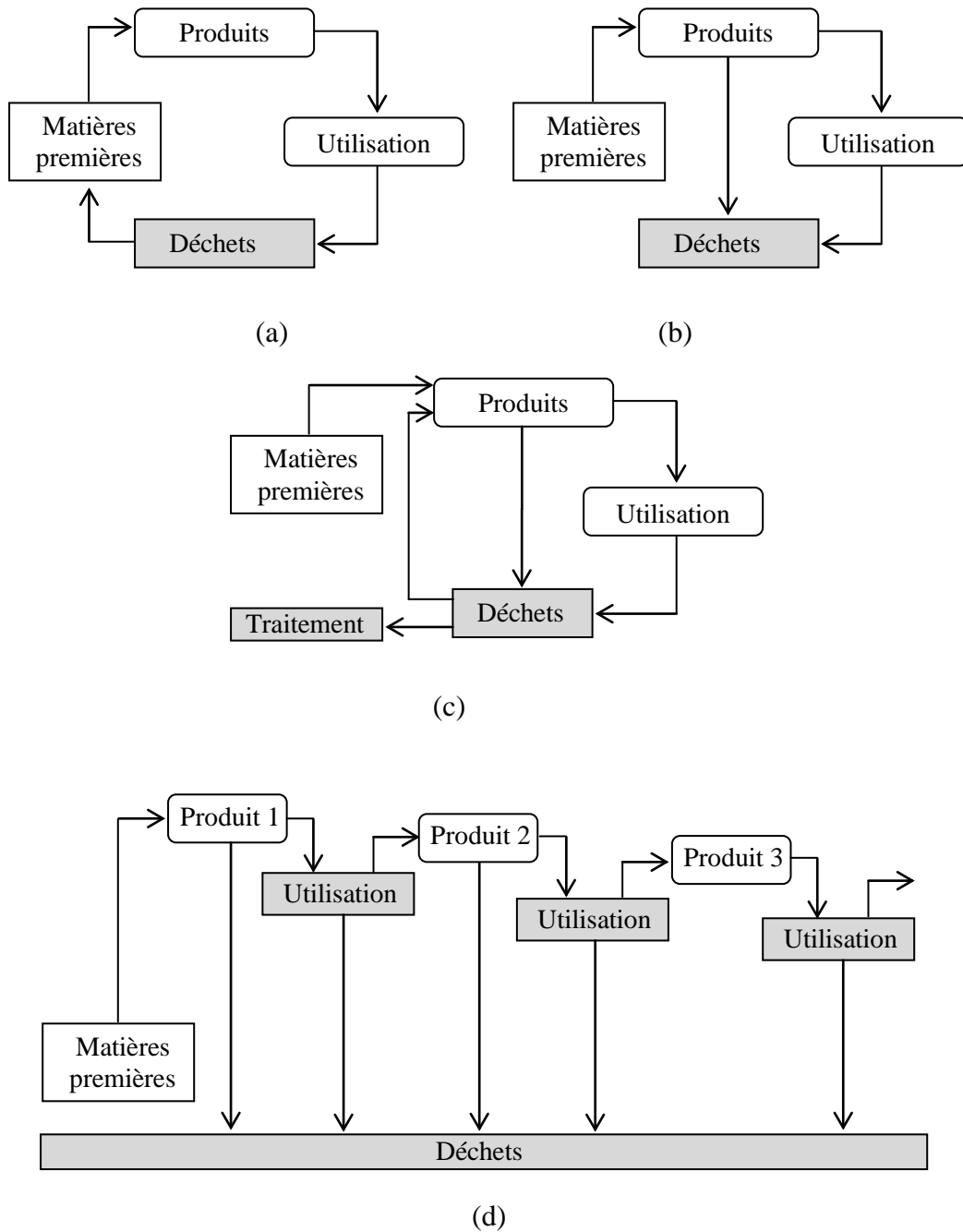


Figure II.1: Schématisation des différents modes de recyclage des déchets: (a) Fabrication d'un produit avec un recyclage complet (idéal), (b) Fabrication d'un produit avec des déchets, (c) et (d) Fabrication d'un produit avec utilisation partielle des déchets dans le procédé [6].



Figure II.2: Symbole du recyclage.

II.3.1. Recyclage des matériaux

Pour pouvoir être recyclé, un matériau doit être collecté, trié puis stocké en bon état dans un conteneur approprié, le tri sélectif contribue à améliorer le processus.

La plupart des déchets ménagers et industriels non dangereux peuvent se recycler [9]:

- **recyclage aluminium et acier:** une fois broyés, ces matériaux servent à confectionner des chariots de supermarché, des clefs ou des fers à repasser.
- **recyclage verre:** ce matériau durable peut se recycler à 100% et indéfiniment.
- **recyclage plastique:** s'il est correctement trié, le plastique peut se recycler sous la forme de montres, de tuyaux ou de vêtements.
- **recyclage piles:** plomb, zinc, mercure, cadmium... les piles contiennent de nombreuses substances toxiques.
- **recyclage électroménager:** comme les piles, le petit électroménager (grille-pain, cafetière, réveil...) ne doit pas finir dans la poubelle classique, mais à la déchetterie ou dans un point de vente.
- **recyclage déchets électroniques:** plus question de laisser traîner sa vieille télé sur le trottoir. Pour faire recycler ses vieux appareils, il faut les redonner au distributeur, les confier à une association d'économie sociale et solidaire, ou les déposer à la déchetterie.

II.3.2. Recyclage des déchets plastiques

Un matériau plastique est apte à être recyclé selon sa nature et ses propriétés physiques et physico-chimiques. On entend par produit plastique recyclable celui qui est susceptible d'être refondu et moulé ou injecté à nouveau.

Ce sont les produits thermoplastiques qui se prêtent à cette pratique, contrairement aux plastiques thermorigides, ou thermodurcissables, tels que le polyuréthane et le polyester.

Les déchets thermoplastiques sont traités et transformés en granulés par triage, broyage, lavage, séchage et fonte dans une extrudeuse pour être régénérés.

Parmi les produits thermoplastiques répandus que l'on rencontre sur le marché national et qui sont recyclables, figurent [6]:

- le PET (Poly Ethylène Téréphtalate);
- le PE (Poly Ethylène);
- le PVC (Poly Chlorure de Vinyle);
- le PP (Poly Propylène);
- les matériaux caoutchouteux.

II.3.2.1. Recyclage sous forme de mélanges de déchets de polymères

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 [10].

II.4. Quelles perspectives pour le recyclage ?

Dans un contexte de renchérissement et de raréfaction des matières premières et de volatilité des cours, le recyclage contribue à renforcer l'indépendance nationale en ce qui concerne l'approvisionnement en matières premières. Mais les efforts doivent être poursuivis. Dans ce sens, des chercheurs envisagent de nouvelles techniques de séparation et de tri des matières permettant de conserver l'intégralité de leur pureté et leurs caractéristiques initiales. Ils proposent d'investiguer des nouveaux processus de séparation. Ces perspectives constituent un espace d'innovation prometteur [5].

II.5. Conclusion

Le recyclage est un enjeu stratégique majeur pour l'économie. Le tri et le recyclage de déchets permettent de limiter fortement le gaspillage des ressources naturelles, participe à la préservation de l'environnement et permet de pérenniser l'approvisionnement de l'industrie en matières premières.

Chapitre III

Techniques de chargement et séparation électrostatique des matériaux isolants

III.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. Par conséquent, le chargement électrostatique des matériaux granulaire est indispensable pour leur séparation dans un champ électrique intense.

III.2. Etat de charge des matériaux isolants

Deux mécanismes physiques sont généralement utilisés pour charger les matériaux granulaires isolants en vue de leur séparation dans un champ électrique intense: l'effet couronne [11,12], assurant la charge par bombardement ionique et l'effet triboélectrique, impliquant le transfert de charge entre deux corps en contact.

III.2.1. Chargement par la décharge couronne

On peut définir la décharge couronne comme une décharge électrique autoentretenu dans un gaz, dont la zone active, où se produisent l'ionisation et les phénomènes d'avalanche, est limitée dans l'espace par la décroissance du champ électrique, par opposition aux décharges de type étincelle ou arc, pour lesquelles la décharge est limitée géométriquement par une électrode. La décharge couronne nécessite donc une configuration produisant un champ fortement divergent, c'est-à-dire généralement une électrode à faible rayon de courbure: pointe arête ou fil [13]. L'effet couronne se produit sur tous les conducteurs, dès que le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand, l'air s'ionise et forme autour du conducteur une couronne lumineuse [14,15].

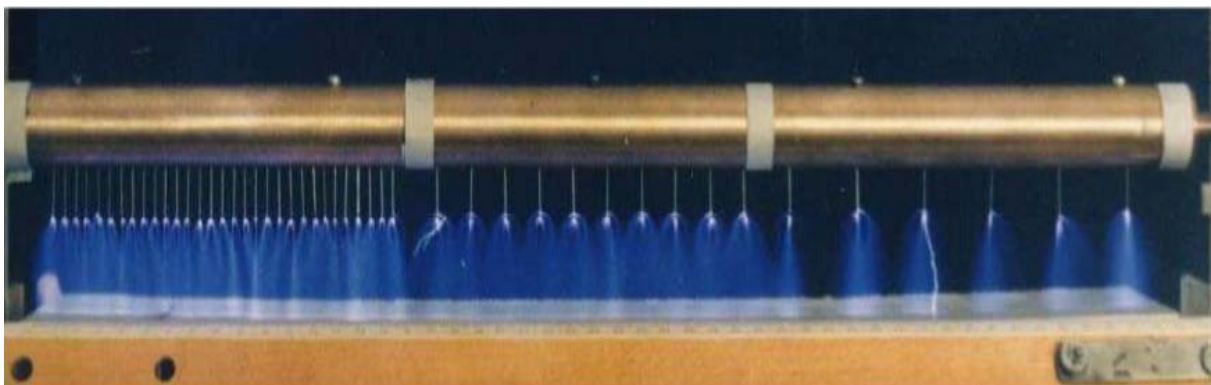


Figure III.1: Photographie d'une décharge couronne avec une électrode à aiguilles [16].

III.2.2. Chargement par effet triboélectrique

L'électrification par contact aussi appelée effet triboélectrique du "grec tribein" signifiant frotter [17]. Il s'agit d'un transfert de charges électriques entre différents matériaux: lorsque deux matériaux électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charge qui abouti à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement [18]. Ce phénomène est influencé par le couple frotteur / frotté.

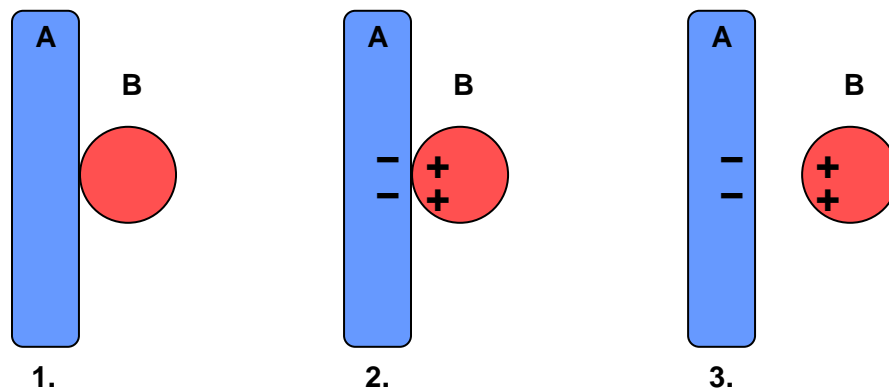


Figure III.2: L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux surfaces:
1. Surface A neutre, particule B est neutre; 2. La surface A et la particule B sont en contact; 3. Après la séparation, la surface A a la tendance de se charger négativement, et la particule B positivement [5].

III.2.2.1. Mécanisme physique de charge

Le phénomène de charge de deux polymères par impact est basé sur la physique des surfaces [19] qui prend en compte l'existence de deux niveaux d'énergie des électrons situés dans la bande interdite du polymère (Figure III.3), 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 [19] prend des valeurs d'ordre de grandeur $(10^{30} \dots 10^{33}) \text{ m}^{-2} \text{ J}^{-1}$. 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 III.4).

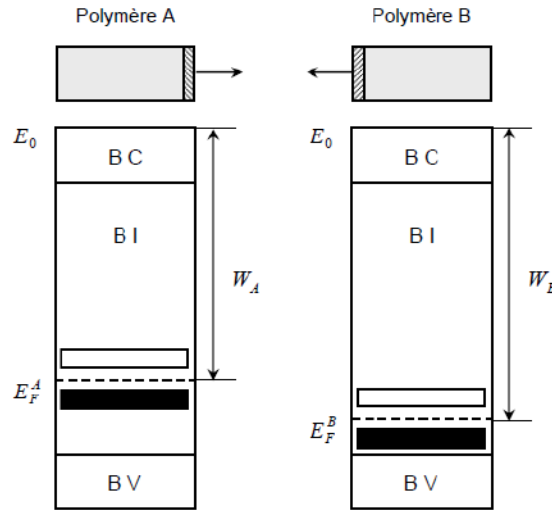


Figure III.3. La modélisation des niveaux superficiels qui explique le processus de triboélectrisation est basé sur le transfert de charge entre les surfaces de contact et la présence des niveaux d'énergie dans la bande interdite des polymères. Les bandes noires situées au dessous des niveaux Fermi représentent 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 [19].

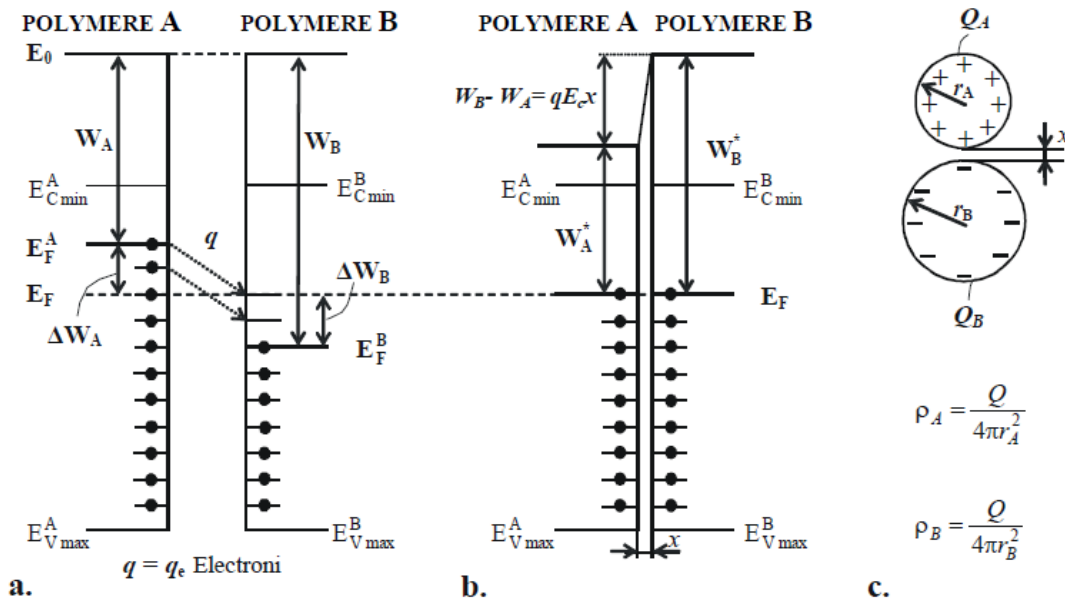


Figure III.4. Diagrammes des niveaux d'énergie qui expliquent la triboélectrisation de deux granules de différents polymères par la théorie des niveaux superficiels de haute densité (a) polymères en contact (électronique). Le polymère A caractérisé par un travail d'extraction faible, transfère des électrons et se charge positivement par rapport au polymère B; (b) le processus de triboélectrisation prend fin par l'accumulation de la charge Q à l'interface et par renforcement du champ électrique de contact E_C 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 ρ_A, ρ_B [19].

III.2.2.2. Série triboélectrique

On appelle série triboélectrique un classement des corps selon leur tendance à se charger positivement ou négativement, un corps est placé avant un autre dans la série s'il a tendance à lui céder des électrons (à se charger positivement) quand les deux corps sont mis en contact ou frottés l'un contre l'autre. 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 [16]. A travers les années, plusieurs séries triboélectriques ont été établies (figure III.5).

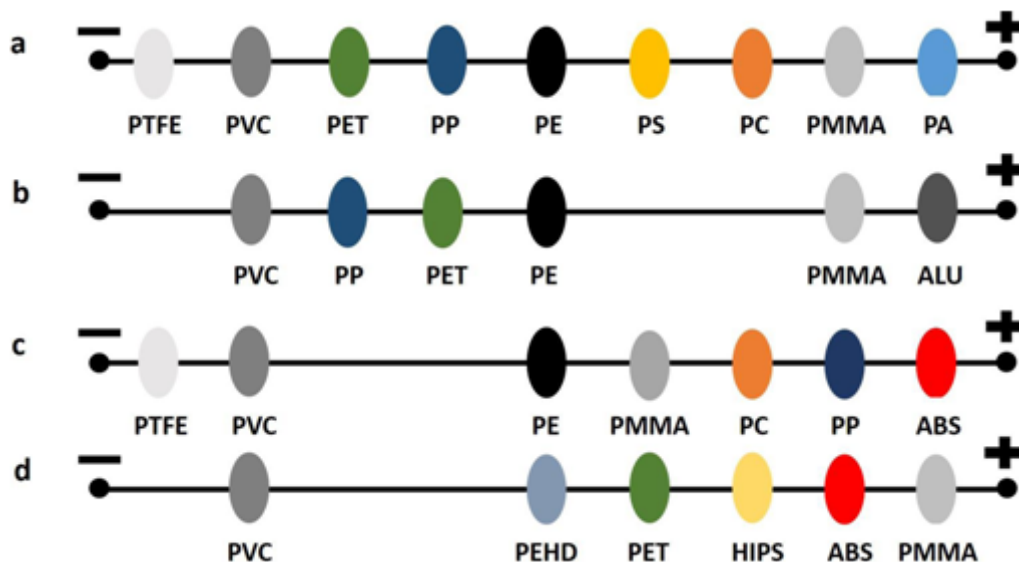


Figure III.5: Série triboélectrique expérimentale pour différents matériaux plastiques utilisés dans la fabrication des équipements informatiques et électriques selon différents auteurs: a [20], b [21], c [22], d [23].

III.2.3. Dispositifs de chargement triboélectrique

Multiples travaux ont été publiés sur les procédés de chargement triboélectrique, qui utilisent essentiellement: des ventilateurs, des cylindres rotatifs, des lits fluidisés (créés par des soufflantes ou des compresseurs), des micro-cyclones, ou des chargeurs statiques [24-25].

III.2.3.1. Dispositif de charge par ventilateur

Le dispositif consiste en une chambre cylindrique isolante en polyvinyle chlorure PVC (Figure III.6). A son extrémité inférieure, la chambre est munie d'une hélice coaxiale, entraînée par un moteur électrique à courant continu à vitesse variable. Le dispositif utilise l'air ascendant qui donne naissance à des turbulences dans le tube contenant le mélange

granulaire, provoquant ainsi leur tribo-électrification lorsque celles-ci entrent en collisions entre-elles ou avec les parois du tube [16,24].

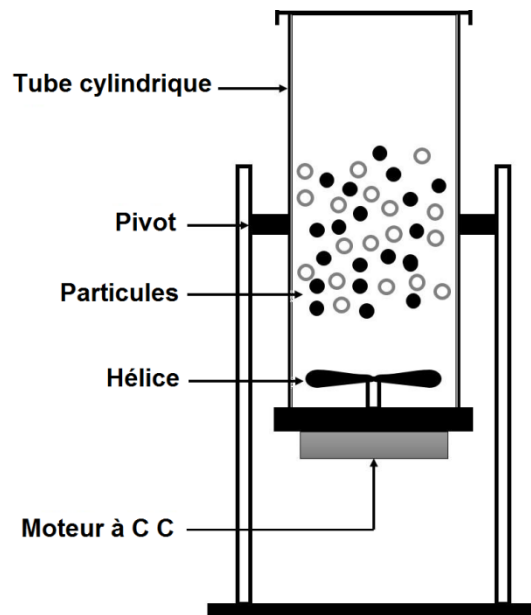


Figure III.6: Représentation schématique du dispositif d'un chargement par ventilateur [16].

III.2.3.2. Dispositif de charge par cyclone

Le dispositif est constitué d'un cylindre isolant disposé en position verticale et un ventilateur dont la vitesse de rotation peut être modifiée (Figure III.7). Il permet de souffler les particules à charger par frottement avec les parois internes du dispositif [25].

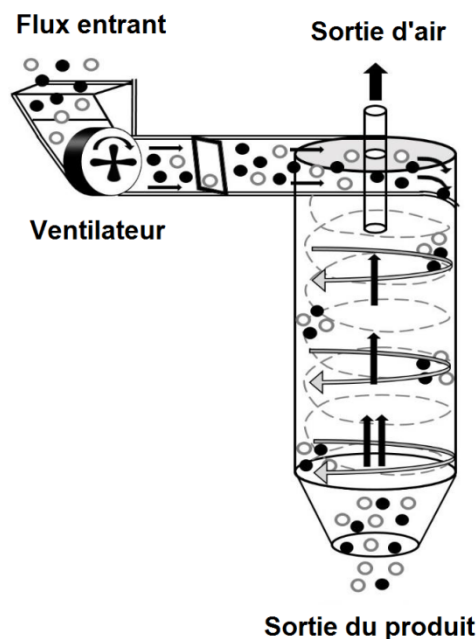


Figure III.7: Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [16].

III.2.3.3. Dispositif de chargement statique

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique en matière isolante (Figure III.8), 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].

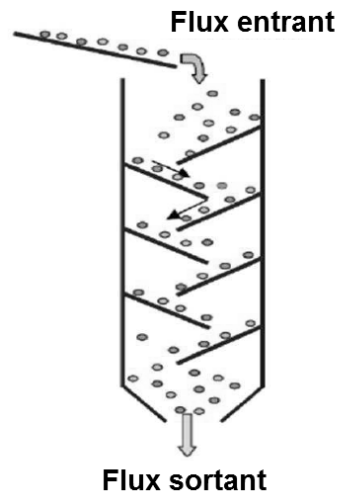


Figure III.8: Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [25].

III.2.3.4. 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.9), les particules passent à travers le tube par la force de la pesanteur. 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 [25, 26].

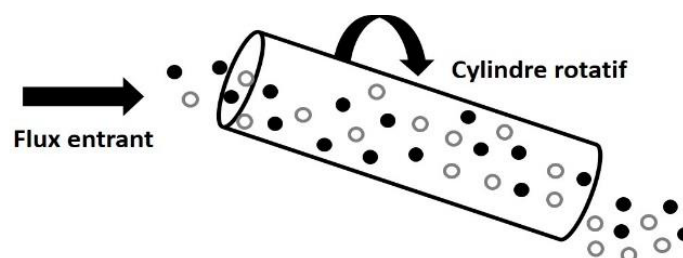


Figure III.9: Dispositif de tribo-charge à cylindre rotatif [16].

III.2.3.5. Dispositif de charge par vibrations

Cette installation a été développée par Blajan et al [27] (Figure III.10). Le matériau à charger glisse dans des canaux en Zig-Zag mis en mouvement vibratoire sur les deux axes X et Y [28-29]. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique associé à un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif. En changeant la vitesse du moteur, il est possible de modifier le mouvement oscillant du dispositif de charge [12].

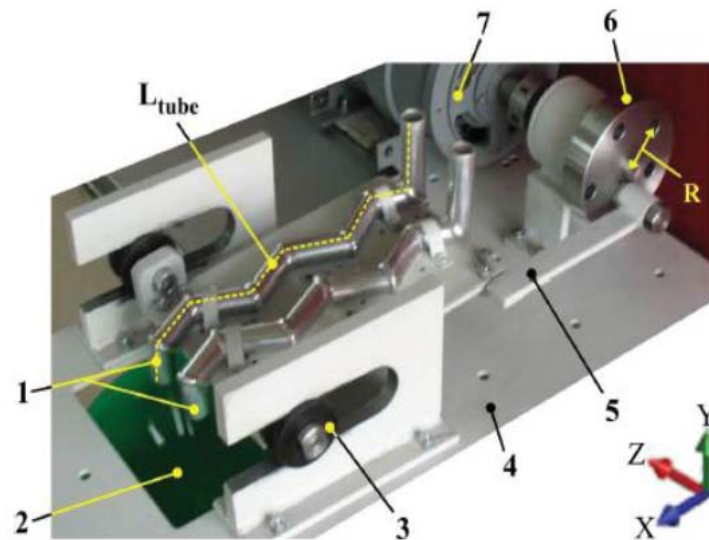


Figure III.10: Dispositif à vibrations (1: tubes de charge; 2: sortie des particules chargées; 3: glissière; 4: support; 5: bielle; 6 : manivelle; 7: moteur électrique; R: rayon; X, Y, Z : direction du mouvement; L_{tube} : longueur du tube) [12].

III.2.3.6. Dispositif de charge à lit fluidisé

C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique. Le dispositif a 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 [12]. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes [12]

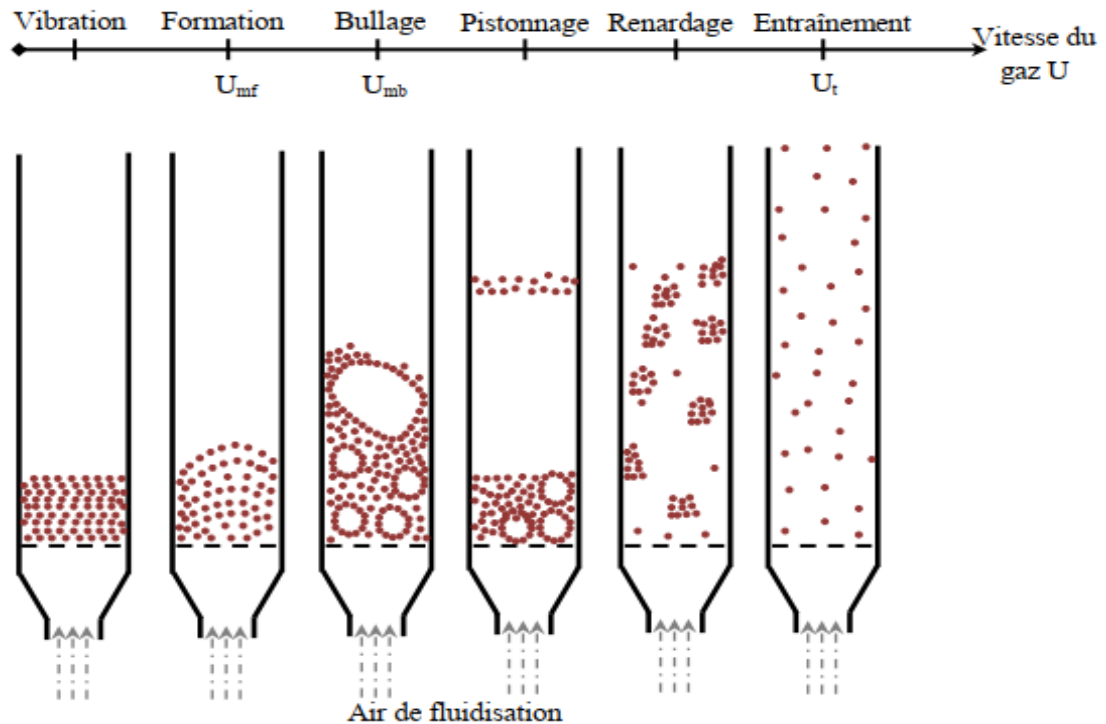


Figure III.11: Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation.

- ❖ **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.

III.2.4. Forces exercées sur les matériaux granulaires

Trois types de forces s'exercent sur les matériaux granulaires qui prennent naissance lors d'un frottement ou lors d'un simple contact:

- Les forces de la pesanteur
- Les forces électrostatiques
- Les forces aérodynamiques

III.2.4.1. Forces de la pesanteur

Le poids d'un corps de masse m s'exprime par:

$$P = mg \quad (\text{III.1})$$

Avec $g=9.81 \text{ m/s}^2$ et P en Newton.

Aux forces de la pesanteur s'opposent des forces inter particulaires. Elles sont différentes pour des particules chargées d'électricité statique ou électriquement neutres.

III.2.4.2. Forces de London-Van der Waals

Ce sont des forces de nature électrostatique qui s'exercent sur des molécules ou des particules électriquement neutres. Elles peuvent être estimées en faisant la somme de toutes les combinaisons possibles de paires d'atomes entre particules et s'écrivent:

$$F = \frac{\lambda}{a^7} \quad (\text{III.2})$$

Où a est la distance entre les deux centres et λ est une constante qui dépend de la polarisation et de l'énergie d'ionisation des atomes impliqués.

Les forces de London – Van Der Waals étant inversement proportionnelles à la septième puissance de leur distance, cela entraîne un accroissement rapide de l'interaction pour les courtes distances (Figure III.12).

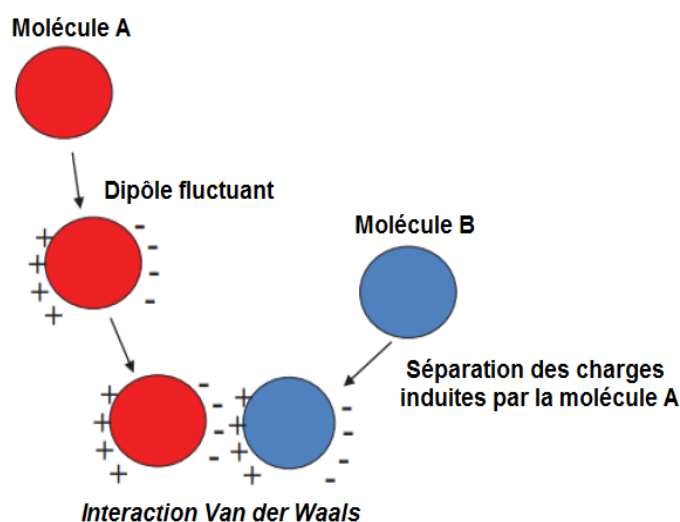


Figure III.12: Le phénomène physique responsable de la force Van der Waals: polarisation électrique des atomes ou molécules neutres [26].

Le tableau III.1 donne la valeur des forces d'interaction entre des particules séparées par une distance de 50 \AA (5nm), en fonction de leur rayon. Pour des particules de 1 mm, elles sont approximativement identiques. Ces constatations expliquent le fait que les fines particules aient plus tendance à s'agglomérer que les grosses.

Tableau III.1: Forces de Van der Waals et de pesanteur en fonction de la taille des particules, d'après Higuchi [26].

Rayon (cm)	Forces de Van der Waals $a = 50 \text{ \AA}$	Poids (g.cm /s ²)
10^{-5}	$3,3 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-12}$
10^{-4}	$3,3 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-9}$
10^{-3}	$3,3 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-6}$
10^{-2}	$3,3 \times 10^{-1}$	$4,1 \times 10^{-3}$
10^{-1}	3,3	4,1

III.2.4.3. Forces de Coulomb

Les forces de Coulomb sont des forces attractives ou répulsives qui s'exercent entre particules chargées. Si q_1 et q_2 sont les charges des deux particules et r la distance entre leurs centres, la loi de Coulomb permet d'écrire:

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} K \quad (\text{III.3})$$

avec $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.10^9$ et ϵ_0 étant la permittivité du vide.

Le calcul de ces forces a été établi pour des éléments supposés sphériques de charges données, de tailles différentes et en proche contact. Nous présentons sur le tableau III.2, une comparaison entre les forces électrostatiques et les forces de la pesanteur, pour des petites particules.

Tableau III.2: Forces d'interaction électrostatique entre deux sphères chargées [26].

Rayon (cm)	Forces (dynes)	Poids (g.cm/s ²); Densité=1
10 ⁻⁴	9 × 10 ⁻⁶	4,1 × 10 ⁻⁹
10 ⁻³	9 × 10 ⁻⁴	4,1 × 10 ⁻⁶
10 ⁻²	9 × 10 ⁻²	4,1 × 10 ⁻³
10 ⁻¹	9	4,1
1	9 × 10 ²	4,1 × 10 ³

Entre deux particules de 1µm de diamètre, avec le même maximum de charges, s'exerce une force 1000 fois supérieure à celle de la pesanteur. En analysant les deux tableaux, on peut tirer les conclusions suivantes :

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

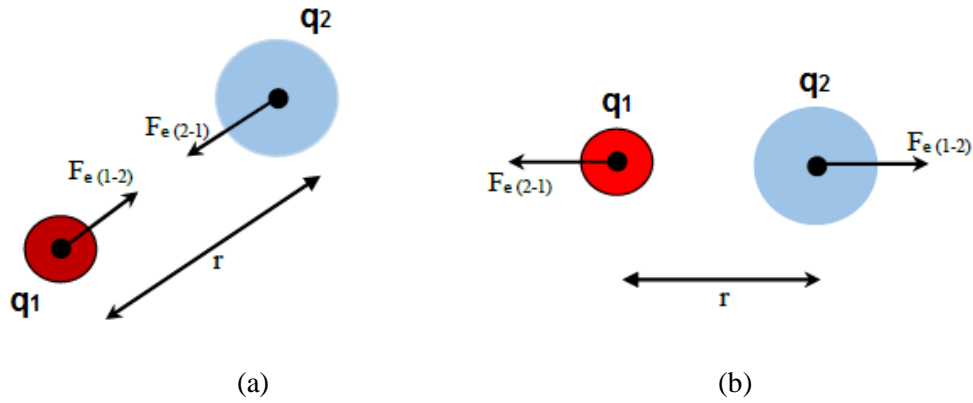


Figure III.13: Force de coulomb entre deux sphères chargées. (a): attraction, charges de signes opposées ($q_1q_2 < 0$), (b): répulsion, charges de mêmes signes ($q_1q_2 > 0$).

III.2.4.4. Forces aérodynamiques

Lors de l'étude de mouvement des particules dans un procédé de chargement triboélectrique en présence ou en l'absence de champ électrique, il faut étudier les forces aérodynamiques agissant sur ces particules [26].

Une particule chargée sous un champ électrostatique a pour équation de force la formule suivante:

$$F_i = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad (\text{III.4})$$

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

F_a est la force aérodynamique et F_g la force gravitationnelle.

La force d'inertie F_i est donnée par la relation:

$$F_i = W(\rho_s - K\rho) \frac{dv}{dt} \quad (\text{III.5})$$

où: v est la vitesse de particule, K est le coefficient de forme [30] (pour les particules sphériques $K = 0,5$), W est le volume d'une particule ayant la densité ρ_s et ρ la densité de l'air.

La force aérodynamique s'exprime par la relation:

$$F_a = C_d \pi R^2 \rho v_r^2 / 2 \quad (\text{III.6})$$

où C_d est une constante en fonction du nombre du Reynolds, v_r est la vitesse relative d'une particule dans l'air.

La résistance de l'air, est un exemple de frottement du fluide. Contrairement au modèle standard de la surface de frottement, la force de friction est dépendante de la vitesse. Cette dépendance de vitesse peut être très compliquée, et seulement les cas spéciaux peuvent être traités analytiquement. À des vitesses très faibles des particules, la résistance de l'air est approximativement proportionnelle à la vitesse et peut être exprimée sous la forme:

$$F_f = -bv \quad (\text{III.7})$$

où le signe négatif implique qu'il est directement opposé à la vitesse.

III.3. Installations de séparation tribo-électrostatique des mélanges granulaires isolants

III.3.1. Séparateurs tribo-électrostatiques des mélanges granulaires

Il existe une multitude d'installations de séparation destinées au tri des matériaux plastiques. Le point commun entre ces dispositifs est la nécessité de réaliser deux opérations successives, le chargement triboélectrique des particules suivi de leur séparation [12].

III.3.1.1. Séparateur tribo-électrique à chute libre

Dans un séparateur électrostatique à chute libre (Figure III.14), 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 un fort champ électrique horizontal produit entre deux électrodes et situé dans une chambre isolante. Les granules chargés seront déviés vers l'électrode ayant la polarité de signe opposé [30].

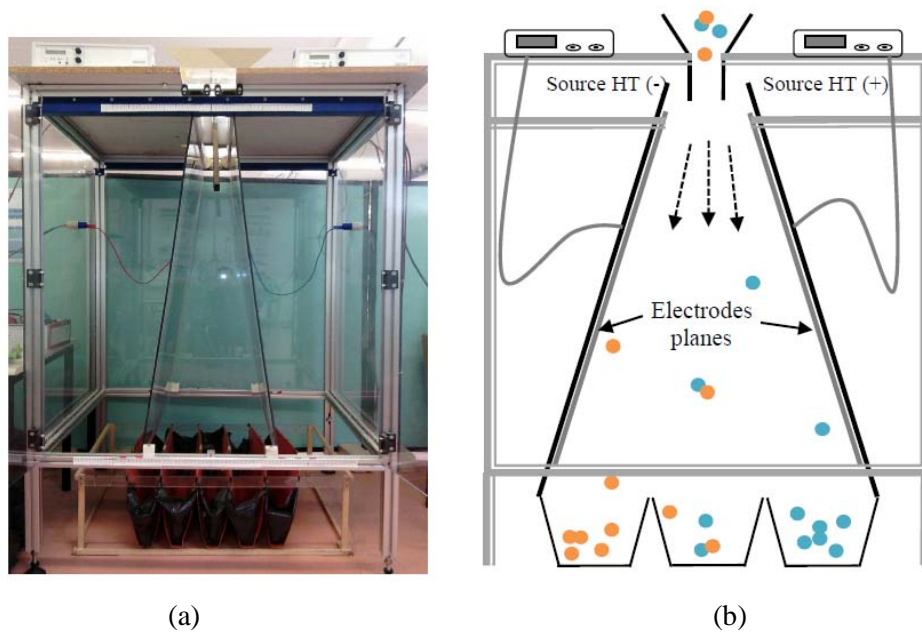


Figure III.14: Séparateur tribo-électrostatique à chute libre. (a): Photographie du dispositif; (b): Schéma du dispositif [25].

III.3.1.2. Séparateur tribo-électrique à tapis roulant

Les particules sont chargées par un dispositif de chargement statique, puis elles tombent sur un tapis roulant qui les transportent vers la zone de séparation. 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 de Coulomb [31].

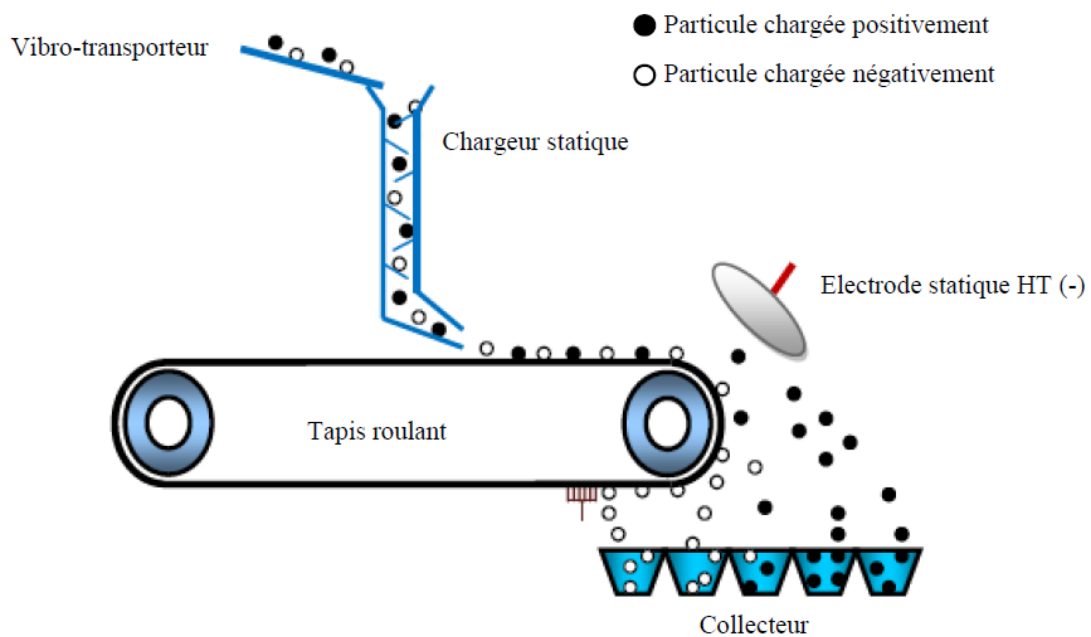


Figure III.15: Représentation schématique d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant [12].

III.3.2. Séparateurs tribo-aéro-électrostatique pour les mélanges granulaires

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

III.3.2.1. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales

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 [32].

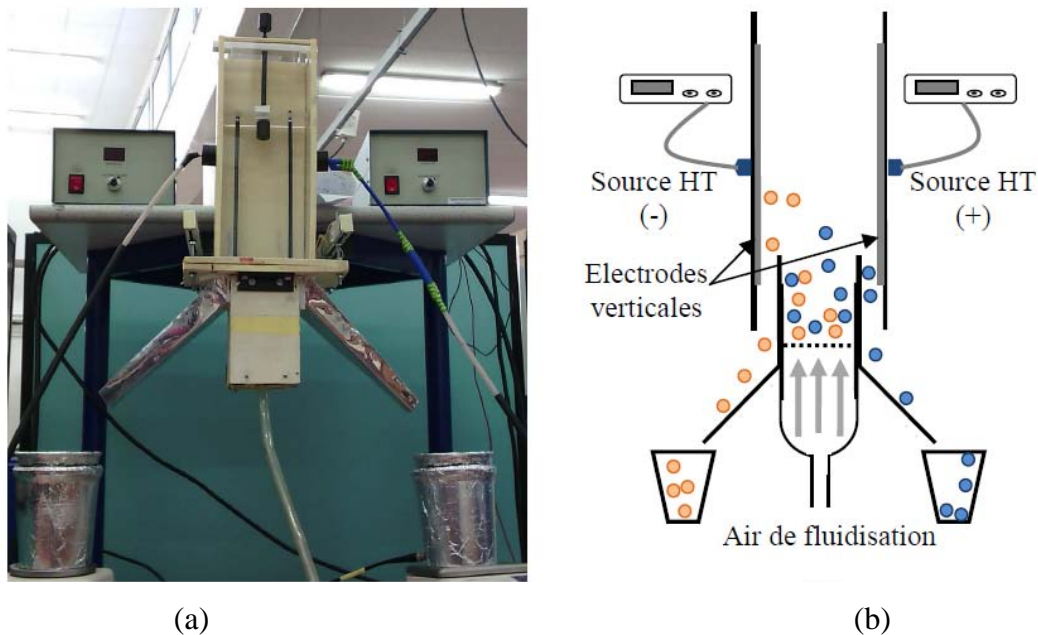


Figure III.16: Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales. (a): Photographie du dispositif, (b): Schéma du dispositif [25].

III.3.2.2. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournant

C'est une installation adaptée à la séparation des particules fines de plastique. Deux disques métalliques sont montés sur le même arbre (Figure III.17), 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 [12,33].

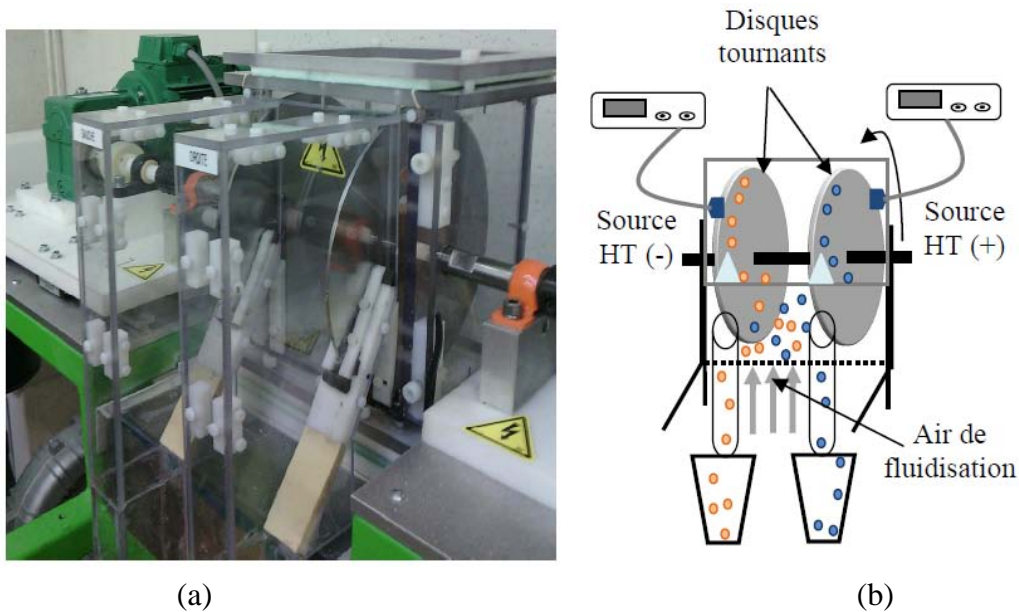
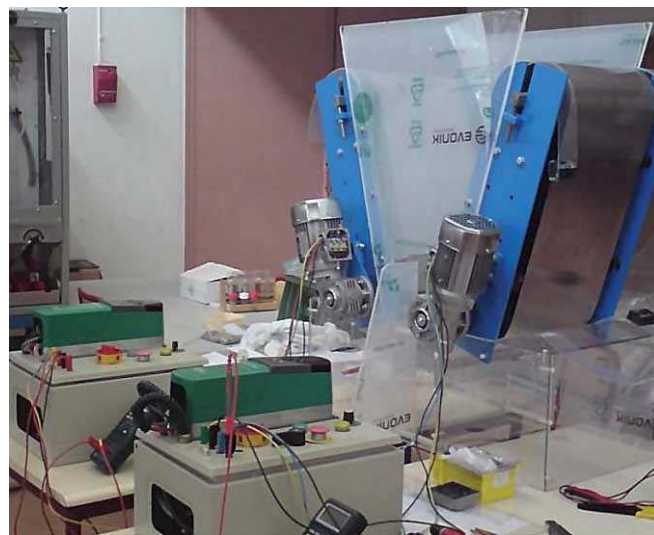


Figure III.17: Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants. (a): Photographie du dispositif; (b): Schéma du dispositif.

III.3.2.3. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux bandes transporteuses

Les électrodes qui vont attirer la matière granulaire fluidisée sont constituées de deux bandes transporteuses du tapis roulant (Figure III.18). Les bandes transporteuses sont dans ce cas à base d'une matière conductrice, leur entrainement est assuré par deux moteurs triphasés alternatifs, commandés par des variateurs de vitesse. Soumis à l'action de la force d'image électrique, les granules chargés adhèrent à la surface des bandes de polarités opposées, qui les entraînent vers le collecteur de récupération des produits [25].



(a)

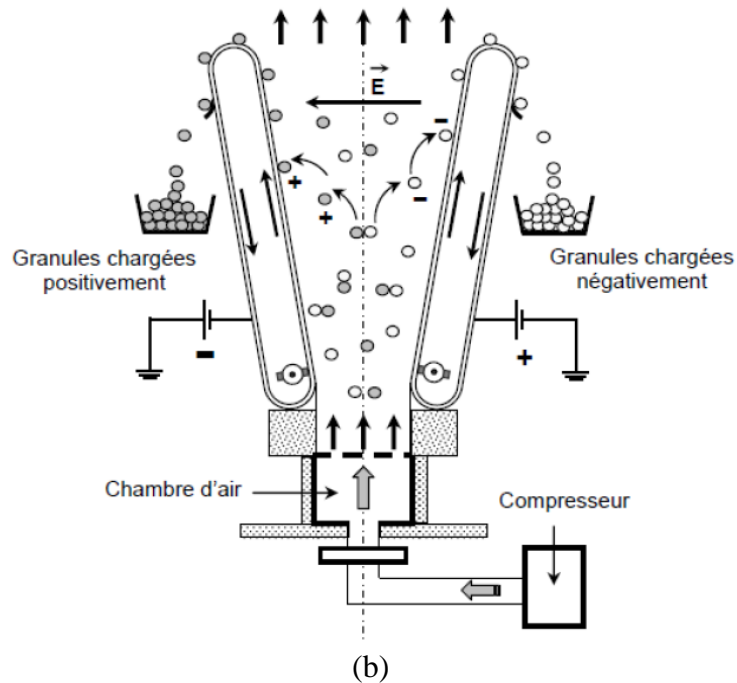


Figure III.18: Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses. (a): Photographie du dispositif, (b): Schéma du dispositif [34].

III.4. Conclusion

Les phénomènes tribo-électriques sont extrêmement complexes et mal expliqués, et sont influencés par plusieurs facteurs externes et internes. Plusieurs travaux de recherche ont été effectués sur des dispositifs de chargement triboélectrique et des séparateurs triboélectriques des déchets d'équipements électrique et électronique, dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières.

Chapitre IV

Réalisation et étude d'un séparateur électrostatique à plan incliné

IV.1. Introduction

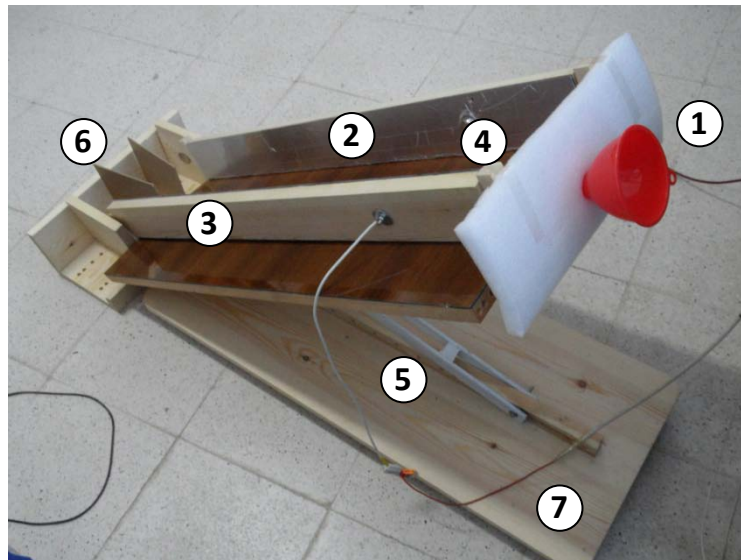
Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de la séparation d'un mélange granulaire isolant (PA/PC), par l'emploi d'un séparateur électrostatique à plan incliné associé à un dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé. Nous rappelons que ce séparateur est inspiré du séparateur à chute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

IV.2. Présentation du séparateur à plan incliné

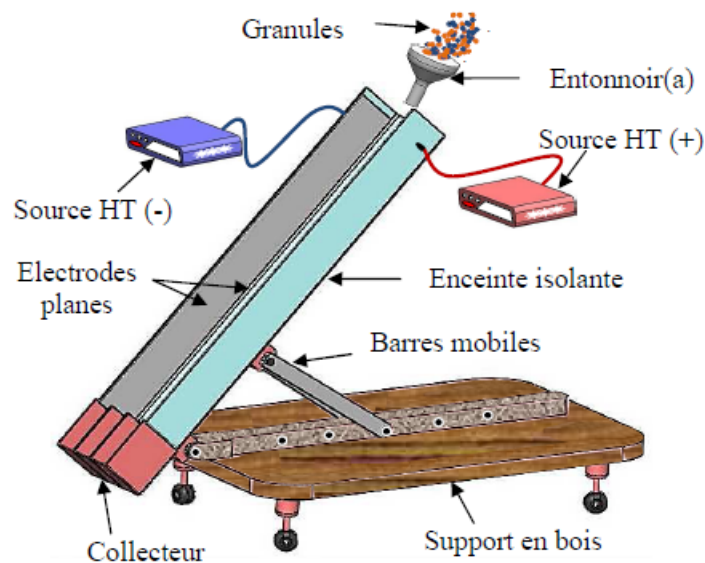
IV.2.1. Description

L'installation expérimentale de séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants est présentée sur la figure IV.1. Le banc est composé essentiellement de deux phases: une phase de chargement triboélectrique et une phase de séparation électrostatique. Le type du mouvement des particules dans le séparateur est le glissement sur la surface d'un plan d'une inclinaison réglable, ce qui est différent de celui dans le séparateur à chute libre standard.

Le séparateur à plan incliné est composé d'une enceinte parallélépipédique (hauteur: 100cm; largeur: 40cm; profondeur: 10cm) ayant une paroi supérieure transparente, afin de permettre la visualisation des phénomènes. Les parois latérales, détachables, ont des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces internes. Ces deux plaques conductrices peuvent être disposées soit en position parallèle avec une distance inter-électrodes ajustable (Figure IV.2a), soit en position "V" inversé, où la distance entre les bords supérieurs des électrodes est réglable, la distance entre les bords inférieurs est aussi réglable (Figure IV.2b). Ces électrodes sont connectées à deux alimentations haute tension continue réglable de polarités opposées (Figures: IV.3 et IV.4), afin de créer un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules chargés et contrôler ainsi leurs trajectoires. L'enceinte est placée au-dessus d'un support permettant de varier manuellement l'angle d'inclinaison de l'enceinte de 0° jusqu'à 90° par rapport à l'horizontale. L'angle d'inclinaison du séparateur est 30°, cet angle a été choisi après plusieurs observations de l'écoulement des particules à travers le séparateur [15].



(a)



(b)

Figure IV.1: Installation expérimentale pour l'étude du processus de séparation en utilisant le séparateur à incliné. (a): Photographie du séparateur à plan incliné: (1) Entonnoir, (2-3) Electrodes planes, (4) Enceinte isolante, (5) Barres mobiles, (6) Collecteur, (7) Support en bois, (b): Représentation schématique de l'installation

La charge des mélanges granulaires se produit par effet triboélectrique dans un dispositif de chargement à lit fluidisé. Les particules chargées sont attirées par l'électrode de polarité opposée, et sont récupérées ensuite dans les compartiments N°1 et N°2 comme étant les produits A et B (Figure IV.5). 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 le compartiment N°3 destiné au produit mixte.

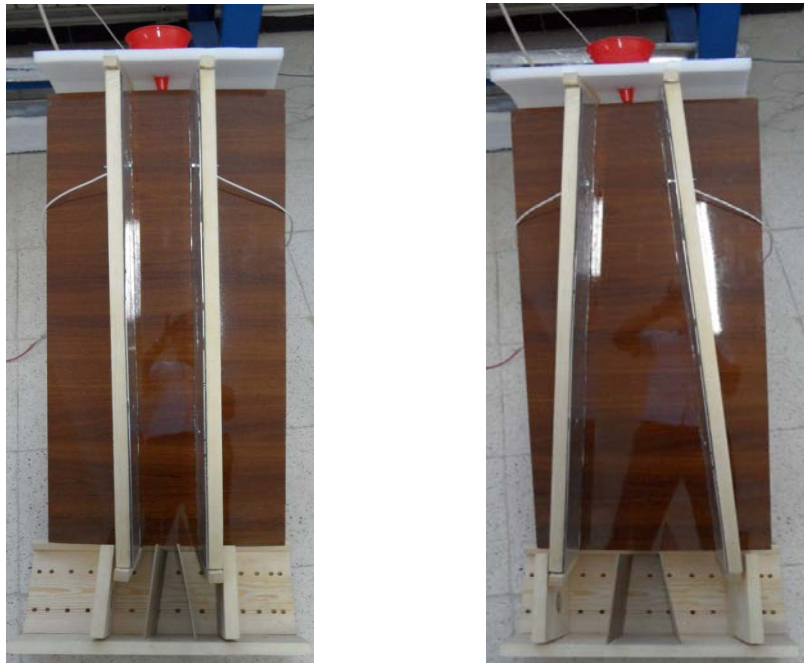


Figure IV.2: Photographie du séparateur à plan incliné. (a): électrodes parallèles, (b): électrodes en position “V” inversé.



Figure IV.3: Photographie de générateur de haute tension négative.



Figure IV.4: Photographie de générateur de haute tension positive.

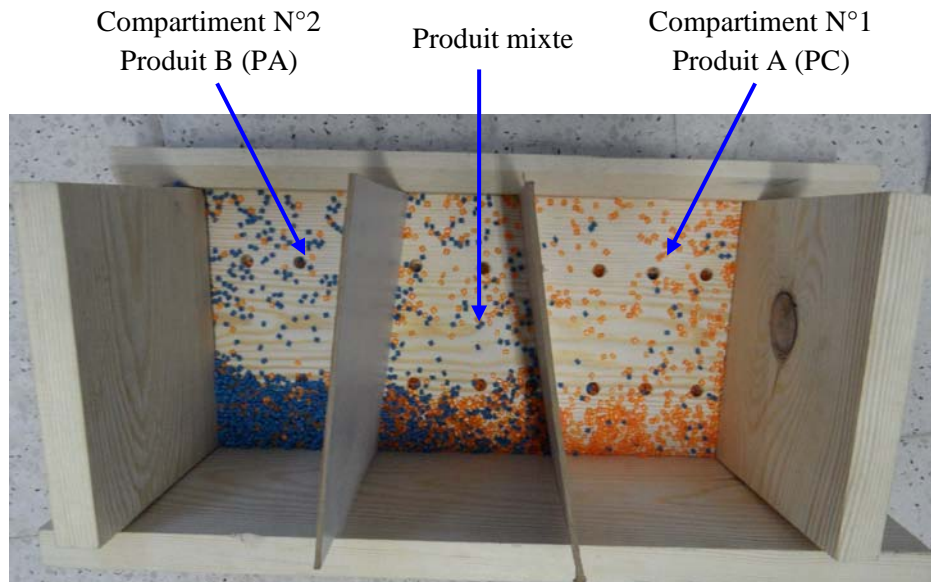


Figure IV.5: Photographie des deux produits séparés et le produit mixte dans les trois compartiments du collecteur de produit.

IV.2.2. Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé

Le dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé présenté sur les figures IV.6 et IV.7 est utilisé pour le chargement des mélanges granulaires isolants de tailles millimétriques. L'air de fluidisation est fourni par une soufflante à débit variable. 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 électriques de signe opposé grâce aux contacts entre elles dans une chambre cylindrique en polyéthylène téréphtalate.

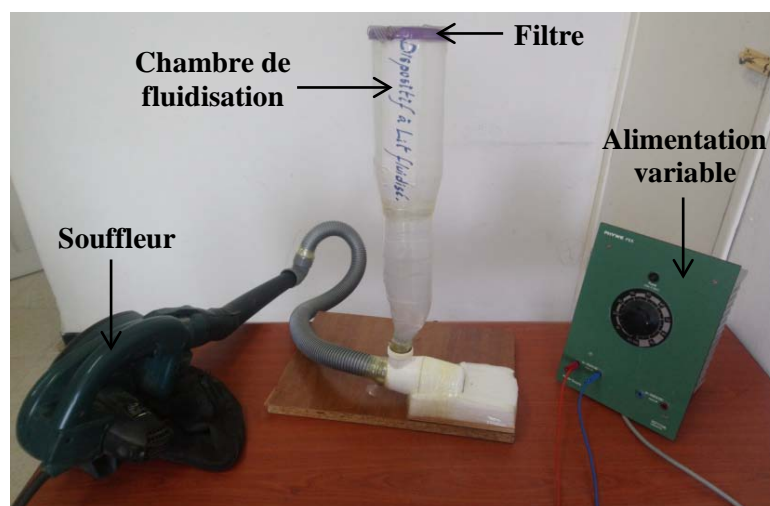


Figure IV.6: Photographie du dispositif expérimental de chargement à lit fluidisé.

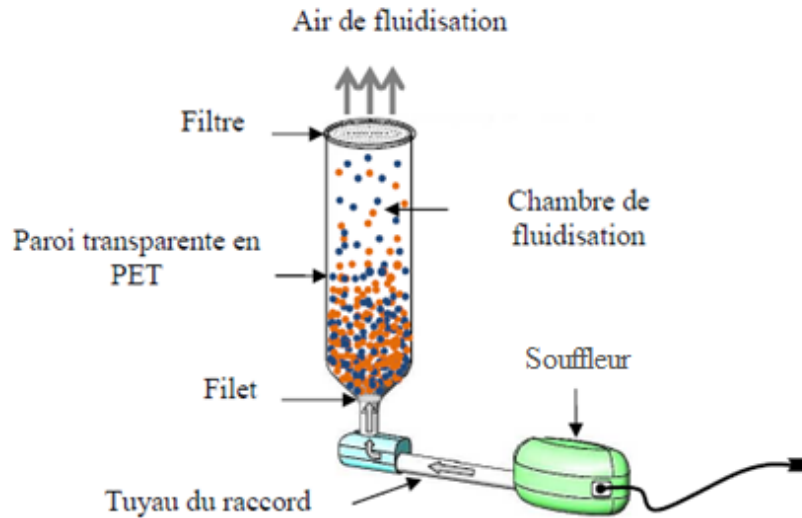


Figure IV.7: Dispositif expérimental de chargement à lit fluidisé [25].

IV.2.3. Forces exercées sur les particules

Les forces électrostatiques et mécaniques qui agissent sur les particules durant le processus de séparation pour un séparateur à chute libre sont illustrées sur la figure IV.8.

La particule de masse m , portant une charge Q et évoluant dans un champ électrique uniforme d'intensité E .

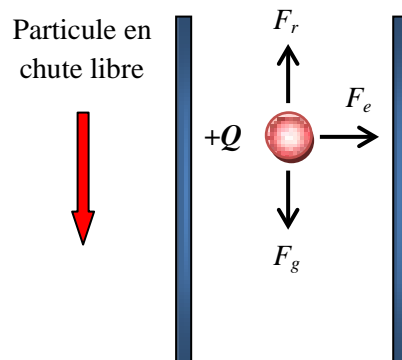


Figure IV.8: Représentation schématique des forces agissant sur une particule chargée en chute libre dans un champ électrique.

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_f : La force de l'air supposée négligeable;

m : La masse de la particule [Kg];

g : L'accélération de la pesanteur [m/s^2];

Q : La charge de la particule [C];

E : Le champ électrique [kV];

ΔU : La différence de potentiel [kV];

d : La distance entre les électrodes [m].

Dans notre cas, les particules chargées glissent le long d'un plan incliné faisant un angle θ avec l'horizontale (elles ne chutent pas verticalement), à travers un champ électrique intense E créé entre les deux électrodes du séparateur et sont soumis à l'action de plusieurs forces: la force du champ électrique F_e , la force gravitationnelle F_g et la force de frottement F_f (Figure IV.9). Le choix de l'axe x selon la pente du plan simplifie les équations suivantes:

$$\sum F = m \cdot a = F_x + F_y \quad (\text{IV.5})$$

avec:

$$F_x = F_e + F_{gx} = Q \cdot E + m \cdot g \cdot \cos(\theta) \quad (\text{IV.6})$$

$$F_y = F_f + F_{gy} = F_f + m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (\text{IV.7})$$

F_f : La force de frottement.

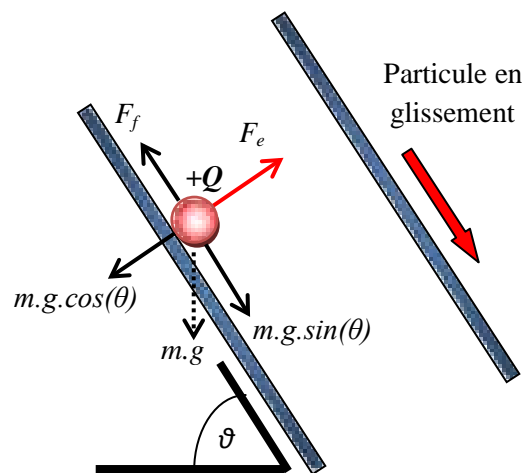


Figure IV.9: Représentation schématique des forces agissant sur une particule chargée en glissement dans un champ électrique pour une configuration à plan incliné.

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 deux paramètres de contrôle qui peuvent affecter les performances du processus de séparation électrostatique à savoir la disposition des électrodes haute tension et la distance inter-électrodes.

IV.3.1. Procédure de déroulement des expériences

Nous avons réalisé nos expériences sur un mélange granulaire isolant de 50g (50% PC + 50% PA). Toutes les expériences ont été réalisées à l'air ambiant (Température: $25\pm 1^\circ\text{C}$, Humidité relative de l'atmosphère: $55\pm 1\%$). L'analyse des résultats a été facilitée par le fait que les granules ont des couleurs différentes. La procédure expérimentale se fait en quatre étapes principales:

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 (10kV);
- 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.
- Evaluer la pureté des produits.

IV.3.2. Taux de récupération

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:

$$Rec (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \times 100 \quad (IV.8)$$

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

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 :

$$Pur (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \times 100 \quad (IV.9)$$

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, parce que les résultats de processus de chargement et de séparation sont influencés par les conditions ambiantes. En conséquence, on a utilisé un thermo-hygromètre numérique modèle LUTRON AM-4205A (Figure IV.10).



Figure IV.10: 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.11: Balance électronique.

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.12).



Figure IV.12: Seau de Faraday.

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.13) permettant la mesure de la valeur et le signe de la charge, le produit granulaire est versé dans l'enceinte intérieure.



Figure IV.13: 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). Le Tableau IV.1 représente les principales caractéristiques de matériaux granulaires utilisés dans les expériences [5,25].

Tableau IV.1: Caractéristique principales des matériaux granulaires utilisés [5,25].

Matériau	PC	PA
Densité [g/cm ³]	1.2	1.14
Couleur	Orange	Bleu
Forme	Cylindrique	Cylindrique
Taille [mm]	Ø 3 x 3.6	Ø 2.5 x 3.4
Masse [mg]	25	20
Absorption d'eau à 23°C et RH 50% [%]	0.15	3
Résistance à la traction [N/mm ³]	70	70
Rigidité diélectrique [kV/mm]	28	28-30
Résistivité transversale [Ω/cm]	10 ¹⁵	10 ¹⁵
Constante diélectrique	3	3.7

❖ 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 est présent soit sous forme pure, soit principalement sous forme de mélanges (ABS/PC,...) [35]:

- 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.14: Aspect des granules de Polycarbonate (PC).

❖ Le Polyamide (PA)

Le polyamide est un polymère thermoplastique représente approximativement 4% de la consommation totale des polymères [36]. 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.15: 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: +0,38 $\eta\text{C/g}$ et -1,3 $\eta\text{C/g}$. Ces valeurs enregistrées après séparation électrostatique pour les deux matériaux sont relativement faibles notamment pour le cas de Polycarbonate (PC). 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 incliné à électrodes parallèles

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.16 et IV.17, pour une tension appliquée (10 kV) et un temps de chargement des particules (6 min). D'après ces résultats, le meilleur résultat de séparation, déterminé par les expériences, a été de 20cm. Comme nous pouvons le constater, pour une distance inter-électrodes de 20 cm, le taux de récupération des particules de PA et PC égal 37.16%, 33.56% et le taux de pureté des deux produits est égal: 79.94% et 72.51% 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	23,24	51,96	62,74	58,32
15	32	60	78,04	60,48
20	37,16	33,56	79,94	72,51
25	51,44	19,56	74,68	76,28
30	40,04	10,08	59,76	67,66

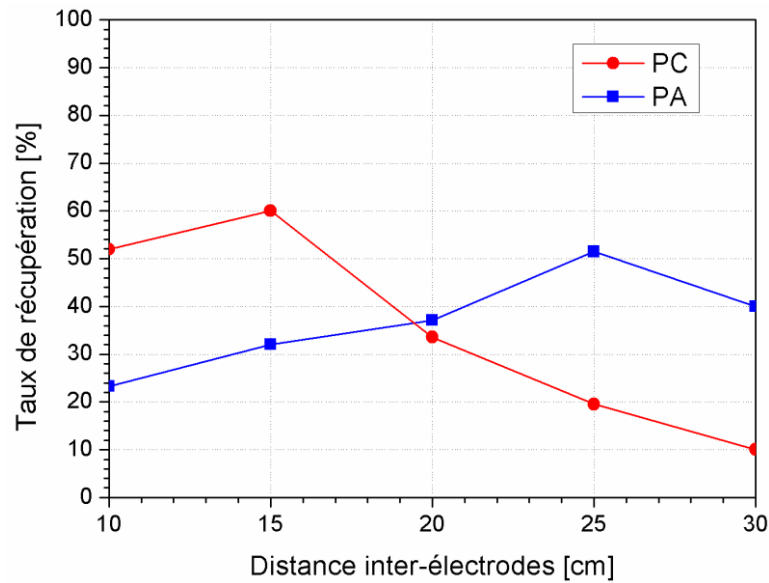


Figure IV.16: Taux de récupération des produits en fonction de la distance inter-électrodes.

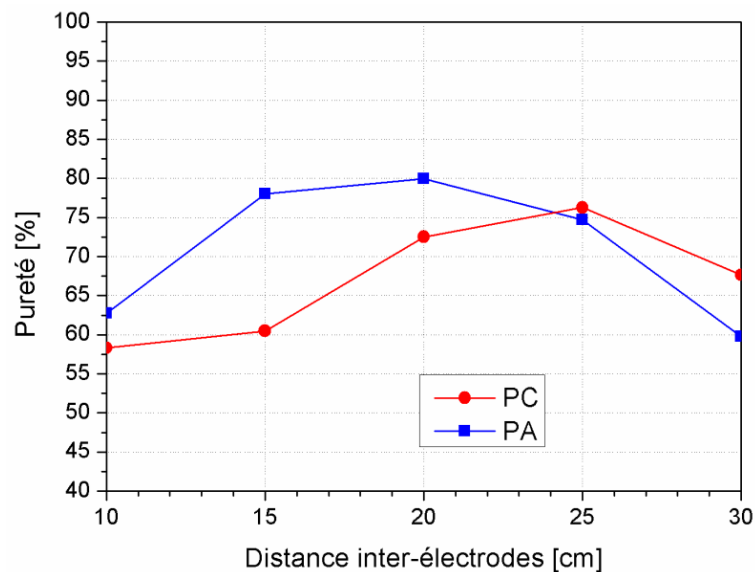


Figure IV.17: Taux de pureté des produits en fonction de la distance inter-électrodes.

IV.5.3. Résultats du séparateur incliné à électrodes en position “V” inversé

Dans cette partie, nous allons représenter les résultats du séparateur incliné à électrodes en position “V” inversé en fonction de la distance inter-électrodes. Variant soit la distance entre les bords supérieurs des électrodes soit la distance entre les bords inférieurs.

IV.5.3.1. Influence de la distance entre les bords supérieurs des électrodes

Les résultats en termes de taux de récupération et de taux de pureté des deux produits en fonction de la distance entre les bords supérieurs des électrodes sont présentés dans le

tableau IV.3 et les figures IV.18 et IV.19, la distance entre les bords inférieurs des électrodes est maintenue constante et égale à 30 cm.

Tableau IV.3: Influence de la distance entre les bords supérieurs des électrodes sur le taux de récupération et le taux de pureté des deux produits récupérés.

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
10	30	64	41.64	75.61	84.97
15		84.04	27.96	83.01	87.48
20		74.64	27.96	67.75	80.25
25		65	19.52	66.54	66.84

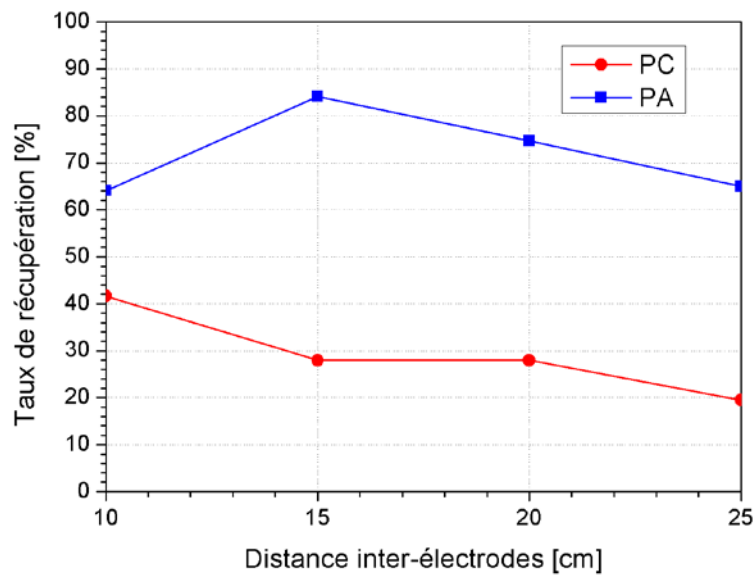


Figure IV.18: Taux de récupération des produits en fonction de la distance entre les bords supérieurs des électrodes.

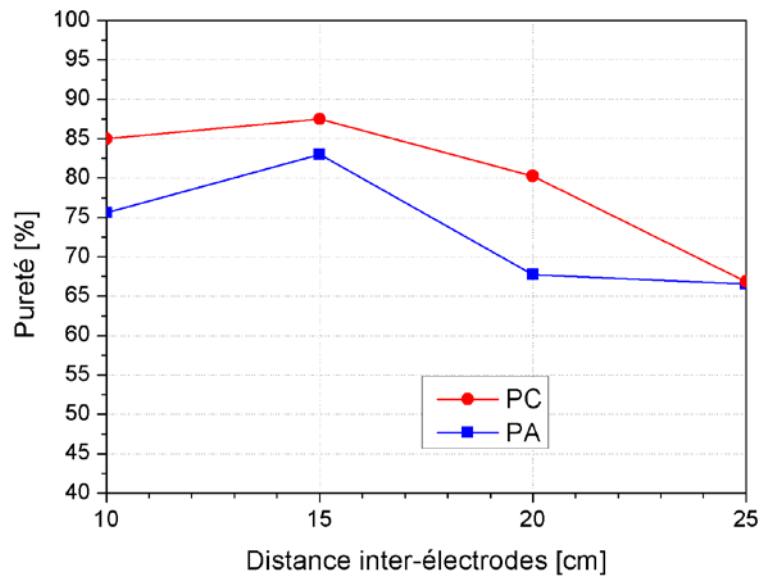


Figure IV.19: Taux de pureté des produits en fonction de la distance entre les bords supérieurs des électrodes.

IV.5.3.2. Influence 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 en fonction de la distance entre les bords inférieurs des électrodes sont présentés dans le tableau IV.4 et les figures IV.20 et IV.21, la distance entre les bords supérieurs des électrodes est maintenue constante égale à 15 cm.

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.

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	74.64	23.32	66.61	75.71
	25	80.04	25.4	66.17	84.32
	30	84.1	28.23	83.00	88.50

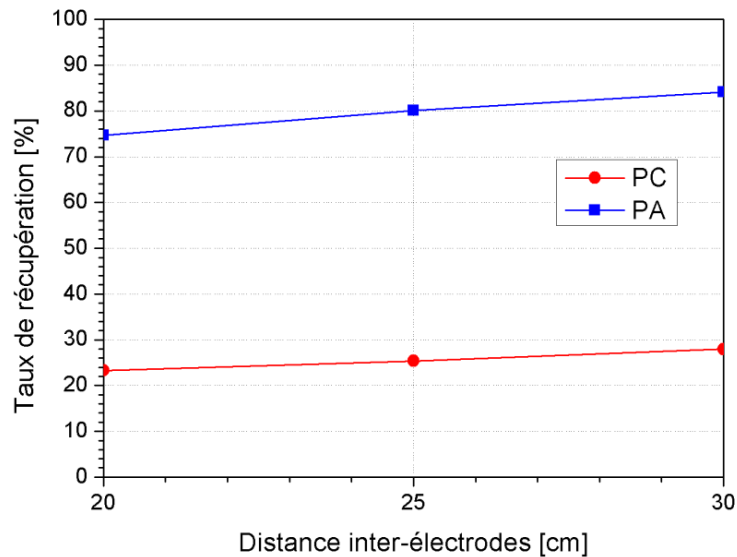


Figure IV.20: Taux de récupération des produits en fonction de la distance entre les bords inférieurs des électrodes.

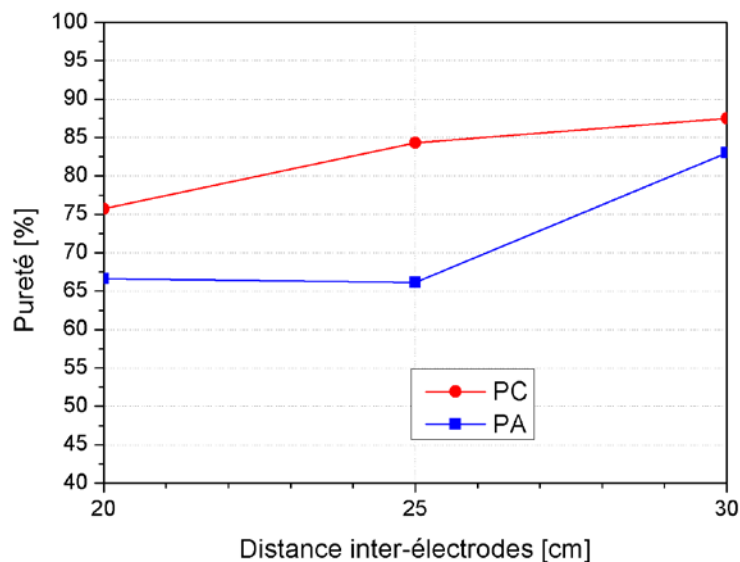


Figure IV.21: Taux de pureté des produits en fonction de la distance entre les bords inférieurs des électrodes.

Le meilleur résultat de séparation électrostatique dans une configuration des électrodes en “V” inversé, déterminée par les expériences, a été de 15 cm entre les bords supérieurs des électrodes et 30 cm entre les bords inférieurs des électrodes. En conséquence, pour ces distances, le taux de récupération était environ 84 % pour le PA et 28 % pour le PC, et la pureté des produits était supérieur à 83 % pour le PA et 88 % pour le PC.

IV.6. Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent clairement qu'il existe une grande différence des résultats obtenus avec des électrodes parallèles et des électrodes en position "V" inversé. Dans le deuxième cas, les résultats sont nettement meilleurs comparativement au premier cas. A partir de là, la disposition des électrodes du séparateur à plan incliné a un effet très important sur l'efficacité du processus de séparation.

Conclusion générale

Le volume des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) connaît une forte croissance liée à un taux d'équipement de plus en plus élevé et à l'évolution très rapide des performances technologiques. Ces déchets sont composés d'une grande diversité de matériaux plastiques. 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 sont retraités nécessite la recherche et le développement de nouvelles technologies de séparation physique. L'objectif de ce travail est de contribuer à l'amélioration du séparateur électrostatique à plan incliné afin d'améliorer la récupération des matériaux plastique. L'analyse des résultats expérimentaux nous a permis de montrer que la disposition des électrodes haute tension et la distance inter-électrodes influent considérablement à la fois la récupération et la pureté des produits séparés.

Bibliographie

- [1] Brahiman T., “Elaboration et caractérisation d’une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés): Amélioration de la résistance par des charges en argiles”, Thèse de Doctorat en matériaux, Université de Bourgogne Franche-Comté, 2018.
- [2] Bemmami K.E., Tchouar A. “Conception et Réalisation d’une Unité de Recyclage - Plastique -”, Mémoire de Master, Génie Industriel, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, 2017.
- [3] l’indispensable réinvention des plastiques: “La revue de l’institut veolia”, France, 2019.
<https://www.institut.veolia.org>
- [4] 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.
- [5] Hanafi Z., Allele S., “Etude expérimentale d’un séparateur incliné à deux étages”, Mémoire de Master en électrotechnique, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2019.
- [6] Bennama T., “Polycopié de Cours: Les bases de traitement des déchets solides”, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran, Département de Génie Chimique, 2016.
- [7] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-recyclage-5774/> (le recyclage).
- [8] Bechkoura H. Mendjel S., “Etude et réalisation d’un procédé de tri des particules isolantes”, Mémoire de Master en électrotechnique, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2019.
- [9] www.geo.fr/environnement/recycler-materiaux-38403 (Recycler différents types de matériaux).
- [10] Kossentini Kallel T. “Etude de mélanges PE/PS Contribution au recyclage”, thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] Molinié P. “Etude de la neutralisation de la charge électrique déposée par effet couronne à la surface d'un isolant. Application au suivi des premiers stades de vieillissement d'un isolateur époxyde”, Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 1992.
- [14] Gary C., “Effet couronne sur les réseaux électriques aériens. Techniques de l'ingénieur”, Editions T.I. 1998.
- [15] Bendaoud A., Tilmatine A., Medles K., Rahli M., Huzau M., Dascalescu L., “Characterization of dual corona electrodes for electrostatic processes applications”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 44, pp. 692-698, 2008.
- [16] 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.
- [17] Gontran R., “étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires”, Thèse de Doctorat université de Poitiers, 2018.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.

- [25] Nadjem A. “Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques”, Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2019.
- [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] Blajan M., Samuila A., Neamtu V., Beleca R., Caliap L., Vadan D., Iuga A., and Dascalescu L., “Experimental modeling of particle electrification in vibrated zigzag shaped metallic tubes”, Proceedings of ESA/IEJ/IEEE-IAS/SFE Joint Conference on Electrostatics, University of California, and Berkeley. California, pp. 538-543, 2006.
- [28] Dascalescu L., Urs A., Bente S., Huzau M., and Samuila A., “Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices”, Journal of Electrostatics, vol. 63, pp. 705-710, 2005.
- [29] Buda G., Bilici M., Samuila A., and Dascalescu L., “Experimental study of the tribocharging process of plastic granular materials on a vibratory feeder device,” IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., vol. 20, pp. 1489-1496, 2013.
- [30] Blajan M. “Séparation de la muscovite des pegmatites feldspathiques en utilisant des champs électriques intenses”, Thèse de Doctorat, Université de Poitier 2006.
- [31] Miloudi M., Medles K., Tilmatine A., Brahami M., and Dascalescu L., “Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials” J. Electrostat, Vol. 69, pp. 631-637, 2011.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Remadnia M. “Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants”, Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2012.
- [35] 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.
- [36] 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.