

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



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Génie Electrique

Département d'Électrotechnique

Thèse présentée par :

Reriballah Hafidha

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat LMD en Electrotechnique

Option : Réseaux électriques

Intitulé de thèse :

*Traitement des matériaux de différentes tailles issus des
déchetteries par un nouveau procédé de séparation
électrostatique*

Présentée devant le jury composé de :

Président :	Pr. Bendaoud Abdelber	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès
Encadreur :	Dr. Aksa Wessim	M.C A	Université de Sidi Bel Abbès
Co-encadreur :	Dr. Touhami Seddik	M.C A	Université de Sidi Bel Abbès
Examineurs :	Dr. Boukhoulda Mohamed Fodil	M.C A	Université de Sidi Bel Abbès
	Dr. Dahou Omar	M.C A	Université de Mascara

Soutenue en : Juillet 2021

Remerciement

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

*Je tiens à remercier grandement mon directeur de thèse **Dr. Aksa Wessim** qui m'a encadré tout au long de cette thèse pour toutes ses aides précieux, sa gentillesse, sa disponibilité permanente, sa patience et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués.*

*Je tiens à remercier sincèrement **Dr .Touhami Seddik** pour avoir accepté de codiriger ma thèse. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa Codirection. Je le remercie surtout pour ses qualités humaines, sa grande disponibilité, et pour sa patience tout au long de la réalisation de ce travail.*

*J'adresse mes plus sincères remerciements aux professeurs **Medles Karim, Thami Zeghloul et Lucien Dascalescu** pour leurs aides.*

*En outre, J'adresse mes vifs remerciements à monsieur **BENDAOU Abdelber** pour avoir accepté de présider le jury, tout comme j'adresse ma profonde reconnaissance aux messieurs **Boukhoulda Mohammed Fodil et Dahou Omar** pour avoir acceptés d'examiner et d'évaluer ce travail.*

*Mes remerciements s'adressent également à l'équipe de laboratoire **IRECOM, APELEC et ICEPS** particulièrement à **Moukadem Djilali, Hallouche Omar, Aicha Senoussaoui, Omnia et Khayra**.*

*Par ailleurs j'aimerais tout particulièrement remercier mon père, ma mère, mes frères (**Youcef et Ali**) et mes sœurs (**Fatima et Kheira**) pour leur soutien quotidien.*

*Je n'oublierais pas de remercier mes amis (**Bouthaina, Meryem, Aicha, Nesrine, Latifa, Nour, Raja, Fatima, Imene, Soumia, Seyfeddine, Nasreddine ,Fodel, Abdelrahmène, Imed**) et à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse.*



SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale

1

Chapitre 1

Etat de l'art sur le tri des déchets industriels

1.1 Définition des déchets	4
1.2 Classification des déchets	6
1.2.1 Classification en fonction de la nature du danger	6
1.2.2 Classification en fonction de l'origine du déchet	8
1.2.3 Relation entre le type de déchet et le secteur de production du déchet	12
1.3 Gestion des déchets	13
1.3.1 La gestion de la collecte des déchets	13
1.3.2 Les différents modes de traitement des déchets	14
1.3.3 Les différents types de déchets solides industriels	19
1.3.4 Gestion des DEEE	21
1.4 Processus de séparation des DEEE	24
1.4.1 Réduction de la taille des DEEE	26
1.4.2 Tri des particules broyées	32
1.5 Conclusion	39

Chapitre 2

Séparateurs électrostatiques

2.1 Mode de chargement électrique	41
2.1.1 Induction électrostatique	41
2.1.2 L'effet couronne	42
2.1.3 L'effet triboélectrique	44
2.2 Classification des séparateurs électrostatiques	52
2.2.1 Séparateurs à électrodes statiques	52
2.2.2 Séparateurs à électrodes dynamiques	58
2.3 Conclusion	66

Chapitre 3

Réalisation des séparateurs à plan incliné

3.1 Séparateur à plan incliné SPI	68
3.1.1 Réalisation d'un SPI	68
3.1.2 Etude expérimentale	74
3.1.3 Résultats et discussions	77
3.2 Séparateur à tambour incliné STI	81
3.2.1 Réalisation d'un STI	81
3.2.2 Etude expérimentale	83
3.2.3 Résultats et discussions	85
3.3 Conclusion	88

Chapitre 4

Réalisation d'un séparateur à quatre électrodes cylindriques

4.1	Réalisation d'un chargeur triboélectrique à lames	89
4.1.1	Choix des matériaux	89
4.1.2	Caractéristiques d'un dispositif de chargement à lames	91
4.1.3	Types des collisions dans le chargeur triboélectrique à lames	91
4.2	Réalisation du dispositif de séparation à quatre électrodes cylindriques verticales	92
4.2.1	Principe de fonctionnement	94
4.2.2	Etude expérimentale	94
4.2.3	Résultat et discussion	101
4.3	Séparateur à quatre électrodes cylindriques rotatives	106
4.3.1	Principe de fonctionnement	110
4.3.2	Etude expérimentale	110
4.3.3	Résultat et discussion	122
4.4	Conclusion	125
Conclusion générale		126
Références Bibliographiques		128



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La révolution industrielle qui a commencé au XIXe siècle a conduit à une augmentation expressive de la capacité humaine à façonner et à transformer nos ressources en aliments, en biens et en énergie. Parallèlement, l'industrialisation rapide a généré d'énormes quantités de déchets qui doivent être éliminés [1]. L'élimination des déchets comprend les opérations de traitement thermique, physico-chimique et biologique, de la mise en décharge, d'enfouissement, d'immersion et de stockage des déchets.

La gestion des déchets concerne la collecte, le transport, le traitement, le recyclage ou l'élimination, et le contrôle des déchets produits par l'activité humaine, elle vise généralement à réduire ou éliminer leurs effets négatifs sur l'environnement et la santé humaine, préserver les ressources naturelles, améliorer la qualité de vie et contribuer au développement économique [2-3]. La quantité globale des déchets produite en Algérie a atteint 34 millions de tonnes (0,8 kg/habitant) en 2018 et elle devrait presque se doubler à l'horizon 2035 à 73 millions de tonnes (1,23 kg/habitant) [4]. Cela pousse les gouvernements et les industries à rechercher des solutions technologiques permettant un traitement efficace et moins coûteux des déchets.

Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ont été sélectionnés comme un déchet intéressant parmi ces principaux flux de déchets car ils contiennent des matières à la fois dangereuses et précieuses. Actuellement, la gestion de DEEE représente un défi de durabilité important pour l'environnement [5].

Les DEEE représentent le flux de déchets qui connaît la croissance la plus rapide sur la planète, il représente 5% de tous les déchets solides municipaux [6]. La production mondiale des DEEE a atteint un record de 44,7 millions de tonnes en 2016 (**Figure 1**) et devrait atteindre environ 52.2 millions de tonnes d'ici la fin de 2021 dont 2.2 millions de tonnes ont été produites en Afrique dans la même année [7].

Ces déchets sont particulièrement complexes en raison de leur composition matérielle bien qu'ils contiennent des matériaux de valeur tels que les plastiques, les métaux conventionnels, les matériaux céramiques et les métaux des terres rares, ils contiennent également des matériaux toxiques tels que les métaux lourds, les polluants organiques persistants,...etc. Les avantages d'un traitement approprié de cette fraction sont donc nombreux, car les DEEE peuvent fournir des matériaux aux industries, en minimisant le coût de l'extraction des matières vierges ainsi que les risques environnementaux liés aux composants dangereux. Il est donc essentiel d'adopter des stratégies plus durables pour la manipulation de ce type des déchets [8].

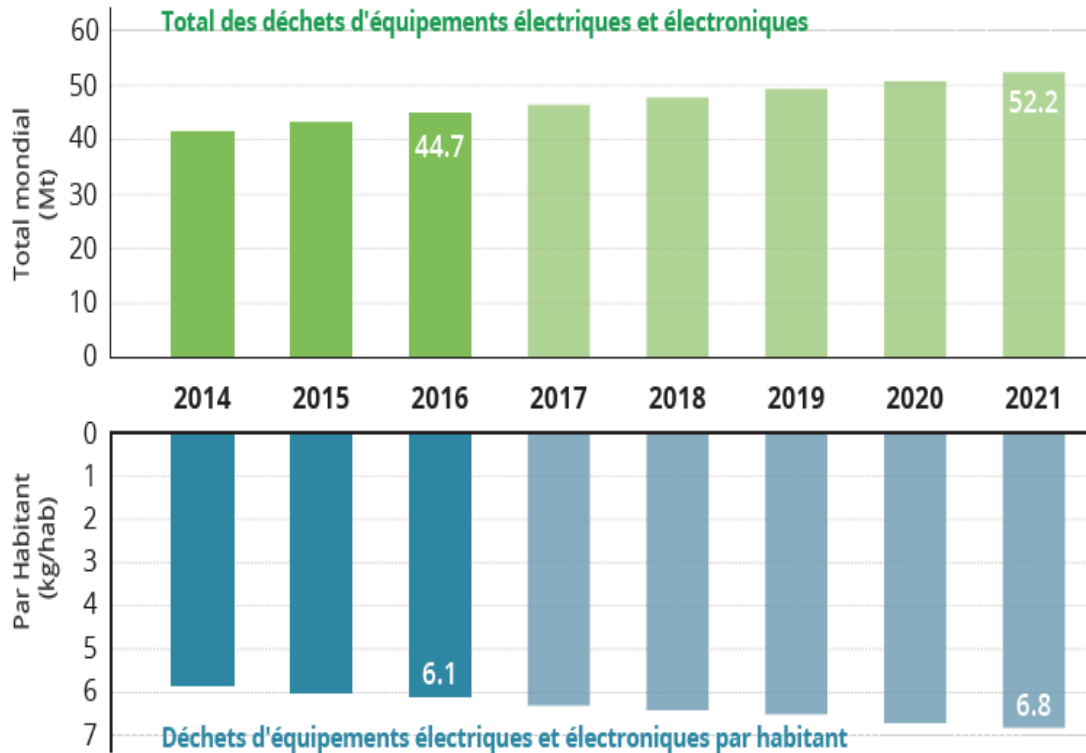


Figure 1. Déchets d'équipements électriques et électroniques générés dans le monde [7].

La technique de séparation électrostatique est la technologie la plus innovante pour le tri sélectif des matériaux contenus dans les déchets d'équipement électrique et électronique par des forces électriques qui agissent sur les particules chargées ou polarisées [9]. D'autant plus que la séparation électrostatique est une technologie non-polluante, caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien.

Cette technique nécessite un prétraitement des déchets à recycler : particulièrement la réduction de la taille (déchiquetage et/ou broyage et/ou granulation) par des broyeurs. Après cette réduction on aura un mélange de particules de différentes tailles qui nécessite une opération de tamisage pour séparer les particules en fonction de leurs tailles. Chaque gamme de ces particules nécessite sa propre technique de séparation, il en résulte plusieurs dispositifs de séparation en cascade utilisés dans une même application de tri d'un seul mélange.

L'objectif principal de cette thèse est la conception, la réalisation et la mise en marche d'un séparateur capable de traiter plusieurs gammes de taille des particules plastiques. Evidemment pour y arriver, on doit passer par la réalisation de quelques prototypes de séparation, offrant une vision générale sur les techniques de tri de chaque taille de particules.

Le contenu de la thèse est réparti en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, une étude générale a été faite sur les déchets industriels ainsi que les étapes de prétraitement et de séparation suivies par les recycleurs jusqu'à l'acquisition de la matière première seconde.

Le second chapitre présente les trois principaux mécanismes physiques utilisés pour le chargement électrostatique des matériaux issus des déchets destinés au recyclage. Chaque

mécanisme de chargement possède ses propres dispositifs, des prototypes de laboratoire sont également présentés. La deuxième partie de ce chapitre décrira le principe de fonctionnement ainsi que l'application de certaines installations de séparation électrostatique.

Deux nouvelles installations expérimentales feront l'objet du troisième chapitre : Il s'agit de l'utilisation d'une technique de séparation à un plan incliné, comme technique elle offre des avantages au niveau de quelques forces agissantes sur les particules chargées. Le Premier séparateur est à plan incliné destiné au mélange de taille granulaire, le deuxième est à cylindre tournant incliné destiné au tri des produits pulvérulents. Une étude paramétrique des deux procédés sera faite dans le but de déterminer les facteurs qui influent considérablement sur le rendement des installations réalisées.

Le quatrième chapitre est consacré à la réalisation d'une nouvelle installation qui offre la possibilité de séparer plusieurs tailles de particules. Elle est composée principalement d'une partie de chargement et une partie de séparation. Le chargeur utilisé est un nouveau dispositif à lames destiné au chargement des particules micronisées, sous-millimétriques et même granulaires. Le système de tri est composé d'un séparateur à quatre électrodes cylindriques. Ce séparateur est d'abord appliqué à la séparation d'un mélange granulaire de taille millimétrique en étudiant l'influence de chaque facteur sur le processus de séparation. Ensuite une amélioration de séparateur a été faite pour rendre possible la séparation d'un mélange micronisé. La méthodologie de plans d'expérience pour modéliser et optimiser ce processus de séparation sera très efficace.



CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART SUR LE TRI DES DECHETS INDUSTRIELS

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART SUR LE TRI DES DECHETS INDUSTRIELS

Aujourd'hui environ 20 % de la population consomment 80% des ressources de la planète. Ce qui implique une destruction des ressources et génère un nombre considérable de pertes en particulier les déchets. La mauvaise gestion des déchets a induit des dégâts considérables à la planète : effet de serre, pluies acides, désertification, diminution de la couche d'ozone, augmentation du taux de CO₂, pollution des océans, pollution de l'air,... etc.

La vision classique sur les déchets les considère souvent comme matières indésirables à éliminer. Mais en réalité, ils peuvent être considérés comme des substances sans utilités, ou bien comme une source secondaire de matière.

Les industriels doivent trouver des solutions, au niveau des énergies exploitées et des matières consommées, pour réduire l'impact de l'activité humaine sur l'environnement et optimiser l'exploitation des ressources.

La solution la plus radicale est de restructurer le système industriel pour le rendre plus compatible avec la biosphère. Pour passer d'un système qui se caractérise par des flux d'énergie rapide et un taux de recyclage faible vers un système où le flux d'énergie est faible et le taux de recyclage est élevé.

Dans ce chapitre nous allons présenter un aperçu général sur les déchets industriels, les étapes de prétraitement ainsi que les différentes techniques de tri.

1.1 Définition des déchets

Le rôle des définitions est particulièrement critique dans le secteur des déchets [10]:

- Elles orientent vers la filière d'élimination, et par conséquent les coûts de traitement par unité de poids;
- Elles favorisent ou limitent le phénomène de rejet par les populations des unités de traitement correspondantes disposées dans leur voisinage;
- Elles fixent les limites des domaines (matières premières, matières premières secondaires, recyclage, déchets) et les réglementations respectives qui s'appliquent ;
- Elles définissent la réglementation à respecter pour les transferts de déchets ;
- Elles permettent de définir des taxes et redevances sur des catégories de déchets spécifiques.

Ceci explique pourquoi certaines définitions de déchets ou de dispositifs de traitement de déchets ont souvent évolué en l'espace de quelques années.

Les législateurs définissent le déchet comme «tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon» [11].

Une nouvelle définition du déchet se réduit à «toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire». L'aspect «abandon» a disparu. La séparation déchet-non déchet s'opère, en répondant aux questions suivantes:

- Le matériau est-il produit volontairement?
- Le matériau est-il produit pour répondre à une demande du marché?
- La valeur économique du produit est-elle négative?
- Le produit est-il encore intégré à une chaîne d'usage ou à un cycle commercial?
- La production du matériau fait-elle l'objet d'un contrôle qualité?
- Le matériau répond-il à des normes/standards/spécifications nationaux ou internationaux?
- Ces standards comportent-ils des considérations environnementales en sus des conditions techniques et économiques?
- L'emploi du matériau présente-t-il un impact environnemental identique à celui de la matière première?
- L'emploi du produit dans la chaîne de production génère-t-il une augmentation des risques pour la santé humaine ou l'environnement relativement à la matière première initiale?
- Un traitement complémentaire est-il nécessaire pour que le matériau puisse être utilisé dans une application technique ou commerciale?
- Le matériau convient-il encore pour sa fonction d'origine?
- Le produit peut-il être utilisé comme matériau de substitution pour une autre fonction que celle prévue initialement?
- Le matériau peut-il être effectivement utilisé dans un procédé de production?
- Le produit présente-t-il un usage identifié?
- Le matériau peut-il être utilisé dans sa forme présente ou de façon identique sans subir pour autant une opération de recyclage?
- Ce matériau peut-il être utilisé après une opération de recyclage?

La volonté générale de donner la priorité au recyclage matière sur tous les autres modes de valorisation pose le problème du passage d'une matière qui, initialement qualifiée de déchet, se transforme en matière première secondaire, sous-produit ou coproduit. Ce passage d'un état à un autre conduisait le produit d'une réglementation très contraignante à une réglementation initialement beaucoup plus souple. Différents critères sont à prendre en considération: caractère dangereux du produit, sa valeur marchande (positive ou négative), nécessité d'opérer un traitement préalable, mise en place de prescriptions techniques minimales ou de normes, l'intention du détenteur, ...etc.

De la définition générale des déchets, on décline ensuite leurs différentes catégories en tenant compte de certains aspects des déchets : caractère dangereux ou non, caractéristiques

physiques, chimiques et biologiques (fermentescible, inflammable, etc.), secteur producteur (industries, collectivités, particuliers), composition, usage (emballage, électroménager, véhicule).

1.2 Classification des déchets

1.2.1 Classification en fonction de la nature du danger

Les déchets peuvent être classés en cinq catégories selon la nature du danger :

a) Les déchets radioactifs

Ce sont les déchets provenant de l'industrie nucléaire, de la médecine, de la recherche ou de l'industrie et présentant des propriétés radioactives.

b) Les déchets dangereux

Un déchet est classé dangereux s'il présente une ou plusieurs propriétés de danger énumérées au tableau 1.1 [12]. Quand les déchets industriels dangereux sont produits en petite quantité, ils sont appelés déchets toxiques en quantité dispersée (DTQD) ou déchets dangereux diffus (DDD). Ils proviennent des industries, des PME/PMI, des petits laboratoires, des artisans, ...etc. Les déchets produits en petite quantité par les ménages sont appelés déchets ménagers spéciaux (DMS).

Les produits sont divers et hétérogènes. Les quantités produites sont trop faibles pour être collectées par les collecteurs de déchets industriels. Les déchets n'entrent pas dans les filières de traitement des ordures ménagères et des déchets industriels non dangereux.

Tableau 1.1. Propriétés caractérisant un déchet dangereux

Catégorie	Propriétés	Déchets
H1	Explosif	Substances et préparation pouvant exploser sous l'effet de la flamme ou qui sont plus sensibles aux chocs ou aux frottements que le dinitrobenzène
H 2	Comburant	Substances et préparations qui, au contact d'autres substances, notamment de substances inflammables, présentent une réaction fortement exothermique
H 3A	Facilement inflammable	A l'état liquide, dont le point d'éclair est inférieur à 21°C, pouvant s'échauffer au point de s'enflammer à l'air à température ambiante sans apport d'énergie. A l'état solide, qui peuvent s'enflammer facilement par une brève action d'une source d'inflammation et qui continuent à brûler ou à se consumer après l'éloignement de la source d'inflammation. A l'état gazeux, qui sont inflammables à l'air à une pression normale ou qui, au contact de l'eau ou de l'air humide, produisent des gaz facilement inflammables en quantités dangereuses
H 3B	Inflammable	Substances et préparations liquides, dont le point d'éclair est égal ou supérieur à 21°C et inférieur ou égal à 55°C
H 4	Irritant	Substances et préparations non corrosives qui, par contact immédiat, prolongé ou répété avec la peau et les muqueuses,

		peuvent provoquer une réaction inflammatoire
H 5	Nocif	Substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent entraîner des risques de gravité limitée
H 6	Toxique	Substances et préparation qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent entraîner des risques graves, aigus ou chroniques, voire la mort
H 7	Cancérogène	Substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire le cancer ou en augmenter la fréquence
H 8	Corrosif	Substance et préparations qui, en contact avec des tissus vivants, peuvent exercer une action destructrice sur ces derniers
H 9	Infectieux	Matières contenant des micro-organismes viables ou leurs toxines, dont on sait qu'ils causent la maladie chez l'humain ou chez d'autres organismes vivants
H 10	Toxique pour la reproduction	Substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire ou augmenter la fréquence d'effet indésirables non héréditaires dans la progéniture ou porter atteinte aux fonctions ou capacités reproductives.
H 11	Mutagène	Substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire des défauts génétiques héréditaires ou en augmenter la fréquence.
H 12		Substances et préparations qui, au contact de l'eau, de l'air ou d'un acide, dégagent un gaz toxique
H 13		Substances et préparations susceptibles, après élimination, de donner naissance, par quelque moyen que ce soit, à une autre substance, par exemple un produit de lixiviation, qui possède l'une des caractéristiques énumérées ci-avant
H 14	Ecotoxique	Substances et préparations qui présentent des risques immédiats ou différés pour une ou plusieurs composantes de l'environnement

c) Les déchets Inertes

Ce sont des déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

d) Les déchets Ultimes

Il s'agit des déchets résultant ou non d'un traitement d'autres déchets, qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment,

notamment par extraction de la part valorisable ou par la réduction de son caractère polluant et dangereux.

e) Les déchets non dangereux

Il s'agit des déchets qui ne présentent pas de caractère dangereux et/ou toxique pour l'environnement. Ils n'appartiennent à aucune citée précédemment.

1.2.2. Classification en fonction de l'origine du déchet

a) Les déchets municipaux

Il s'agit de l'ensemble des déchets dont l'élimination relève de la compétence des communes [13].

Parmi les déchets municipaux, on peut distinguer les catégories suivantes :

- **Les déchets de ménages ou les déchets ménagers** : déchets provenant de l'activité domestique des ménages et dont l'élimination relève généralement de la compétence des communes. Cela inclut les ordures ménagères ainsi que les déchets encombrants et dangereux.
- **Les déchets assimilés aux déchets ménagers** : déchets provenant des entreprises industrielles, des artisans, des commerçants, des écoles, des services publics, des hôpitaux et des services tertiaires. Ils sont collectés dans les mêmes conditions que les déchets ménagers.
- **Les déchets des collectivités** : déchets issus des activités d'entretien (voirie et marchés), de renouvellement des espaces verts et des traitements des eaux des collectivités territoriales, des organismes publics et parapublics.
- **Les encombrants** : déchets provenant de l'activité domestique des ménages. En raison de leur volume ou de leur poids, ils ne peuvent être pris en compte par la collecte usuelle des ordures ménagères. Ils comprennent notamment des biens d'équipement ménagers usagés, des déblais et des déchets verts des ménages. Il s'agit le plus souvent de déchets occasionnels.

b) Les déchets industriels

Il s'agit de l'ensemble des déchets produits par les entreprises industrielles dont l'élimination leur incombe. Il existe deux types de déchets industriels :

- **Les déchets industriels dangereux (DID) ou spéciaux (DIS) [14]** : les déchets industriels sont considérés dangereux s'ils contiennent des éléments toxiques en qualité variable. Lors de la collecte, ils doivent être contenus dans des emballages spéciaux et étiquetés correctement. Sur l'ensemble de production, on distingue actuellement trois grandes catégories de déchets industriels :
 1. Déchets à dominante organique (résidus d'hydrocarbure de la pétrochimie, goudrons, solvants).
 2. Déchets minéraux liquide (acides, bases, bains de traitement de surface).
 3. Déchets des minéraux solides (catalyseur usés, sables de fonderie, boues d'hydroxydes métalliques).

- **Les déchets Industriels Non Dangereux (DIND) ou Banals (DIB) :** Ce sont des déchets non toxiques assimilables aux ordures ménagères, issus de diverses activités économiques et dont les détenteurs ne sont pas des ménages.

c) Les déchets de l'Agriculture

Traditionnellement, ils proviennent de l'agriculture, de la sylviculture, de l'élevage et de l'exploitation forestière. Dans cette catégorie, on distingue :

- Les déjections animales (lisiers et fumiers)
- Les produits phytosanitaires non utilisés (PPNU) (fongicides, insecticides, herbicides, etc....) et les emballages vides de produits phytosanitaires (EVPP)
- Les films plastiques Agricoles usagés (FPAU) : les bâches d'ensilage et d'enrubannage, les voiles plastiques utilisés en maraichage
- Les déchets d'animaux : les coproduits issus des abattoirs et les farines animales qui se décomposent en 3 catégories [15] :
 1. Les déchets à très haut risque qui seront incinérés en totalité après avoir traités. Il s'agit d'animaux détectés dans le cadre du dépistage par test abattoirs
 2. Les déchets à haut risque à incinérer qui seront également incinérés. Il s'agit d'animaux morts naturellement, d'animaux malades, de matériels à risque spécifiques, de saisies partielles ou totales.
 3. Les coproduits à bas risque ou coproduits des abattoirs dont une partie sera incinérée et une autre partie sera valorisée. Il s'agit de coproduit : le gras, le cuir, les abats rouge (cœur, poumon, foie) ou blanc, les os, ...etc. issus des abattoirs, des boucheries, des ateliers de découpe, de grandes et moyennes surfaces.
- Les plumes et les duvets qui se décomposent en 3 origines distinctes [16] :
 1. Les plumes de palmipèdes (canards et oies), très recherchées pour les qualités isolantes. Elles proviennent de l'abattage des oies et des canards.
 2. Les plumes issues de l'abattage des volailles.
 3. Les plumes de récupération.

d) Les déchets de la construction et de la démolition

Ils proviennent d'une part des chantiers de démolition, de réhabilitation et de construction pour le secteur du bâtiment, d'autre part de l'entretien des ouvrages existants et de la réalisation de nouveaux projets pour les travaux publics. Les spécificités les plus marquantes de ce secteur et des déchets qu'il produit sont les suivantes [17] :

- Une très grande diversité dans la taille, dans la concentration et dans la fréquence des chantiers et donc dans la production des déchets dans le temps et dans l'espace, qui nécessitent un système de collecte adapté à la fluctuation de la production ainsi que des structures de regroupement et de tri (plates-formes).
- Une majorité de déchets ne peuvent pas suivre les filières traditionnelles de valorisation des déchets ménagers et des déchets des autres entreprises à cause de leur nature, de leur taille et de leur caractère non incinérable pour une majorité entre eux.

- Une majorité de déchets inertes, étroitement associés à la source avec des DIND dans le cas des chantiers de démolition et de réhabilitation de bâtiments.
- Une multitude d'intervenants sur un même chantier : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, coordinateur sécurité et protection, bureau de contrôle, entreprises générales et sous-traitantes. Tous directement ou indirectement concernés par la gestion des déchets. Cette multitude augmente les difficultés de gestion, chaque partenaire ayant une part de responsabilité.

e) Les déchets des activités de soins (DAS)

Ils sont définis comme les déchets issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif, curatif ou palliatif dans les domaines de la médecine humaine ou vétérinaire, des activités de recherche, d'enseignement, de production industrielle et de thanatopraxie [18]. Ils se répartissent en 4 catégories :

- Les déchets d'activité de soins à risque infectieux. Ce sont les déchets coupants, piquants, tranchants, le sang, les pansements, les pièces anatomiques,... etc.
- Les déchets d'activité de soins à risque autre qu'infectieux. Ce sont le plus souvent les réactifs de laboratoires, les détergents, les thermomètres à mercure, les amalgames dentaires, ...etc.
- Les déchets d'activité de soins assimilables aux ordures ménagères. Ce sont soit les déchets de restauration, d'hôtellerie, d'entretien des espaces verts, les déchets des services administratifs.
- Les médicaments. Il s'agit en particulier les médicaments des ménages. Ce sont soit les médicaments périmés, soit les médicaments non utilisés.

Ces déchets sont générés soit par les établissements de santé, soit en mode diffus par les professionnels de santé en exercice libéral, les laboratoires d'analyse, les antennes d'auto-dialyse, les infirmeries d'entreprises, ...etc.

f) Les déchets de l'automobile

Les déchets de l'automobile sont les déchets qui proviennent de l'entretien et de la réparation des véhicules. Ils sont aussi issus du démantèlement des véhicules hors usage (VHU). Un VHU est un véhicule en fin de vie ou accidenté ne pouvant faire l'objet d'une réparation. Parmi les déchets de l'automobile, sont classés :

- Les VHU ;
- Les huiles de vidanges et autres lubrifiants ;
- Les liquides de refroidissement, lave-vitre ;
- Les batteries ;
- Les pots catalytiques ;
- Les pneumatiques usagés.

g) Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)

On appelle Equipements Electriques et Electroniques (EEE) tous les équipements fonctionnant grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques ainsi que les équipements de production, de transfert ou de mesure de ces courants et champs, conçus

pour être utilisés à une tension ne dépassant pas 1000 volts en courant alternatif et 1500 volts en courant continu [19-20]. Les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE), sont quant à eux, des appareils arrivant en fin de vie, qui relèvent des catégories d'appareils suivantes :

1. Gros appareils ménagers
2. Petits appareils ménagers
3. Équipements informatiques et de télécommunications
4. Matériels grand public
5. Matériels d'éclairage à l'exception des appareils d'éclairage domestique et des ampoules à filament.
6. Outils électriques et électroniques
7. Jouets, équipements de loisir et de sport
8. Dispositifs médicaux
9. Instruments de surveillance et de contrôle
10. Distributeurs automatiques
11. Panneaux photovoltaïques

- **Filières des DEEE**

Sont considérés comme DEEE ménagers, les déchets issus d'équipements électriques et électroniques provenant des ménages ainsi que d'équipements qui, bien qu'utilisés à des fins professionnelles ou pour les besoins d'associations, sont similaires aux déchets ménagers en raison de leur nature et des circuits par lesquels ils sont distribués.

Sont considérés comme DEEE professionnels les autres déchets d'équipements électriques et électroniques.

La filière de collecte et de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) est basée sur le principe de responsabilité élargie des producteurs d'équipements électriques et électroniques. Ainsi, ces producteurs doivent prendre en charge l'élimination des équipements une fois ceux-ci usagés.

Les DEEE ménagers sont collectés soit par la distribution, dans le cadre du « un pour un » (le distributeur reprend l'ancien équipement lors de la vente d'un nouvel équipement), pour certains types de distributeurs, une obligation de reprise gratuite dite « 1 pour 0 » (sans obligation d'achat) existe pour les très petits équipements ; soit par les collectivités qui ont mis en place une collecte sélective (en général en déchèterie), soit par les acteurs du réemploi, lorsque les équipements peuvent être réutilisés. Les DEEE ainsi collectés sont enlevés et traités par les prestataires des éco-organismes, qui garantissent un haut niveau de dépollution et de recyclage [19].

Pour les DEEE professionnels les producteurs doivent prendre en charge l'organisation et le financement de l'enlèvement et du traitement.

1.2.3 Relation entre le type de déchet et le secteur de production du déchet

Le tableau 1.2, bien que non exhaustif, permet de classer les déchets en croisant le secteur de production et leur type.

Les déchets d'origines différentes peuvent avoir une même composition qui définit leur dangerosité intrinsèque. Ainsi, des déchets de sources distinctes mais de nature similaire pourront être regroupés pour suivre la même filière de traitement ou de valorisation.

Tableau 1.2. Quelques exemples de corrélation entre le type de déchets et le secteur de production du déchet

		Type des déchets			
		Déchets dangereux	Déchets non dangereux	Déchets inertes	Déchets ultimes
Secteur de production des déchets	Déchets municipaux (déchets des ménages et assimilés)	• Accumulateur Cd-Ni • Déchets contenant du mercure • Hile de vidange • Emballages souillés • DMD	• Ordures ménagères • Papiers • Cartons • Déchets verts	• Déchets inertes du « bricolage » des particuliers • Résidus d'incinération • Faïence, porcelaine	• Résidus d'incinération après stabilisation
	Déchets industriels	• Goudron acides • Sels contenant des cyanures • Cendres volantes • DTQD....	• Emballages • Ferrailles • Plastiques	• Sables résidus de la métallurgie	• Résidus d'incinération après stabilisation
	Déchets de l'agriculture	• Déchets agrochimiques • Farines animales non contaminées • Films plastiques souillés • PPNU • EVPP	• Plastiques • Bois • ...		
	Déchets de la construction et de la démolition	• Déchets de peinture • Fibres libres d'amiantes	• Bois non traité • Cartons • Plastiques	• Béton • Pierres • Porcelaine • Résidus de l'amianté et amianté lié • Matériaux d'excavation (terres propres)	

	Déchets des activités de soins	• Déchets à risque infectieux • Produits chimiques vétérinaires • Médicaments	• Bois non traité • Cartons		• Résidus d'incinération après stabilisation
	Déchets d'équipements électriques et électroniques	• Piles, accumulateurs • Tubes cathodiques • Plastiques bromés • Verres spéciaux • Cartes électroniques	• Ferrailles • Plastiques non bromés	• Béton-ciment	
	Déchets de l'automobile	• Batteries • Fluides • Air-bag	• Pneumatiques • Textiles • Acier • plastique		

1.3 Gestion des déchets

Cette partie illustrera les aspects concrets de la gestion des déchets, à savoir la collecte et les modes de traitement. Cette analyse permettra par la suite d'établir un jugement sur les méthodes les plus efficaces et écologiques, et de mettre en avant les modes de traitement qui seraient les plus facilement transposables aux principes de l'écologie industrielle.

Dans tous les pays, la gestion des déchets est basée sur les principes de gestion intégrée, avec toutefois, quelques variations dans la hiérarchie établie.

1.3.1 La gestion de la collecte des déchets

La gestion de la collecte des déchets constitue la première étape de l'élimination des déchets. Cette dernière doit tenir compte d'un certain nombre de points comme le mode de ramassage, les différents contenants de déchets, les véhicules de transport, ...etc. La récupération des déchets, qui suppose une collecte séparée ou un tri, permet de valoriser les matériaux ou l'énergie contenue dans les déchets, de limiter leur apport dans les installations de traitement, ou de leur faire suivre une filière de traitement spécifique [21].

Une fois les déchets collectés et acheminés par les véhicules de collecte, ils sont regroupés et stockés dans des stations de transit (centre de transfert) dans l'attente d'être transférés par des véhicules de grande capacité (camion gros porteur, chemin de fer...) vers un centre de traitement. Les stations de transit existent lorsque les installations de traitement sont éloignées des zones de collecte et permettent des économies de coûts de transport, notamment en zones rurales.

Une fois les déchets séparés, par les différents types de collecte, il est nécessaire de réaliser un tri supplémentaire. Les centres de tri ont pour objet d'exécuter cette tâche, car les déchets sont souvent altérés par des matériaux indésirables, les rendant alors incompatibles avec les conditions de valorisation. D'autre part, les centres de tri doivent conditionner l'ensemble des déchets en vue de les transporter vers l'unité de traitement.

1.3.2 Les différents modes de traitement des déchets

Ce sont les plans départementaux de gestion des déchets qui coordonnent l'ensemble des actions de collecte menées par les pouvoirs publics et les organismes privés. Il est important de distinguer la gestion des déchets ménagers de la gestion des déchets industriels, qui par leurs contenus, implique des modes de traitement différents. L'analyse suivante étudiera cette distinction et exposera les principaux modes de traitement des déchets, à savoir:

- La valorisation de matière par le réemploi, la réutilisation ou le recyclage ;
- La valorisation organique par le compostage ou la méthanisation ;
- La valorisation énergétique ;
- L'enfouissement.

Ces modes de traitement sont complémentaires dans la mesure où ils produisent tous des refus ou des déchets secondaires pouvant être réutilisés.

Par ailleurs, la valorisation matière se définit, comme « le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie ». Il s'agit donc d'utiliser les déchets comme une source de matière première, appelés alors matière secondaire, comme source énergétique.

1.3.2.1 La valorisation de matière par le réemploi, la réutilisation ou le recyclage

a) Le réemploi

Le réemploi consiste à utiliser une nouvelle fois un produit ou objet usagé, pour un usage analogue à celui de sa première utilisation ou pour une autre utilité, sans qu'il y ait de traitement intermédiaire [22]. Il s'agit, en d'autres termes, de prolonger la durée de vie du produit avant qu'il ne devienne un déchet tout en limitant les processus de transformation du produit. Il permet donc une réduction de l'utilisation de ressources naturelles et donc, des impacts négatifs sur l'environnement. Exemple : la consignment des bouteilles qui sont à nouveau remplies après leur nettoyage.

b) La réutilisation

La réutilisation consiste à utiliser de nouveau un déchet, pour un usage différent de son premier emploi. Exemple : l'utilisation de pneus usagers pour protéger la coque des bateaux.

Les centres de recyclage ont pour mission de promouvoir la réutilisation ou le réemploi. Ainsi, après avoir récupéré les déchets dans les déchèteries ou par apport volontaire des particuliers, les déchets sont triés, nettoyés, réparés pour pouvoir être revendus. Les centres réalisant de telles opérations sont souvent des organismes à but non lucratif, vecteurs de

développement local et durable, encourageant la protection de la nature, la création d'emplois viables, l'éducation et la sensibilisation des citoyens.

c) Le recyclage

Le recyclage désigne la réintroduction d'un matériau contenu dans un déchet dans le cycle de production, en remplacement total ou partiel d'une matière première neuve. Par exemple, utiliser les bouteilles cassées et les refondre pour en faire des bouteilles neuves.

Les critères de recyclage en « boucle fermée » sont rencontrés lorsqu'un produit est réutilisé après la fin de sa durée de vie (utile) tout en maintenant ses propriétés matérielles inhérentes [23]. Quant au recyclage en « boucle ouverte », il est une option dans laquelle les propriétés matérielles du produit sont modifiées lors du processus de recyclage. Par ailleurs, le « sous cyclage » (down cycling) renvoi au recyclage dit en « boucle ouverte », durant lequel les propriétés matérielles du produit sont réduites fonctionnellement lors du processus, comparée à une matière vierge ou à une matière recyclée en « boucle fermée ».

Cette méthode confère une véritable valeur aux déchets permettant de réaliser des économies de coût, d'énergie et de matière. Les déchets recyclables sont alors triés par catégories de matériaux : papiers/cartons, verre, plastiques, métaux... Par ailleurs, on parle de valorisation matière pour les matériaux récupérés lors de l'incinération des déchets (mâchefer, ferrailles...).

Ces derniers sont par la suite traités afin de récupérer les matières qu'ils contiennent et peuvent être utilisés comme sous-couche routière.

Exemples :

- Le recyclage du verre permet d'économiser « 100 kg d'équivalent pétrole par tonne de verre recyclé » ;
- Une tonne de papier recyclée permet d'économiser 200 kg de pétrole et 100 m³ d'eau ;
- Une tonne de plastique recyclée et transformée en poudre, paillette ou granules permet d'économiser 700 à 800 kg de pétrole brut ;
- Le recyclage de l'aluminium a l'avantage de pouvoir être réutilisable à 100% et à l'infini et il consomme 95% d'énergie en moins que sa fusion à l'état brut ;
- 19 000 boîtes de conserve = 1 voiture.

La valorisation de matière par le réemploi, la réutilisation ou le recyclage fait partie des modes de traitement préconisés par les principes de l'écologie industrielle, à savoir, la fermeture des boucles de matières et la minimisation de l'usage des ressources. Le second mode de valorisation, constitue, quant à lui, une élimination plus « naturelle » des déchets.

1.3.2.2 La valorisation organique par le compostage ou la méthanisation

Elle représente l'utilisation pour amender les sols de compost ou autres déchets organiques transformés par voie biologique.

Dans le milieu naturel, la transformation de matières organiques peut se faire de deux manières : le compostage et la méthanisation. Néanmoins, cette dégradation peut être maîtrisée industriellement et appliquée aux déchets ménagers. De ce fait, l'élimination des

déchets est réduite au profit de la valorisation, et peut être utilisée par les agriculteurs en tant qu'engrais.

L'utilisation des ordures brutes nécessite au préalable une opération de tri au moyen d'une collecte sélective. La Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères (FFOM) est essentiellement constituée de déchets alimentaires, de déchets verts et de papier/cartons. Ce type de valorisation permet une réduction de 45 à 50% du volume des déchets.

a) Le compostage

Le compostage correspond à la décomposition de matière organique grâce à des microorganismes présents dans l'eau et l'oxygène (aérobie). Cette décomposition engendre un dégagement de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone, et donne naissance à un résidu composé de matières organiques et de minéraux appelé compost ou amendement organique.

Le compost peut s'effectuer de différentes manières :

- A l'extérieur en amas, pendant deux à trois mois pour un compostage lent et naturel
- Dans des enceintes spécifiques durant une quinzaine de jours pour un compostage accéléré ;
- A l'aide de vers de terre ou lombrics (le lombricompostage) qui favorisent la minéralisation des matières organiques et leurs transformations.

Pratiqué depuis des siècles par les fermiers, le compostage s'est longtemps limité aux déchets verts. Désormais, son champ d'utilisation a été élargi à d'autres types de déchets (les déchets de l'industrie agro-alimentaire, les boues des stations d'épuration et les effluents d'élevage).

De nos jours, les différents procédés utilisés se distinguent par les modes de fermentation, qui peuvent être soit en cellules ouvertes ou en andains (déchets verts, boues), soit en digesteur. Dans le dernier cas, on observe à la fois une production un gaz (le biogaz) et la production d'un solide, le compost [24].

La qualité du compost dépend de la matière entrante. Lorsqu'il est de bonne qualité, le compost est un produit stabilisé, hygiénique et riche en humus, comparable à un terreau. Par ailleurs, l'appellation « compost » regroupe deux sous-produits :

1. Le « compost » à proprement dit : riche en minéraux (azote, phosphore, potassium), notamment lorsque le compost est issu des boues ;
2. « l'amendement organique » : issu du même processus de fabrication, mais moins riche (part fermentescible des ordures ménagères, déchets verts...).

A cet effet, plusieurs pays ont instauré ou préparent un label qualité afin de rassurer les utilisateurs. Par ailleurs, son utilisation peut être très réglementée selon les pays : épandage interdit suivant les saisons ou les zones ; les producteurs sont tenus de mentionner les quantités produites, vendues, et leur composition afin d'optimiser l'utilisation du compost.

La valorisation organique par le compostage représente un gisement considérable et sous exploité. En effet, les matières organiques constituent le premier composant des déchets municipaux ; mis en décharge, elles dégagent du méthane qui s'avère nocif s'il n'est pas capté

et valorisé. Le compost reste donc une solution à considérer pour le traitement des déchets ménagers, déchets qui ne peuvent guère être valorisés dans les processus industriels. En effet, l'incinération des ordures ménagères n'est pas efficace, car ces matières ont un faible dégagement de pouvoir calorifique, en rapport avec le volume important. Le compostage n'est donc pas une solution à retenir pour développer l'écologie industrielle, mais doit toutefois être développé pour les raisons citées précédemment.

b) La méthanisation

Proche du compostage, l'opération de méthanisation consiste à transformer des matières organiques en conditions anaérobies (sans oxygène), produisant à la fois un gaz combustible, appelé biogaz (mélange de gaz carbonique et de méthane), et un amendement organique. Comme pour le compost, cette fermentation est le résultat de l'activité microbienne naturelle ou contrôlée.

Les installations de traitement de méthane doivent, pour bien fonctionner, effectuer un tri préalable des ordures pour ne retenir que la partie organique. Il existe des installations traitant les boues de stations d'épuration, fonctionnent sur ce principe.

Les sources d'émission du biogaz sont multiples :

- Les boues des stations d'épuration : le biogaz produit est riche en méthane, en hydrogène sulfuré, mais aussi en métaux lourds ;
- Les industries agro-alimentaires et les agriculteurs ;
- Plus rarement du compostage (puisque ce dernier nécessite un traitement avec apport d'air). Toutefois, il existe aujourd'hui des procédés mixtes qui permettent la production d'amendement organique et de biogaz ;
- Le biogaz de décharge, issu du dépôt des déchets fermentescibles.

Il est à noter que le biogaz est avant tout un gaz naturel relativement toxique contribuant à l'effet de serre. En effet, la décomposition des plastiques, des lessives et autres déchets, donne naissance à du gaz carbonique, et surtout du méthane, lequel est 35 fois plus toxique que le gaz carbonique. De ce fait, l'idée d'organiser sa fabrication de façon industrielle par la méthanisation permet un meilleur contrôle.

L'avantage de la méthanisation par rapport au compostage est qu'elle n'entraîne que très peu d'odeurs puisque le traitement se fait dans une cuve hermétique. Toutefois, ce processus est plus cher. Enfin, comme pour le compostage, cette méthode de valorisation présente un fort potentiel peu exploité.

1.3.2.3 La valorisation énergétique

La valorisation énergétique consiste à utiliser une source d'énergie résultant de l'incinération ou de la thermolyse. Ces modes de traitement des déchets sont tout à fait applicables dans un système industriel appliquant les principes de l'écologie industrielle puisqu'ils permettent de récupérer l'énergie de la combustion.

a) L'incinération avec valorisation énergétique

L'opération d'incinération consiste à brûler des déchets hétérogènes dans des fours aménagés à cet effet en fonction de leurs caractéristiques : composition des ordures, taux d'humidité, pouvoir calorifique.

L'incinération des ordures n'est une valorisation énergétique que lorsque les déchets se substituent à une matière première combustible, comme par exemple dans les cimenteries. La combustion de déchets constitue donc une opération de valorisation lorsque son objectif principal est que les déchets puissent remplir une fonction utile, en tant que moyen de produire de l'énergie, en se substituant à l'usage d'une source d'énergie primaire qui aurait dû être utilisée pour remplir cette fonction.

L'énergie produite à partir de la combustion peut donc être récupérée sous forme de chaleur ou d'électricité (c'est ce qu'on appelle la cogénération) par les entreprises qui s'alimenteront directement à cette source d'énergie, réduisant alors leur dépendance envers les ressources non renouvelables. Par ailleurs, afin d'éviter une déperdition de chaleur et pour pouvoir utiliser au maximum cette production d'énergie, l'utilisateur devra être suffisamment proche de l'usine d'incinération. D'autre part, il devra avoir des besoins en harmonie avec la production variable de l'usine d'incinération, qui est dépendante des flux d'approvisionnement.

Le poids de l'incinération comme mode de traitement, face à l'abandon de la mise en décharge des déchets ménagers devrait se renforcer dans le temps. En effet, en dépit des améliorations techniques, cette option demeure très controversée en raison des risques qu'elle entraîne sur la santé et l'environnement, risques qui sont pourtant maîtrisés aujourd'hui.

b) La thermolyse

La thermolyse (ou pyrolyse) est une technique qui allie recyclage et valorisation énergétique.

Après avoir été broyés, séchés et criblés, les déchets ne sont pas brûlés, mais chauffés, à moyenne température (450 à 750°) en conditions d'anaérobies. L'absence d'air et la chaleur entraînent une séparation des matières organiques en deux parties :

- Un composant solide : Le solide contient des cendres, des matières minérales qui n'ont pas été détruites par la chaleur du four (métaux ferreux et non ferreux, inertes ou infusibles, verre, céramiques, cailloux...), et surtout du carbone, composant fondamental de toute matière vivante végétale ou animale. Après séparation physique du verre et des métaux, on obtient un composant solide de thermolyse, le « coke », qui s'apparente à un charbon (composé de 30 à 40% de cendres) pouvant être valorisé en sidérurgie ou cimenterie.
- Un gaz combustible chaud : Constitué d'une partie pouvant être liquéfiée ou transformée en huile (vapeurs d'essence, vapeurs d'eau) et d'une partie qui reste à l'état gazeux (hydrogène, méthane, oxyde de carbone, hydrocarbures...). La partie non condensable est brûlée afin de détruire les dioxines résiduelles, et il est possible d'influencer la production de gaz ou de matériaux solides suivant la température du four.

Ainsi, la valorisation énergétique constitue le mode de traitement des déchets le plus facile à appliquer en vue d'une réutilisation de l'énergie issue de la combustion des déchets, notamment des déchets industriels. En effet, en se plaçant à proximité d'une telle installation, les entreprises peuvent tout à fait substituer leur consommation d'énergie non renouvelable pour alimenter leurs systèmes de production, ou du moins s'en servir comme complément.

1.3.2.4 L'enfouissement

Enfin, le dernier mode de traitement des déchets est l'enfouissement, méthode la moins écologique de toute puisque le déchet n'est ni réutilisé, ni valorisé. Ce mode de gestion s'applique essentiellement aux déchets ultimes dont aucune solution, à l'heure actuelle, n'a été trouvée.

Depuis 2002, le stockage des déchets ultimes se fait dans des Centres de Stockage des Déchets Ultimes, installations classées en deux catégories :

- **Les CSDU de classe 1 :**

Ces centres reçoivent les déchets industriels spéciaux nécessitant au préalable une stabilisation physicochimique, afin d'éviter des impacts négatifs sur l'environnement. Ils doivent être placés sur un terrain imperméable et être équipés d'une unité de stabilisation, mais aussi de dispositifs de rétention et de récupération des substances polluantes.

- **Les CSDU de classe 2 :**

Ces centres sont habilités à stocker les déchets ménagers ultimes dont la fraction valorisable et les DIB ont été préalablement extraits. Comme pour les centres de classe 1, ils doivent être installés sur un terrain présentant un contexte géologique convenable. Ils sont exploités durant une vingtaine d'années, puis couverts pendant trente ans et suivis par un programme post-exploitation.

Pour conclure cette partie, il apparaît que les modes de traitement les plus écologiques sont la valorisation matière, organique et énergétique. Recommandés par les principes de l'écologie industrielle, la réutilisation, le recyclage et la valorisation énergétique des matières permettent la fermeture des boucles de matière et d'énergie, diminuant ainsi les dépendances en ressources non renouvelables et diminuant les rejets dans l'environnement. Dans la mesure où les modes de traitement les plus respectueux de l'environnement sont désormais identifiés, il convient à présent d'observer : si ce sont eux qui sont le plus appliqués dans la réalité, quelles sont les pratiques de gestion dans les entreprises.

1.3.3 Les différents types de déchets solides industriels

Une analyse des déchets industriels détaillée s'avère en réalité très difficile en raison du manque de données communiquées par les industries ou les organismes. L'analyse suivante se contentera donc d'énumérer les types de déchets rencontrés et les problèmes qu'ils engendrent.

La production de déchets est liée à la croissance économique et au produit national brut. D'autre part, les déchets industriels varient en fonction de la structure industrielle de chaque

pays : les industries qui produisent le plus de déchets sont les industries chimiques, les usines à papier, l'industrie du fer et de l'acier.

Les processus industriels engendrent déchets dont les principales sources sont les suivantes [25] :

- **Les métaux lourds** : tels que l'arsenic, le plomb, le cadmium, le mercure et le sélénium. Ces métaux lourds se déposent par la suite dans les sols ou les rivières ;
- **Les déchets de papier/carton** : ce type de déchet est facile à recycler, mais souvent à l'extérieur des usines où ils ont été générés. Dans la mesure du possible, l'utilisation de papier/carton doit être minimisée et l'utilisation de matière recyclée doit être privilégiée par rapport à la matière vierge. Par ailleurs, chaque emballage entrant dans une usine doit être récupéré par son fournisseur ;
- **Les déchets biologiques** : ces derniers concernent principalement l'industrie pharmaceutique, mais l'introduction d'ingénierie génétique suppose que la génération de ce type de déchet sera plus répandue dans le futur. Lors de l'élimination, il est important que chaque déchet biologique généré ne soit pas une source d'infection, d'où la nécessité d'une gestion de l'élimination prudente ;
- **Les déchets radioactifs** : certains de ces déchets sont utilisés dans les industries pour la fabrication d'équipement médical ou de détecteur de fumée. Dans la mesure où, la fabrication de produits contenant de telles substances génère à son tour des déchets radioactifs, leur utilisation doit être évitée à moins que leurs caractéristiques soient essentielles. Dans ce cas, la quantité de matières doit être minimisée au maximum et l'élimination doit être rigoureusement suivie ;
- **Les boues** : de nombreuses industries produisent des boues qui ne leur sont d'aucune utilité et qui ne peuvent être consignées pour l'élimination. La minimisation de la production de ces boues est du ressort du designer et de l'ingénieur de processus qui ont mis en fonction l'usine. Des efforts doivent donc être fournis pour trouver une utilisation de ces boues, en interne comme en externe, ce qui peut nécessiter quelque fois, l'ajout de procédés additionnels ;
- **Les déchets de plastiques** : les déchets thermoplastiques sont relativement faciles à réutiliser à l'intérieur de l'installation dans laquelle ils ont été générés. En effet, ils peuvent être facilement introduits dans les flux de matières vierges. Toutefois, si ces derniers sont trop dégradés pour pouvoir être recyclés, ils doivent être incinérés en vue de récupérer l'énergie ;
- **Les déchets mixtes** : la principale règle pour gérer ce type de déchets est d'essayer de n'en générer aucun, ce qui exige la séparation des déchets mixtes en groupes de matières.

Ainsi, tant que les déchets solides peuvent être subdivisés, il sera plus facile de les recycler à l'intérieur de l'usine, ou de les vendre à un autre utilisateur. Il est évident, suite à la lecture des différents déchets produits par les activités industrielles, que leur gestion doit s'avérer complexe, d'où une source élevée de problèmes.

1.3.4 Gestion des DEEE

Plusieurs directives, ont ainsi été élaborées afin de contrôler la gestion de ces déchets. Elles imposaient ainsi leur collecte sélective et leur traitement ainsi que celles des substances dangereuses qu'ils contenaient. Elles préconisent également la réutilisation, le recyclage et la valorisation de ces déchets [19]. Ces directives visent à restreindre, voir à interdire l'utilisation de substances dangereuses dans les EEE. Elles ont pour objectif d'obliger au remplacement de ces substances par des produits plus respectueux de l'environnement tout en garantissant au moins le même niveau de protection du consommateur. L'objectif est de promouvoir la valorisation des DEEE dans le sens où les EEE doivent être conçus et fabriqués de manière à faciliter leur démantèlement et de favoriser la réutilisation et le recyclage plutôt que leur destruction. La gestion des déchets doit être améliorée par la mise en place de collectes sélectives et d'un traitement adapté des DEEE en séparant certains composants, tout en évitant la dispersion des substances dangereuses. C'est aux producteurs (fabricants, vendeurs, revendeurs et importateurs) d'être responsables (Responsabilité Etendue du Producteur REP) de la collecte, du traitement et de la valorisation des DEEE. La quantité des DEEE devait également être réduite.

1.3.4.1 État du gisement des DEEE

Chaque année, environ 641 millions d'équipements, sont mis sur le marché, soit 25 (kg/hab/an), dont plus de 80% de ces équipements sont de type ménager [20]. L'augmentation du taux de recyclage rend nécessaire la connaissance de la composition des matériaux composants les DEEE.

La figure 1.1 donne une moyenne des proportions de matériaux ferreux, non ferreux, plastiques et de matériaux non récupérables présents dans les DEEE hors écrans et lampes. Le recyclage des métaux ferreux et non ferreux est maîtrisé et constitue une source d'approvisionnement de matière première secondaire (MPS) [26]. Parallèlement, les matières plastiques, qui représentent plus de 20% de la masse des DEEE, ne sont actuellement pas recyclées mais incinérées. Il est donc pertinent de s'intéresser à leur recyclage. Cependant, comme le montre la figure 1.2, ces matières plastiques sont composées d'environ une dizaine de polymères. Trois polymères sont majoritairement présents : l'ABS et ses alliages ABS-PC, le PP (Polypropylène) et le PS (Polystyrène principalement sous la forme HIPS) [27]. En raison d'un si grand nombre de polymères utilisés, il est particulièrement difficile d'en assurer une séparation idéale et donc d'un recyclage exempt d'impuretés. Actuellement, aucune filière de retraitement des plastiques n'est en mesure d'assurer un tri aussi sélectif.

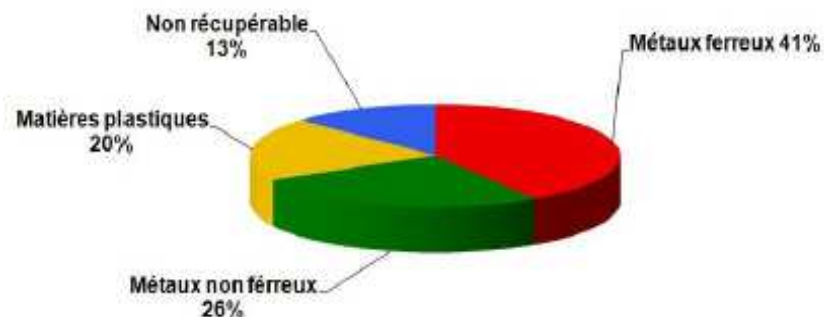


Figure 1.1. Type et proportion de matériaux existant dans les DEEE [28]

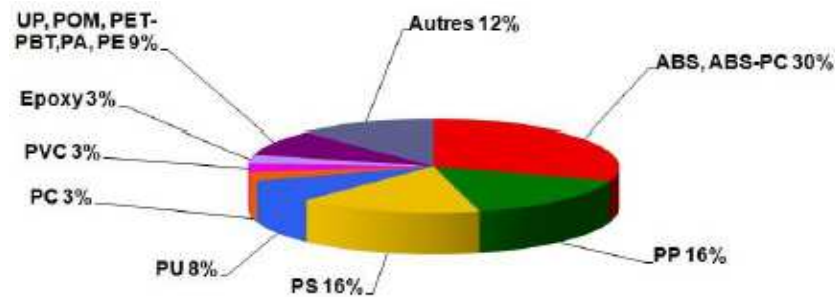


Figure 1.2. Proportion des plastiques selon leur nature dans les DEEE [29]

1.3.4.2 Voies de traitement des DEEE

Une fois collectés, les déchets sont traités selon 5 voies (Figure 1.3) [30-31] :

Le réemploi, ou réutilisation des équipements entiers qui a pour but de remettre en état de marche et de revendre l'équipement d'occasion pour le même usage que celui de départ ;

La réutilisation en pièces qui consiste à récupérer des pièces détachées sur un appareil hors service afin de réparer d'autres équipements ou bien de les réintégrer à la fabrication de nouveaux EEE ;

Le recyclage, ou valorisation de la matière qui consiste à démonter, à dépolluer, à broyer et puis à trier les différentes matières. Après avoir subi une remise en forme, la matière peut être utilisée comme matière première secondaire (MPS).

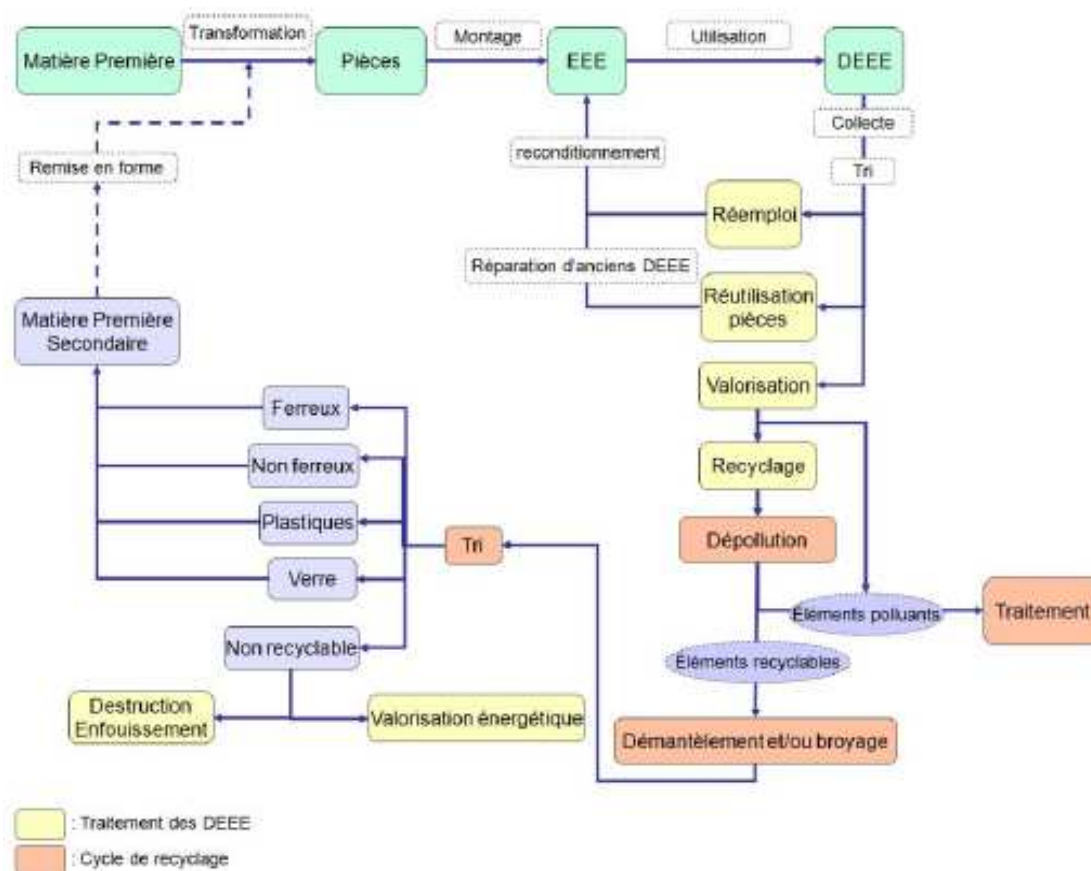


Figure 1.3. Schéma du cycle de vie d'un EEE.

La valorisation énergétique, ou incinération avec récupération d'énergie qui permet par le biais d'un traitement thermique des déchets non recyclables de récupérer une partie de leur contenu énergétique à condition que ceux-ci ne contiennent pas de substances dangereuses (par exemple les retardateurs de flamme bromés) [32].

La destruction qui consiste à éliminer le déchet sans valorisation (mise en décharge ou incinération sans récupération d'énergie).

1.3.4.3 Tri des polymères

Le gisement de plastiques issus des DEEE est constitué d'environ 15 polymères différents dont une partie est constituée d'alliages de polymères. Lors de leur arrivée sur la chaîne de tri, ces plastiques préalablement broyés, se retrouvent mélangés. Or ce gisement ne peut pas être recyclé tel quel car la plupart des polymères ne sont pas miscibles entre eux. C'est pourquoi, plusieurs auteurs [32], [33-36] insistent sur le fait que le tri est l'une des étapes primordiales du recyclage pour réduire l'effet de contamination par d'autres polymères. Ainsi, la très grande diversité de polymères présents dans ce gisement requiert le développement de techniques de tri automatique, rapides, économiques et efficaces. Les procédés les plus répandus sont : le tri par voie sèche comme la spectroscopie infra rouge, et le tri électrostatique ou par voie humide basée sur la différence de densité ou de solubilité [36], [37-41]. Les techniques actuelles de tri admettent un taux d'impureté de 1 à 5%. Obtenir un polymère pur à 99% nécessite plusieurs étapes de tri, ce qui implique un surcoût et par conséquent une mauvaise rentabilité. Il faut considérer que la présence d'impuretés est donc inévitable.

1.3.4.4 Méthodes de valorisation des plastiques et contraintes

Deux grandes méthodes de valorisation des plastiques existent : la valorisation énergétique et la valorisation de la matière. En terme de valorisation de la matière qui seule nous intéresse ici, quatre types de procédés de recyclage peuvent être envisagés [42] :

Le recyclage chimique consiste à décomposer le polymère en constituants de base (monomères, oligomères). Les processus classiquement utilisés font appel à la pyrolyse, la gazéification, la décomposition chimique par voie liquide (hydrolyse, alcoololyse,...etc.) Les matières premières sont alors réutilisables dans les raffineries ou dans les filières de la pétrochimie et de la chimie. Ces techniques de décomposition sont bien adaptées à des polymères « purs » comme le polyuréthane, le polyéthylène téréphtalate, le polyamide et le poly-méthacrylate de méthyle. Il est en revanche beaucoup plus complexe et coûteux de produire des matières premières réutilisables, de manière rentable, lorsqu'il s'agit de polymères de commodité, de mélanges ou d'alliages de polymères. De plus, certaines techniques comme la dissolution par voie liquide possèdent un gros inconvénient car elles nécessitent l'utilisation de solvants [43-44], même si certaines études proposent une solution pour recycler le solvant [45].

Le recyclage mécanique consiste à : après avoir éliminé les constituants dangereux puis broyer le polymère sous forme de paillettes, à le ramollir sous l'effet de la chaleur par extrusion. Le jonc ainsi obtenu est ensuite réduit sous forme de granulés. Cette méthode apparaît de loin comme la voie la plus appropriée pour le traitement des polymères issus des

DEEE. Des études montrent que le recyclage mécanique est en général préférable à d'autres procédures en termes d'optimisation de la consommation énergétique et de la minimisation d'émissions de gaz à effet de serre [46]. Il s'avère, par ailleurs, moins coûteux que le recyclage chimique. Ces transformations peuvent toutefois engendrer, par exemple, des dégradations thermomécaniques de la matière causées par des températures et des taux de cisaillement élevés durant la mise en œuvre [47-48].

Le recyclage électrostatique consiste à éliminer les substances dangereuses puis broyer les matériaux plastiques sous forme de granulé de différentes tailles (grosses particules, petites particules, sous-millimétriques et micronisées) [49]. Les méthodes de séparation électrostatiques utilisent les forces agissant sur des granules chargés ou polarisés, soumis à l'action d'un champ électrique. Ces technologies se développent aujourd'hui essentiellement en rapport avec de nouvelles applications dans le domaine du recyclage des déchets.

Le recyclage magnétique consiste à soumettre des morceaux de déchets à des forces magnétiques et mécaniques développées par un séparateur magnétique [50-52]. Suivant les propriétés magnétiques des déchets, il y a lieu d'employer soit la force attractive soit la force répulsive. La séparation magnétique s'applique industriellement depuis le début du 20^{ème} siècle. Cette séparation est utilisée aussi bien dans la préparation des matières fortement magnétiques que pour celles qui sont faiblement magnétiques. C'est au cours des dernières décennies que les méthodes d'enrichissement des matières faiblement magnétiques ont été développées. Il est possible de constater que les techniques du recyclage magnétique jouent un rôle très important également dans le domaine du recyclage des déchets de métaux non ferreux issus des DEEE.

1.4 Processus de séparation des DEEE

L'analyse des éléments constituant les EEE montre que leurs procédés de fabrication sont très consommateurs de matières premières tels que les plastiques (ABS ; PS ; PC ; PVC...), les métaux (Or ; Argent ; Cuivre ; étain ; Plomb ...), ou encore les terres rares principalement utilisées dans l'industrie du verre et de la céramique [31-34]. La figure 1.4 montre un exemple d'un EEE (déflecteur électromagnétique du tube cathodique). Cet élément contient plusieurs matériaux de natures différentes à savoir : le cuivre ; verre ; plastique ; résine époxy ; acier ; céramique ; ...etc. [53]. Actuellement la plus part de ces matériaux sont considérés comme matériaux non renouvelables en voie d'épuisement. Par conséquent, il est devenu indispensable de trouver des solutions qui permettent de réutiliser les DEEE pour prolonger le cycle de vie des matériaux et réduire le taux d'épuisement des ressources naturelles [54].

Pour commencer à apporter des solutions à ce problème, nombreuses entreprises dans le monde procèdent au recyclage des DEEE en fin de vie. Le tableau 1.3 montre les informations sur le pourcentage des matériaux qui peuvent être récupérés à partir de quatre équipements électriques et électroniques utilisés au Japon [55].

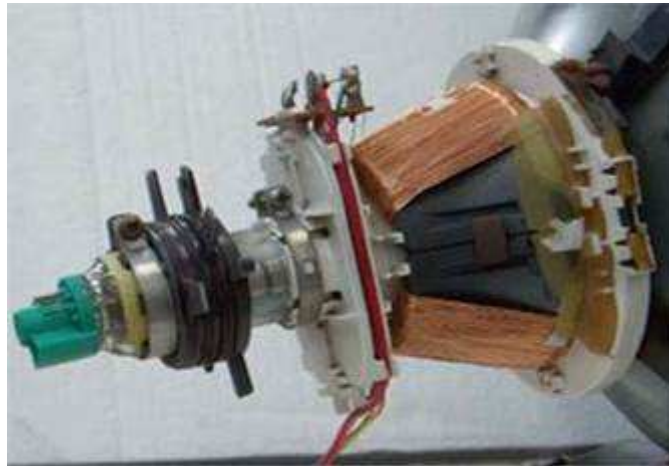


Figure 1.4. Déflecteur électromagnétique d'un tube cathodique comportant des éléments en cuivre plastique ; résine époxy ; acier ; verre ; céramique... etc. [54]

Tableau 1.3. Pourcentage des matériaux utilisés dans la fabrication de quatre EEE différents [55]

Matériaux	Télévision	Machine a lavé	Climatiseur	Réfrigérateur
Verre [%]	57	-	-	-
Plastique [%]	23	36	11	40
Fer [%]	10	53	55	50
Cuivre [%]	3	4	17	4
Aluminium [%]	2	3	7	3
Autres [%]	5	4	10	3

Selon *K. Makenji & al* [56] et d'un point de vue énergétique, le recyclage des matériaux à partir des *DEEE* est plus rentable par rapport à l'extraction de ces produits à partir des ressources naturelles. Le tableau 1.4 indique l'estimation de l'énergie économisée lors du recyclage de quelques matériaux récupérés à partir des *DEEE*.

Tableau 1.4. Energie économisée par le recyclage des DEEE [56]

Matériaux	Energie économisé (%)
Aluminium	95
Cuivre	85
Plomb	65
Produit en plastic	> 80

Bien que le recyclage des DEEE permette d'économiser une quantité considérable d'énergie, il faut en amont passer par l'étape de tri sélectif qui demeure très compliquée

lorsqu'il s'agit du traitement des équipements constitués par des éléments hétérogènes. Dans des situations similaires un traitement manuel est appliqué au début de la chaîne de tri (Figure 1.5). Dans cette chaîne de tri, des opérateurs procèdent à la sélection et au tri des DEEE transportés par un tapis convoyeur. Chaque opérateur peut sélectionner un ou plusieurs types de déchets en même temps. Le but de cette opération consiste à sélectionner les éléments homogènes des équipements et les envoyer vers une chaîne de recyclage. La pureté des déchets homogènes obtenus par cette opération dépasse généralement les 95% [56].



Figure 1.5. Traitement manuelle des DEEE. [56]

Le reste, c'est-à-dire les éléments hétérogènes des *DEEE*, sont expédiés généralement vers d'autres chaînes de traitement où ils vont subir une réduction de taille en première étape donc une dissociation des éléments de matériaux différents. Le produit obtenu peut être traité ensuite par des techniques qui incluent des procédés mécaniques, électriques, magnétiques, thermiques, ...etc. (Figure 1.6).

1.4.1 Réduction de la taille des DEEE

Le traitement des *DEEE* hétérogènes commence généralement par une étape de réduction de taille (déchiquetage et/ou broyage et/ou granulation). Dans cette étape les *DEEE* sont soumis à l'action des forces brutales des marteaux, boules ou des lames en mouvement dans un compartiment fermé [57]. Le but de ces procédés consiste à libérer les éléments constituant un objet hétérogène. Le même procédé est utilisé généralement dans l'industrie des minerais, l'industrie des produits chimiques et pharmaceutiques.

Dans le cas du traitement des *DEEE*, l'utilisation d'un procédé de granulation doit porter le déchet à un certain degré de dissociation [57]. Selon W. Schubert [58] le degré de dissociation d'un déchet récupéré à la sortie d'un broyeur est défini par le pourcentage du produit dissocié par rapport à la masse totale de l'échantillon.

$$D_d = \frac{M_{hm}}{M_{ech}} \quad (1.1)$$

Où D_d est le degré de dissociation des déchets récupérés à la sortie d'un broyeur, M_{hm} la masse du produit homogène et M_{ech} la masse de l'échantillon

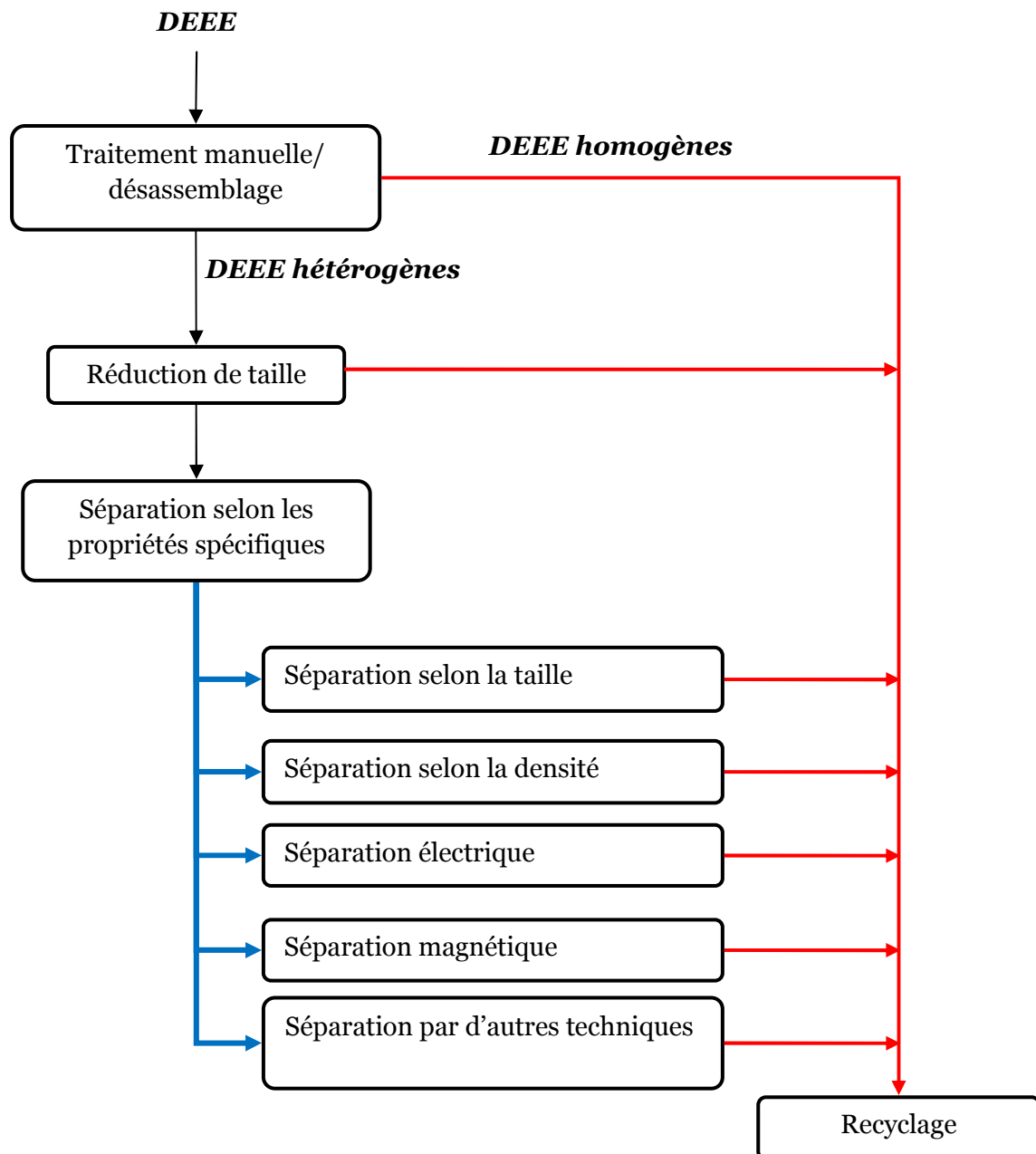


Figure 1.6. Méthode de séparation des DEEE basées sur les méthodes de traitement des minerais.

La figure 1.7 montre un exemple d'un échantillon de déchets de câbles électriques récupéré à la sortie d'un broyeur. La présence des particules de cuivre encapsulées par des matériaux isolants réduit le degré de dissociation de l'échantillon. Ainsi la pureté des produits récupérés à la sortie des processus de séparation exécutés dans l'étape suivante se trouve-t-elle diminuée.

Le degré de dissociation D_d représente un paramètre très important dans la réussite ou non d'un processus de séparation quelconque. D'un côté et selon *S. Zhang & al* [59] le broyage des circuits imprimés électroniques à des tailles inférieures à 2 mm permet l'obtention d'un produit granulaire caractérisé par un degré de dissociation très élevé. D'un autre côté les travaux de *H. Masuda & al* [60] montrent que l'énergie consommée dans l'étape

de broyage est inversement proportionnelle à la taille des particules obtenues à la sortie du broyeur. Donc une minimisation excessive de la taille des particules est parfois inutile et engendre une perte d'énergie considérable.

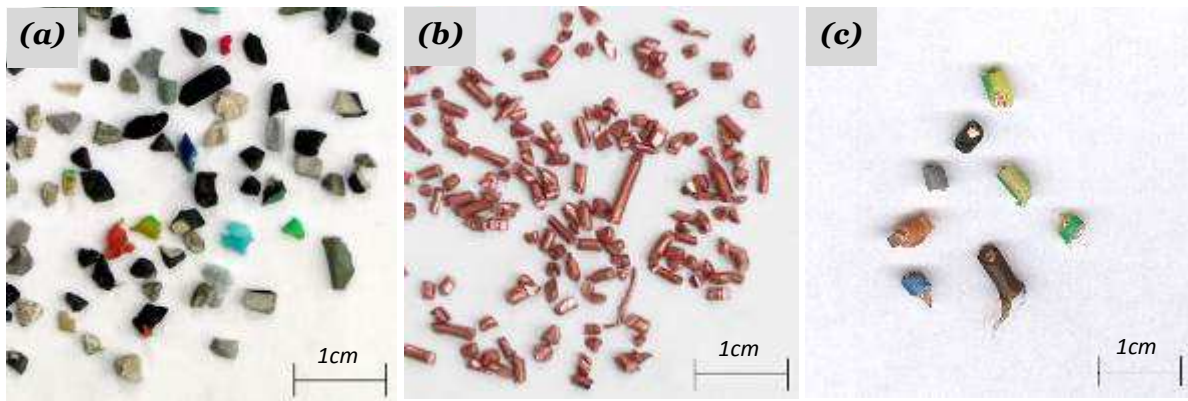


Figure 1.7. Déchet de câble électrique récupéré à la sortie d'un broyeur (a-b) : granules homogènes ; (c) : granules hétérogènes

Actuellement il existe différentes installations exploitées dans le broyage des DEEE. Le choix de l'installation appropriée est guidé généralement par la nature des déchets à broyer (métallique et/ou non métallique) la taille et la forme des particules désirées, la capacité productive et l'énergie consommée par l'installation. Parmi les installations les plus compatibles et les plus utilisées dans les applications de recyclage des DEEE, citons les: broyeur à marteaux, broyeur à cylindre denté, broyeur à lames.

1.4.1.1 Broyeur à marteaux

Dans cette installation les matériaux à broyer sont introduits dans la chambre de broyage par une ouverture qui se trouve en dessous de l'installation. En contact avec les marteaux liés au rotor (Figure 1.8) les particules sont projetées avec une grande vitesse vers les barres d'impact. Après avoir subi une réduction de taille, les particules quittent la chambre de broyage à travers l'espace qui se trouve entre les barres d'impact.

Pour contrôler le processus de broyage ainsi que la taille des particules obtenues, cette installation nous donne la possibilité de régler l'espace entre les barres d'impact et la vitesse de rotation du rotor. Les résultats d'une application de broyage des DEEE par un broyeur à marteau modèle (Alpine Omniplex type 80/60) sont représentés sur la figure 1.9.

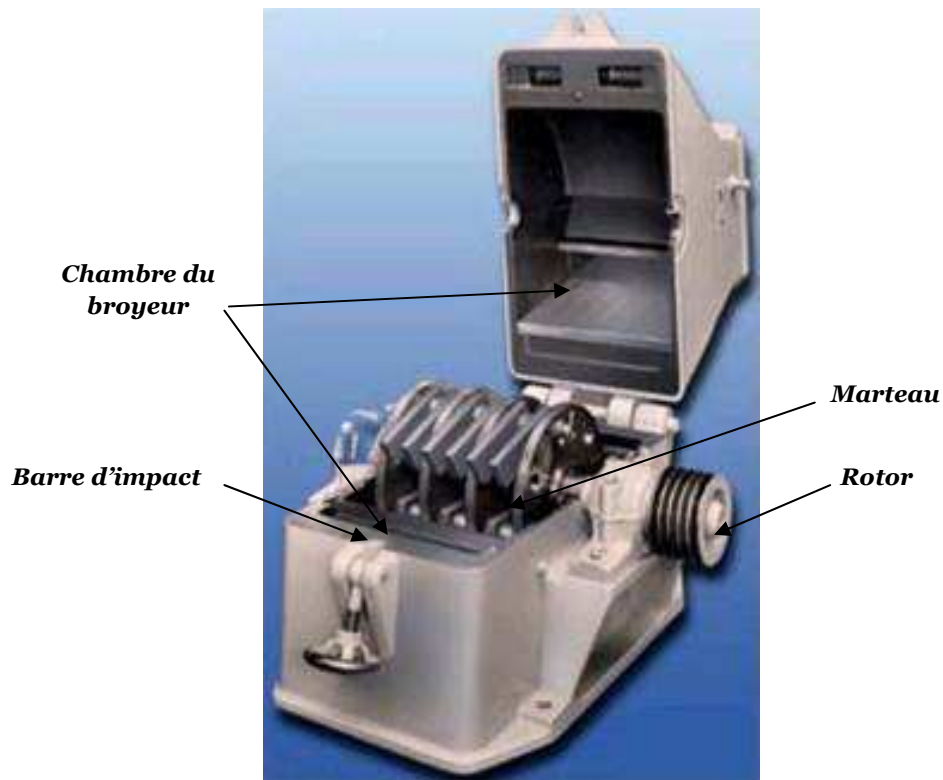


Figure 1.8. Broyeur à marteau

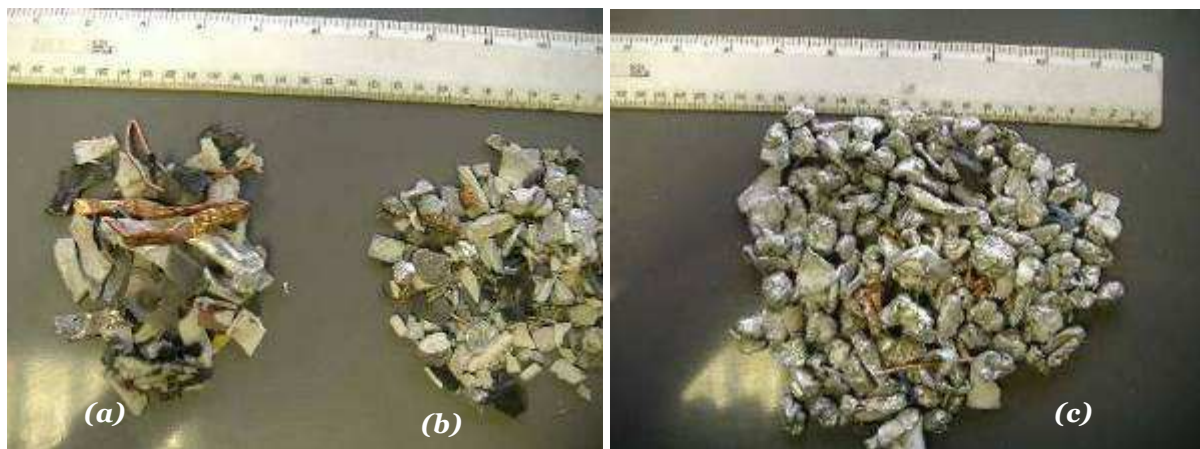


Figure 1.9. Résultats du broyage des DEEE obtenus à la sortie d'un broyeur à marteau modèle (Alpine Omniplex type 80/60) ; Espace entre barre d'impact 20mm ; vitesse de rotation du rotor 1000tr/min ; nombre des marteaux 18. (a)DEEE avant broyage ; (b) après broyage ; (c) forme des particules métallique après broyage [61]

1.4.1.2 Broyeur à cylindre denté

Dans cette installation les DEEE sont introduits à l'aide d'un bras hydraulique vers un cylindre tournant et une lame fixe dentée (Figure 1.10). Les arrêtes des dents de la lame fixe et les dents du cylindre forment des couteaux capables de couper et de réduire ainsi la taille des DEEE. Les déchets coupés ainsi introduits à l'intérieur de la chambre de broyage sont pressés contre un écran incurvé pendant la rotation du cylindre. Dans cette position la

réduction de la taille des morceaux de DEEE se poursuivra jusqu'à ce que les morceaux soient de tailles inférieures à celles des trous de l'écran/grille. Selon la matière des dents choisis le broyeur à cylindre denté peut traiter des DEEE constitués de produits métalliques et non métalliques tel que les câbles électriques, contenant des éléments en fer, en cuivre et en aluminium.



Figure 1.10. Broyeur à cylindre denté



Figure 1.11. Résultat du broyage des carcasses de TV en plastique à l'aide d'un broyeur à cylindre denté modèle (Wagner 40) équipé d'un écran de 20 mm ;(a) : avant broyage ; (b) après broyage [61]

La figure 1.11 montre le résultat d'une application de broyage des carcasses en plastique à l'aide d'un broyeur à cylindre denté modèle (*Wagner 40*). Selon les essais effectués par *K. Freegard & al* [61] l'exploitation de ce type de modèle permet la réduction de la taille des déchets en plastique de *1500 mm* à *20 mm* en un seul passage avec une capacité

productive de 1.6 t/h . La taille et la forme des déchets obtenus par ce type de broyeur sont représentées dans la figure 1.11.

1.4.1.3 Broyeur à lames

L'élément principal de cette installation est un tambour tournant équipé d'une série de lames. Les lames tournant à vitesse constante viennent frôler une autre série de lames fixes dans la chambre de broyage. Les deux séries de lames sont placées de façons opposées avec un certain angle par rapport à l'horizontale. Avec cette disposition les lames forment des ciseaux qui coupent avec une grande finesse les DEEE introduits dans la chambre de broyage. (Figure 1.12).

Le mouvement du tambour permet de balayer les particules sur un écran perforé. Le choix du diamètre des trous sur l'écran permet le contrôle de la taille des particules obtenues à la sortie du broyeur. Les résultats du broyage des *DEEE* par un broyeur à lames (*Modèle Herbold SML 60/100*) sont représentés dans la figure 1.13. Cette figure montre le résultat d'une application obtenue avec un écran perforé dont le diamètre des trous est de 10 mm .

Ce type d'installation est très adapté au traitement des produits en plastique pré déchiquetés. Cependant, la présence des produits métalliques peut abîmer les lames du broyeur. La capacité productive de cette application peut atteindre les 4.8 t/h . Les particules obtenues à la sortie du broyeur possèdent une taille presque uniforme.

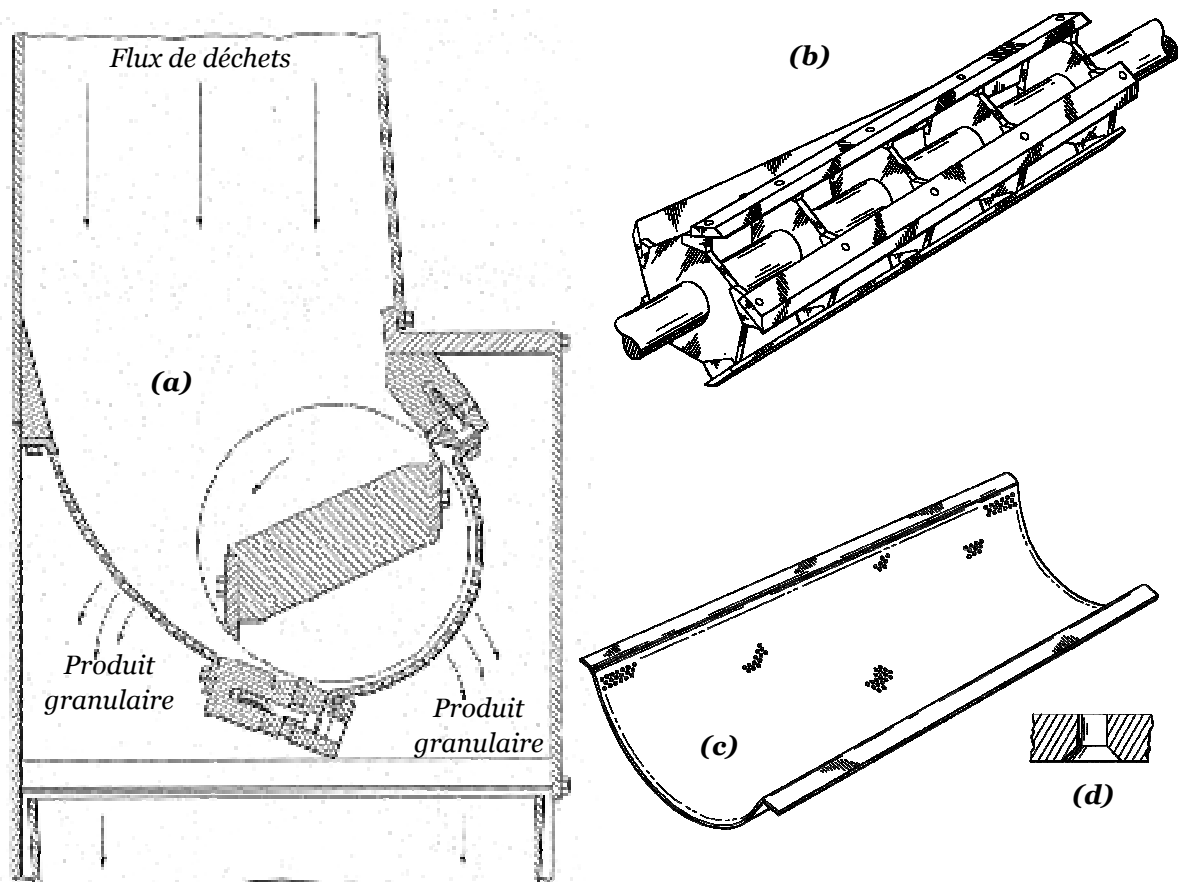


Figure 1.12. Broyeur à lames : (b) la disposition des lames sur le rotor du broyeur ; (c) forme de l'écran ; (d) la formes des trous exécuter sur l'écran. [62]

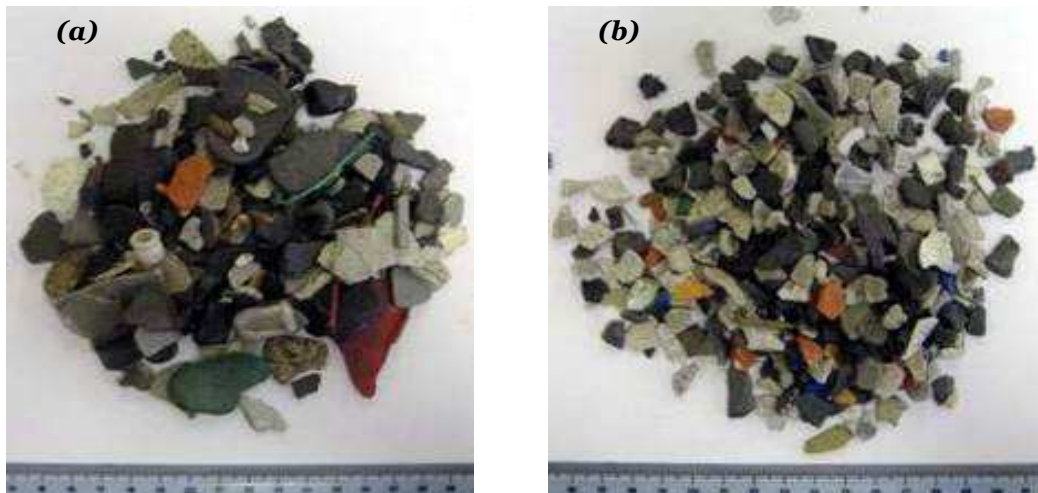


Figure 1.13. Résultats du broyage des DEEE obtenus à la sortie d'un broyeur à lames ; (a) DEEE avant broyage ; (b) après broyage ; [61]

Pour que la matière plastique recyclée soit commercialisée, il faut qu'elle réponde à deux critères : un critère technique garantissant la qualité de la matière recyclée en terme de performance et d'exigences de santé et de sécurité ; un critère commercial correspondant à ce qu'est prêt à dépenser l'acheteur pour avoir un produit à base de polymère recyclé.

1.4.2 Tri des particules broyées

Selon les types de fractions à séparer, différentes technologies peuvent être utilisées pour les trier.

1.4.2.1 Tri mécanique

a) Le criblage

Parmi les techniques mécaniques les plus utilisées pour la séparation des matériaux en fonction de leur taille, est celle du criblage. Il existe trois principaux types de criblage utilisés dans la récupération des matériaux: le criblage au trommel, le criblage à disque et le crible vibrant. [63-65]

- **Criblage au trommel**

Le trommel est un appareil de séparation cylindrique perforé rotatif qui sépare les matériaux en de deux fractions granulométrique ou plus. Le tambour est fixé sur une structure légèrement incliné. Lors de son mouvement rotatif les plus petites particules traversent les perforations du tamis tandis que les plus grosses particules se déplacent jusqu'à son extrémité. Les deux fractions peuvent être empilées séparément ou recueillis par des convoyeurs. La figure 1.14 montre un exemple de criblage au trommel.



Figure 1.14. Crible au trommel [66].

- **Crible vibrant**

Le crible vibrant est constitué d'un cadre de support qui maintient les grilles en position, et des mécanismes d'actionnement qui vibrent ou secouent les grilles sur le plan vertical pour permettre le déplacement de la matière à tamiser le long de la surface et sa séparation en fonction des différentes granulométries.

Lors de la vibration de crible le matériau à tamiser qui a des tailles plus petites que les ouvertures des grilles tombe dans une bouche d'évacuations tandis que les plus grosses particules sortent par une autre bouche d'évacuation. Ils sont réceptionnés dans un conteneur ou sur un convoyeur. La figure 1.15 montre un exemple de crible vibrant.



Figure 1.15. Crible vibrant [67].

- **Criblage à disque**

Il consiste en une série de disques montés parallèlement sur des axes (rotors) positionnés de manière à créer des espaces réguliers entre les disques et les axes. Ces espaces, interstitiels déterminent la taille des ouvertures du tamis. Lorsque les arbres mis en rotation, les plus petites particules tombent entre les espaces de disque tandis que les plus grosses particules continue son chemin sur le niveau de criblage grâce à la rotation des arbres. La figure 1.16 montre un exemple de crible à disque.



Figure 1.16. Crible à disque [68].

L'efficacité du tamisage peut être affectée par des facteurs liés au matériau [69], aux caractéristiques de l'équipement et au type du mouvement appliqué au tamis.

Tableau 1.5. Facteurs peuvent affecter l'efficacité du tamisage [70].

Les principaux facteurs concernant le matériau	Les facteurs clés concernant l'équipement	Les facteurs considérés concernant le mouvement appliqué au tamis
• Densité • Distribution de la taille des particules • Formes de particules • Surfaces de particules	• Zone de tamis • Pourcentage de surface perforé • Diamètre de trou • Formes de trous • Epaisseur du tamis	• La fréquence • Amplitude et direction de la vibration • Angle d'inclinaison • Temps de traitement

b) Tri aérodynamique

La classification par l'air ou aéraulique est une opération utilisée pour séparer le flux de déchets solide légers (papier, plastique, bois,...etc.) des matériaux plus lourdes (métaux, verre, céramiqueetc.) en fonction des différentes caractéristiques aérodynamique (taille,

densité et géométrie). Cette technique inclut l'interaction entre le courant de déplacement d'air, les particules de déchets broyées et la force de gravitation dans une chambre.

Chaque particule mise dans la chambre de séparation, elle subit deux forces dominantes : la force de traction et la force de gravitation appliquée dans différentes directions, entraînant les particules les plus lourdes à tomber tandis que les composants les plus légers tendent à se déposer sur le courant d'air.

Dans le traitement des déchets, L'air contrôlé est considéré comme l'une des technologies de séparation de base. Il est polyvalent et offre une plus grande flexibilité. Il garantit une grande efficacité dans le tri. En utilisant de l'air, le séparateur à tambour associé à un ventilateur de recirculation est la meilleure solution de séparation fondée sur la densité des matériaux à des capacités d'entrée pouvant atteindre 100 t/h [71]. La figure 1.17 montre un exemple de séparateur aéraulique pour flux de matières plus grands et plus fins.

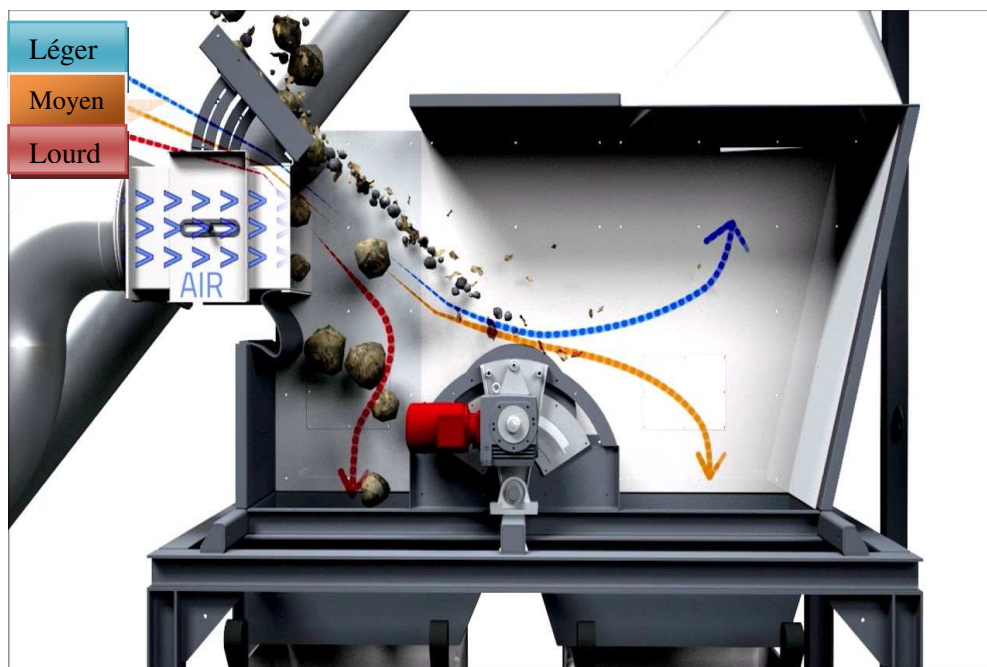


Figure 1.17. Séparateur aéraulique [72].

1.4.2.2 Tri magnétique

Il est utilisé pour la récupération des métaux ferreux à partir de métaux non ferreux et d'autres matériaux non magnétiques présents dans un flux de déchets. [64] [73 -74].

La séparation magnétique est basée sur les propriétés magnétiques des matériaux traités et du champ magnétique. La propriété magnétique la plus intéressante lors du traitement de matériaux qui sont soumis à un champ magnétique est la susceptibilité magnétique (X).

$$X = \frac{M}{H} \quad (1.2)$$

Où :

M (A/m) est l'aimantation ;

H (A/m) est le champ magnétique ;

L'intensité du champ dans un matériau soumis à un champ magnétique est donnée par :

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1.3)$$

B (Tesla) : Induction magnétique ;

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.

Les matériaux peuvent donc être classés en trois catégories en fonction de la susceptibilité magnétique comme suit [75] :

- **Matériaux diamagnétiques** : ce sont des matériaux qui correspondent à une susceptibilité négative et faible car le champ magnétique induit est en opposition au champ magnétique externe, produisant une répulsion de faible intensité et donc les matériaux sont repoussés par le champ magnétique externe.

Exemples : cuivre, mercure, or, argent, zinc, plomb, ...etc.

- **Matériaux paramagnétiques** : sont des matériaux caractérisés par une susceptibilité faible et positive. Il se rencontre dans des substances qui possèdent des dipôles magnétiques atomiques ayant tendance à s'aligner suivant l'orientation du champ magnétique externe, ce qui provoque une attraction faible des matériaux par les aimants.

Exemples : aluminium, sodium, manganèse, étain, chrome, platine, palladium, ...etc.

- **Matériaux ferromagnétiques** : sont des matériaux qui présentent une susceptibilité positive et élevée car le dipôle total d'un atome ferromagnétique interagit fortement avec les dipôles voisins, et ils s'alignent dans une direction commune. Ces substances sont fortement attirées par les pôles d'un aimant.

Exemple : fer, de cobalt ou de nickel, ...etc.

Les trois types de séparateurs magnétiques couramment utilisés sont [71] :

a) L'over-band : C'est un système magnétique fixe placé au-dessus d'un convoyeur et autour duquel tourne une bande d'évacuation entraînée par un moto-réducteur (Figure 1.18). Sous l'effet de l'attraction magnétique, les produits ferreux acheminés par le convoyeur sont entraînés en dehors de la ligne de transport du mélange.

b) La poulie magnétique : Elle se présente sous la forme d'un cylindre monté sur un axe (Figure 1.19). Il contient un aimant permanent ou un électro aimant, qui entraîne la formation d'un champ magnétique autour de sa circonférence, permettant de retenir les particules de fer qui circulent et entraînés en dessous du convoyeur. Ils tombent alors par gravité.

c) Le tambour magnétique : C'est un tambour rotatif à l'intérieur duquel un aimant forme une demi-circonférence (Figures 1.20). Lorsque les matériaux tombent sur le tambour, les pièces ferromagnétiques restent plaquées contre le tambour et tombent après avoir quitté la

zone du champ magnétique. Les autres pièces tombent par gravité directement dans une goulotte.

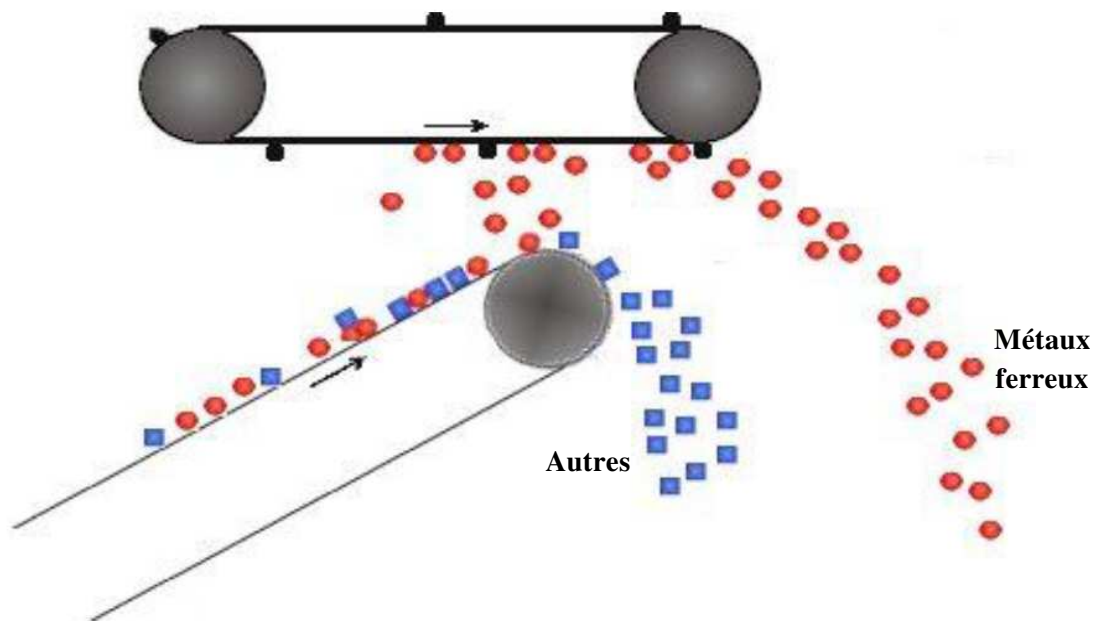


Figure 1.18. Principe de base d'un séparateur magnétique à over-band [71].

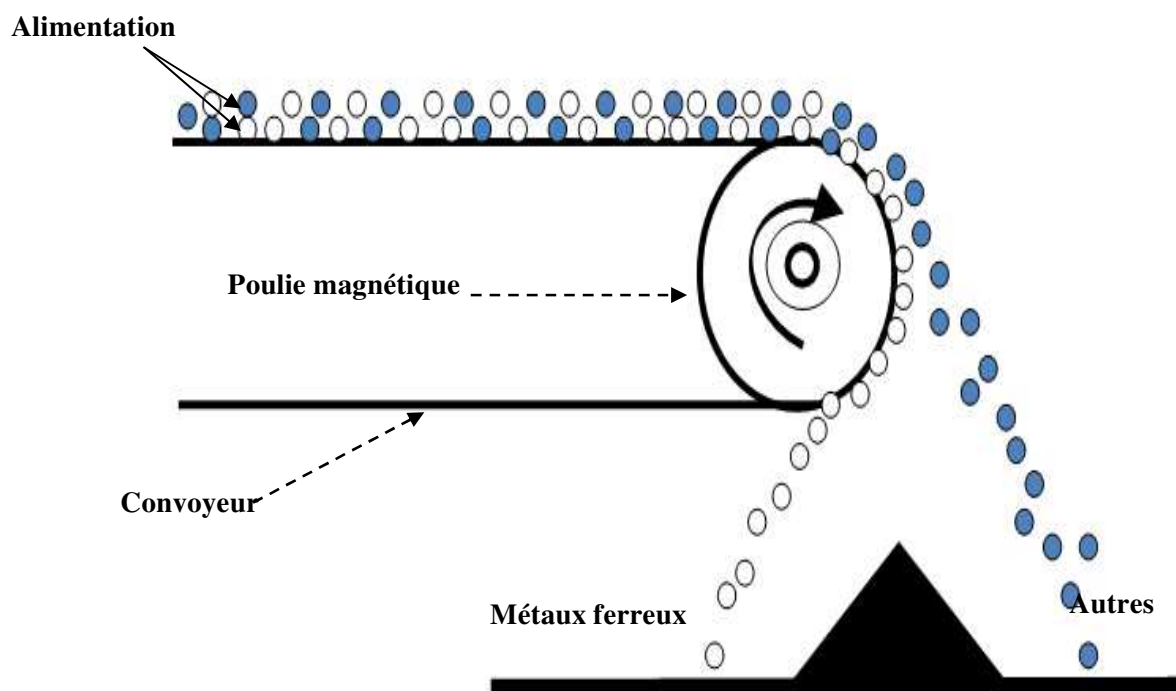


Figure 1.19. Principe de base d'un séparateur magnétique par poulie magnétique.

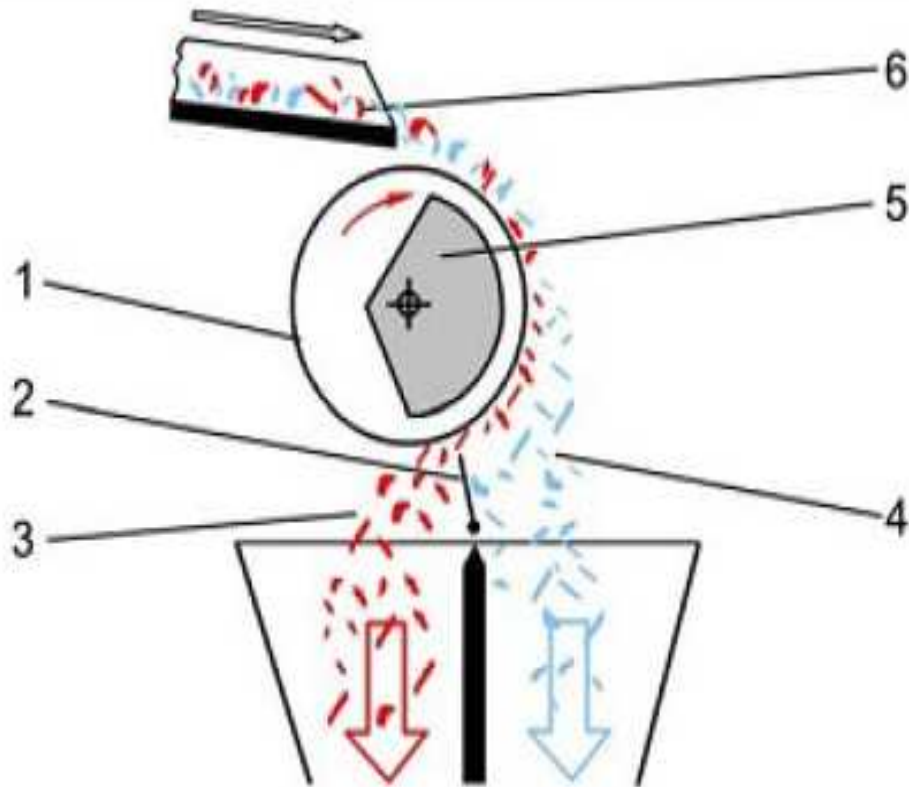


Figure 1.20. Principe de base d'un séparateur magnétique à tambour [71].

1. Tambour rotatif (amagnétique), 2.Tôle de séparation réglable, 3.Composants magnétisables ; 4.Composants non magnétisables ; 5.Aiment permanent ; 6.Charge d'alimentation.

1.4.2.3 Tri par courant de Foucault

Le séparateur à courant de Foucault (Figure 1.21) est largement utilisé pour le recyclage de métaux non ferreux provenant des déchets industriel ou municipaux solide telle qu'aluminium, cuivre, laiton, ...etc. Grâce à l'application d'un champ électromagnétique [63-64], [76-77].

La séparation par courant de Foucault est réalisée on en exposant les matériaux à un champ magnétique variable qui induit dans les particules conductrices un courant électrique appelé courant de Foucault. Le courant de Foucault induit produit un champ magnétique qui s'oppose au champ créé par la rotation de rotor de séparateur. Les particules métalliques non ferreux seront accélérées et éjectées par la force magnétique (force de répulsion), les inertes tels que le plastique, le verre et les autres matières recyclables sèches tomberont simplement sur le rotor, créant ainsi deux flux de matière, permettant leur séparation et les particules métalliques ferreux seront attirées par les aimants.

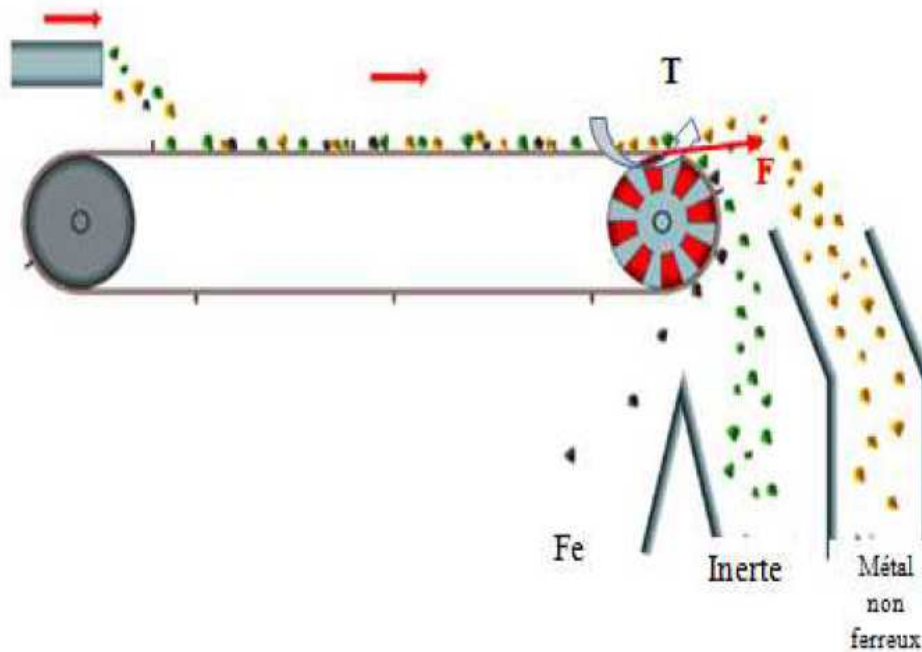


Figure 1.21. Séparation des différentes particules avec un séparateur à courants de Foucault.

1.4.2.4 Tri électrostatique

Les techniques électrostatiques ont été largement utilisées pour la séparation à sec des minéraux présentant des différences de conductivité électrique [64].

La méthode de séparation électrostatique a été améliorée et devenue la plus innovante pour une séparation granulométrique efficace dans le processus de recyclage des déchets industriels, en particulier les déchets d'équipement électrique et électronique DEEE. En exploitant les champs électriques générés, la fraction la plus conductrice peut être séparée de la fraction diélectrique moins conductrice. Cette technologie est caractérisée par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien et aussi par une faible consommation d'énergie.

Le principe de séparation électrostatique est basé sur le chargement des particules par différentes techniques, notamment : l'effet triboélectrique, l'effet couronne et l'induction électrostatique (ces trois phénomènes seront détaillés dans le chapitre suivant). Après le chargement, les particules sont introduites dans la zone du champ électrique créé entre les électrodes reliées à des sources haute tension DC. Sous l'action des plusieurs forces les particules se séparent et elles se dirigent vers les collecteurs de récupération.

1.5 Conclusion

L'activité industrielle de l'être humain a induit des dégâts considérables à la planète, une production mondiale de déchets qui représente de 3,4 à 4 milliards de tonnes par an. Le recyclage s'est imposé comme la solution de choix viable pour l'élimination des déchets, non seulement il représente un moyen efficace pour la protection de l'environnement, mais aussi il préserve les ressources d'énergie et de la matière. L'une des phases incontournable du recyclage est la réduction de la taille des déchets, les machines utilisées pour ce procédé sont soit des broyeurs, soit des atomiseurs. La deuxième phase est généralement le tri des particules issues de différentes tailles, soit par des méthodes mécaniques, aérodynamiques,

magnétiques ou électrostatiques. Le choix de la méthode de séparation dépend à la fois de la nature de déchets et de la taille des particules.

Le prochain chapitre décrira la séparation électrostatique des particules, qui représente la méthode de tri la plus efficace. C'est une technologie non polluante caractérisée par une faible consommation d'énergie ainsi que par des coûts réduits de maintenance et d'entretien.



CHAPITRE 2

SEPARATEURS ELECTROSTATIQUES

CHAPITRE 2 : SEPARATEURS ELECTROSTATIQUES

Le processus de recyclage est utilisé pour réduire le volume de déchets et les valoriser. Afin de récupérer les matériaux provenant de ces déchets, différentes techniques sont recommandées [78]. Les technologies électrostatiques sont considérées comme la solution la plus efficace [79] grâce à leur faible consommation d'énergie, leur simplicité et leur coût de maintenance modéré [80-85].

La séparation électrostatique est une méthode basée sur l'attraction ou la répulsion des particules chargées sous l'influence d'un champ électrique très élevé [86]. Cette technique représente de nos jours, une technologie moderne de recyclage des matériaux usagés issus des déchets industriels.

Dans ce chapitre nous allons présenter en premier lieu les différents mécanismes permettant le chargement des particules en vue de leur séparation dans un champ électrique intense ainsi que les dispositifs correspondants.

Pour la deuxième partie, nous allons classer les différents dispositifs de séparation électrostatique selon le mouvement de leurs électrodes, la construction et le principe de fonctionnement de chaque séparateur.

2.1 Mode de chargement électrique

Une condition de la séparation électrostatique d'un mélange de matériaux, granulaires ou pulvérulents, les composants d'un mélange doivent acquérir des différentes charges (intensité et/ou polarité). Plusieurs mécanismes physiques peuvent générer ces charges électriques [87-90]. Les trois principales techniques sont : l'induction électrostatique, la décharge couronne et la triboélectricité.

2.1.1 Induction électrostatique

2.1.1.1 Phénomène physique

L'induction électrostatique est un phénomène créant un déplacement de charges électriques dans un objet, initialement électriquement neutre, par le biais d'un second objet électriquement chargé, sans contact direct entre eux. L'objet chargé génère un champ électrique qui provoque la polarisation de l'objet neutre. Ainsi, les charges positives et négatives présentes dans l'objet neutre vont se séparer et s'organiser en deux pôles situés aux deux extrémités de l'objet. Si celui-ci est conducteur et en contact avec la terre, les charges proches du point de contact s'évacuent vers la terre. De ce fait, lorsque l'objet est détaché de la terre, il emporte une charge non nulle.

Par définition un objet isolant ne transmet pas de charges électriques. Il ne peut donc pas être chargé par induction électrostatique [91].

2.1.1.2 Dispositifs utilisés

Les électrodes utilisées pour générer un champ électrique nécessaire à l'induction électrostatique sont souvent de forme cylindrique ou elliptique. La présence d'arrêtes sur ces électrodes est déconseillé afin d'éviter toute décharge et diminuer le risque de passage à l'arc électrique. La forme elliptique est beaucoup utilisée dans les séparateurs électrostatiques pour étendre et uniformiser le champ. La figure 2.1 représente deux configurations d'électrodes destinées à l'induction électrostatique [92-93].

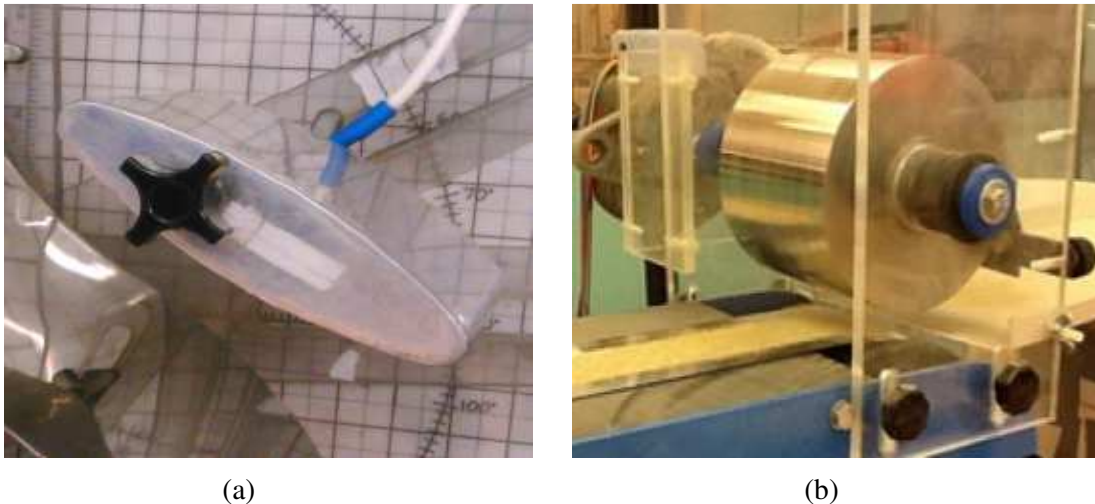


Figure 2.1. Electrodes utilisées pour l'induction électrostatique ; (a) : Electrode elliptique ; (b) : Electrode cylindrique tournante.

2.1.2 L'effet couronne

L'effet couronne possède actuellement bon nombre d'applications dans divers domaines. Cet effet est notamment utilisé dans les générateurs d'ozone pour le traitement de l'eau et le contrôle des odeurs, la neutralisation [94], le chargement électrique de films plastiques et de média textiles [95], et bien évidemment dans la séparation électrostatique [96-97].

2.1.2.1 Phénomène physique

La décharge couronne est créée entre deux électrodes fortement dissymétriques dont l'une dite cathode se présentant sous forme d'un fil ou d'une pointe ayant un faible rayon de courbure relié à la source haut tension et l'autre est l'anode, qui est une plaque reliée à la terre. La décharge couronne apparaît au voisinage de l'électrode de faible rayon si le champ électrique est suffisant pour ioniser le gaz [94]. Sous l'effet de champ électrique, les électrons naturellement libres présents dans l'air accélèrent et acquièrent suffisamment d'énergie cinétique pour ioniser une molécule d'air ainsi libérant un électron ou plus. En multipliant leurs nombres et continuant leur trajectoire vers l'électrode de polarité opposée (anode) provoquant le phénomène d'avalanche électronique (Figure 2.2). Les molécules ayant libérées des électrons sont devenues des ions positifs et sont donc attirées par l'électrode cathode. De cette façon, elles regagnent un électron et redeviennent neutres. Ce phénomène cesse jusqu'à

ce que l'électron accéléré ne peut plus ioniser d'autre molécule à cause de son énergie cinétique réduite, donc ce phénomène est limité dans l'espace, il se passe à quelques micromètres de l'électrode couronne. Au-delà de cette zone, les électrons vont alors s'associer aux molécules de l'air et forment des ions négatifs, formant une charge d'espace qui se dirigera vers l'électrode anode.

Ces ions entrent en contact avec les particules isolantes et leurs durées de vie sont suffisamment longues pour que la séparation des matériaux ait lieu. Les particules, soumises au flux ionique, vont se charger négativement [98-100].

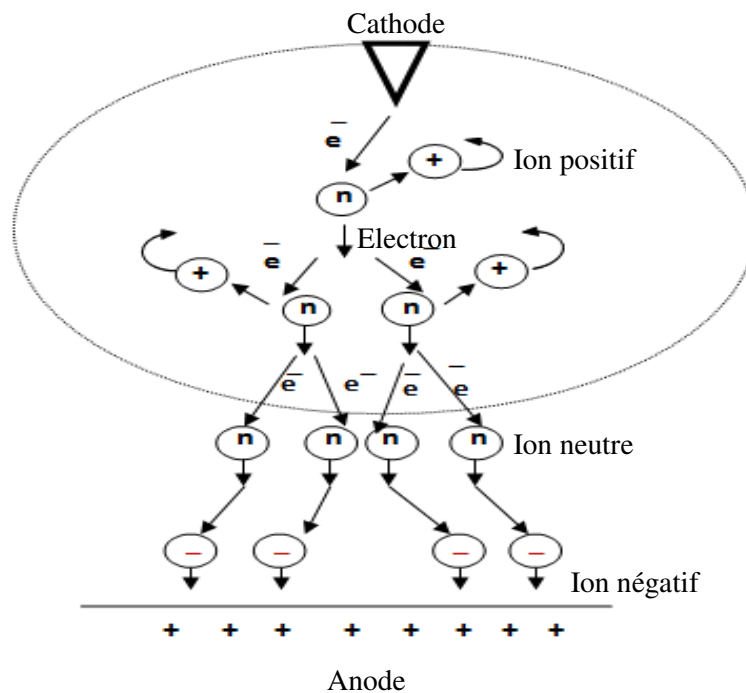


Figure 2.2. Génération d'une avalanche électronique et de la décharge couronne

2.1.2.2 Dispositifs utilisés

Plusieurs types de configurations d'électrodes capables de produire la décharge couronne sont décrites dans la littérature. Les électrodes les plus couramment utilisées sont les électrodes à fil fin (Figure 2.3.b) et les électrodes à aiguilles (Figure 2.3.a). Les électrodes couronne à fil fin sont les plus utilisées dans l'industrie, à cause de la facilité de réalisation et leur faible coût de revient.

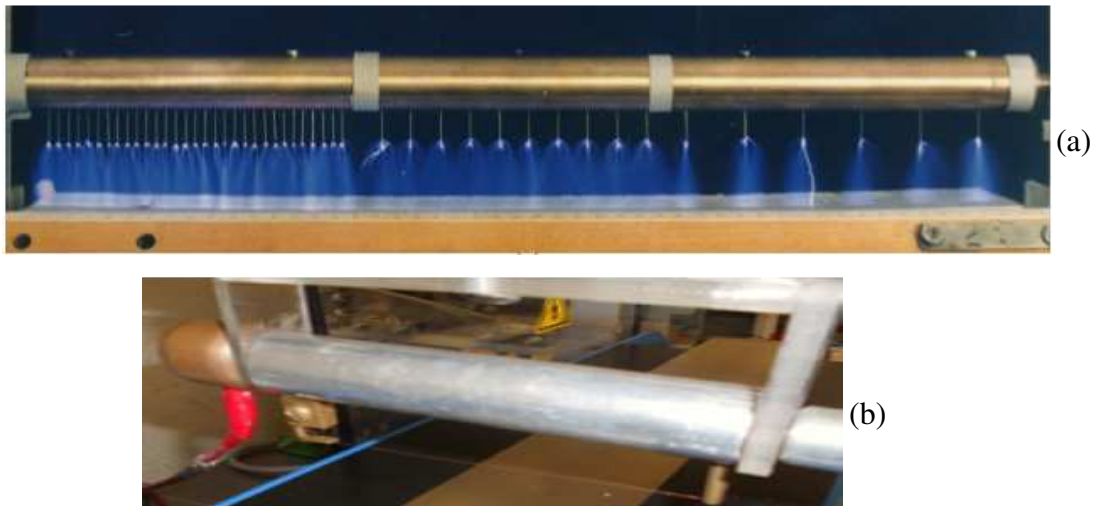


Figure 2.3. Différentes configurations d'électrodes couronnes. (a) Photographie d'une décharge couronne avec une électrode à aiguilles; (b): Photographie d'une électrode couronne à fil.

2.1.3 L'effet triboélectrique

2.1.3.1 Phénomène physique

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 charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement [101]. 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. L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux [102-107], ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés (Figure 2.4). C'est le mécanisme physique le plus utilisé pour charger des matériaux granulaires ou micronisées plastiques en vue de leur séparation dans un champ électrique intense [108-112].

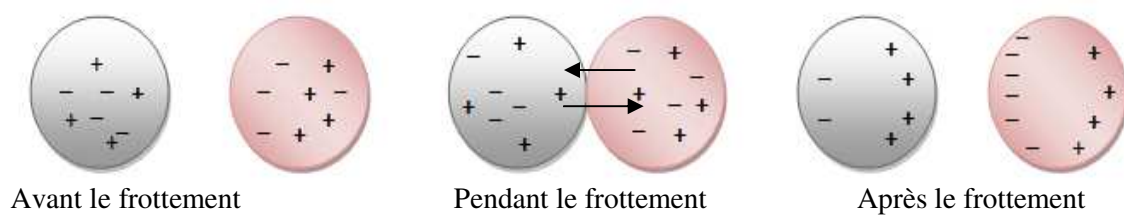


Figure 2.4. Transferts de charges électriques dus au frottement de deux corps ; l'un s'électrise positivement et l'autre négativement.

2.1.3.2 Dispositifs de chargement triboélectrique

Plusieurs recherches ont été effectuées sur les dispositifs de chargement triboélectrique de matériaux isolants : cylindre tournant [82], lames ou hélices rotatives [113-114], dispositif de vibration [104], [115-119], cyclone [120-122] ou encore lits fluidisés [103], [123-125].

a) Chargement par ventilateur

Les principaux éléments de cette installation sont (Figure 2.5) : le tube cylindrique isolant, le moteur à courant continu qui entraîne l'hélice isolante et le support métallique. Le dispositif utilise l'air ascendant qui donne naissance à des turbulences dans le tube contenant le mélange de particules, provoquant ainsi leur tribo-électrification lorsque celles-ci entrent en collisions entre-elles ou avec les parois du tube [114], [126]. Le mélange chargé est récupéré en pivotant le cylindre sans procéder à l'arrêt du moteur afin d'éviter l'adhérence des particules aux parois et permettre la récupération complète du contenu.

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

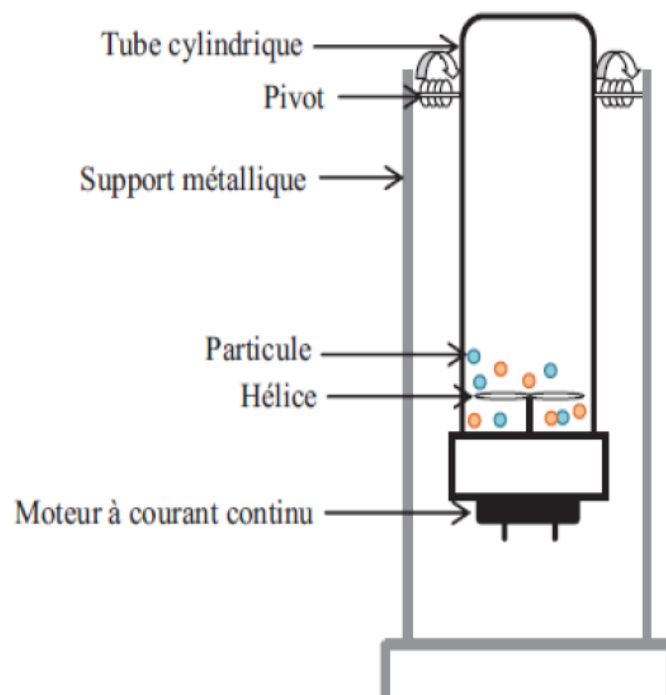


Figure 2.5. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur [114].

Ce dispositif peut être adapté à un fonctionnement continu (Figure 2.6) en introduisant les granules par sa partie supérieure, et en les récupérant chargés par sa partie inférieure.

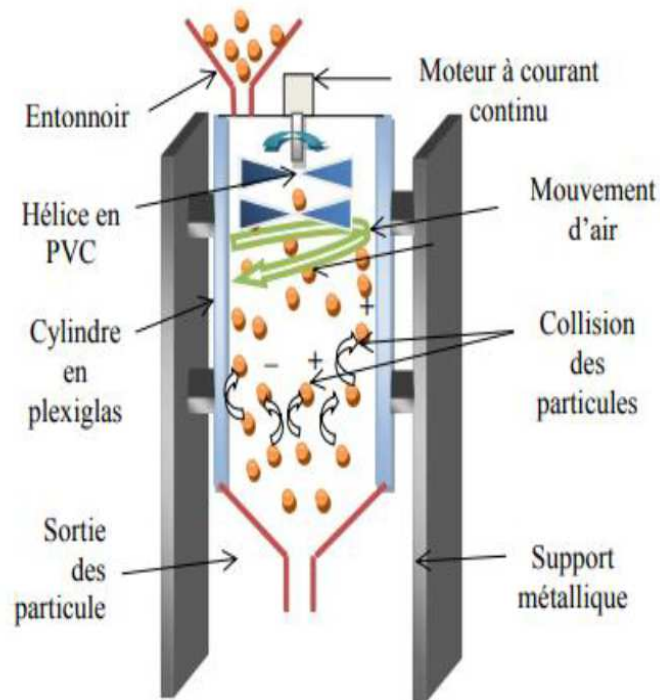


Figure 2.6. Dispositif de charge tribo-électrique à plusieurs hélices et à fonctionnement continu

b) Chargement par cyclone

Les particules qui vont rentrer à l'intérieur du cyclone à l'aide d'un ventilateur se chargent par frottement contre la paroi du cyclone [127-130]. Les particules descendent vers le bas par le mouvement de l'air qui traverse le cyclone (Figure 2.7), et atteint le fond. Puis, elles sortent par une ouverture en bas du cyclone. En fin les particules se chargent totalement.

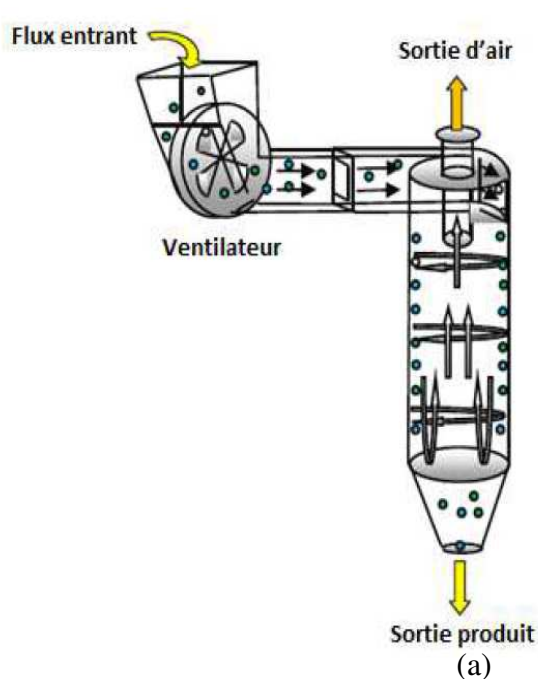


Figure 2.7. Représentation schématisée d'un dispositif de chargement par cyclone ; (a) principe de fonctionnement, (b) Photographie d'un dispositif de chargement par cyclone

c) Dispositif de chargement statique

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique en matière isolante ou métallique (Figure 2.8), à l'intérieur de laquelle sont disposées plusieurs plaques inclinées. Les particules glissent le long de ces plaques par gravitation et se chargent par frottement avec celles-ci (effet tribo-électrique) [127].

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

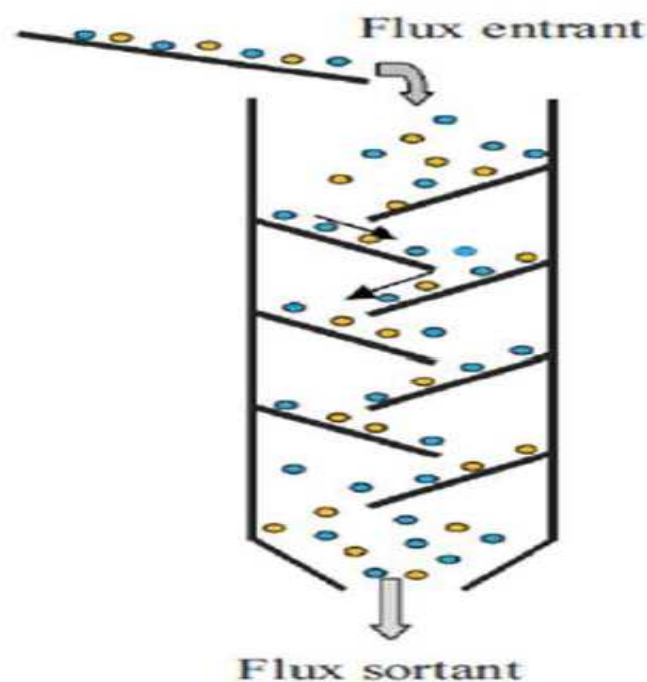


Figure 2.8. Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [127].

Pour une utilisation avec des mélanges pulvérulents, le dispositif doit être soumis à des vibrations, afin d'éviter l'agglomération des particules.

d) Dispositif de chargement par vibrations

Une autre solution pour charger les particules est représentée par le dispositif à vibrations (Figure 2.9). Le matériau à charger glisse dans des canaux en Zig-Zag mis en mouvement vibratoire [117], [131-132] sur les deux axes X et Y. 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.

La figure 2.10 représente un autre dispositif de charge par vibration [129] consiste à placer une boîte, dans laquelle sont déposées les particules à charger, sur un plateau vibrant. Les vibrations du plateau se transmettent aux particules par le biais de la boîte et vont

permettre leur frottement contre ses parois et entre elles, si le nombre de particules est suffisamment important.

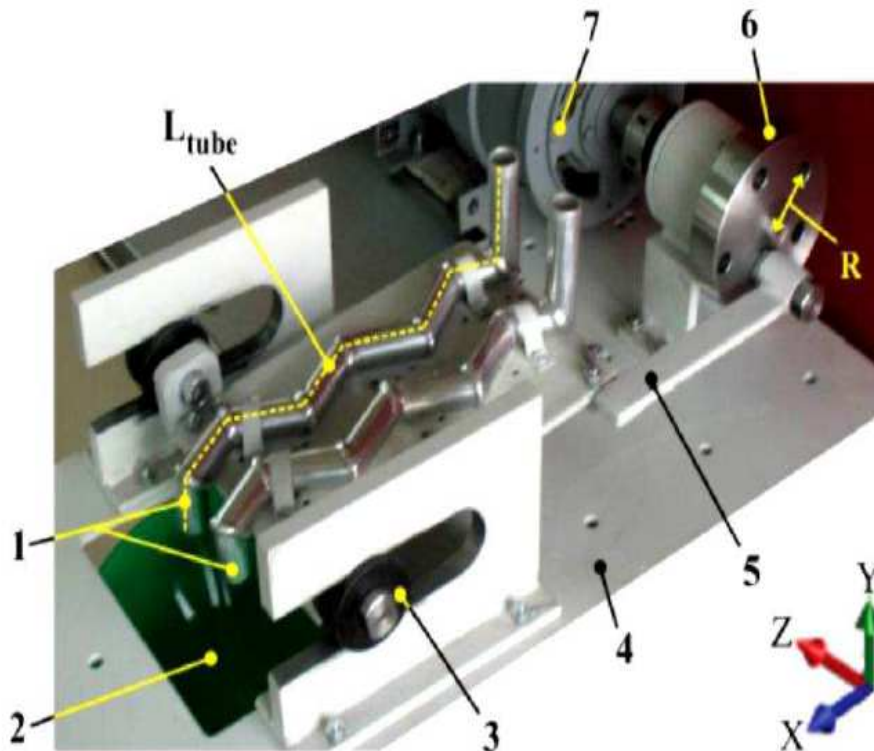
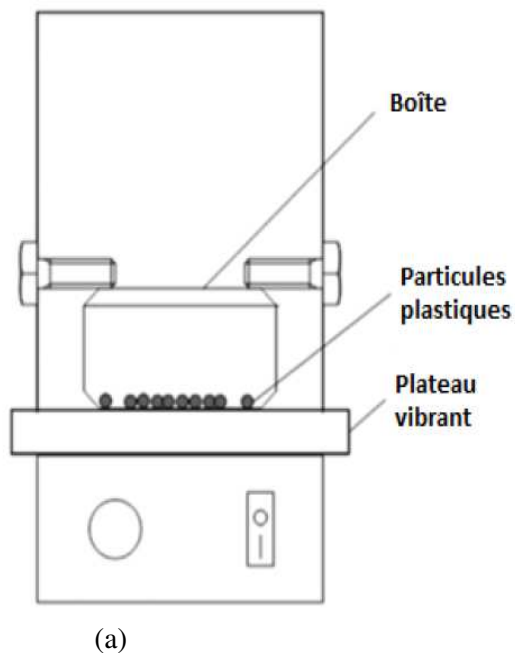
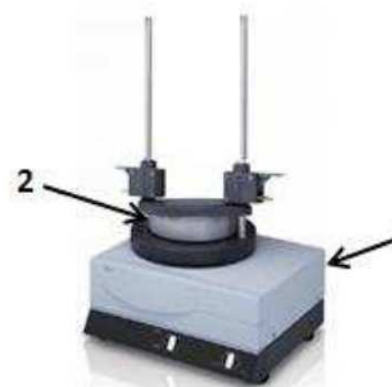


Figure 2.9. Dispositif à vibration ; (1) Tubes de charge ; (2) Sortie des particules chargées ; (3) Glissière ; (4) Support ; (5) Bielle ; (6) Manivelle ; (7) Moteur électrique ; (R) Rayon ; L_{tube} : Longueur du tube.



(a)



(b)

Figure 2.10. (a) Représentation schématisée d'un dispositif de charge triboélectrique vibrant ; (b) Dispositif de charge de marque Retsch ; (1) Dispositif vibrant ; (2) Boîte en acier inoxydable (Diam. : 160 mm).

e) Dispositif de chargement à cylindre tournant

Dans ce dispositif (Figure 2.11), les particules à charger sont introduites dans un entonnoir (1). Une vanne (2) permet de réguler le débit de particules entrant dans le cylindre creux (3) qui permet leur charge. Ce cylindre est lié à un moteur (4) dont la vitesse de rotation est variable. Sa longueur est modulable (200 mm, 400 mm ou 600 mm) et 3 ou 6 ailettes de 10 mm ou 15 mm de hauteur peuvent être fixées à sa paroi intérieure. Son inclinaison peut également être modifiée entre 0° (horizontal) et 45° (5). Une trémie de sortie (6) empêche la projection des particules et permet leur récupération. Une armoire de commande (7) contient l'équipement électrique utilisé pour régler la vitesse du cylindre [133].

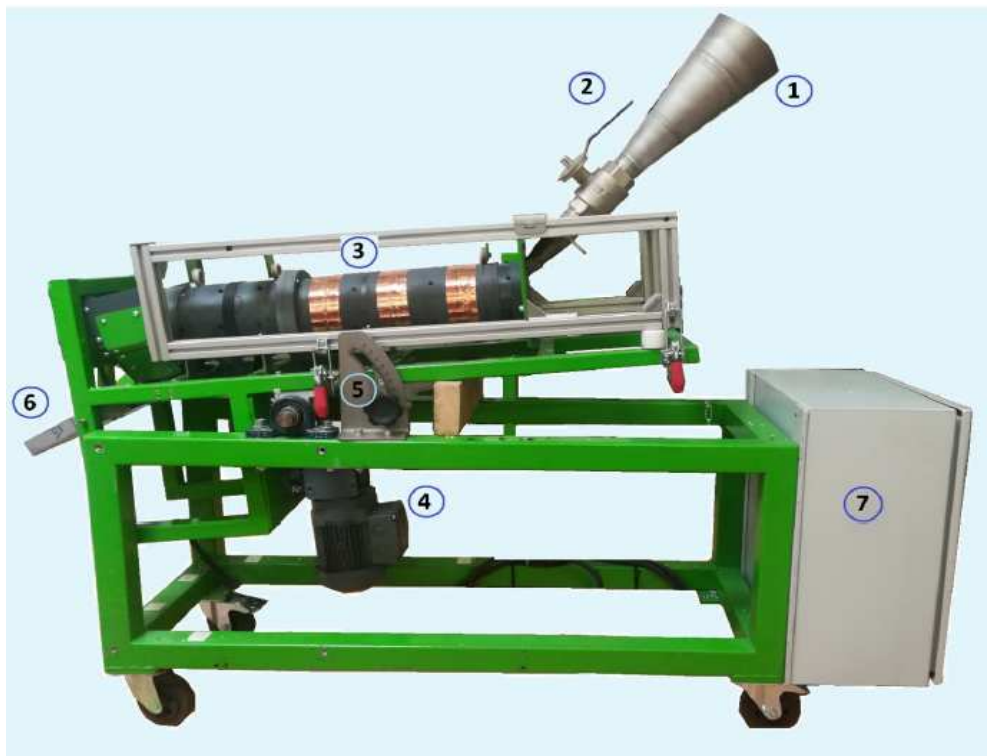


Figure 2.11. Dispositif de chargement à cylindre(s) tournant(s). (1) Entonnoir ; (2) Vanne ; (3) Cylindre creux ; (4) Moteur ; (5) Système de réglage de l'inclinaison ; (6) Trémie de sortie ; (7) Armoire de commande électrique [133].

f) Chargement à lit fluidisé

Ce procédé est l'un des plus utilisés pour le chargement triboélectrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (Figure 2.12) [134-141]. Considérons une colonne de particules solides reposant sur une plaque poreuse horizontale à l'intérieur d'un cylindre vertical. Un gaz est injecté à travers la plaque dans le sens ascendant. Dans la plupart des cas, le gaz en question est de l'air.

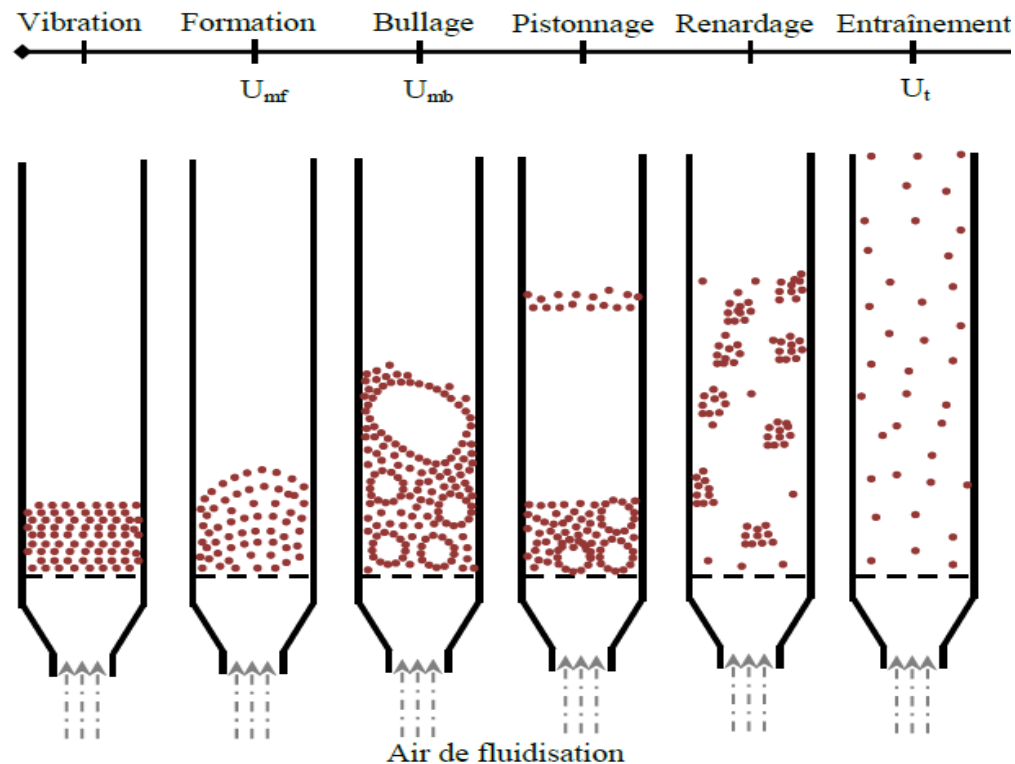


Figure 2.12. Régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse du gaz.

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

Le dispositif a souvent la forme d'un tube cylindrique isolant (Figure 2.13), en position verticale. Le mélange de particules est déposé sur un support (un disperseur d'air, en tamis isolant), situé en bas du cylindre. L'air de fluidisation est produit par une soufflante connectée au bas du cylindre. Les particules fluidisées acquièrent des charges électriques désignées opposées grâce aux collisions entre elles. Le dispositif est particulièrement efficace pour les particules fines, car l'air de fluidisation empêche leur agglomération et favorise le chargement par effet triboélectrique.

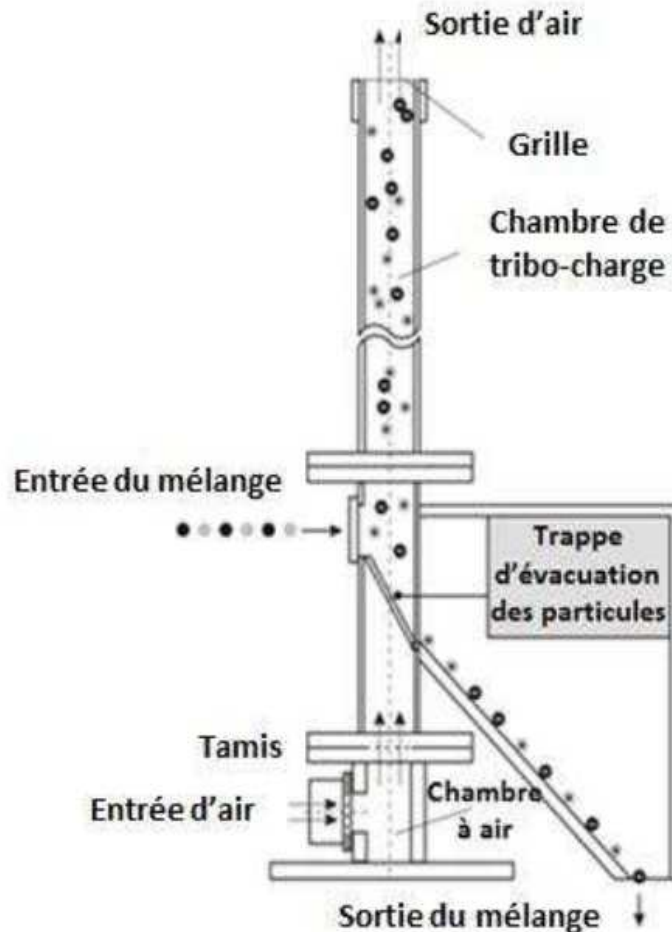


Figure 2.13. Dispositif de chargement à lit fluidisé [125]

Un autre dispositif [128] qui est une combinaison de deux modes de chargement en cascade (Figure 2.14). La première section du dispositif assure le chargement triboélectrique en lit fluidisé. Les particules fines sont dirigées vers la deuxième partie du dispositif, destinée au chargement statique sur des plaques inclinées. Cette solution technique permet de mieux contrôler le processus, multipliant les mécanismes de charge employés.

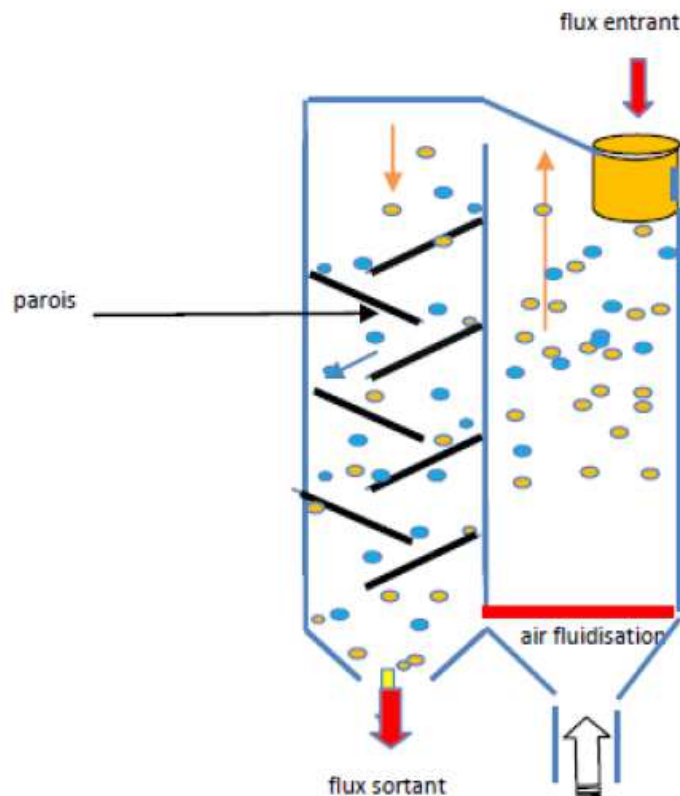


Figure 2.14. Représentation schématique d'un dispositif composé d'un lit fluidisé et d'un chargeur statique [128]

g) Chargement par broyage

Les broyeurs peuvent être aussi considérés comme un dispositif de chargement tribo-électrique car lors de l'atomisation, les particules acquièrent des charges électriques grâce au frottement avec les lames de ces broyeurs.

2.2 Classification des séparateurs électrostatiques

Les séparateurs électrostatiques peuvent être classés selon plusieurs critères, pour cette thèse nous allons les classer en fonction du mouvement d'électrodes (statique ou dynamique). Ce mouvement est l'un des paramètres les plus influents sur l'efficacité de l'installation et la réussite de la séparation.

2.2.1 Séparateurs à électrodes statiques

2.2.1.1 Séparateur à chute libre

a) Description

Le séparateur électrostatique à chute libre est largement utilisé dans le tri et la purification des minerais de taille sous-millimétrique [142-143]. Il est aussi conçu pour la séparation des matériaux granulaires en plastiques issus des déchets d'équipement électriques et électronique [144-147].

Ce séparateur est constitué de deux électrodes planes verticales et inclinées reliées à deux sources hautes tension de polarités opposées pour générer un champ électrique qui

permet de dévier les particules séparées vers le collecteur. La figure 2.15 représente un exemple de séparateur à chute libre.

b) Principe de fonctionnement

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 cycloneetc. Les particules pré-chargées sont projetées en chute libre entre les deux électrodes où le champ électrique est intense. Elles sont alors déviées dans leur chute, puis elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge acquise et récupérées dans le collecteur.

Tableau 2.1. Caractéristiques d'un séparateur à chute libre

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille de mélange	Mode de chargement
Séparateur à chute libre	- Prototype de laboratoire - Prototype industriel	0.8 m × 0.8 m × 1.5 m	Isolant/Isolant	-Granulaire -Pulvérulent	Effet tribo électrique

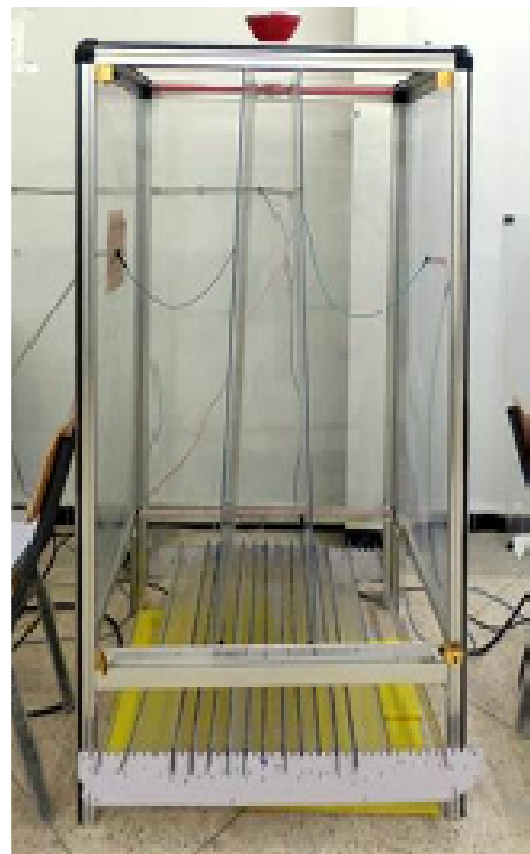
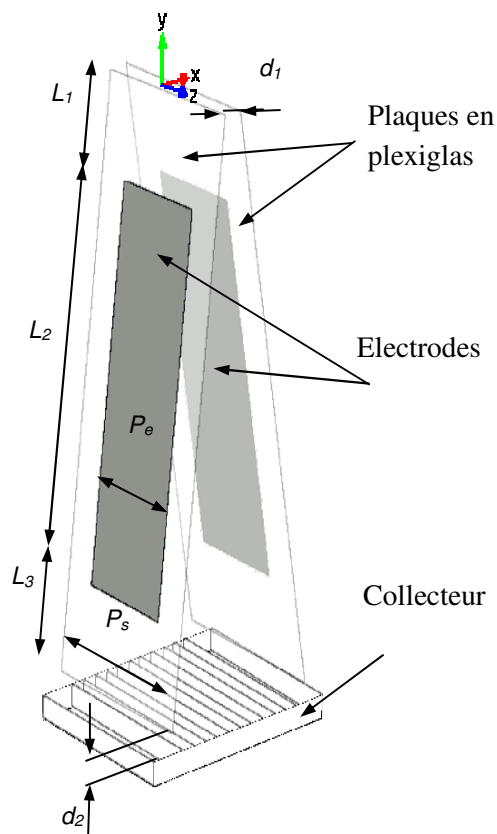


Figure 2.15. Séparateur à chute libre équipée de deux électrodes planes.

2.2.1.2 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages

a) Description

L'installation est composée de deux étages superposés, détachables, attachées à un même support vertical. Le séparateur tribo-aéro-électrostatique, situé à l'étage supérieur, est une enceinte parallélépipédique, ayant deux parois transparentes, afin de permettre la visualisation des phénomènes. Les parois latérales, opaques, ont des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces internes. Ces électrodes sont connectées à deux alimentations haute tension continue variable de polarités différentes, afin de créer un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules chargés et contrôler ainsi leurs trajectoires.

L'air de fluidisation est fourni par une soufflante à débit variable. Le diffuseur d'air (une plaque perforée située à l'extrémité inférieure de l'étage supérieur de l'installation) assure l'uniformité de la fluidisation du lit de granules. Ceux-ci sont introduits dans l'enceinte de séparation par un entonnoir, alimenté par un vibro-transporteur à débit ajustable. Sous l'action combinée des forces électriques, aérodynamiques et gravitationnelles, ils se séparent essentiellement en fonction de la polarité de leur charge et sortent par le bas de cette enceinte (Figure 2.16).

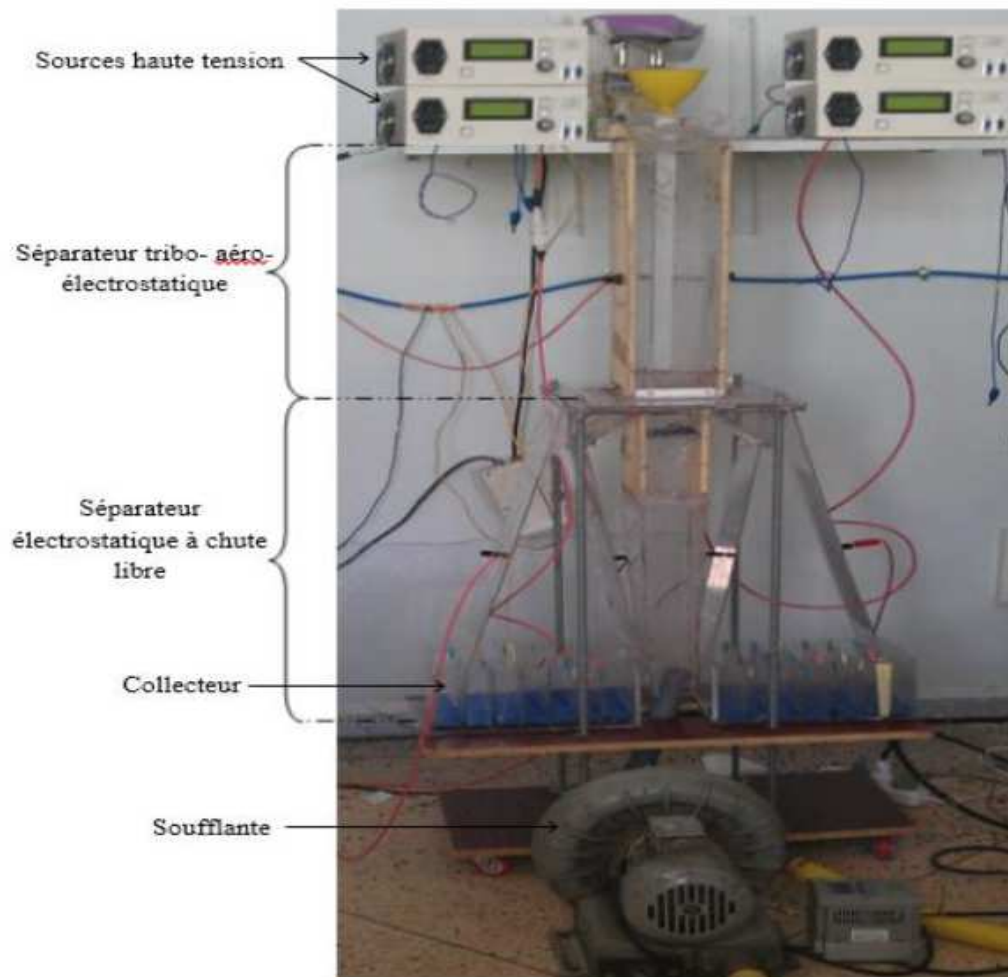
Deux chambres en SAN/PMMA dirigent les deux flux de granules ainsi créés vers l'étage inférieur de l'installation, composé de deux séparateurs électrostatiques à chute libre. Les électrodes de ces séparateurs sont collées sur quatre plaques isolantes en plexiglas. Les extrémités supérieures de ces quatre plaques sont positionnées aux deux pivots, afin de se déplacer et former des angles allant de 0° jusqu'à 45° par rapport à la verticale. Les deux plaques centrales sont connectées à la terre, tandis que les deux électrodes extérieures, connectées à des alimentations haute tension de polarités opposées. La récupération des produits séparés est faite dans deux collecteurs identiques, comportant chacun dix compartiments [148].

b) Principe de fonctionnement

Le mélange de particules à séparer est introduit dans l'enceinte de séparation par un entonnoir. Les particules sont ensuite mises en agitation à l'aide d'une soufflante à débit variable ce qui provoque la tribo-électrification des particules qui acquièrent des charges de signes opposés. Le champ électrique généré par les électrodes de séparateur (situé à l'étage supérieur) permet d'attirer les particules chargées et les séparer. Les granules séparés se dirigent et tombent librement entre les électrodes des deux séparateurs électrostatiques à chute libre (situé à l'étage inférieur) qui effectuent un second tri sélectif des matériaux. Les produits séparés sont récupérés dans deux collecteurs identiques.

Tableau 2.2. Caractéristiques d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille de mélange	Mode de chargement
Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages	Prototype de laboratoire	1 m $\times$ 0.3 m $\times$ 1.6 m	-Isolant/Isolant/Isolant (multiple)	Granulaire	Effet tribo électrique

**Figure 2.16.** Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages

2.2.1.3 Séparateur électrostatique à plaque

a) Description

Le séparateur est composé de deux électrodes dont l'une est de forme elliptique connectée à un générateur de haute tension continue tandis que l'autre est une plaque métallique reliée à la terre (Figure 2.17 et 2.18).

b) Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de l'électro-séparateur à plaque peut être décrit comme suit : les granules à séparer (mauvais et bon conducteurs) sont transportés par le vibro-transporteur électromagnétique et déposés sur l'électrode plaque reliée à la terre. Les

particules glissent ensuite à la surface de la plaque et se comportent différemment suivant qu'elles sont électriquement plus ou moins bonnes conductrices [149].

- **Les granules conducteurs :** en arrivant dans la zone du champ électrique généré par l'électrode statique de forme elliptique, ils acquièrent par induction électrostatique une charge de signe opposé au potentiel de la haute tension continue. Ils subissent alors une force d'attraction électrique exercée par cette électrode et se déposent dans la partie droite du collecteur.
- **Les granules non conducteurs :** vu leur constante de relaxation élevée, ils n'acquièrent aucune charge par induction électrostatique. Ils ne sont donc pas attirés par l'électrode elliptique et tombent sous l'action de leur poids et de leur vitesse dans la partie gauche du collecteur qui leur est destinée.

Tableau 2.3. Caractéristique d'un séparateur à plaque

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille de mélange	Mode de chargement
Séparateur à plaque	Prototype de laboratoire	0.8 m ×0.35m×0.9 m	-Isolant/conducteur -conducteur/conducteur	- Granulaire -Sous-millimétrique	Induction électrostatique

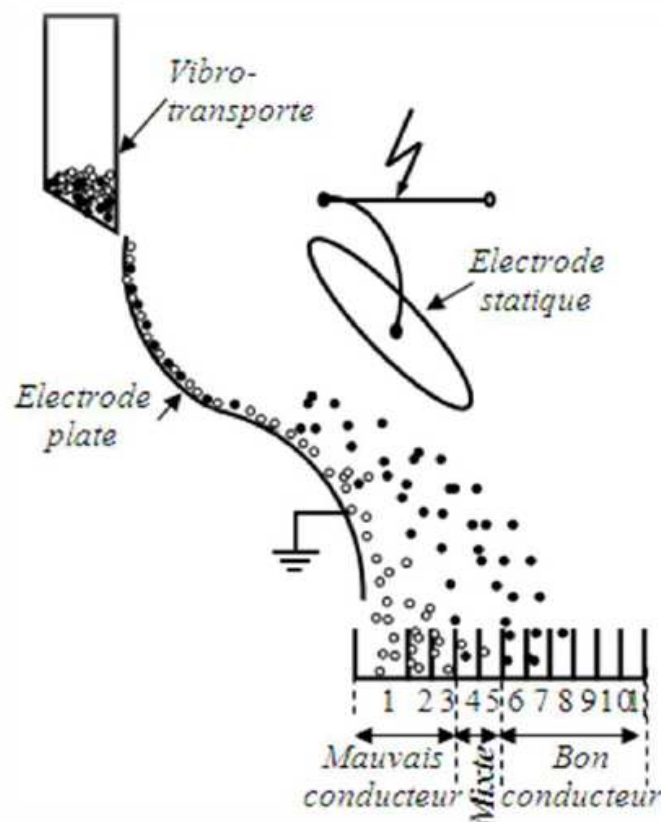


Figure 2.17. Schéma simplifié du principe de l'électro-séparation à plaque [85]

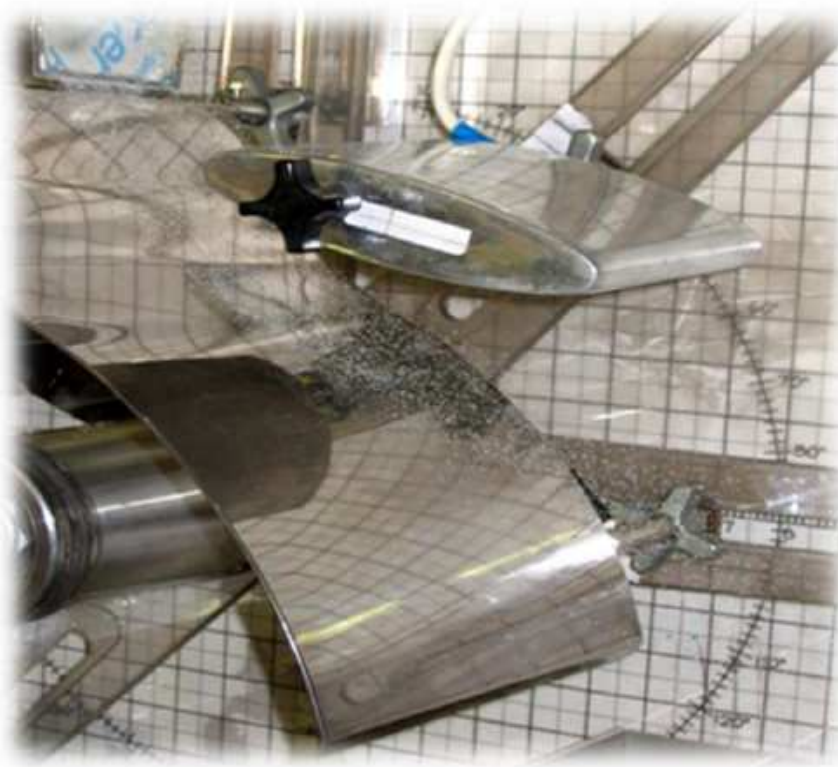


Figure 2.18. Photographie de l'électro-séparateur à plaque

2.2.1.4 Séparateurs tribo-électrostatique à chute libre

a) Description

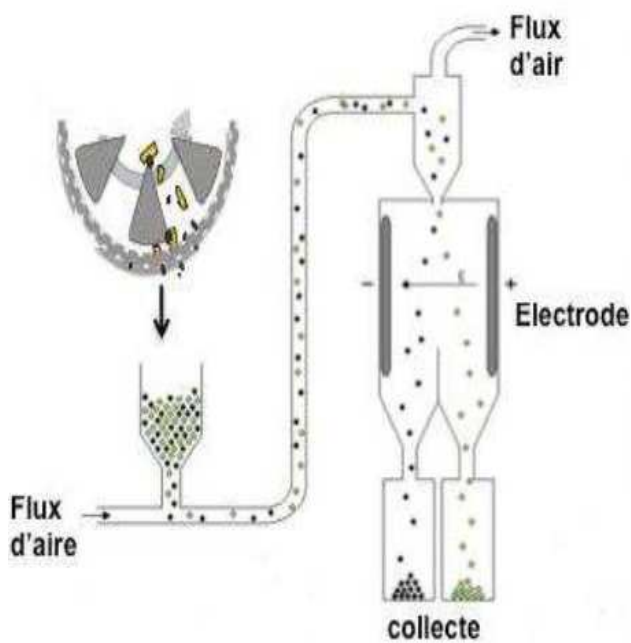
Le séparateur électrostatique de la (Figure 2.19), utilisé par l'Institut National de la Recherche Agronomique de Montpellier (INRA) a la particularité que les mélanges pulvérulents subissent un chargement triboélectrique dans un tube isolant, grâce à l'injection d'air par une soufflante. Une fois chargées, les particules sortent vers le séparateur à chute libre à travers un clapet commandé [150-151].

b) Principe de fonctionnement

Le mélange est chargé par la triboélectricité (Figure 2.19 a), il tombe ensuite dans un fort champ électrique horizontal produit entre deux électrodes et situé dans une chambre isolante. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge.

Tableau 2.4. Caractéristique d'un séparateur tribo-électrostatique à chute libre

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement
Séparateurs tribo- électrostatique à chute libre	Prototype de laboratoire	2,10 m × 0,6 m × 0,9 m	Isolant /isolant (agroalimentaire)	Pulvérulent	Effet triboélectrique



(a)



(b)

Figure 2.19. Séparateur tribo-aéro-électrostatique (INRA); (a) Schéma descriptif de l'installation, (b) Photographie

2.2.2 Séparateurs à électrodes dynamiques

2.2.2.1 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses

a) Description

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à bande transporteuse [152-156] a la particularité que ses électrodes sont deux convoyeurs métalliques liés à des générateurs de haute tension continue (Figure 2.20). La longueur active d'une électrode (la distance entre les deux poulies du convoyeur) est de 500 mm. La distance moyenne entre les électrodes dans la zone de lit fluidisé étant de 20 cm.

b) Principe de fonctionnement

Les granules chargés dans le lit fluidisé sont attirés par les convoyeurs et collés à la surface de la bande métallique de ces derniers par les forces électriques. La rotation des convoyeurs conduit ces particules jusqu'à des bacs prévus à cet effet.

Tableau 2.5. Caractéristiques du séparateur à bandes transporteuses

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement
Séparateur à bandes transporteuses	- Prototype de laboratoire - Prototype semi-industriel	1.2 m × 0.65 m × 1.1 m	Isolant /isolant	-Granulaire - Grosse particules	Effet triboélectrique

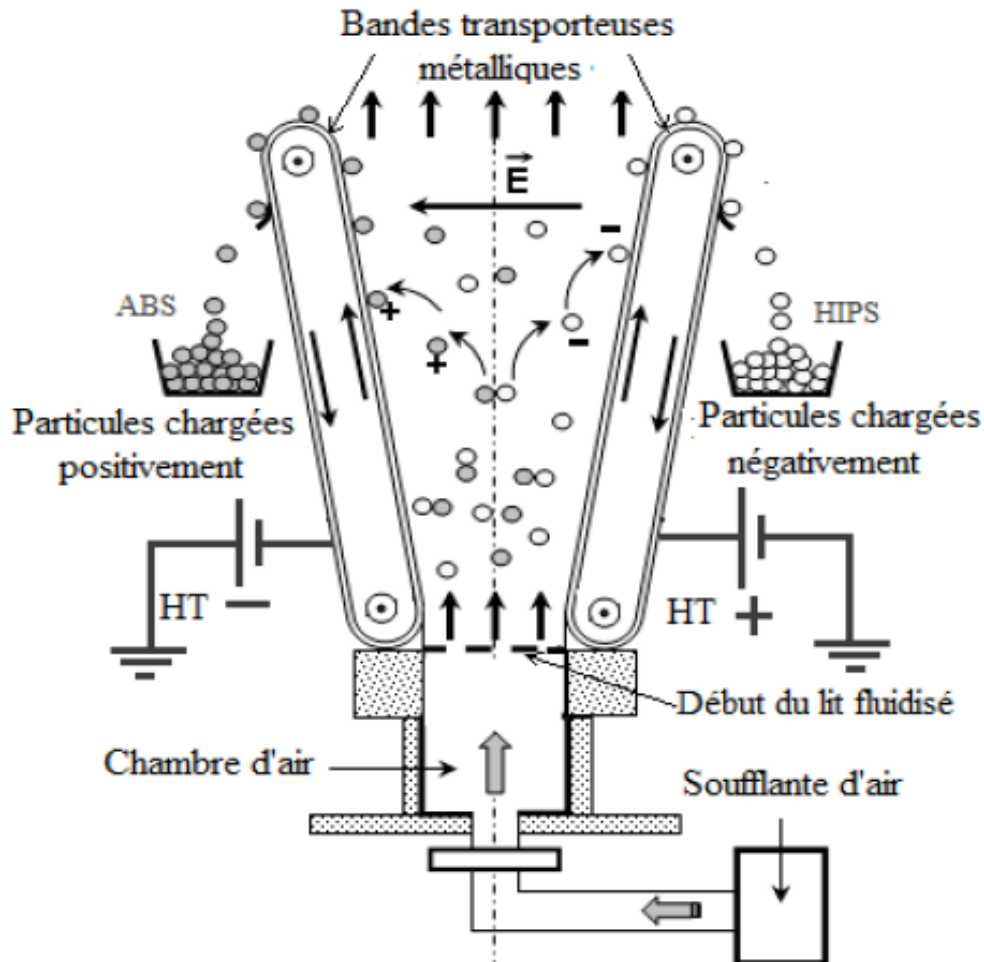


Figure 2.20. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses.

2.2.2.2 Séparateur à chute libre Carpco

a) Description

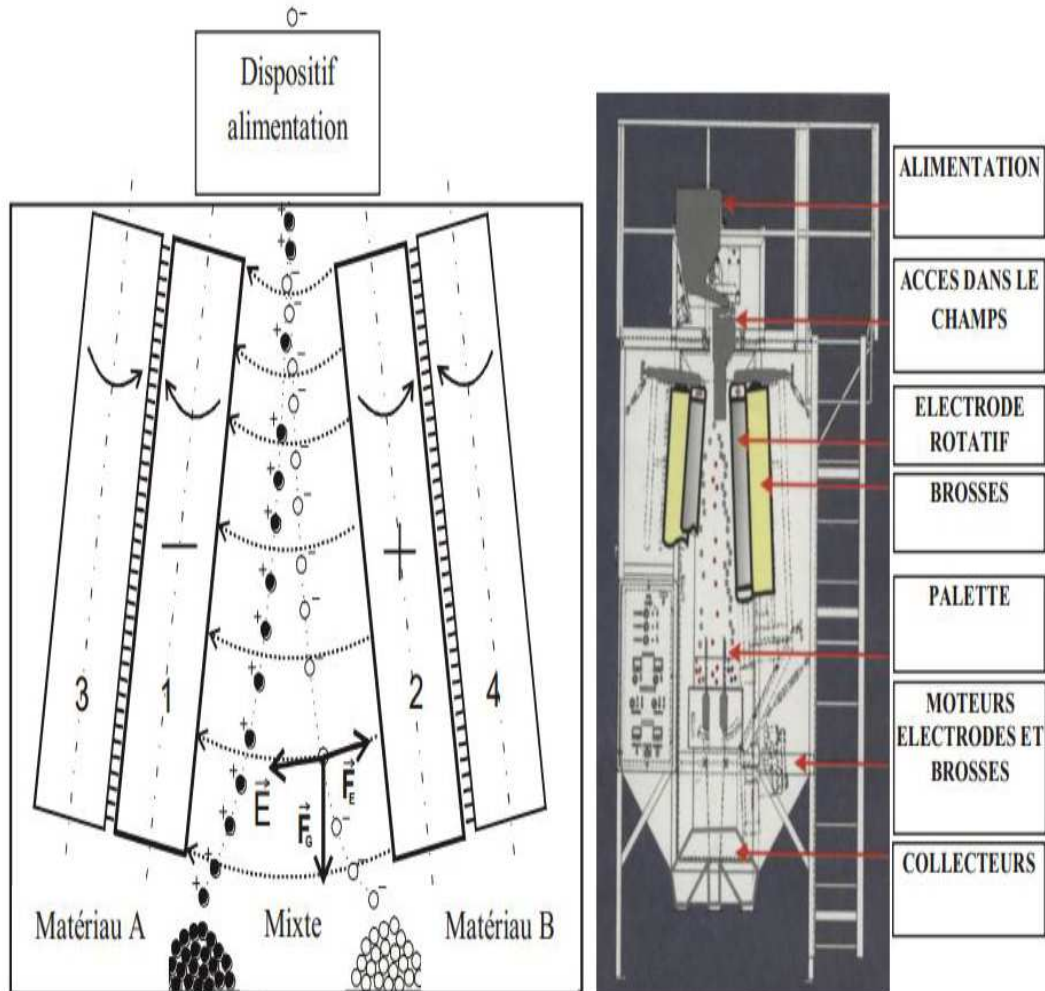
Le séparateur Carpco [157-158] (Figure 2.21), réalisé par la société américaine CARPCO est un séparateur tribo-électrostatique à chute libre, de grande capacité, pour la séparation de deux ou plusieurs matériaux. La nouvelle conception de cette installation est facilement adaptable à diverses applications, notamment à la séparation des minerais et des plastiques. Le séparateur électrostatique utilise un champ électrique produit par deux électrodes cylindriques rotatives, connectées à deux sources variables de haute tension, de polarités opposées, ajustables dans la gamme 0-60 kV.

b) Principe de fonctionnement

Après l'introduction du mélange granulaire isolant dans un champ électrique intense généré par deux électrodes cylindriques rotatives de polarités opposées ; l'une attire les particules chargées positivement et l'autre attire les particules chargées négativement.

Tableau 2.6. Caractéristique d'un séparateur à chute libre Carpco

Installation	Utilisation	Type de mélange	Taille de mélange	Mode de chargement
Séparateur à chute libre Carpco	Industriel	Isolant/isolant	-Granulaire -Grosses particules	Effet triboélectrique

**Figure 2.21.** Séparateur tribo électrostatique à chute libre Carpco.

2.2.2.3 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques

a) Description

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes [159-163] est présenté sur les figures 2.22 et 2.23. Il a été conçu dans le laboratoire IRECOM, UDL SBA. Le mélange à séparer est introduit dans la chambre de fluidisation qui sert aussi comme chambre de séparation. Celle-ci a une section rectangulaire et ses parois sont en PMMA transparent. Une soufflante permet l'injection de l'air à vitesse variable dans la chambre de fluidisation.

Le champ électrique est généré entre deux électrodes cylindriques tournantes. Chaque électrode est connectée à une source de haute tension continue de polarité opposée. Leur entraînement à une vitesse variable est effectué par deux moteurs à courant continu. Les

produits séparés sont récupérés dans les deux bacs collecteurs placés de chaque côté de la chambre de séparation.

b) Principe de fonctionnement

Le mélange de produits est mis en agitation dans le lit fluidisé ce qui provoque la tribo électrifcation des particules qui acquièrent des charges de signe opposés. Ensuite les deux électrodes tournantes qui sont reliées à deux sources haute tension de polarité opposée attirent les particules contrairement polarisées et repoussent celles de même signe. Le produit séparé est récupéré dans deux collecteurs.

Tableau 2.7. Caractéristiques d'un séparateur à deux cylindres tournants

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement
Séparateur à deux cylindres tournants	Prototype de laboratoire	0.8 m × 0.7m × 0.7m	Isolant/isolant	- Granulaire - Micronisé	Effet tribo électrique

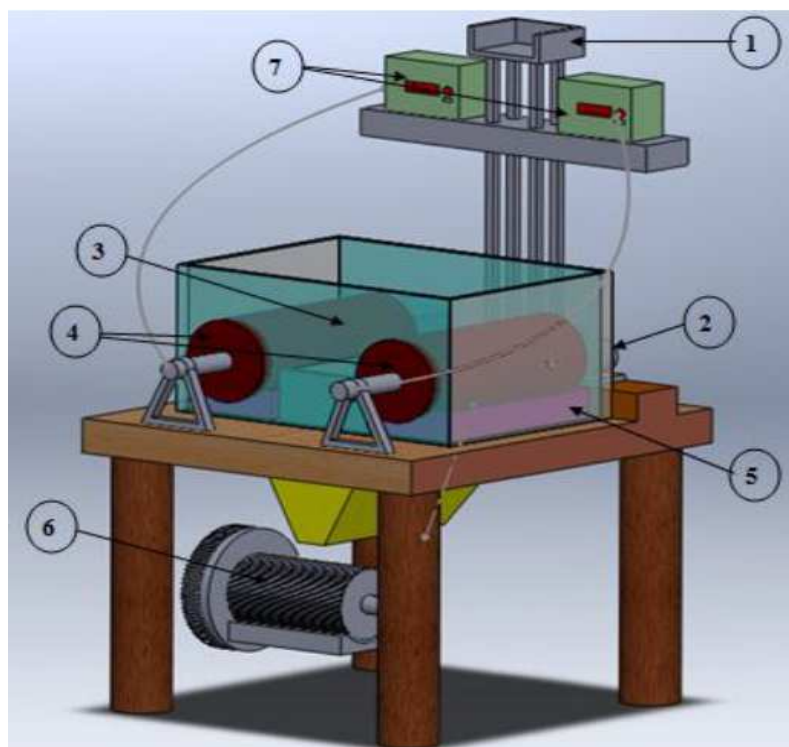


Figure 2.22. Représentation schématique du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes ; 1 : Vibro-transporteur; 2 : Moteur CC ; 3 : Chambre de séparation; 4 : Electrodes cylindriques tournantes ; 5 : Bacs collecteurs ; 6 : Soufflante ; 7 : Alimentations haute

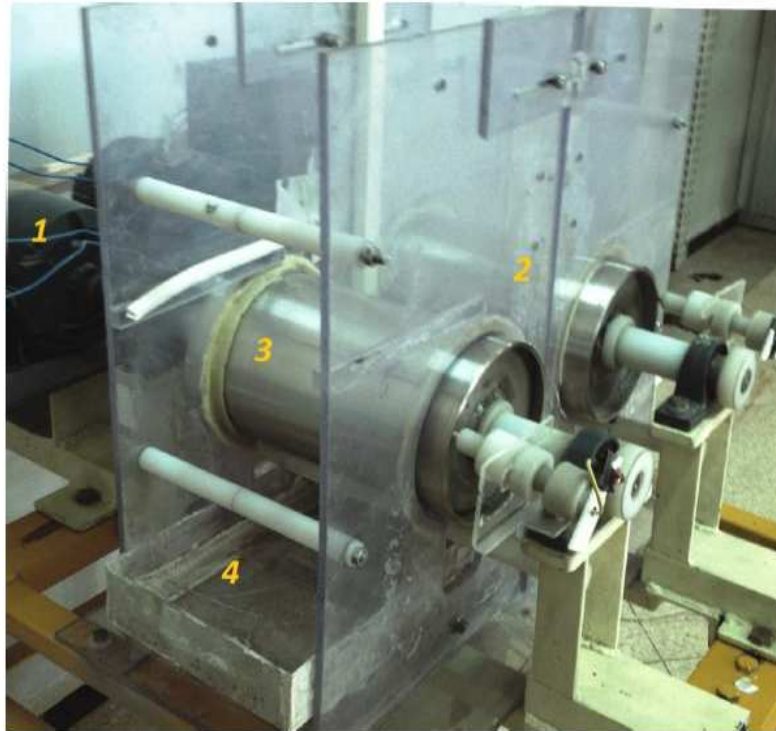


Figure 2.23. Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes tournantes ; 1 : Moteur CC ; 2 : Chambre de séparation ; 3 : Electrodes cylindriques tournantes ; 4 : Bacs collecteurs.

2.2.2.4 Séparateur tribo-aéro-électrostatique a disques tournants

a) Description

Une quantité de matériaux est introduite dans un lit fluidisé généré dans une chambre de séparation (2) ; composée de parois en PMMA transparent. Une turbine (7) fourni le débit d'air souhaité [164]. Le lit fluidisé se forme grâce à une plaque poreuse qui distribue uniformément l'air (Figure 2.24).

Les effets électrostatiques dans un lit fluidisé sont dus à des collisions entre les particules elles-mêmes et entre les particules et les parois de la chambre de séparation (2). Il en résulte la tribo-électrification des matériaux [141], [165]. Le champ électrique est généré entre deux disques tournants ((3) ; plongés dans un lit fluidisé et situés à une distance d comprise entre 40 mm et 120 mm l'un de l'autre. Chaque disque est relié à un générateur de haute tension de polarité opposée et est entraîné en rotation par un moteur à vitesse variable (1). Les produits sont récupérés dans deux boîtes collectrices (5) placées à l'extérieur de la chambre de séparation.

b) Principe de fonctionnement

Les particules se chargent dans le lit fluidisé. Les disques tournants qui sont reliés à deux sources haute tension de polarité opposée attirent les particules contrairement polarisées. Des racleurs sont utilisés pour récupérer les particules collés aux disques vers le collecteur.

Tableau 2.8. Caractéristiques d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux disques tournants

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement
séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants	-Prototype de laboratoire -Prototype semi-industriel	1,8 m $\times$ 0.8 m $\times$ 0.6m	Isolant/Isolant	Micronisé	Effet triboélectrique

**Figure 2.24.** Photographie d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques

(1) Moteurs électriques; (2) Chambre de séparation; (3) Electrodes-disques tournants; (4) Collecteurs ; (5) Cages de Faraday ; (6) Balances électroniques ; (7) Turbine ; (8) Armoire électrique

2.2.2.5 Séparateur électrostatique multi fonctionnel

a) Description

Le séparateur électrostatique multifonctionnel (Figure 2.25) [166-170], est capable de trier des matériaux micronisés granulaires ou sous-millimétriques grâce à l'utilisation de trois mécanismes physiques différents de chargement électrique: l'effet triboélectrique, l'effet couronne et l'induction électrostatique. Les particules à séparer sont déposées en monocouche sur la surface du convoyeur à bande métallique (1), qui est connecté à la terre et entraîné par

un moteur (2) lui-même relié à un variateur de vitesse électronique. Une électrode cylindrique tournante (3) (acier inoxydable) est connectée à un générateur de haute tension (4) réversible (positive ou négative).

b) Principe de fonctionnement

Une zone de champ électrique intense est générée entre l'électrode cylindrique reliée à la haute tension et le convoyeur à bande métallique mis à la terre. L'électrode haute tension attire les particules contrairement polarisées et repoussent celles de même signe, permettant ainsi la séparation.

Tableau 2.9. Caractéristiques d'un séparateur électrostatique multifonctionnel

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement
Séparateur multifonctionnel	Prototype de laboratoire	0.9 m × 0.2 m × 0.2 m	- Isolant/Conducteur - Isolant/ Isolant - Conducteur /Conducteur	- Granulaire - Pulvérulent -Sous-millimétrique	- Induction électrostatique - Effet couronne - Effet triboélectrique



Figure 2.25. Séparateur électrostatique à tapis roulant.

2.2.2.6 Séparateur électrostatique à tambour

a) Description

Le séparateur à tambour [85], comme celui montré sur la (Figure 2.26), est le modèle le plus utilisé. Il est composé de trois électrodes dont deux électrodes (1), (2) sont connectés à un générateur haute tension et une électrode cylindrique (3) est reliée à la terre.

b) Principe de fonctionnement

Son principe de fonctionnement consiste à la création de charges électriques par ionisation de l'air grâce à une électrode (1). Ainsi les granules déposées par le vibro transporteur(4) sur le cylindre tournant (tambour) (3) acquièrent une charge électrique de même signe que le potentiel HT.

Les particules non-conductrices, chargées par effet couronne créée par l'électrode (1), sont collées à la surface du tambour (3) par la force d'image électrique et tournent avec ce dernier

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

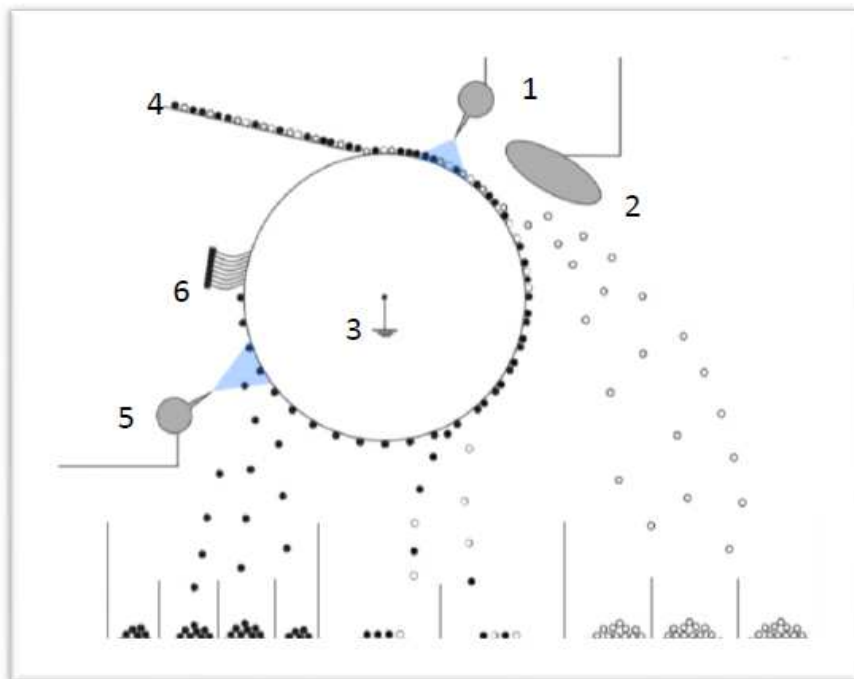


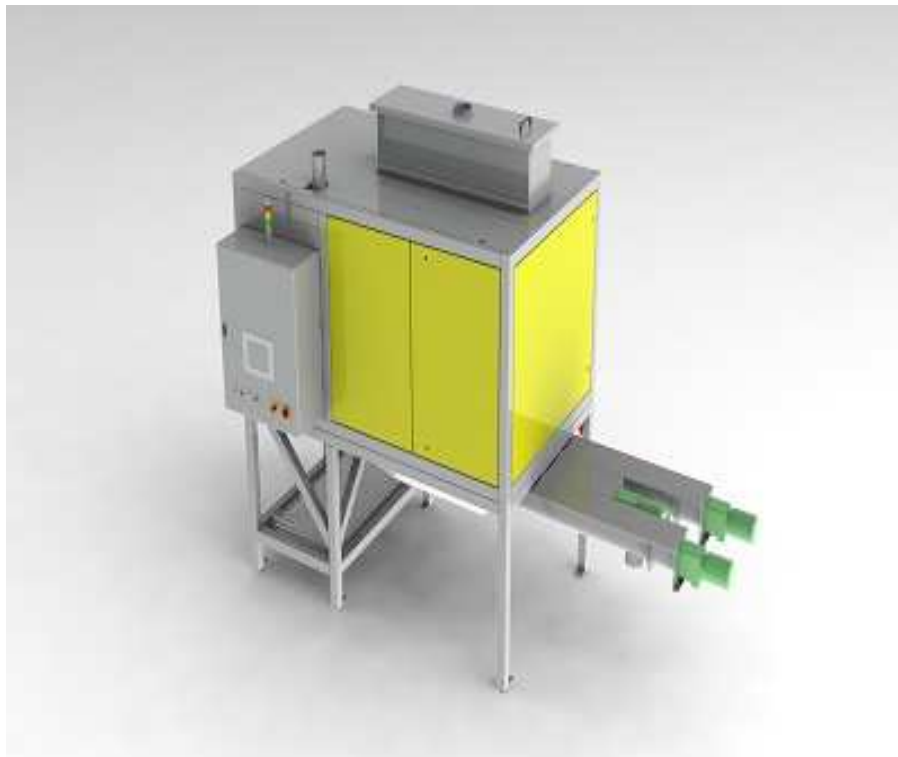
Figure 2.26. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour

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

Tableau 2.10. Caractéristiques d'un séparateur à tambour

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement
Séparateur à tambour	- Prototype de laboratoire - Prototype industriel	1.1 m × 0.5 m × 0.8 m	Isolant –conducteur	- Granulaire - Grosse particules - Sous-millimétrique	- Induction électrostatique - Effet couronne

La société Hamos a proposé un modèle de séparateur KWS (Figure 2.27) qui utilise ce type de séparation (séparateur à tambour). Ce séparateur KWS permet la séparation des métaux à partir des plastiques dont la taille de particule est de 100 μm -8 mm [171].

**Figure 2.27.** Séparateurs électrostatique fabriqués par HAMOS. (Modèle KWS)

2.3 Conclusion

La séparation électrostatique est une solution fiable pour le tri sélectif des mélanges issus des déchets industriels. Il existe plusieurs procédés destinés à cette technique, chacun a sa propre application. Des installations pour séparer les mélanges granulaires et grosses particules, d'autres installations pour séparer les matériaux pulvérulents, sous-millimétriques et micronisés. Même la nature du matériau (isolant ou conducteur) présente un critère primordial pour le choix du séparateur. Quel que soit le type du séparateur, l'utilisation d'un dispositif de chargement est nécessaire. Trois techniques sont généralement utilisées pour charger les matériaux : la triboélectricité, l'effet couronne et l'induction électrostatique. Pour notre étude nous avons classé les séparateurs selon le mécanisme des électrodes (statique

dynamique). Ce classement nous a permis de bien comprendre la conception, la construction et le principe de fonctionnement de chaque installation, ainsi que leurs avantages et inconvénients. La maîtrise et l'acquisition de ces informations est indispensable pour l'étape suivante de cette thèse : la conception et la réalisation des nouveaux séparateurs électrostatiques.



CHAPITRE 3

REALISATION DES SEPARATEURS A PLAN INCLINE

CHAPITRE 3 : REALISATION DES SEPARATEURS A PLAN INCLINE

Le présent chapitre est réparti en deux section, premièrement nous allons présenter le dispositif de séparation à plan incliné qui se démarque par le fait qu'il offre la possibilité de diminuer la force de pesanteur exercée sur les particules granulaires, permettant de séparer les particules dans des meilleurs conditions. Une étude expérimentale est naturellement nécessaire pour connaître l'influence des variables du système.

La seconde partie décrit un deuxième dispositif de séparation à tambour incliné, dédié au traitement des produits pulvérulents. Son avantage par rapport aux autres installations est l'inutilité de la partie de chargement des matériaux micronisés, sa technique de séparation est différente ainsi qu'innovante. Une étude paramétrique est essentielle dans le but de prouver l'efficacité de cette installation.

Le but de cette partie du travail est de séparer des particules de différentes tailles (millimétriques et micronisées) utilisant différents procédés basés sur une seule technique « inclinaison des électrodes ».

3.1 Séparateur à plan incliné SPI

3.1.1 Réalisation d'un SPI

Comme le montre le schéma descriptif global de l'installation représentée à la figure 3.1 ainsi que la photographie de la figure 3.2, le séparateur comprend dans sa conception. Trois parties distinctes [172]:

1-Partie de chargement triboélectrique (chargeur à lit fluidisé) : les particules se chargent tribo-électriquement et acquièrent différentes charges (en fonction de leurs électronégativités).

2-Partie de séparation électrostatique : les particules sont déviées selon leurs charges acquises sous l'influence du champ électrique généré entre les deux électrodes inclinées.

3-Partie de récupération des particules séparées.

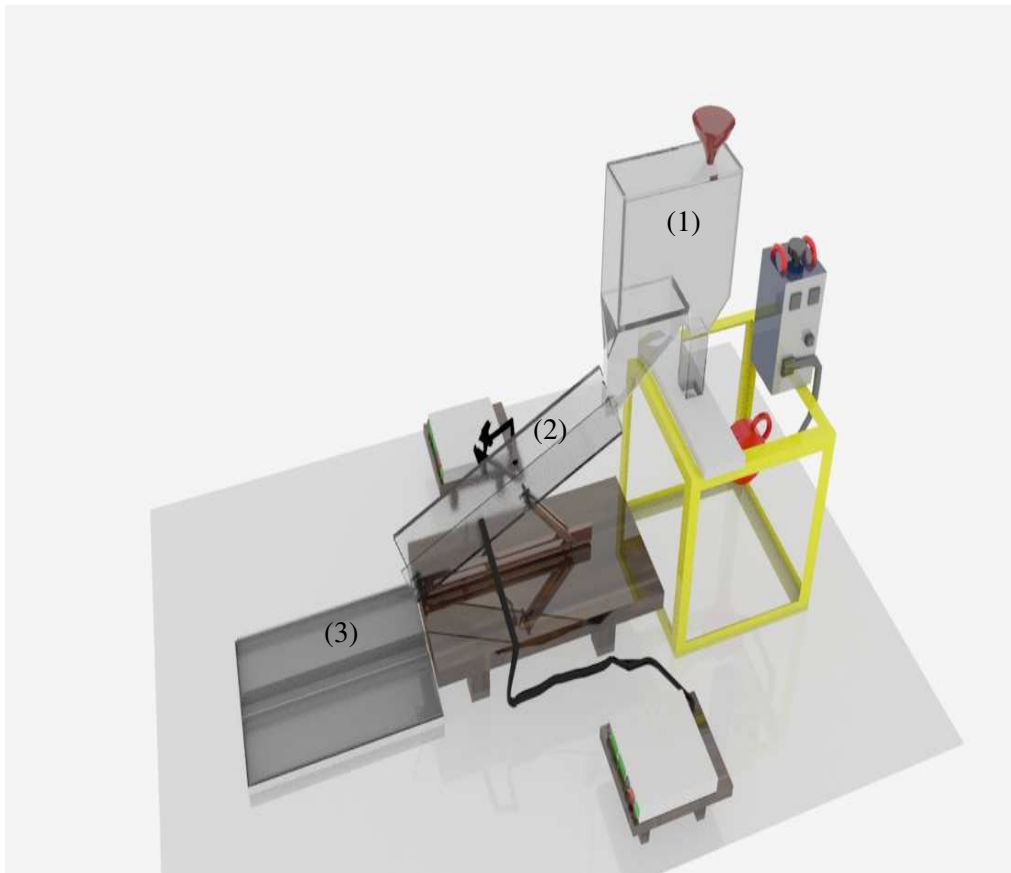


Figure 3.1. Représentations schématique de l'installation SPI

(1)Partie de chargement, (2) Partie de séparation; (3) Partie de récupération

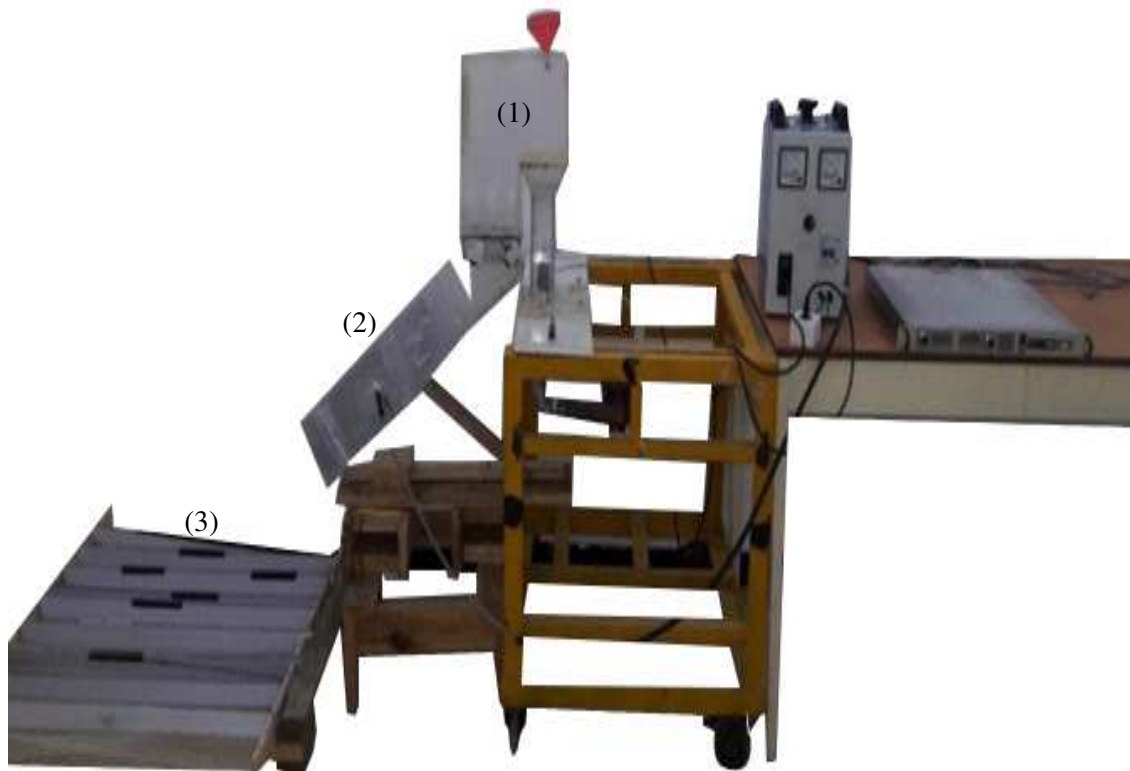


Figure 3.2. Photographie de l'installation SPI

(1)Partie de chargement, (2) Partie de séparation; (3) Partie de récupération

3.1.1.1 Partie de chargement triboélectrique

- **Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé**

Le dispositif de chargement tribo-électrique à lit fluidisé des matériaux isolants granulaires est présenté dans la figure 3.3 et 3.4. Le dispositif se compose d'une chambre de fluidisation en plexiglas (largeur : 150 mm, hauteur : 150 mm, profondeur : 130 mm) placée sur un support. Un souffleur à débit variable permet l'injection de l'air dans la chambre de fluidisation. Le lit se forme grâce à une plaque poreuse qui distribue l'air dans la chambre pour bien assurer la fluidisation et l'agitation des particules.

La tribo-électrisation des matériaux à l'intérieur de la chambre est due aux multiples collisions particules/particules et particules/parois.

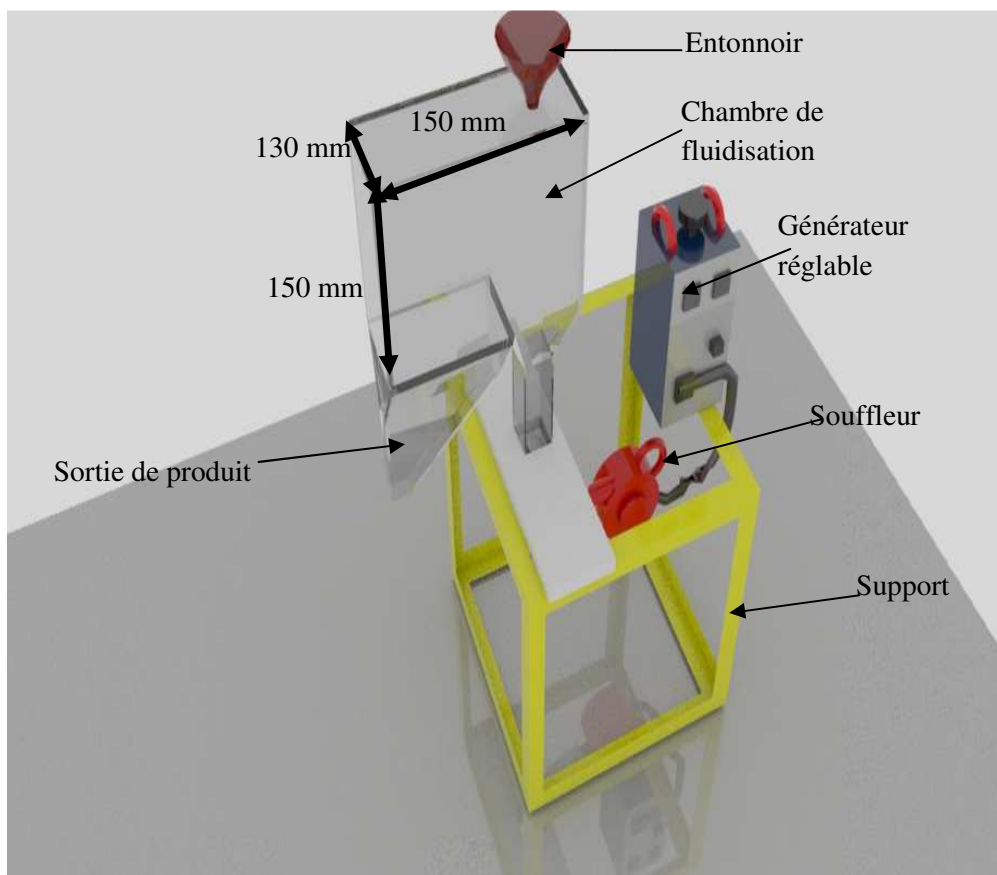


Figure 3.3. Représentation schématique du chargeur à lit fluidisé

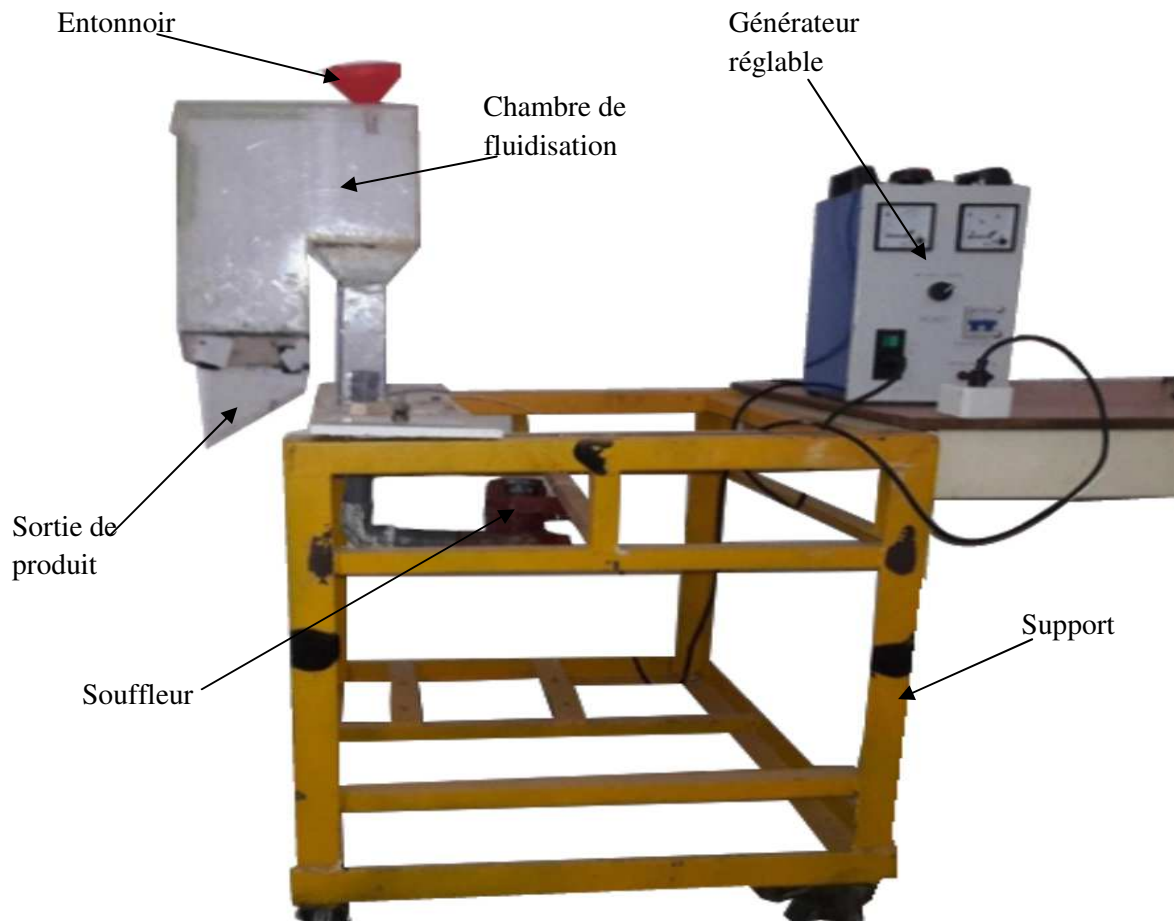


Figure 3.4. Photographie du chargeur à lit fluidisé

3.1.1.2 Partie de séparation électrostatique

- Dispositif de séparation à plan incliné

Le SPI, montré sur la figure 3.5 est composé d'une enceinte parallélépipédique (hauteur : 500 mm; largeur : 200 mm; profondeur : 150 mm) placée sur un support combiné de deux axes mobiles, qui permettent de varier manuellement l'angle d'inclinaison de l'enceinte de 0° jusqu'à 90° par rapport à l'horizontale. Nous avons enlevé la paroi supérieure de l'enceinte afin d'alléger le poids de la chambre de séparation. Le dispositif comporte deux électrodes en aluminium (hauteur : 450 mm, largeur : 150 mm) collées sur les surfaces externe de deux parois latérales en plexiglas (hauteur : 500 mm, largeur : 150 mm), la distance inter-électrodes est réglable de 150 mm à 200 mm. Ces électrodes sont alimentées à deux alimentations Haute Tension CC réglables de polarités opposées pour générer un champ électrique intense. La séparation s'effectue après le glissement des particules sur la paroi inférieur de l'enceinte.

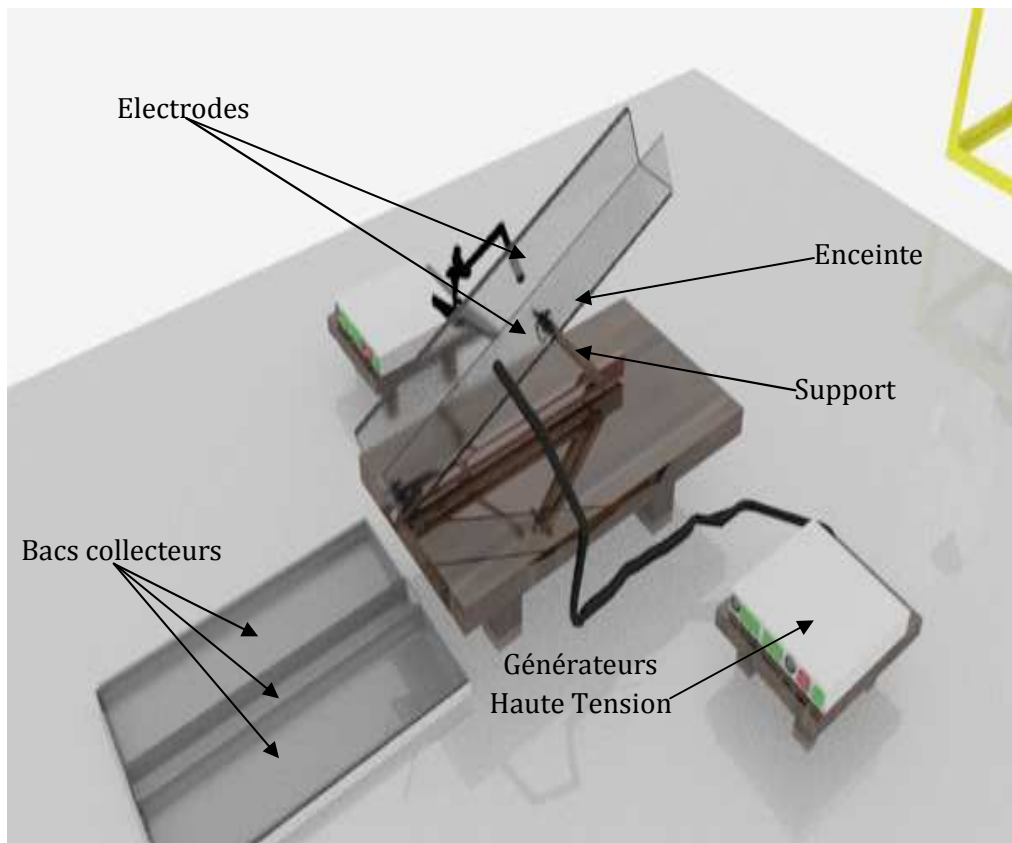


Figure 3.5. Représentation schématique de séparateur électrostatique à Plan incliné

3.1.1.3 Partie de récupération

- Collecteur

Les produits séparés sont récupérés dans un collecteur en plastique (Figure 3.6) comportant six compartiments dont les dimensions sont réglables (longueur : 900 mm ; largeur : 200 mm ; profondeur : 100 mm).

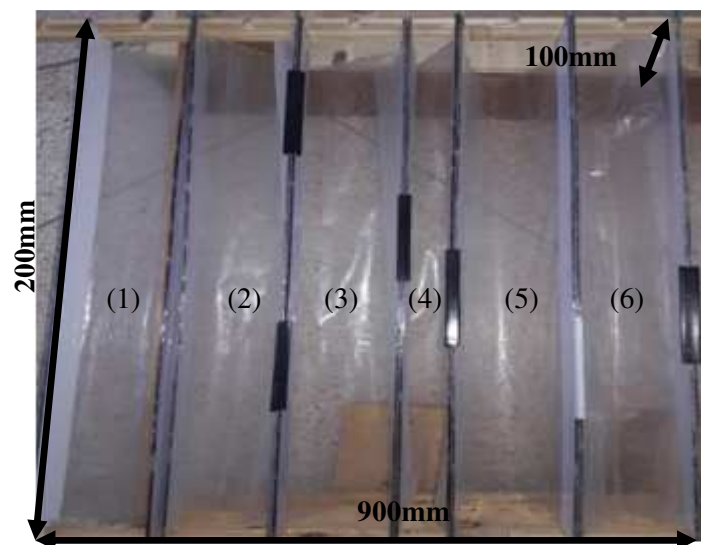


Figure 3.6. Photographie d'un bac collecteur.

3.1.1.4 Principe de fonctionnement

Le mélange binaire du produit isolant est introduit à l'aide d'un entonnoir dans la chambre de fluidisation. L'injection de l'air comprimé à l'intérieur de la chambre par le souffleur provoque la fluidisation des particules, elles acquièrent des charges de signes opposés. Chaque type de particule est attiré par l'électrode contrairement polarisée, pour tomber ensuite dans le collecteur. Les particules insuffisamment chargées s'accumulent dans le compartiment des centres 3 et 4.

Dans la partie de séparation (Figure 3.7) les granules sont soumis à l'action des forces gravitationnelles exprimée par l'équation (3.1), coulombienne exprimées par l'équation (3.2) et frottement avec la paroi équation (3.3) :

$$\vec{F}_g = m \times g \times \sin \theta \quad (3.1)$$

Avec : F_g : force de gravitation [N]

m : La masse de particule [g]

g : Gravitation [9.80 N/m]

θ : L'angle d'inclinaison [°]

$$\vec{F}_E = Q \times \vec{E} \quad (3.2)$$

Avec : F_E : force du champ électrique (N)

Q : la charge de particule granulaire (C)

E : le champ électrique (V/m)

$$\vec{F}_f = \vec{F}_N \times \mu \quad (3.3)$$

Avec : F_f : Force du frottement de la particule (N)

F_N : Composante de la force d'application, normale à la surface de contact (N)

μ : Coefficient de frottement qui dépend de la nature de la surface.

L'introduction de « $\sin \theta$ » dans la formule de la force de pesanteur (équation 3.1), nous permet de minimiser cette force considérablement, en variant l'inclinaison de la chambre de séparation (l'angle θ). Ces conditions favorisent la force électrostatique comme dominante. Le deuxième avantage de cette installation par rapport à celle de chute libre qui possède presque les mêmes paramètres de conception est le temps de séjours des particules dans la zone de séparation, qui est contrôlé encore une fois par l'angle d'inclinaison.

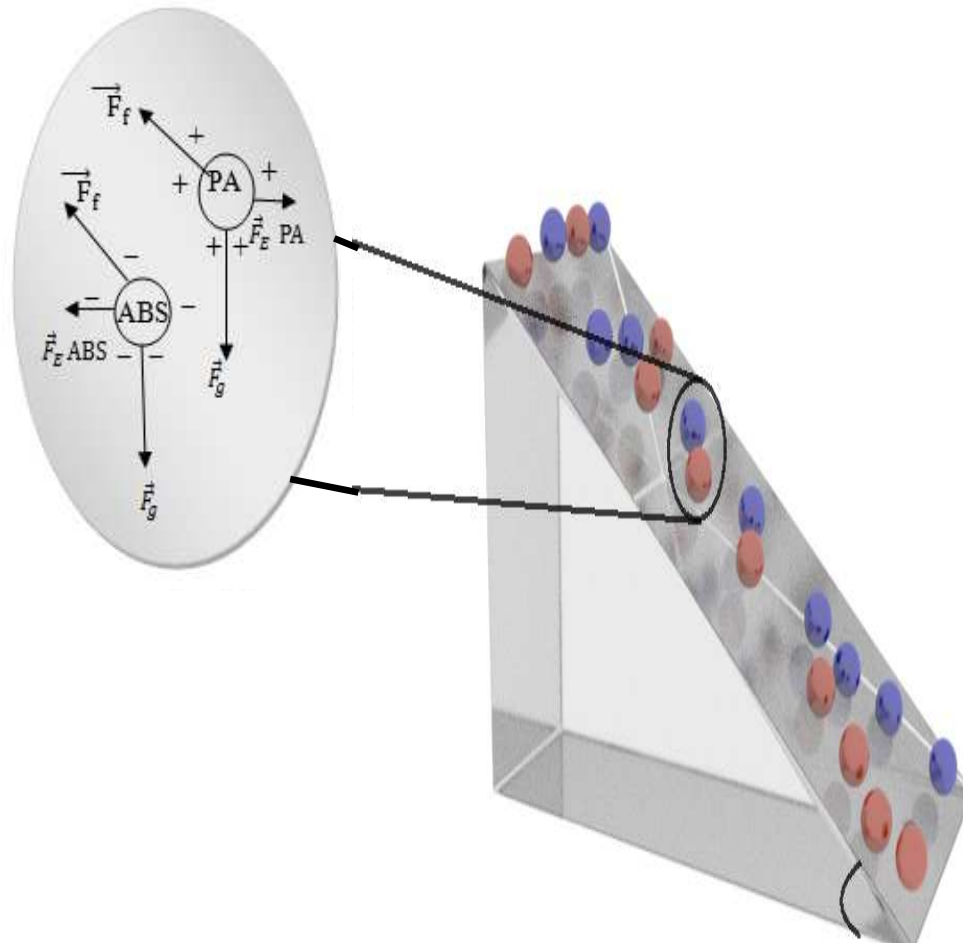


Figure 3.7. Description des forces agissant sur les particules dans le séparateur

3.1.2 Etude expérimentale

3.1.2.1 Type de matériaux utilisés

Les expériences ont été effectuées sur deux types de produits utilisés dans la plasturgie polyamide (PA), Acrylonitrile Butadiène Styrène « ABS »

a) Acrylonitrile Butadiène Styrène « ABS »

C'est un polymère thermoplastique solide, résilient et facile à mouler. Il est normalement amorphe fabriqué en combinant trois composés différents. Les trois constituants de l'ABS sont l'acrylonitrile (15-35%), le butadiène (5-30%) et le styrène (40-60%). L'acrylonitrile donne la résistance thermique et chimique, le butadiène semblable à du caoutchouc donne la ductilité et la résistance mécanique, le styrène donne une surface brillante, la facilité de mise en œuvre et un coût plus bas [173].

L'utilisation de combinaisons différentes de ces monomères, permet de fabriquer une gamme étendue de types d'ABS offrant un large spectre de propriétés obtenues par ramification ou copolymérisation.

Les applications types de l'ABS sont les suivantes :

- Grand public : jouets, biens de consommation, téléphones, casques de sécurité.
- Automobile : panneaux intérieurs de portière, montants, garnitures de sièges, grilles, tableaux de bord, boîtiers de rétroviseurs.
- Electroménager : habillages d'appareils de cuisine, boîtiers d'aspirateurs, panneaux de commande de produits blancs.
- Extrusion : feuilles, receveurs de douche, toits de tracteurs, chants de meubles, revêtements de réfrigérateurs, bagagerie.

Les principales caractéristiques des Acrylonitrile Butadiène Styrène « ABS » sont :

- Bonne résistance à la rayure ;
- Bel aspect brillant ou satiné ;
- Bonne rigidité et résistance aux chocs ;
- Facilité de marquage ;
- Bonne résistance à la température ;
- Légèreté ;
- Bonne stabilité dimensionnelle;
- Facilité d'usinage ;
- Excellent isolant électrique ;
- Facilité de soudage ou de collage ;
- Se prête bien à la décoration;
- résistance à de nombreux agents chimiques.



Figure 3.8. Echantillon des granules d'Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) utilisées

b) Polyamide (PA)

Appelée aussi (Nylon) est un polymère contenant des fonctions amide pouvant résulter de la polycondensation entre les fonctions acide carboxylique et amine. Les nylons sont généralement résistants, solides (bien que facilement susceptibles d'être entaillés), des polymères assez élastiques ayant de bonnes propriétés de protection, ainsi qu'une haute résistance à l'abrasion et à la fatigue.

Ils sont capables toutefois d'absorber une grande quantité d'eau (lents dans les sections épaisses) augmentant alors leurs dimensions jusqu'à 3% dans des conditions extrêmes. Si les nylons sont très résistants aux huiles, graisses, solvants et alcalis, il en est autrement par rapport aux acides qui ont tendance à les hydrolyser [174].

Les principales applications du PA sont les suivantes [175] :

- Automobile ;
- Carburant pour l'aviation : collecteurs d'admission d'air ;
- Transmission : vitesses, embrayages, tendeurs de chaîne
- Carters : carters moteurs;
- Gaines d'air moulées par soufflage;
- Intérieur : boîtiers d'airbag ;
- Extérieur : grilles, poignées de portières, jantes, rétroviseur;
- Equipements électriques et électroniques;
- Distribution électrique : dispositifs de commutation basse tension ;
- Connecteurs : connecteurs CEE industriels, borniers ;
- Composants électriques : commutateurs ;
- Secteurs industriels généraux ;
- Outillage électrique : boîtiers et pièces internes ;
- Sports : fixations de skis, patins à roues alignées ;
- Ferroviaire : semelles de rail ;
- Roues pivotantes ;
- Mobilier : applications diverses ;
- Tubes offshore ;
- Films d'emballage.

Les principales caractéristiques des polyamides (PA) [175] :

- Bonne résistance à l'abrasion ;
- Haute résistance mécanique et haute rigidité ;
- Résistance chimique exceptionnelle ;
- Résistance au vieillissement à haute température et sur de longues périodes ;
- Excellentes propriétés diélectriques ;
- Résistance intrinsèque au feu ;
- Absorption d'eau.



Figure 3.9. Echantillon des granules de polyamide (PA) utilisées.

3.1.2.2 Déroulement d'expériences

Pour chaque expérience, On a pris un mélange de granules du plastique «ABS/PA » (40 g pour chaque produit, la taille moyenne est environ de 2 mm), on l'introduit dans la chambre de fluidisation, ensuite on met le souffleur en marche durant un temps désiré et à un débit déterminé. Les particules se mettent en frottement et en collision avec elles-mêmes et avec les parois de la chambre de fluidisation. Après avoir chargé les particules tribo-électriquement, elles sont tombées et séparées sous l'influence du champ électrique généré entre les deux électrodes inclinés et récupérées dans les bacs du collecteur. La deuxième phase concerne les mesures de la charge et de la masse du produit séparé dans chaque compartiment. La mesure de la charge acquise par ces particules est effectuée à l'aide d'une cage de Faraday reliée à un électromètre tandis que la masse a été mesurée par une balance électronique.

Les paramètres de réglage qu'offre ce séparateur sont :

- La tension appliquée U (kV) ;
- La distance entre les deux électrodes d (cm) ;
- L'angle d'inclinaison des électrodes θ ($^\circ$).

La température ambiante et l'humidité relative varient entre : $T=20-30^\circ\text{C}$, $HR= 30-50\%$.

3.1.3 Résultats et discussions

Le but de cette étude est, d'affirmer l'efficacité de cette installation, ainsi que de déterminer les facteurs qui peuvent influencer sur la masse collectée, (le taux de récupération).

3.1.3.1 Influence de la tension appliquée entre les électrodes

La figure 3.10 montre l'influence de la tension (U) sur la masse collectée, variant la valeur de la haute tension (U) de 5 kV à 25 kV, les autres paramètres sont maintenus constants :

- La distance entre les électrodes ($d= 17.5$ cm).
- L'inclinaison de séparateur ($\theta= 30^\circ$)

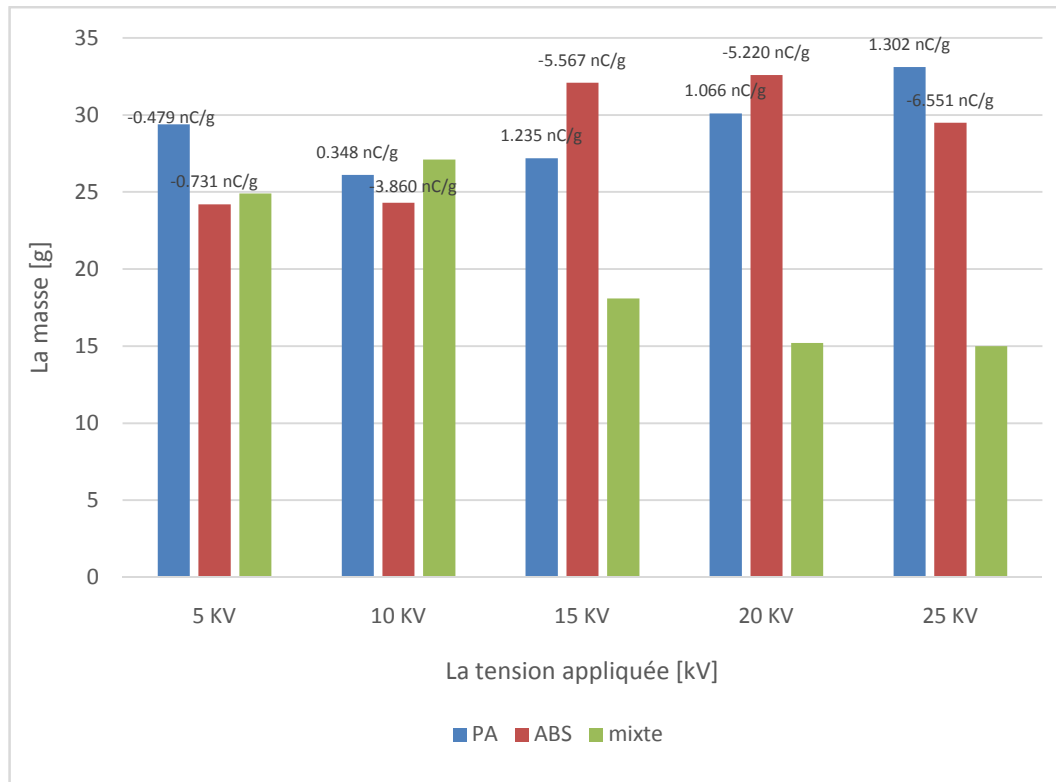


Figure 3.10. Variation de la masse collectée de PA, ABS et Mixte en fonction de la tension.

Selon la figure 3.10 on remarque que la récupération du produit collecté accroît avec l'augmentation de la haute tension appliquée (U). La haute tension est proportionnelle aux forces électriques agissant sur les particules. Une meilleure récupération a été obtenue entre : $U=15\text{KV}$ et 25 kV .

3.1.3.2 Influence de la distance inter-électrodes

La figure 3.11 montre l'influence de la distance (d) inter-électrodes sur la masse collectée, variant la distance (d) de 15 cm à 20 cm, les autres paramètres sont maintenus constants :

- La tension appliquée ($U= 20\text{kV}$).
- L'inclinaison de séparateur ($\theta=30^\circ$).

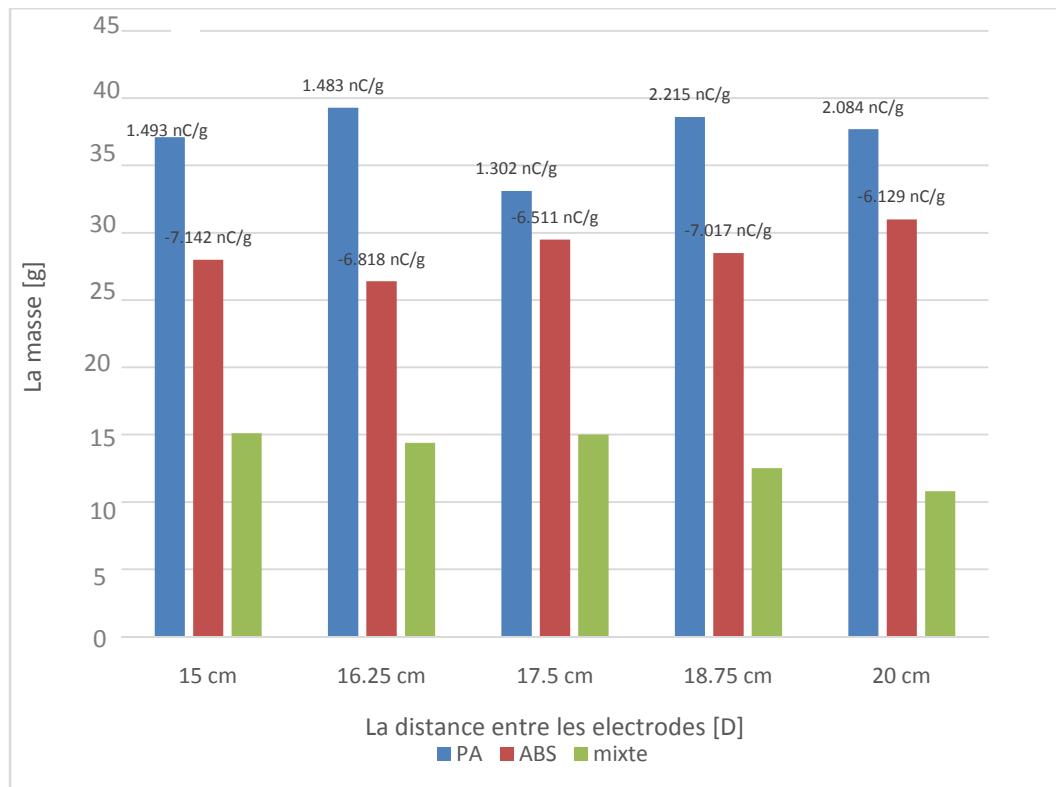


Figure 3.11. Variation de la masse collectée de PA, ABS et Mixte en fonction de la distance.

D'après les résultats de la figure 3.11, on remarque que la distance influe indépendamment sur la récupération de chaque produit. Elle est inversement proportionnelle à la récupération du mixte. Une petite distance fait accroître la force électrostatique, il en résulte une mauvaise trajectoire des particules dû à leurs collisions avec les parois collées aux électrodes.

3.1.3.3 Influence de l'angle d'inclinaison

La figure 3.12 montre l'influence de l'angle d'inclinaison (θ) sur la masse collectée, variant l'angle de séparateur (θ) de 20° à 40° , les autres paramètres sont maintenus constants :

- La tension appliquée ($U = 20\text{kV}$)
- La distance entre les électrodes ($d = 20\text{cm}$)

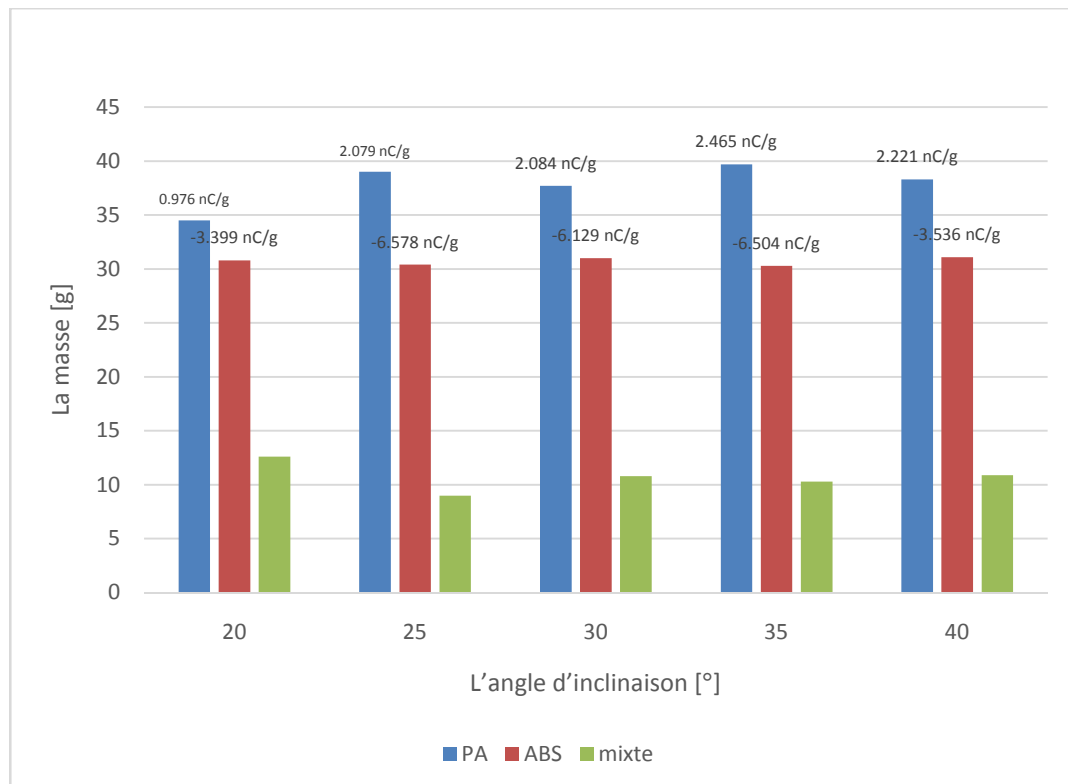


Figure 3.12. Variation de la masse collectée de PA, ABS et Mixte en fonction de l'angle d'inclinaison

On remarque que la récupération du produit collecté diminue avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison. Un grand angle θ provoque non seulement un temps de séjour très réduit des particules dans la zone de séparation mais aussi une augmentation de la force de pesanteur.

Le SPI a prouvé son efficacité dans le traitement d'un mélange granulaire de taille millimétrique ; mais par rapport à d'autre taille (pulvérulent), le SPI présente moins d'avantages, son rendement devient beaucoup plus faible. Basant sur la même idée nous avons réalisé un deuxième séparateur incliné destiné au trie des produits pulvérulents.

3.2 Séparateur à tambour incliné STI

3.2.1 Réalisation d'un STI

Comme le montre le schéma descriptif global de l'installation représenté sur la figure 3.13 et la photographie de la figure 3.14, l'appareil comprend dans sa conception deux électrodes placées sur un support incliné d'un angle variable de 0° à 45° ; l'une est de forme cylindrique (longueur : 300mm, rayon : 38mm (Figure 3.15.a), elle est entraînée par un moteur pas à pas et elle est reliée au travers un connecteur à une source haut tension de polarité négative pour générer le champ électrique. Une brosse a été placée, en contact avec l'électrode cylindrique, afin de récupérer le produit qui adhère sur sa surface. L'autre électrode est une plaque métallique lisse (longueur : 550 mm, largeur : 105 mm (Figure 3.15.b) reliée à la terre et montée sur un vibreur (Figure 3.16) pour faciliter le glissement des particules qui vont être récupérées vers le collecteur 1.

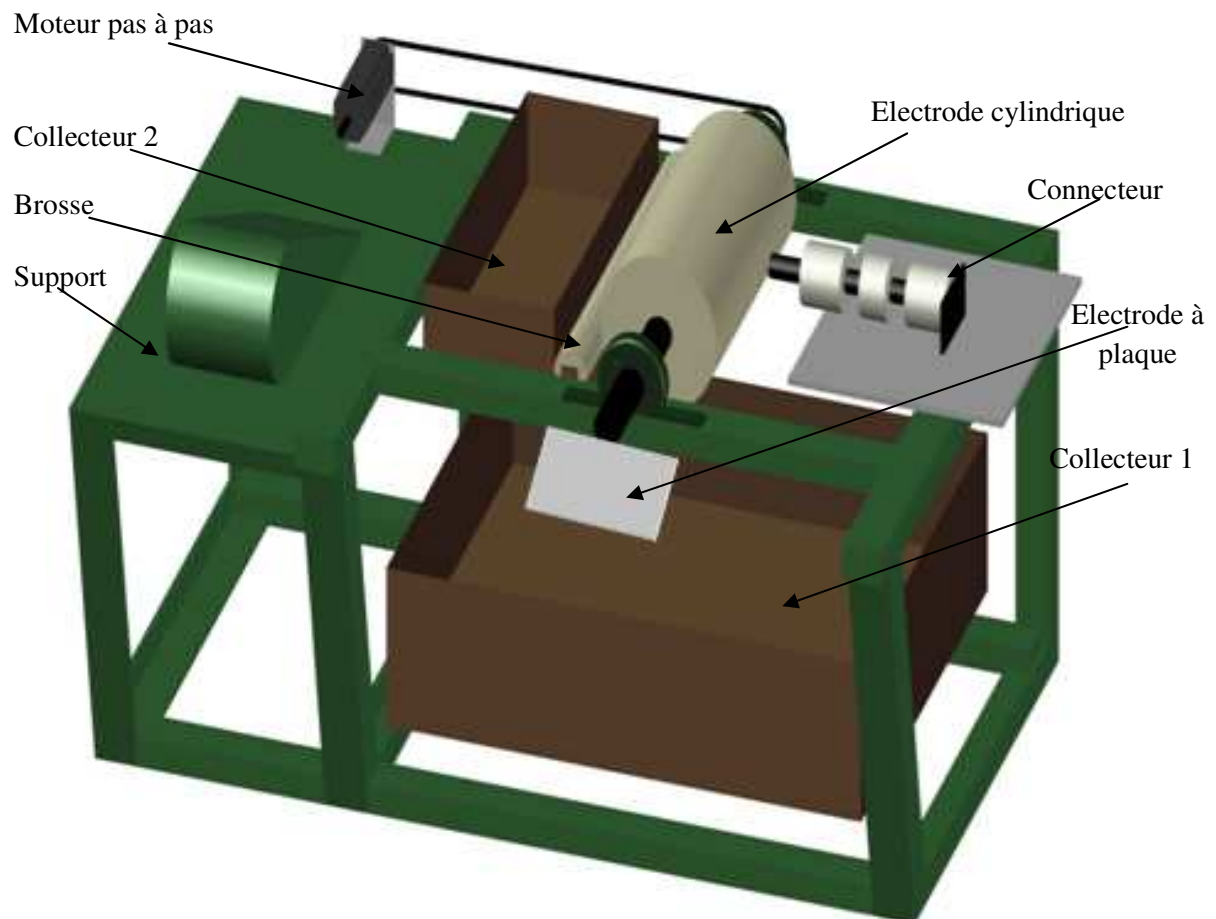


Figure 3.13. Représentations schématique de l'installation STI

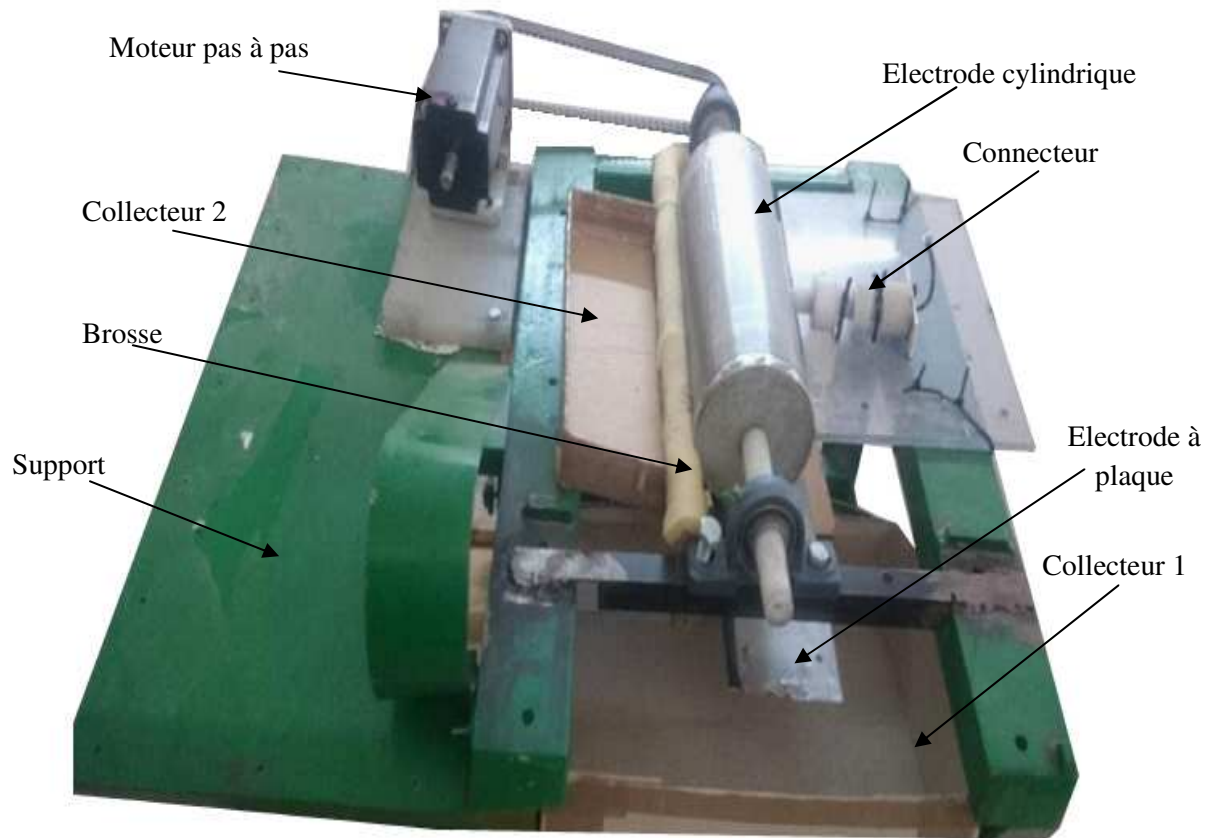


Figure 3.14. Photographie de l'installation STI

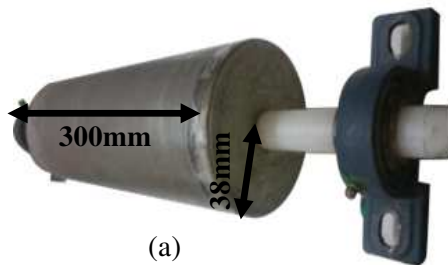


Figure 3.15. Photographie de deux électrodes.
a) Electrode cylindrique ; b) Electrode à plaque.

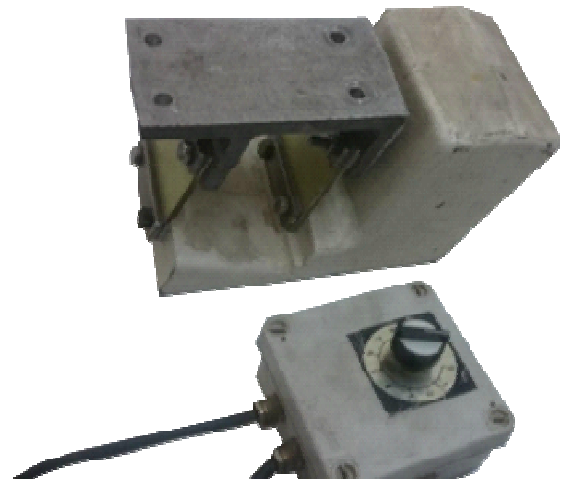


Figure 3.16. Photographie d'un vibreur.

3.2.1.1 Principe de fonctionnement d'un STI

Un mélange micronisé qui est préalablement chargé par atomisation est introduit directement dans le champ électrique généré entre les deux électrodes inclinées. L'électrode cylindrique reliée à la haute tension négative attire lors de son mouvement rotatif les particules contrairement polarisées, qui vont être détachées par la brosse puis récupérées vers le collecteur 2. Le deuxième type de particules reste sur l'électrode à plaque, les particules glissent et meurent sous l'effet de vibration pour être récupérées dans le collecteur 1.

3.2.2 Etude expérimentale

3.2.2.1 Type de matériaux utilisés

Le PVC est un polymère thermoplastique ; sa rigidité varie en fonction des additifs qu'on lui incorpore. Le PVC rigide qui a un aspect lisse et dur est utilisé pour les tuyaux de canalisation, revêtement de sol,...etc. Il est largement employé dans l'industrie de l'ameublement et dans le bâtiment ou le génie civil, les carcasses de produits électriques, électroniques et informatiques et bien d'autre. Il est recyclable et peut se fabriquer dans de multiples finitions et couleurs.

Le mélange binaire utilisé dans l'ensemble des expériences est caractérisé par deux couleurs différentes. Le polychlorure de vinyle ou PVC d'une couleur grise est considéré comme un déchet industriel produit par broyage des tubes en PVC qui possèdent des défauts de fabrication, et le polychlorure de vinyle non plastifié-ou UPVC d'une couleur blanche qui est une matière obtenue par processus de polymérisation industriel. La taille et la forme de quelques échantillons de particules est représenté dans la figure 3.17 et 3.18.

a) Caractéristiques du PVC

Le PVC est souple, peu coûteux et durable. Il est couramment utilisé dans les tuyaux, l'isolation des câbles électriques, des jouets et des vêtements. Le degré de flexibilité peut être contrôlé par la quantité et les caractéristiques des plastifiants ajoutés à la formule. La diminution des plastifiants permet la création de tuyauterie rigide, tandis que davantage de plastifiants créent un matériau souple pour l'isolation ou les vêtements ou encore les rideaux en plastique. Ce matériau est facile à couper proprement et adhère bien aux adhésifs.

b) Caractéristiques de UPVC

Le PVCu, parfois mentionné comme UPVC, est raide, rigide, solide et cassant. Ce matériau est élaboré sans ajout de plastifiants. Il est utilisé dans les tuyaux, les châssis de fenêtres, en remplacement du bois dans la construction et dans les appareils médicaux ou dentaires. On le trouve souvent à l'extérieur de la maison, c'est un plastique durable qui ne changera pas de forme lorsqu'il est exposé aux éléments physiques. Il est également utilisé dans les tuyaux en plastique ; le UPVC propose des parois intérieures lisses pour une meilleure circulation de l'eau et il est résistant à l'érosion chimique.

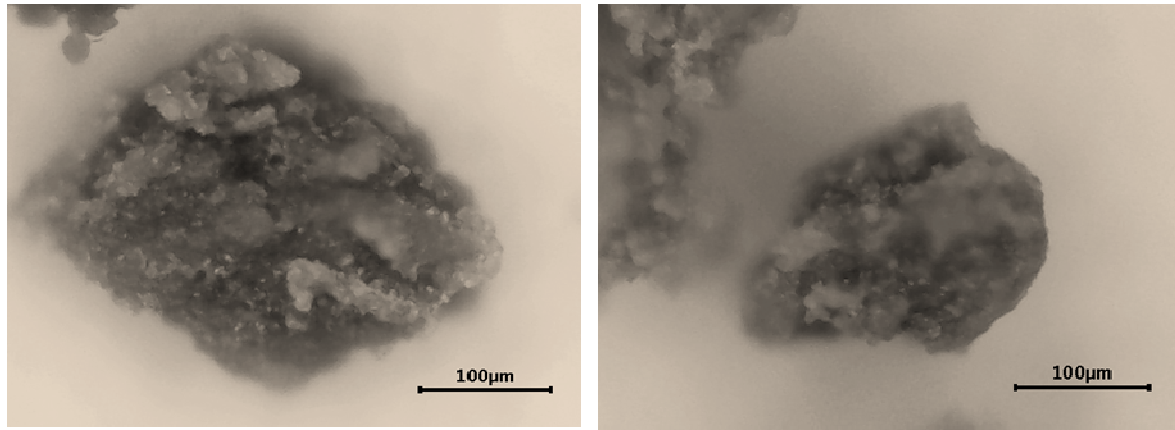


Figure 3.17. Forme et la taille des particules de PVC gris utilisées dans l'étude expérimentale

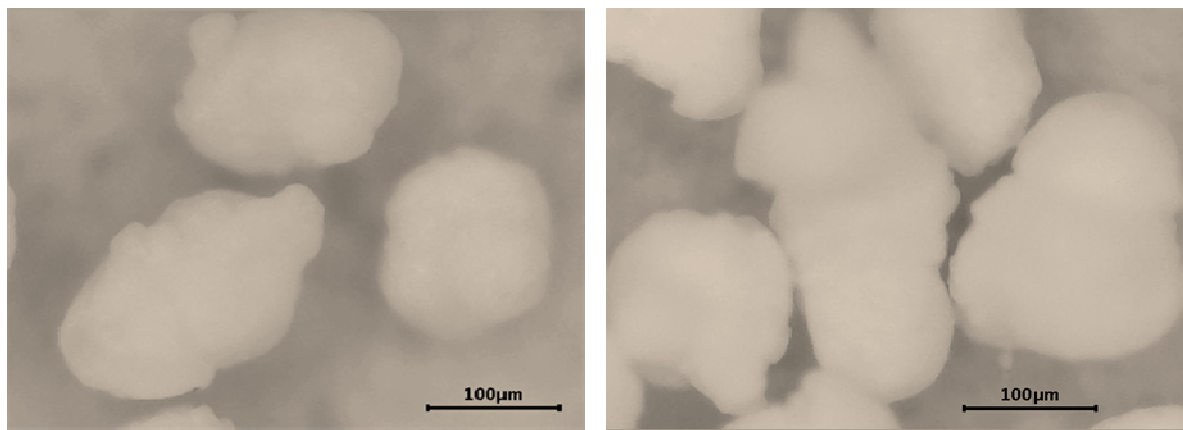


Figure 3.18. Forme et la taille des particules de UPVC Blanc utilisées dans l'étude expérimentale

3.2.2.2 Déroulement d'expériences

Pour chaque expérience, on met en marche le moteur pas à pas, la source haute tension et le vibreur. Ensuite on dépose le produit micronisé à séparer sur l'électrode plane (30 g pour chaque produit). Sous l'effet des vibrations le mélange micronisé est transporté vers la zone du champ électrique et il se sépare. Chaque type du produit séparé est récupéré au niveau de son propre collecteur. La deuxième phase consiste à mesurer la charge, la masse et la pureté du produit séparé dans chaque collecteur.

Les essais ont été réalisés sur les deux types d'isolants précédemment cités (UPVC et PVC).

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

$$Réc(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} * 100 \quad (3.4)$$

Avec m_{ic} : quantité du produit i considéré collecté dans la partie qui lui est réservée.

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

L'analyse de la pureté a été réalisée à partir d'une méthode visuelle (Figure 3.19) onze enceintes transparentes ont été remplies par des mélanges granulaires de PVC/UPVC. Le ratio dans chaque enceinte varie d'un pas de 10 % par rapport à son adjacente. La comparaison des couleurs permet d'établir le rapport entre le matériau récupéré et la référence, déterminant ainsi sa pureté.



Figure 3.19. Méthode visuelle pour la pureté.

Les paramètres de réglage qu'offre ce séparateur sont :

- La tension appliquée U (kV).
- le débit du produit à séparer (g/s) dû à l'intensité du vibration
- la vitesse de rotation du cylindre tournant qui est mesurée par un tachymètre (tr/min).

La température ambiante et l'humidité relative varient entre : $T=20-30^{\circ}\text{C}$, $HR= 30-50\%$.

3.2.3 Résultats et discussions

3.2.3.1 Influence de la tension appliquée

La figure 3.20 montre l'influence de la tension U sur la masse collectée et la pureté, variant la valeur de la haute tension de 5 kV à 25 kV, les autres paramètres sont maintenus constants :

- La vitesse de rotation du cylindre est 45tr/min ;
- Le débit de produit est de 8.5 g/s.

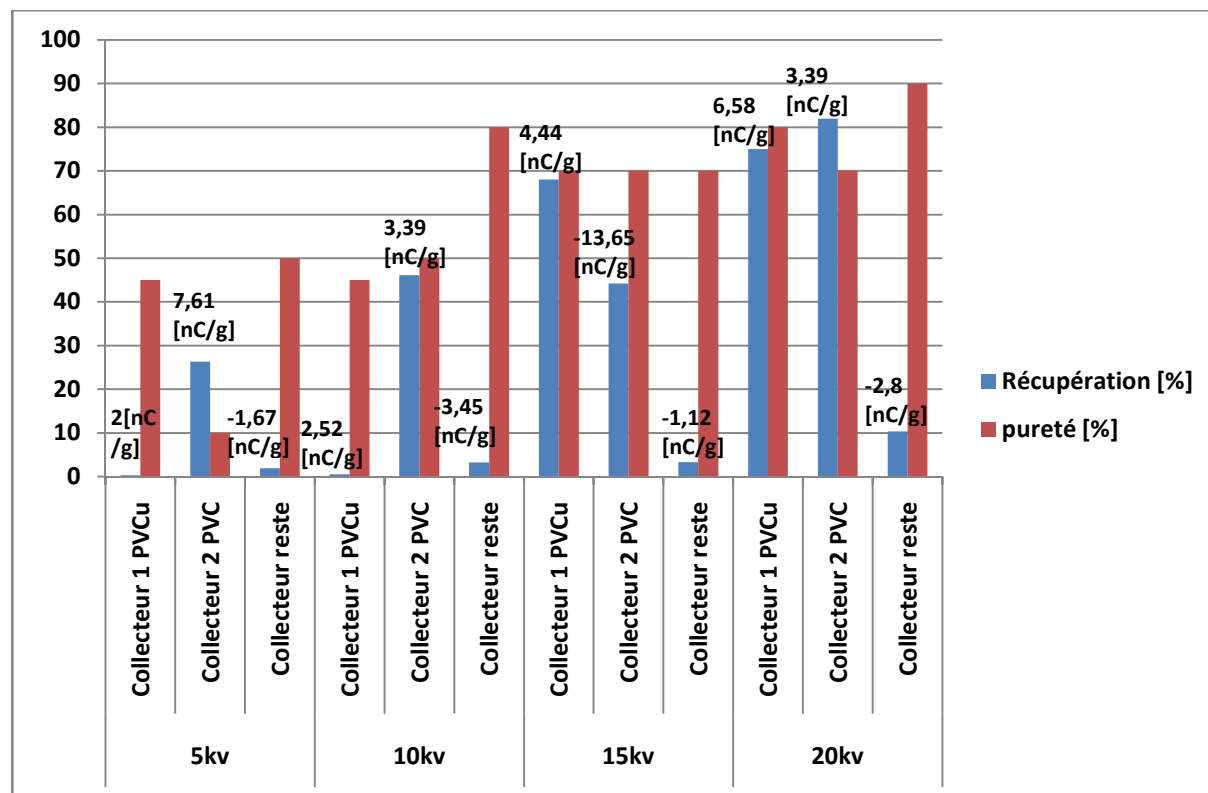


Figure 3.20. Variation de la pureté et la masse collectée de PVC, UPVC et le reste en fonction de la tension appliquée

D'après les résultats de la figure 3.20, la récupération et la pureté du produit collecté sont proportionnelles à la valeur de la haute tension appliquée. Une valeur relativement élevée est nécessaire pour la séparation des particules micronisées.

3.2.3.2 Influence du débit appliqué

La figure 3.21 montre l'influence de débit du produit sur la masse collecté et la pureté, variant le débit de 7g/s à 10g/s, les autres paramètres sont maintenus constants:

- La tension appliquée est de 18kV
- La vitesse de rotation du cylindre est de 45 tr/min

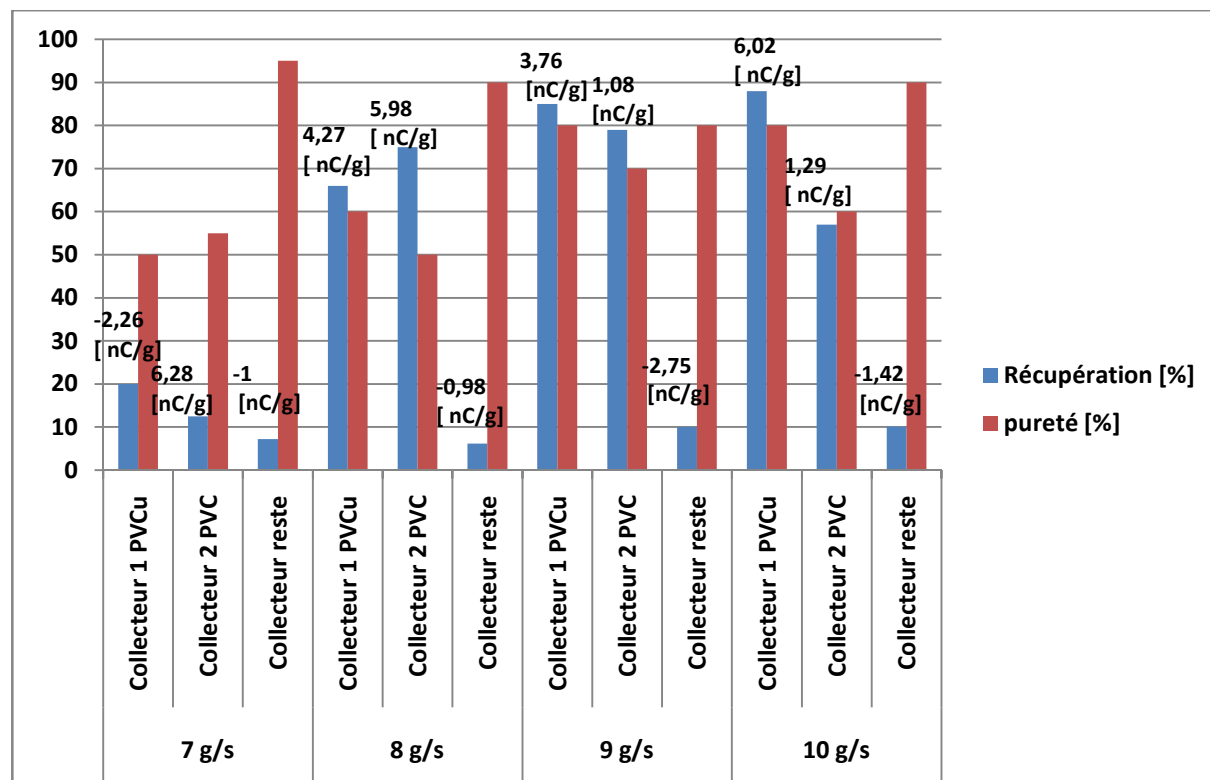


Figure 3.21. Variation de la pureté et de la masse de PVC, UPVC et le reste en fonction du débit de produit

Une bonne séparation est obtenue à des valeurs élevées du débit. L'utilisation des basses valeurs du débit augmente le temps de séjours des particules dans la zone de séparation. Il en résulte une forte adhésion des particules sur les électrodes, à cause de la taille des particules.

3.2.3.3 Influence de la vitesse appliquée

La figure 3.22 montre l'influence de la vitesse de rotation du cylindre sur la masse collectée et la pureté, variant la vitesse de rotation du cylindre de 5 tr/min à 45 tr/min, les autres paramètres sont maintenus constants:

- Le débit est de 8.5 g/s
- La tension appliquée est de 18 kV

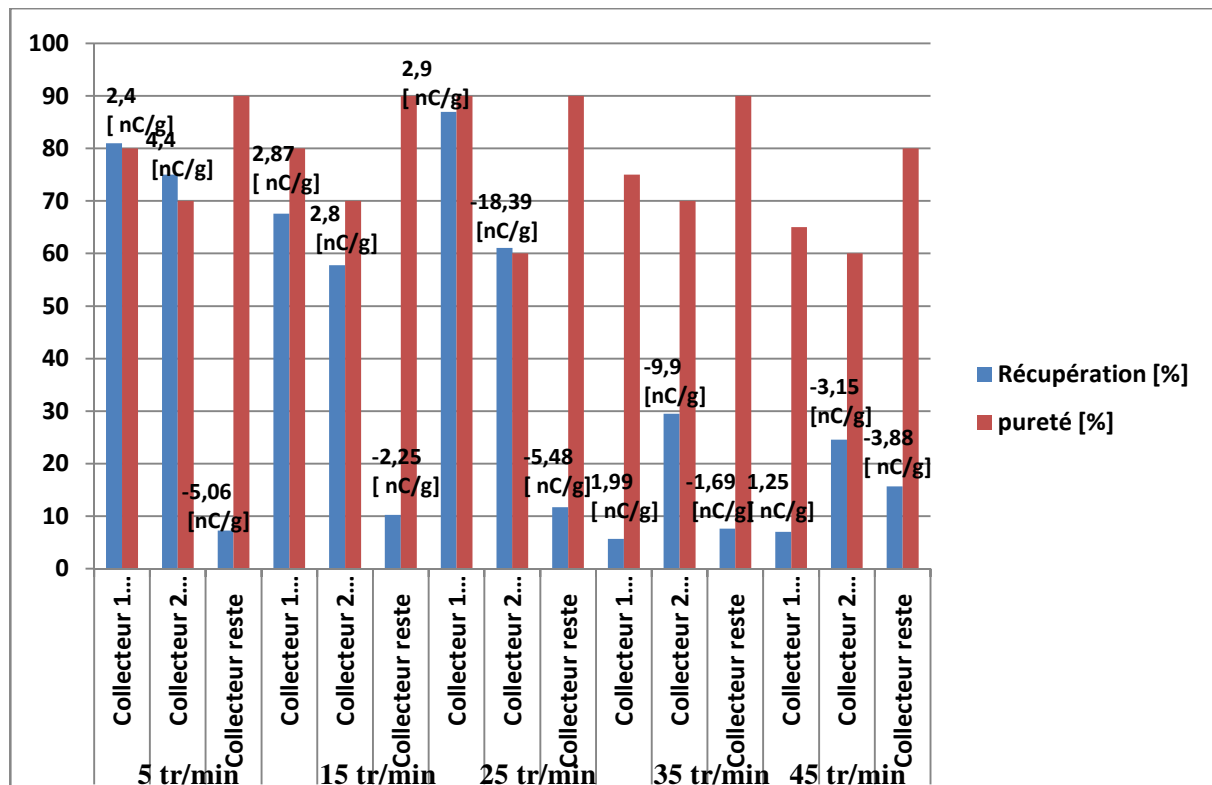


Figure 3.22. Variation de la pureté et de la masse de PVC, UPVC et le reste en fonction de la vitesse de cylindrique

Selon la figure 3.22 la récupération et la pureté de produit collecté sont inversement proportionnelles à la vitesse de rotation de l'électrode, qui est à son tour proportionnelle à la force centrifugeuse. Cette force provoque le détachement préalable des granules.

3.3 Conclusion

Deux nouvelles installations ont été réalisées : le séparateur à plan incliné SPI et le séparateur à tambour incliné STI. Malgré la différence des deux techniques utilisées, en particulier au niveau des forces appliquées sur les particules, les deux procédés utilisent l'inclinaison comme paramètre primordial qui influe directement sur le rendement de la séparation. Le SPI est efficace pour le tri des particules millimétriques ainsi que les grandes particules, alors que le STI est avantageux pour la séparation des particules micronisées et sous-millimétriques. Une étude paramétrique est naturellement la suite d'une nouvelle réalisation. Après plusieurs expériences de faisabilité ainsi que celles préliminaires, nous avons pu déterminer l'influence des paramètres contrôlables sur le rendement de chaque séparateur.

Bien que les deux installations sont efficaces, L'étude technico-économique sera désavantageuse. Pour séparer un mélange dont les particules ont plusieurs tailles à la fois, on doit utiliser deux installations en cascade le SPI et le STI, chose qui est indésirable industriellement. C'est pour cela nous allons réaliser un troisième séparateur capable de trier un mélanges à plusieurs tailles de particules.

CHAPITRE 4

REALISATION D'UN SEPARATEUR A QUATRE ELECTRODES CYLINDRIQUES

CHAPITRE 4 : REALISATION D'UN SEPARATEUR A QUATRE ELECTRODES CYLINDRIQUES

Le but de ce dernier chapitre est de présenter un séparateur à quatre électrodes cylindriques qui se démarque par le fait qu'il offre la possibilité de diminuer le nombre d'impact entre les particules fortement chargées et l'électrode, ainsi il est capable de trier à la fois les particules de différentes tailles (millimétrique, sous millimétrique et micronisé).

Pour la première partie du présent chapitre nous allons présenter le chargeur triboélectrique à lames.

Dans la deuxième partie nous allons présenter le séparateur à quatre électrodes cylindriques destiné à la séparation des produits granulaires. Une étude paramétrique expérimentale est primordiale afin de connaître l'influence des variables sur le rendement du séparateur.

Une troisième partie consiste à présenter le séparateur à quatre électrodes cylindriques tournant qui est destiné à la séparation des produits micronisés. La méthodologie des plans d'expérience [176-177] est utilisée pour la modélisation et l'optimisation du processus de séparation. Ceci permet d'assurer un fonctionnement optimal de l'installation.

4.1 Réalisation d'un chargeur triboélectrique à lames

La nouvelle configuration de chargeur triboélectrique à lames présentée dans la figure 4.1 et 4.2 est constituée de deux tubes de cuivre coaxiaux, dont le tube intérieur métallique est traversé par trois lames métalliques en acier inoxydable, décalées l'une par rapport à l'autre d'un angle de 90°. Les lames métalliques peuvent se déplacer librement pour assurer leur auto-ajustement sur la surface intérieure du tube extérieur lors de la rotation. Le mélange micronisé introduit à l'intérieur de ce dispositif se charge principalement par collision et frottement avec ces lames et les parois internes [178-179].

4.1.1 Choix des matériaux

Toutes les parois et les lames sont conductrices, afin de simuler le comportement d'un broyeur et/ou atomiseur. Des forces mécaniques sont exercées sur les particules tout au long du chargeur. La distance entre la paroi interne du cylindre extérieur et les lames est inférieure à 1 mm, à cet endroit, les particules sont soumises à un écrasement dont l'intensité dépend de leurs tailles. Bien évidemment plusieurs types de frottement des particules s'effectuent à l'intérieur du chargeur permettant ainsi leur chargement triboélectrique. Ces types de collisions seront abordés en détail dans la sous-section 4.1.3.

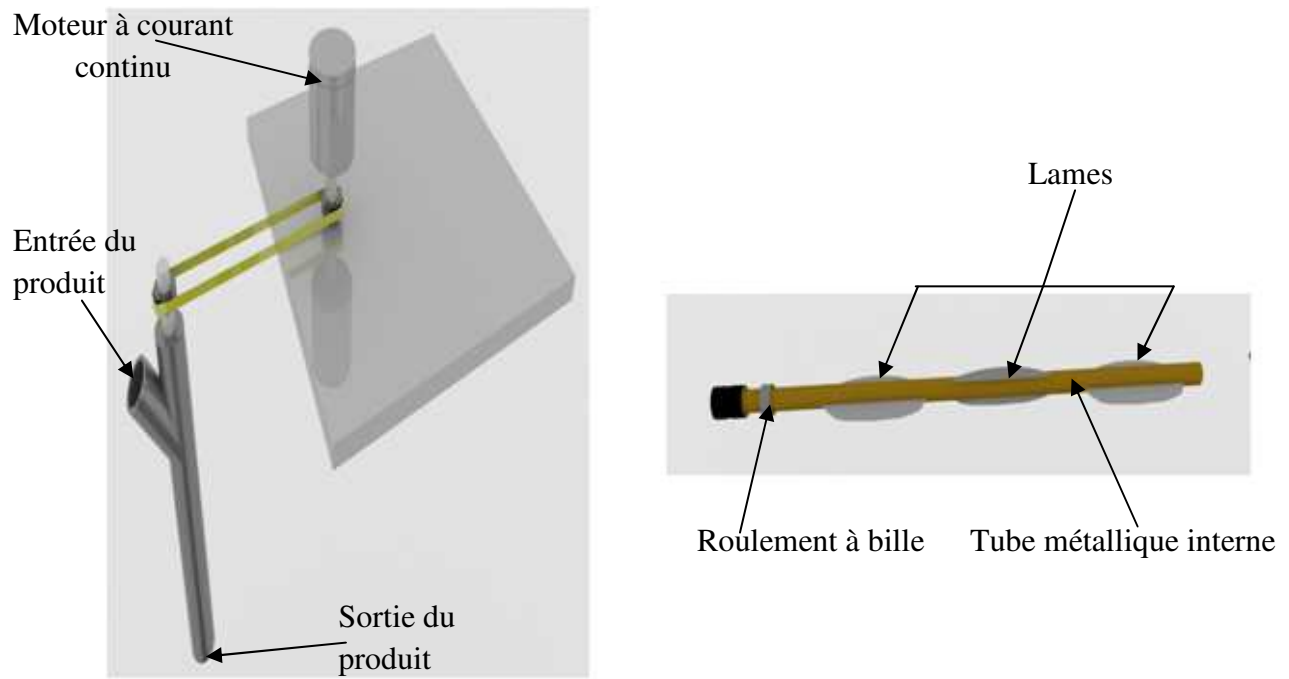


Figure 4.1. Schéma descriptif de chargeur triboélectrique à lames.

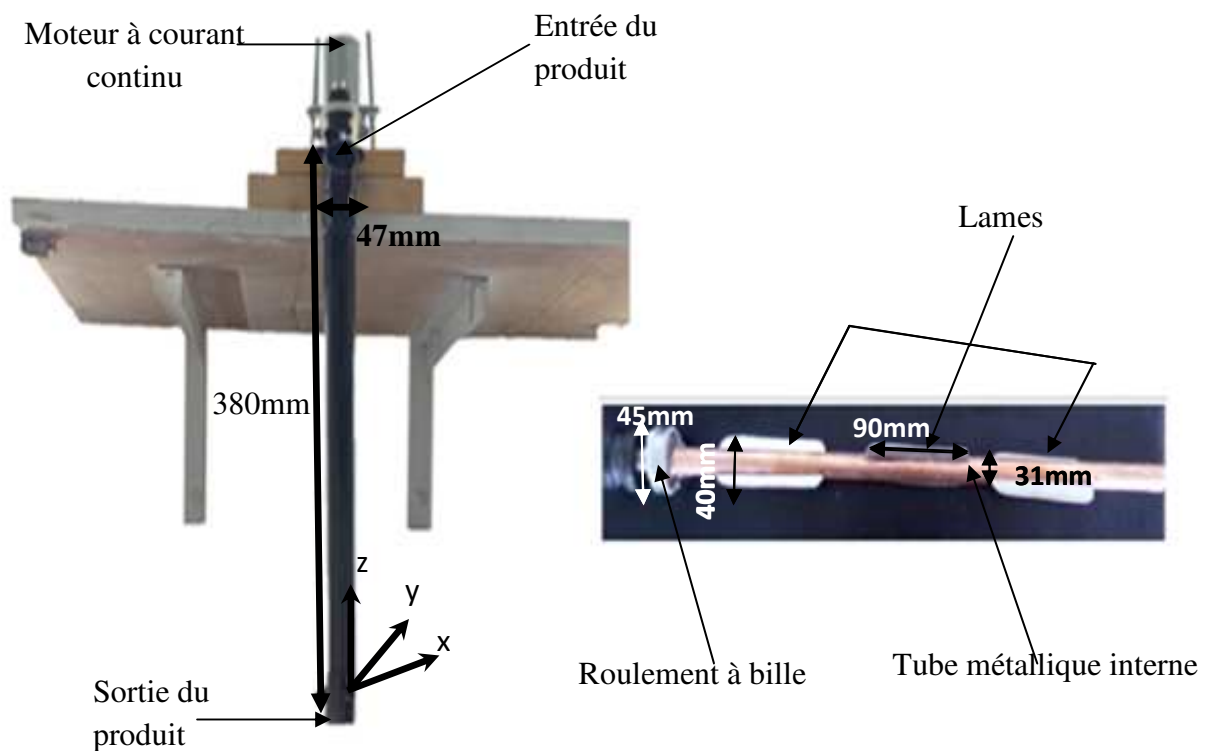


Figure 4.2. Photographie de chargeur triboélectrique à lames.

4.1.2 Caractéristiques d'un dispositif de chargement à lames

Le dispositif présenté dans la figure 4.2 est applicable pour différentes tailles des particules, il possède les caractéristiques suivantes :

- Des parois et des lames conductrices dont le but est de :
 - Simuler le comportement des particules dans un broyeur ;
 - Obtenir la même nature de charge électrique (le signe et le taux d'une manière relative) issue d'un broyeur et/ou atomiseur ;
 - Avoir une bonne robustesse du chargeur, le fait que les particules vont être coincées, même écrasées dans la distance entre les lames et les parois;
- Des lames facilement échangeable, en fonction de :
 - La taille granulométrique des particules (pulvérulentes, sous-millimétriques et granulaires) ;
 - L'électronégativité des particules à charger ;
 - La rigidité des particules à charger.
- Deux tubes coaxiaux en cuivre:
 - Facilement détachables, afin de les nettoyer (de la poudre surtout) ;
 - Facilement échangeables (par un tube autrement dimensionné) ;
 - Facilement dissociables, pour y coller des lames supplémentaires.
- Un système de rotation constitué d'une courroie, deux poulies, un roulement à bille et trois supports latérales déphasé de 120°.
- Un moteur à courant continu : chaque phase du chargement a ses propres caractéristiques, ces phases sont en fonction de la vitesse de rotation et le seul moyen de la contrôler est d'utiliser un variateur de vitesse.
- Un double fonctionnement :
 - Fonctionnement indépendant : pour réaliser des expériences de chargement triboélectrique, où le mélange granulaire se compose d'un seul produit, ce genre d'étude généralement a comme but d'évaluer le taux de chargement d'un produit, variant les paramètres de réglage.
 - Fonctionnement intégré avec des séparateurs électrostatiques : à chute libre, à cylindre tournant, à tapis roulant, ...etc. contrairement au premier fonctionnement, le mélange granulaire est composé de deux produits ou plus. Ce type d'étude compare les taux de charge acquise et l'efficacité de séparation.

4.1.3 Types des collisions dans le chargeur triboélectrique à lames

L'acquisition de charge par effet triboélectrique se produit entre deux surfaces, leur contact est indispensable. Des charges électriques passent de l'une à l'autre, modifiant ainsi le nombre de charges contenues dans chacune des surfaces, ce qui les rend contrairement polarisées.

Le mouvement des particules isolantes dans le dispositif à lames implique quatre types de collisions : collision des particules de même matière, collision des particules de matière

différente, collision entre les particules et les parois interne du dispositif et collision entre les particules et les lames.

4.2 Réalisation du dispositif de séparation à quatre électrodes cylindriques verticales

L'installation représentée sur la photo de la figure 4.3 comprend principalement des tubes en matière isolante (PVC) dont le diamètre est de l'ordre de 100 mm et une longueur de 1100 mm. Une surface extérieure du tube dont la longueur est de l'ordre de 1000 mm, est rendu conductrice par l'application d'une couche de papier en aluminium [180].

Chaque électrode est équipée d'un axe métallique (diamètre: 11 mm) avec des extrémités filetées. Ces axes passants par les centres des électrodes sont fixés dans des supports isolant (Figure 4.4) qui assurent l'ajustement de la position des électrodes suivant les deux axes O_x et O_y . Chaque deux électrode du même côté sont reliées à une source haute tension. Les dimensions de l'électrode sont présentées en détail dans la figure 4.5.

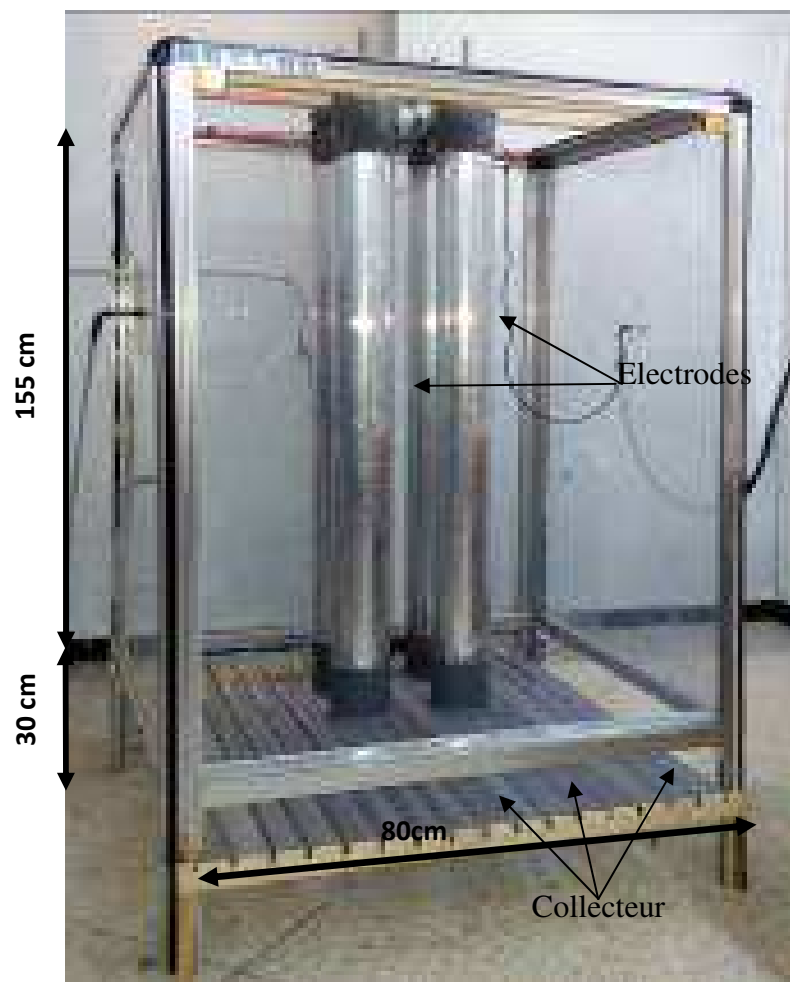


Figure 4.3. Photographie de séparateur à quatre électrodes cylindriques verticales



Figure 4.4. Photos d'électrodes et leurs supports

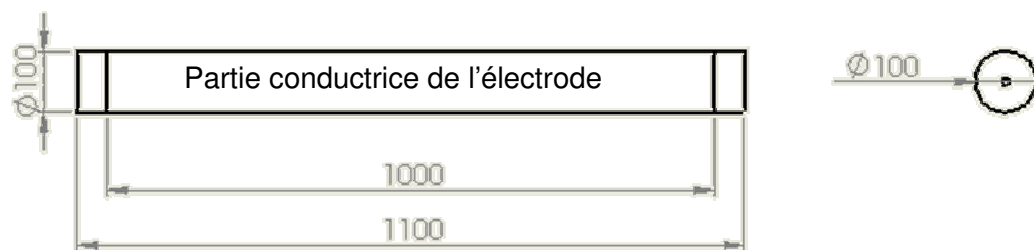


Figure 4.5. Dimension de l'électrode

Dans la partie inférieure de l'installation un collecteur à plusieurs cellules est placé à une distance de 1200 mm au-dessous du point d'alimentation en produit granulaire. Le collecteur est réalisé à partir de deux baguettes en matière isolante comportant plusieurs encoches séparées d'une distance de 20 mm. Les encoches servent comme support pour la partie rigide des cellules. Cette conception permet la récupération du produit dans chaque cellule sans affecter le produit récupéré dans les autres cellules.

La figure 4.6 réalisée par le logiciel Matlab montre un aperçu sur le champ électrique généré entre les quatre électrodes cylindriques verticales suivant les deux axes x et y.

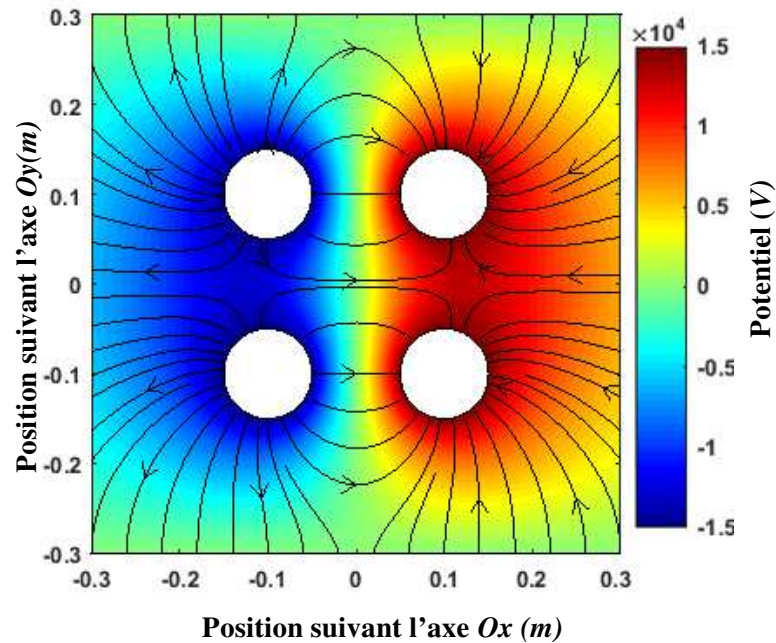


Figure 4.6. Potentiel et lignes du champ électrostatique dans un séparateur à quatre électrodes cylindrique.

4.2.1 Principe de fonctionnement

Après le chargement triboélectrique des particules au cours de l'opération de tamisage, elles sont introduites à l'aide d'un entonnoir dans le champ électrique généré entre les quatre électrodes cylindriques qui sont reliées à deux sources haute tension de polarité opposée.

Les particules qui ont pris une charge positive vont être attirées par les deux électrodes négatives puis récupérées dans les cellules installées dans le côté négatif par rapport à l'axe de symétrie de l'installation, tandis que les particules chargées négativement vont être attirées par les électrodes positives pour tomber ensuite dans les cellules installées dans le côté positif par rapport à l'axe de symétrie de l'installation. Les particules insuffisamment chargées s'accumulent dans la cellule de centre.

4.2.2 Etude expérimentale

4.2.2.1 Procédure expérimentale

Le mélange de matériaux granulaire utilisé dans la présente étude comprend deux types de polymères, l'Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) de couleur marron et l'Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) de couleur noir de taille millimétrique ($\pm 2\text{mm}$).



Figure 4.7. Echantillon des granules d'Acrylonitrile butadiène styrène ABS (marron et noir).

Cette étude vise l'analyse expérimentale de la liaison entre la pureté du produit récupéré à la sortie du séparateur et les trois facteurs suivant : Diamètre des particules $\varnothing$ (mm); la différence de potentiel appliquée entre deux électrodes de polarité opposées U (kV) et la distance entre deux électrodes de même polarité D (cm).

Après quelques essais préliminaires nous avons défini les limites de l'espace expérimental (Tableau 4.1).

Tableau 4.1. Limite de l'espace expérimentale.

Facteurs	Modalité		
Tension U [kV]	20	25	30
Distance inter électrode D [Cm]	10	15	
Diamètre de particule $\varnothing$ [mm]	$1.4 \leq \varnothing < 2.8$		$2.8 \leq \varnothing 2$

Les combinaisons possibles entre les modalités de ces facteurs permettent de réaliser 12 expériences. Les paramètres des expériences sont groupés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Expériences réalisées pour l'élaboration d'un modèle linéaire.

Essai	Facteurs		
	Distance D	Diamètre de particule Ø	Tension U
N°	[cm]	[mm]	[kV]
1	10	Ø1	30
2	10	Ø1	25
3	10	Ø1	20
4	10	Ø2	30
5	10	Ø2	25
6	10	Ø2	20
7	15	Ø1	30
8	15	Ø1	25
9	15	Ø1	20
10	15	Ø2	30
11	15	Ø2	25
12	15	Ø2	20

Pour chaque expérience de séparation, On a pris l'échantillon de granules d'ABS marron et noir, (100 g pour chaque produit).le trie en fonction de la taille a été fait à l'aide d'un tamiseur électrique (FRITSCH), (Figure 4.8) pendant une durée de 5 min. Deux gammes de produit ont été obtenues. La première gamme possède un diamètre compris entre 1.4mm et 2.8 mm tandis que le diamètre de la deuxième gamme est supérieur à 2.8 mm.

Le chargement de mélange de 100g pour chaque produit a été effectué par la vibration résultante de tamiseur.

Ensuite, on introduit les deux types du produit récupéré à l'aide d'un entonnoir dans le champ électrique généré entre les quatre électrodes cylindriques. Les particules différemment chargées sont alors déviées dans leur chute et attirées par les électrodes contrairement polarisées selon leur charge acquise puis elles sont récupérées dans le collecteur. Après la séparation on mesure la charge et la masse dans chaque cellule à l'aide d'une cage de Faraday reliée à un électromètre et une balance électronique.

Toutes les expériences sont réalisées dans des conditions climatiques relativement stables : $HR = 50 \pm 2\%$, $T^\circ = 20 \pm 2^\circ C$.

Pour évaluer la qualité de produit récupéré dans chaque cellule nous avons prélevé un échantillon du produit à partir de chaque cellule. Les particules de l'échantillon sont triées manuellement pour effectuer la mesure de la masse des particules d'ABS marron et ABS noir.

Les valeurs obtenues par l'application de cette méthode, sont groupées dans les tableaux 4.3-5.

Dans cette étude, la pureté des produits récupérés a été utilisée comme un critère de qualité.

$$Pur(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tci}} \times 100 \quad (4.1)$$

Avec : m_{ic} : masse du produit i collecté dans la partie qui lui est réservé

m_{tci} : masse totale du produit collecté dans le compartiment réservé au produit i .



Figure 4.8. Photographie du tamiseur à vibrations FRITSCH.

Tableau 4.3. Masse du produit récupéré dans chaque cellule du collecteur (g).

Expérience		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ø (mm)		Ø1	Ø1	Ø1	Ø2	Ø2	Ø2	Ø1	Ø1	Ø1	Ø2	Ø2	Ø2
U(kV)		30	25	20	30	25	20	30	25	20	30	25	20
Distance (cm)		10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15	15
Centre des cellules (cm)	-32,5	3,3	2,1	1,6	1,5	1,8	1,1	1,4	1,1	0,8	1,8	1,3	1,4
	-27,5	5,9	2,9	1,8	2,1	1,5	1,2	2	1,9	1,4	2,1	1,2	1,5
	-22,5	11,2	7,3	3,9	2,8	3,7	3	3,7	3,3	2,7	3,2	2,4	2
	-17,5	20,4	13,1	10	7,1	7,8	5,5	6,2	5,7	4,6	6,1	5,5	4,4
	-12,5	21,1	18,1	18,8	16,6	12,7	13,9	11,9	12,4	10,3	20,7	8,3	8,5
	-7,5	16	24,7	20,3	24,8	25,1	25,6	20,1	17,5	20,6	22,5	22	20,5
	-2,5	21	26,7	29,9	47,3	47,2	67,7	65,7	56,3	50	45,3	47,9	43,4
	2,5	26,9	37,5	44,4	66,7	48	54,4	52,2	48,9	49,1	53,1	50	47,4
	7,5	19,4	21,6	16,7	21,1	25,5	21,4	11,6	11,7	12,5	17,8	11,9	20,5
	12,5	22,8	14,4	10,8	11	9,6	8,3	8,6	9,3	10,1	11	8,2	14,3
	17,5	15	9,2	6,6	5,4	5,2	6	5,3	4,9	4,9	5,2	4,9	9,1
	22,5	7,2	3,9	3,2	2,6	3,1	3,4	2,5	3,1	3,3	2,5	2,8	3,1
	27,5	2,9	1,9	1,7	1,8	1,9	1,9	1,7	2,1	2,1	1,4	2	2,4
	32,5	1,1	1,6	1,1	2	1,5	1,4	1,2	1,3	1,5	1	1,2	2,3
	37,5	1	1,4	1,5	1,9	1,5	1	1	1,2	1,3	0,9	1,3	1,4

Tableau 4.4. Pourcentage de l'ABS noir (%).

Expérience		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ø (mm)		Ø1	Ø1	Ø1	Ø2	Ø2	Ø2	Ø1	Ø1	Ø1	Ø2	Ø2	Ø2
U(kV)		30	25	20	30	25	20	30	25	20	30	25	20
Distance (cm)		10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15	15
Centre des cellules (cm)	-32,5	93,9	84,5	75,0	66,7	63,6	61,1	60,0	54,6	55,0	61,1	57,9	55,0
	-27,5	94,9	86,3	77,7	76,2	75,0	73,3	55,0	57,9	53,7	57,2	58,3	53,3
	-22,5	96,4	90,5	84,6	71,4	67,9	66,9	56,8	63,6	60,0	56,3	54,2	57,9
	-17,5	95,1	93,0	91,0	80,3	74,0	79,5	55,6	62,5	61,0	63,2	52,7	54,6
	-12,5	95,6	93,8	92,0	83,6	83,6	73,3	62,2	60,4	59,0	68,3	56,1	61,1
	-7,5	89,9	88,5	87,2	83,5	76,5	87,7	64,3	65,0	59,0	72,6	54,0	57,8
	-2,5	81,1	78,8	76,5	71,2	66,9	62,2	56,6	56,6	58,8	55,0	52,4	52,9
	2,5	24,6	15,0	5,4	31,2	18,4	11,5	39,7	42,2	40,8	28,0	41,2	36,5
	7,5	6,0	8,7	11,4	15,9	15,5	13,5	39,3	35,7	41,8	24,5	42,2	42,9
	12,5	5,6	10,3	14,9	18,2	17,7	19,0	36,0	42,5	43,5	23,6	45,0	40,4
	17,5	5,4	12,6	19,7	27,8	30,0	25,0	41,0	45,0	23,2	22,9	42,5	38,7
	22,5	2,9	12,3	21,8	33,4	16,7	29,0	46,1	40,0	33,3	24,0	46,4	35,5
	27,5	7,4	12,5	17,6	38,9	16,9	36,8	41,0	40,0	47,6	28,6	40,0	37,5
	32,5	9,1	13,7	18,2	38,0	28,6	40,0	41,7	38,5	42,8	28,6	33,4	34,5
	37,5	12,5	19,6	26,7	31,5	40,0	40,0	40,0	36,4	33,3	33,7	45,0	42,8

Tableau 4.5. Pourcentage de l'ABS marron (%).

Expérience		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ø		Ø1	Ø1	Ø1	Ø2	Ø2	Ø2	Ø1	Ø1	Ø1	Ø2	Ø2	Ø2
U(kV)		30	25	20	30	25	20	30	25	20	30	25	20
Distance (cm)		10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15	15
Centre des cellules (cm)	-32,5	6,1	10,6	15,0	33,3	36,4	38,9	40,0	45,4	45,0	38,9	42,1	45,0
	-27,5	5,9	9,1	12,3	23,8	25,0	26,6	45,0	42,1	46,3	42,8	51,7	44,7
	-22,5	3,6	4,5	5,4	28,6	32,1	33,1	43,2	36,3	40,0	43,7	45,8	42,1
	-17,5	4,9	7,0	9,0	19,7	26,0	20,5	44,4	37,5	38,0	36,8	47,3	45,4
	-12,5	4,5	6,2	8,0	16,4	16,4	26,7	37,8	39,6	41,0	31,7	43,9	38,9
	-7,5	10,2	11,5	12,8	16,5	23,5	12,3	35,7	35,0	41,0	27,4	46,0	52,2
	-2,5	19,9	21,7	23,5	18,8	33,1	47,8	43,4	43,4	41,2	45,0	47,6	47,1
	2,5	75,4	75,0	74,6	68,8	81,6	78,5	60,3	57,8	59,2	72,0	58,8	63,5
	7,5	94,0	91,3	88,6	84,1	84,5	86,5	60,7	64,3	58,2	75,7	57,8	57,1
	12,5	94,4	90,2	86,1	81,8	72,3	81,0	64,0	57,5	56,5	76,4	55,0	59,6
	17,5	94,6	87,4	80,3	72,2	70,0	75,0	59,0	55,0	76,8	73,1	57,5	61,3
	22,5	97,2	87,7	78,2	66,6	83,3	71,0	53,9	60,0	66,7	76,0	53,6	64,5
	27,5	92,6	87,5	82,4	61,1	63,1	63,2	59,0	60,0	52,4	71,4	60,0	62,5
	32,5	90,9	86,4	81,8	62,0	71,4	60,0	58,3	61,5	57,2	71,4	66,6	65,5
	37,5	87,5	80,4	73,3	68,5	60,0	60,0	60,0	63,6	66,7	66,7	55,0	57,2

La figure 4.9 donne un aperçu visuel sur la qualité des produits récupérés au cours des essais N° 1 et N° 10.

**Figure 4.9.** Produit récupéré au cours des essais 1 (a) et 10 (b).

Un aperçu sur la trajectoire de particules obtenue lors de simulation par un programme écrit sous Matlab est présenté dans la figure 4.10.a qui montre la trajectoire de 1000 particules et la figure 4.10.b qui montre le comportement d'une particule avant et après un impact avec l'une des électrodes de l'installation.

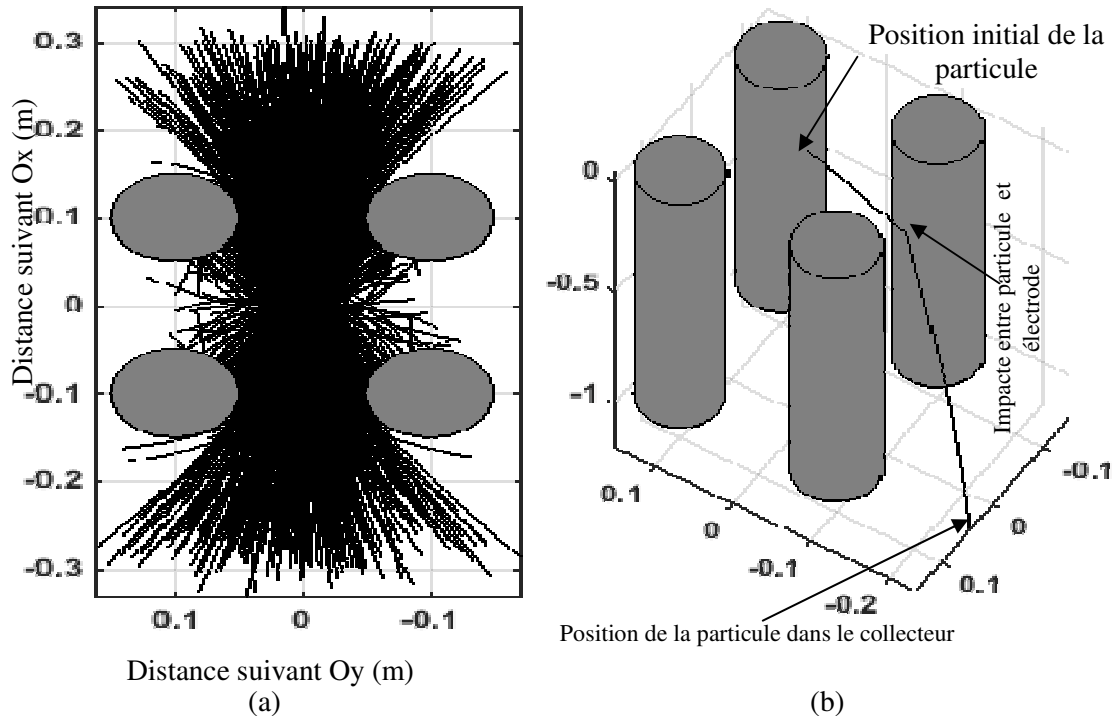


Figure 4. 10. Trajectoires des particules dans un séparateur à quatre électrodes cylindrique ; (a) : Simulation de la trajectoire de 1000 particules ; (b) trajectoire d'une seule particule.

4.2.3 Résultat et discussion

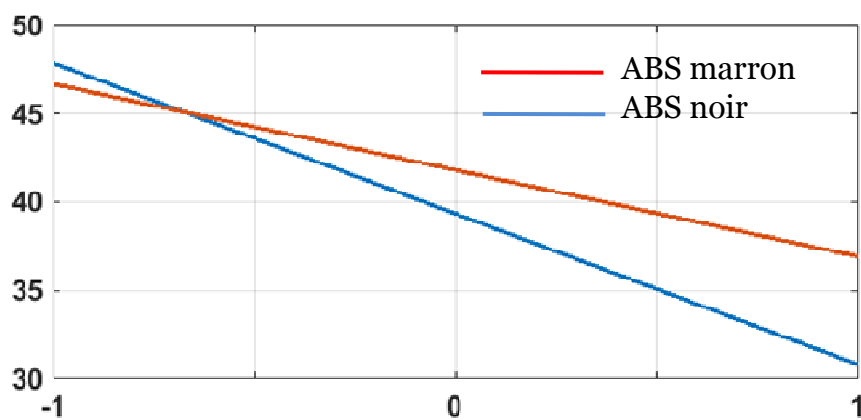
4.2.3.1 Influence de la taille des particules

L'influence de la taille des particules triées sur la pureté du produit est présentée dans le tableau 4.6 et la figure 4.11. La valeur moyenne du pourcentage de l'ABS noir et marron présenté dans le tableau 4.6 est calculée en fonction de diamètre $\varnothing$ à partir de l'ensemble des expériences 1, 2, 3, 7, 8, et 9 pour un diamètre $\varnothing = \varnothing 1$, et de l'ensemble des expériences 4, 5, 6, 10, 11, et 12 pour un diamètre $\varnothing = \varnothing 2$.

La pureté de l'ABS noir est obtenue par le calcul de la moyenne arithmétique de la pureté du même produit récupéré dans les cellules installées dans le côté négatif par rapport à l'axe de symétrie de l'installation, et la pureté de l'ABS marron est obtenue par le calcul de la moyenne arithmétique de la pureté du même produit récupéré dans les cellules installées dans le côté positif par rapport à l'axe de symétrie de l'installation.

Tableau 4.6. Influence de la taille des particules sur la pureté

	Center des cellules (cm)	$\varnothing_1$				$\varnothing_2$			
		ABS Noir (%)	ABS Marron (%)	Pur (%)	Moy (%)	ABS Noir (%)	ABS Marron (%)	Pur (%)	Moy (%)
Pureté de l'ABS noir	-32,5	70,5	27,0	43,5	47,9	60,9	39,1	21,8	30,8
	-27,5	70,9	26,8	44		65,6	35,8	29,8	
	-22,5	75,3	22,2	53,2		62,4	37,6	24,9	
	-17,5	76,4	23,5	52,9		67,4	32,6	34,8	
	-12,5	77,2	22,9	54,3		71,0	29,0	42,0	
	-7,5	75,7	24,4	51,3		72,0	29,7	42,4	
	-2,5	68,1	32,2	35,9		60,1	39,9	20,2	
Pureté de l'ABS marron	2,5	28,0	67,1	39,1	46,7	27,8	70,5	42,7	36,9
	7,5	23,8	76,2	52,4		25,8	74,3	48,5	
	12,5	25,5	74,8	49,3		27,3	71,0	43,7	
	17,5	24,5	75,5	51,0		31,2	68,2	37,0	
	22,5	26,1	74,0	47,9		30,8	69,2	38,3	
	27,5	27,7	72,3	44,6		33,1	63,6	30,4	
	32,5	27,3	72,7	45,4		33,9	66,2	32,3	
	37,5	28,1	71,9	43,8		38,8	61,2	22,4	

**Figure 4.11.** Influence de la taille des particules sur la pureté de l'ABS noir et marron

Pour des particules de diamètre Ø1 la pureté de l'ABS noir est de l'ordre de 47,9% et l'ABS marron est de l'ordre de 46,7%. Une augmentation du diamètre des particules triées Ø2 provoque une diminution de la pureté. Dans notre cas la pureté de l'ABS noir devient 30,8% et celle de l'ABS marron devient 36,9%.

4.2.3.2 Influence de la distance inter électrode

L'influence de la distance inter électrode sur la pureté du produit récupéré est présentée dans le tableau 4.7 et la figure 4.12. La valeur moyenne du pourcentage de l'ABS noir et marron présentée dans le tableau 4.7 est calculé en fonction de la distance (D) à partir de l'ensemble des expériences 1, 2, 3, 4, 5, et 6 Pour une valeur D=10 cm, et de l'ensemble des expériences 7, 8, 9, 10, 11 et 12 pour une valeur D=15 cm.

La pureté de l'ABS noir est obtenue par le calcul de la moyenne arithmétique de la pureté du même produit récupéré dans les cellules installé dans le côté négatif par rapport à l'axe de symétrie de l'installation, et la pureté de l'ABS marron est obtenue par le calcul de la moyenne arithmétique de la pureté du même produit récupéré dans les cellules installées dans le côté positif par rapport à l'axe de symétrie de l'installation.

Tableau 4.7. Influence de la distance inter électrode sur la pureté

		D = 10 cm				D = 15 cm			
	Center des cellules (cm)	ABS Noir (%)	ABS Marron (%)	Pur (%)	Moy (%)	ABS Noir (%)	ABS Marron (%)	Pur (%)	Moy (%)
Pureté de l'ABS noir	-32,5	74,1	23,4	50,7	62,5	57,3	42,7	14,5	16,2
	-27,5	80,6	17,1	63,5		55,9	45,4	10,5	
	-22,5	79,6	17,9	61,7		58,1	41,9	16,3	
	-17,5	85,5	14,5	71,0		58,3	41,6	16,7	
	-12,5	87,0	13,0	74,0		61,2	38,8	22,4	
	-7,5	85,6	14,5	71,1		62,1	39,6	22,6	
	-2,5	72,8	27,5	45,3		55,4	44,6	10,8	
Pureté de l'ABS marron	2,5	17,7	75,7	58,0	59,1	38,1	61,9	23,9	24,5
	7,5	11,8	88,2	76,3		37,7	62,3	24,6	
	12,5	14,3	84,3	70,0		38,5	61,5	23,0	
	17,5	20,1	79,9	59,8		35,6	63,8	28,2	
	22,5	19,4	80,7	61,3		37,6	62,5	24,9	
	27,5	21,7	75,0	53,3		39,1	60,9	21,8	
	32,5	24,6	75,4	50,8		36,6	63,4	26,8	
	37,5	28,4	71,6	43,2		38,5	61,5	23,0	

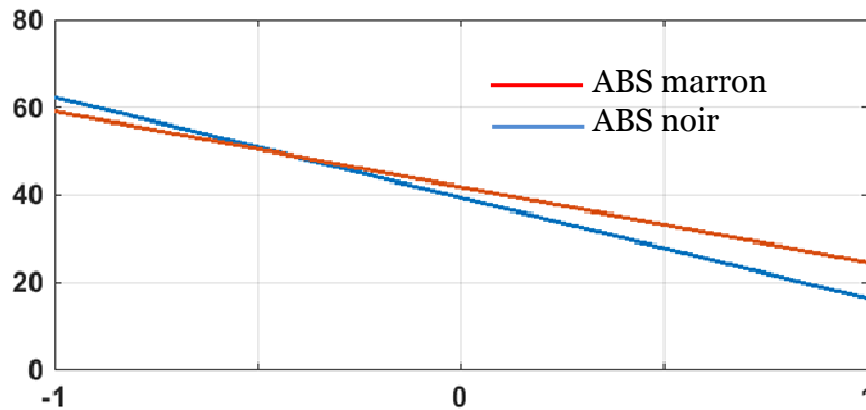


Figure 4.12. Influence de la distance inter électrode

Pour une distance $D=10$ cm, la pureté de l'ABS noir est de l'ordre de 62.5% et l'ABS marron est de l'ordre de 59.1%. Une augmentation de la distance inter électrode $D=15$ cm provoque une diminution de la pureté. Dans notre cas la pureté de l'ABS noir devient 16.2% et celle de l'ABS marron devient 24.5%.

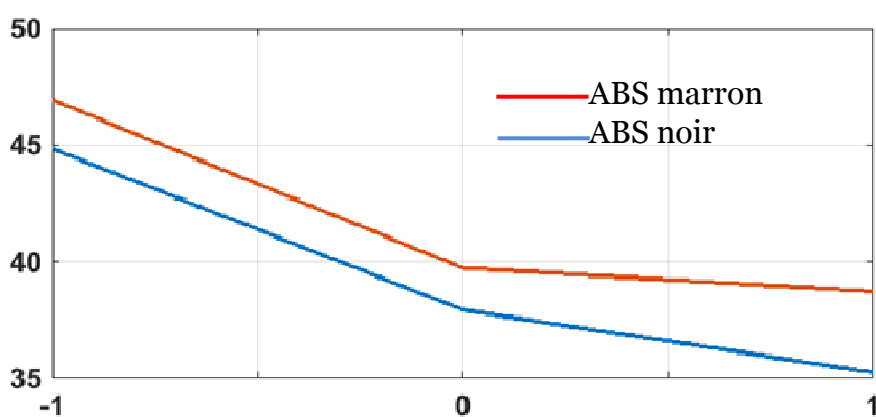
4.2.3.3 Influence de la haute tension

L'influence de la haute de tension sur la pureté du produit récupéré est présentée dans le tableau 4.8 et la figure 4.13. La valeur moyenne du pourcentage de l'ABS noir et marron présenté dans le tableau 4.8 est calculé en fonction de la haut tension (U) à partir de l'ensemble des expériences 1, 4, 7 et 10 pour une valeur de $U=30$ KV, de l'ensemble des expériences 2, 5, 8 et 11 pour une valeur $U=25$ KV et de l'ensemble des expériences 3, 6, 9 et 12 pour une valeur $U=20$ KV.

La pureté de l'ABS noir est obtenue par le calcul de la moyenne arithmétique de la pureté du même produit récupéré dans les cellules installées dans le côté négatif par rapport à l'axe de symétrie de l'installation, et la pureté de l'ABS marron est obtenue par le calcul de la moyenne arithmétique de la pureté du même produit récupéré dans les cellules installées dans le côté positif par rapport à l'axe de symétrie de l'installation.

Tableau 4.8. Influence de la valeur de la haute tension sur la pureté

		U=30kV				U=25kV				U=20Kv			
	Center des cellules (cm)	ABS Noir (%)	ABS Marron (%)	Pur (%)	Moy (%)	ABS Noir (%)	ABS Marron (%)	Pur (%)	Moy (%)	ABS Noir (%)	ABS Marron (%)	Pur (%)	Moy (%)
Pureté de l'ABS noir	-32,5	70,4	29,6	40,8	44,9	65,2	33,6	31,5	37,9	61,5	36,0	25,6	35,3
	-27,5	70,8	29,4	41,5		69,4	32,0	37,4		64,5	32,5	32,0	
	-22,5	70,2	29,8	40,5		69,1	29,7	39,4		67,4	30,2	37,2	
	-17,5	73,6	26,5	47,1		70,6	29,5	41,1		71,5	28,2	43,3	
	-12,5	77,4	22,6	54,8		73,5	26,5	47,0		71,4	28,7	42,7	
	-7,5	77,6	22,5	55,1		71,0	29,0	42,0		72,9	29,6	43,4	
	-2,5	66,0	31,8	34,2		63,7	36,5	27,2		62,6	39,9	22,7	
Pureté de l'ABS marron	2,5	30,9	69,1	38,3	47,0	29,2	68,3	39,1	39,7	23,6	69,0	45,4	38,7
	7,5	21,4	78,6	57,2		25,5	74,5	49,0		27,4	72,6	45,2	
	12,5	20,9	79,2	58,3		28,9	68,8	39,9		29,5	70,8	41,4	
	17,5	24,3	74,7	50,5		32,5	67,5	35,0		26,7	73,4	46,7	
	22,5	26,6	73,4	46,8		28,9	71,2	42,3		29,9	70,1	40,2	
	27,5	29,0	71,0	42,1		27,4	67,7	40,3		34,9	65,1	30,3	
	32,5	29,4	70,7	41,3		28,6	71,5	42,9		33,9	66,1	32,3	
	37,5	29,4	70,7	41,3		35,3	64,8	29,5		35,7	64,3	28,6	

**Figure 4.13.** Influence de la haute tension

Lorsque la haute tension $U=30\text{kV}$, la pureté de l'ABS noir est de l'ordre de 44.9% et l'ABS marron est de l'ordre de 47.%. Une diminution de la haute tension $U=25\text{kV}$ provoque une diminution de la pureté. Dans notre cas la pureté de l'ABS noir devient 37.9% et celle de l'ABS marron devient 39.7%. Une deuxième diminution de la haute tension $U=20\text{kV}$

provoque encore une fois une diminution de la pureté : la pureté de l'ABS noir devient 35.3% et celle de l'ABS marron devient 38.7%.

Le réglage de ces trois paramètres donne la possibilité d'améliorer l'efficacité du séparateur pour une application de tri des particules d'une taille millimétriques préalablement chargées dans un tamiseur.

Le séparateur à quatre électrodes cylindriques verticales a prouvé son efficacité dans la séparation de mélange granulaire de taille millimétrique. L'utilisation de cette installation pour la séparation d'un mélange micronisé donne naissance à quelques handicaps, tel que l'apparition d'une couche de produit sur la surface des électrodes provoquant une mauvaise pureté du produit récupéré et par conséquent l'efficacité de séparation sera considérablement diminuée. Pour résoudre ce problème, on a amélioré cette installation par la mise des électrodes en rotation et en contact continu avec des balais pour assurer le nettoyage des électrodes lors de la séparation.

4.3 Séparateur à quatre électrodes cylindriques rotatives

L'installation expérimentale est présentée dans la figure 4.14 et 4.15. Dans cette nouvelle configuration [178-179], chaque axe de l'électrode traverse le centre d'un support en matière isolante équipé d'un roulement à bille. La partie filetée de l'axe de l'électrode permet l'ajustement avec une précision acceptable verticalement par rapport au point d'alimentation en produit granulaire.

Le support de l'électrode tournante est une pièce en matière isolante équipée d'un roulement à bille et traversé par deux tiges filetées dans le plan horizontal (Figure 4.16 et 4.17). Ce montage assure plusieurs rôles: - Il contribue à l'isolation électrique de l'électrode par rapport à la carcasse de l'installation; -Il assure le maintien et l'ajustement de la position de l'électrode dans les deux plans vertical et horizontal; - Il permet les mouvements de rotation de l'électrode tournante par rapport à son axe dans les deux sens. Les dimensions du support de l'électrode sont présentées en détail dans la figure 4.18. Ces deux tiges traversent un support identique utilisé pour l'ajustement et le maintien de la brosse de nettoyage à une distance acceptable, qui assure le nettoyage de l'électrode avec un minimum de frottement. Pour assurer la stabilité de l'installation en fonctionnement, d'autres supports ont été placés dans la partie inférieure de l'électrode et de la brosse. Chaque électrode est entraînée par un moteur à courant continu (tension nominale 12V). L'utilisation de ce type de moteur nous a facilité la variation de la vitesse de rotation en ajustant sa tension d'alimentation et l'inversion du sens de rotation par l'inversion de la polarité de l'alimentation.

La transmission du mouvement entre moteur et électrode est assurée par un système poulie/courroie. La tension mécanique appliquée aux courroies est réglée par l'ajustement de la position du moteur sur les deux axes métalliques traversant le support de l'électrode tournante.

L'alignement vertical des poulies installées côté moteur et côté électrode tournante est obtenu par l'ajustement de la position vertical de la poulie installée dans la partie filetée de l'axe de rotation de l'électrode. Les dimensions des poulies utilisées dans cette installation sont présentées en détail dans la figure 4.19.a et 4.19.b.

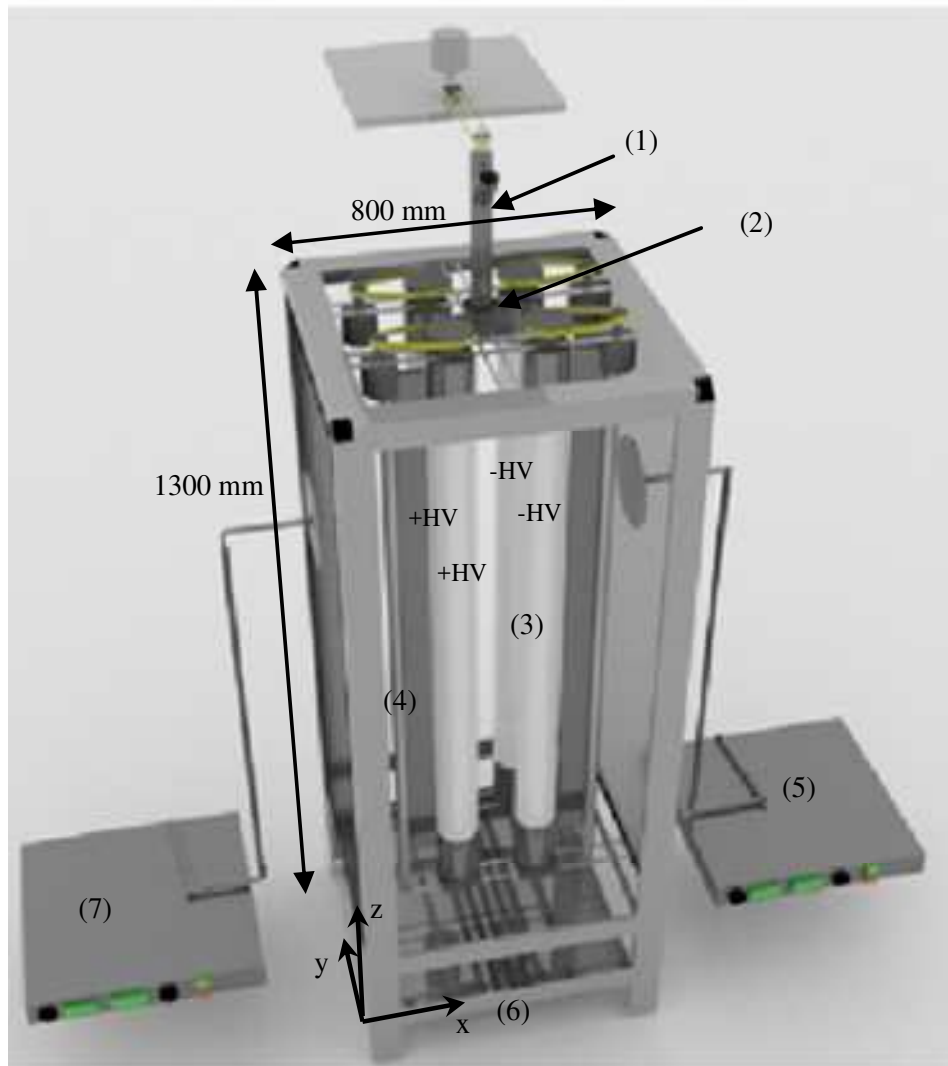


Figure 4.14. Représentation schématique du séparateur à quatre électrodes cylindriques ;
1. Chargeur triboélectrique; 2. Entonnoir ; 3. Électrodes; 4. Balais; 5. Source haut tension négative;
6. Collecteur; 7. Source haut tension positive.

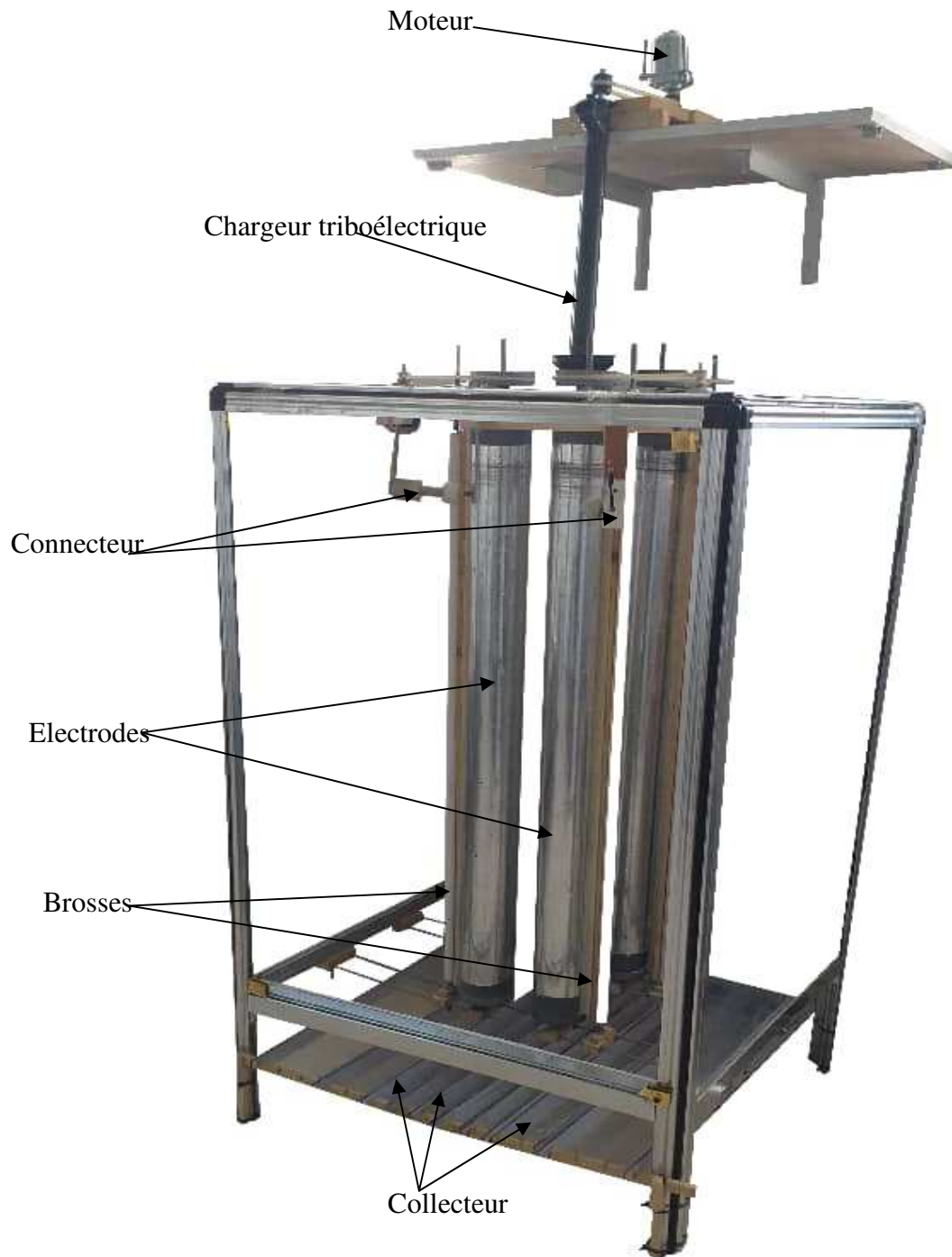


Figure 4.15. Photographie d'un séparateur à quatre électrodes cylindriques verticales

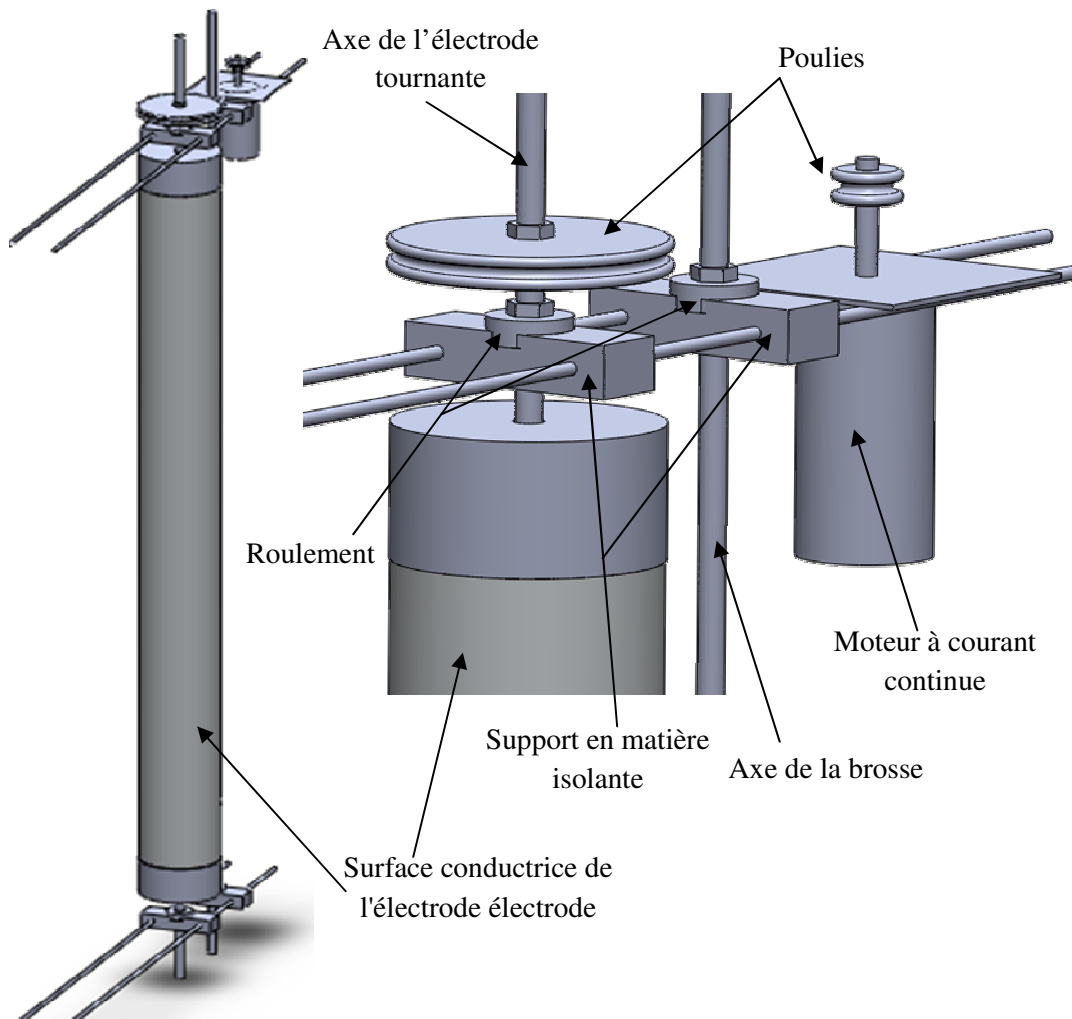


Figure 4.16. Représentation schématique en 3D du système mécanique qui assure le mouvement de rotation et le nettoyage de chaque électrode du cylindre.



Figure 4.17. Photos d'électrodes et leurs supports

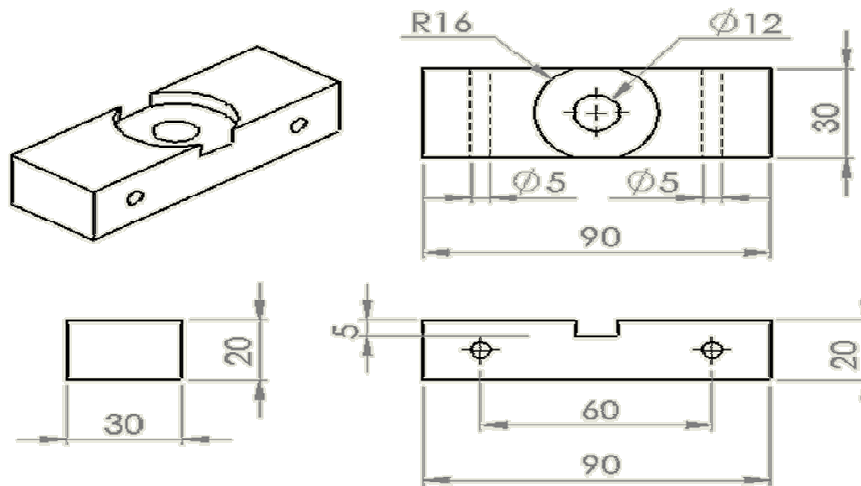


Figure 4.18. Dimensions du support de l'électrode en millimètre.

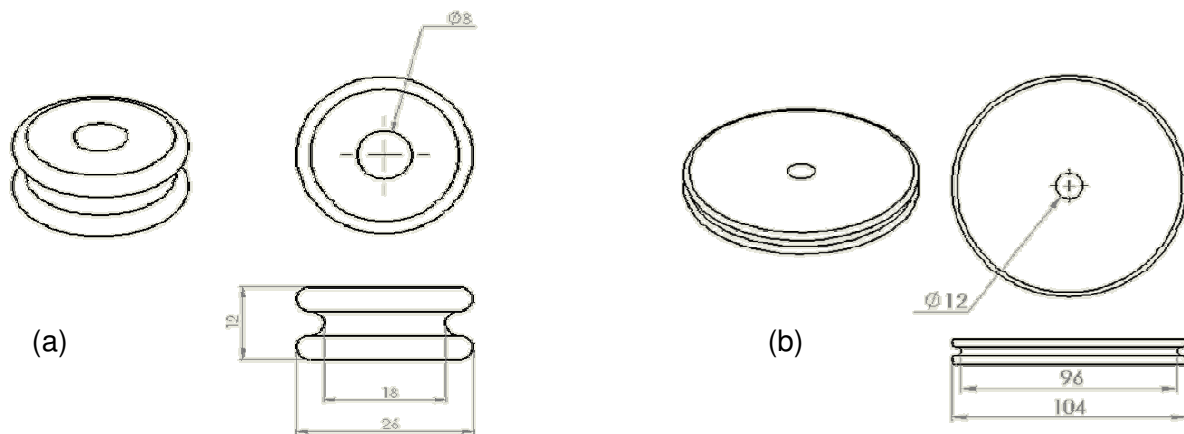


Figure 4.19. Dimension des poulies installées cotés moteur (a) et électrode (b) en millimètre.

4.3.1 Principe de fonctionnement

Après le chargement des particules par le chargeur à lames, elles sont introduites à l'aide d'un entonnoir dans le champ électrique généré entre les quatre électrodes cylindriques rotatives.

Les particules positivement chargées vont être attirées par les deux électrodes rotatives reliées à la haute tension négative, puis elles sont récupérées dans les cellules 1,2,3 et 4. Les particules négativement chargées vont être attirées par les deux électrodes reliées à la haute tension positive, puis elles sont récupérées dans les cellules 6,7,8 et 9. Les particules insuffisamment chargées s'accumulent dans la cellule 5 du centre. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules qui adhèrent à la surface des électrodes cylindriques.

4.3.2 Etude expérimentale

4.3.2.1 Procédure expérimentale

Le mélange micronisé binaire utilisé dans l'ensemble des expériences est caractérisé par deux couleurs différentes. Le polychlorure de vinyle ou PVC d'une couleur grise, et le polychlorure de vinyle non plastifié ou UPVC d'une couleur blanche (Figure 3.18 et 3.19 du chapitre 3)

Cette étude utilise la méthodologie des plans d'expériences [176-177] pour évaluer les effets de trois facteurs qui devraient influencer la pureté et le taux de récupération des deux types de particules: la vitesse de rotation du tube central du chargeur triboélectrique n (tr/min) ; la différence de potentiel appliquée entre deux électrodes de polarité opposées U (kV) et la distance entre deux électrodes de même polarité D (cm).

Même si cette distance D se situe entre deux électrodes de même polarité, elle influence la distribution du champ électrique, comme le démontrent les résultats des calculs numériques effectués avec le logiciel Matlab (Figure 4.20).

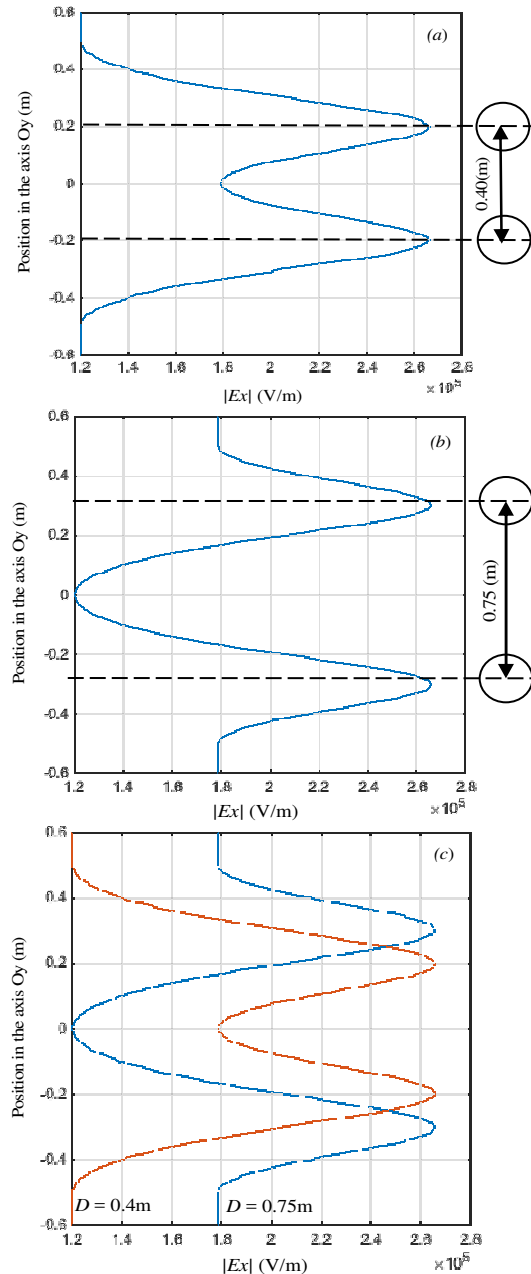


Figure 4.20. Distribution verticale de la composante horizontale du champ électrique pour deux valeurs de la distance D entre deux électrodes de même polarité ; (a) $D = 0,4$ m et (b) $D = 0,75$ m ; (c) comparaison entre les résultats obtenus pour $D = 0,4$ m et $D = 0,75$ m.

Après quelques essais préliminaires nous avons défini les limites de l'espace expérimental (Tableau 4.9).

Tableau 4.9. Limite de l'espace expérimentale

Facteurs	Min	Max
U [kV]	15	20
D [cm]	5	15
n [tr/min]	300	700

En absence de toute information sur la liaison qui existe entre la réponse et ces trois facteurs on adopte, à priori, un modèle polynomial du second degré :

$$y = a_0 + a_1U + a_2D + a_3n + a_{12}UD + a_{13}Un + a_{23}Dn + a_{11}U^2 + a_{22}D^2 + a_{33}n^2 \quad (4.2)$$

Les 17 essais du plan d'expérience composite centré utilisé pour la présente étude sont présentés dans le tableau 4.10.

Tableau 4.10. Matrice des expériences d'un plan composite centré.

Essai	Facteurs		
	Haut tension [kV]	Vitesse [tr/min]	Distance [cm]
1	15	300	5
2	20	300	5
3	15	700	5
4	20	700	5
5	15	300	15
6	20	300	15
7	15	700	15
8	20	700	15
9	15	500	10
10	20	500	10
11	17.5	300	10
12	17.5	700	10
13	17.5	500	5
14	17.5	500	15
15	17.5	500	10
16	17.5	500	10
17	17.5	500	10

Pour chaque expérience, la masse totale du mélange micronisé est de 100g (50 g PVC + 50 g UPVC). Chaque essai du plan est exécuté en respectant la procédure représentée par les étapes suivantes :

- 1- La mise en marche des électrodes et l'ajustement de leur vitesse de rotation sur une valeur adéquate qui assure leur nettoyage avec un minimum de vibration au cours de la séparation.
- 2- L'étape 1 est suivie parfois par le nettoyage des résidus du produit de l'expérience précédente ;
- 3- La mise en marche du chargeur triboélectrique et l'ajustement de sa vitesse de rotation sur la valeur prédéfinie dans le plan d'expériences ;
- 4- La mise en marche des sources HT et l'ajustement du potentiel sur la valeur prédéfinie dans le plan d'expériences ;
- 5- L'introduction du mélange granulaire dans le chargeur triboélectrique avec un faible débit pour assurer la stabilité de la vitesse de rotation du chargeur; (l'introduction du mélange en grande quantité provoque une diminution de la vitesse de rotation du chargeur) ;
- 6- La mise en arrêt des sources HT après avoir vider le chargeur triboélectrique ;
- 7- La mise en arrêt du chargeur et des électrodes ;
- 8- La mesure de la charge totale du produit récupéré dans chaque cellule ;
- 9- La mesure de la masse totale du produit récupéré dans chaque cellule ;
- 10- La prise d'échantillons de produit récupéré dans chaque cellule pour la colorimétrie, afin de déterminer sa pureté ;
- 11- Nettoyage de l'installation ;
- 12- Neutralisation du produit.

Toutes les expériences sont réalisées dans des conditions climatiques relativement stables : $HR = 50 \pm 2\%$, $T^\circ = 20 \pm 2^\circ C$.

La figure 4.21 donne un aperçu visuel sur la qualité des produits récupérés au cours des essais N° 2 et N° 5.

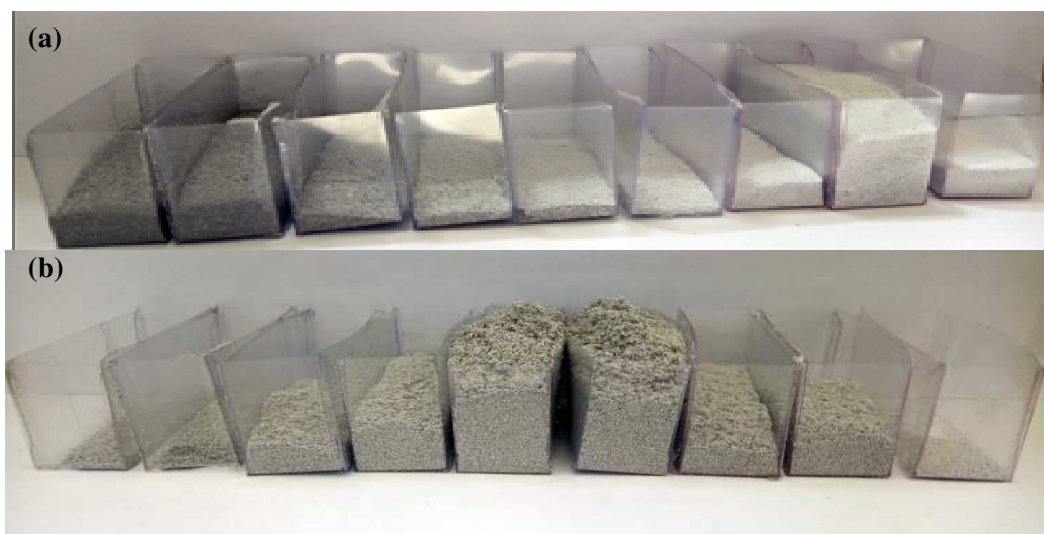


Figure 4.21. Produit récupéré au cours des essais 2 (a) et 5 (b).

4.3.2.2 Mesure de pureté

Pour mesurer la pureté du produit récupéré dans chaque cellule nous avons utilisé une méthode basée sur la colorimétrie [181]. La première étape de la procédure de mesure est considérée comme une étape de calibrage. Dans cette étape une numérisation de l'image de plusieurs échantillons dont la concentration du PVC gris et Blanc est effectuée à l'aide d'une paillète de couleur de référence (Figure 4.22).

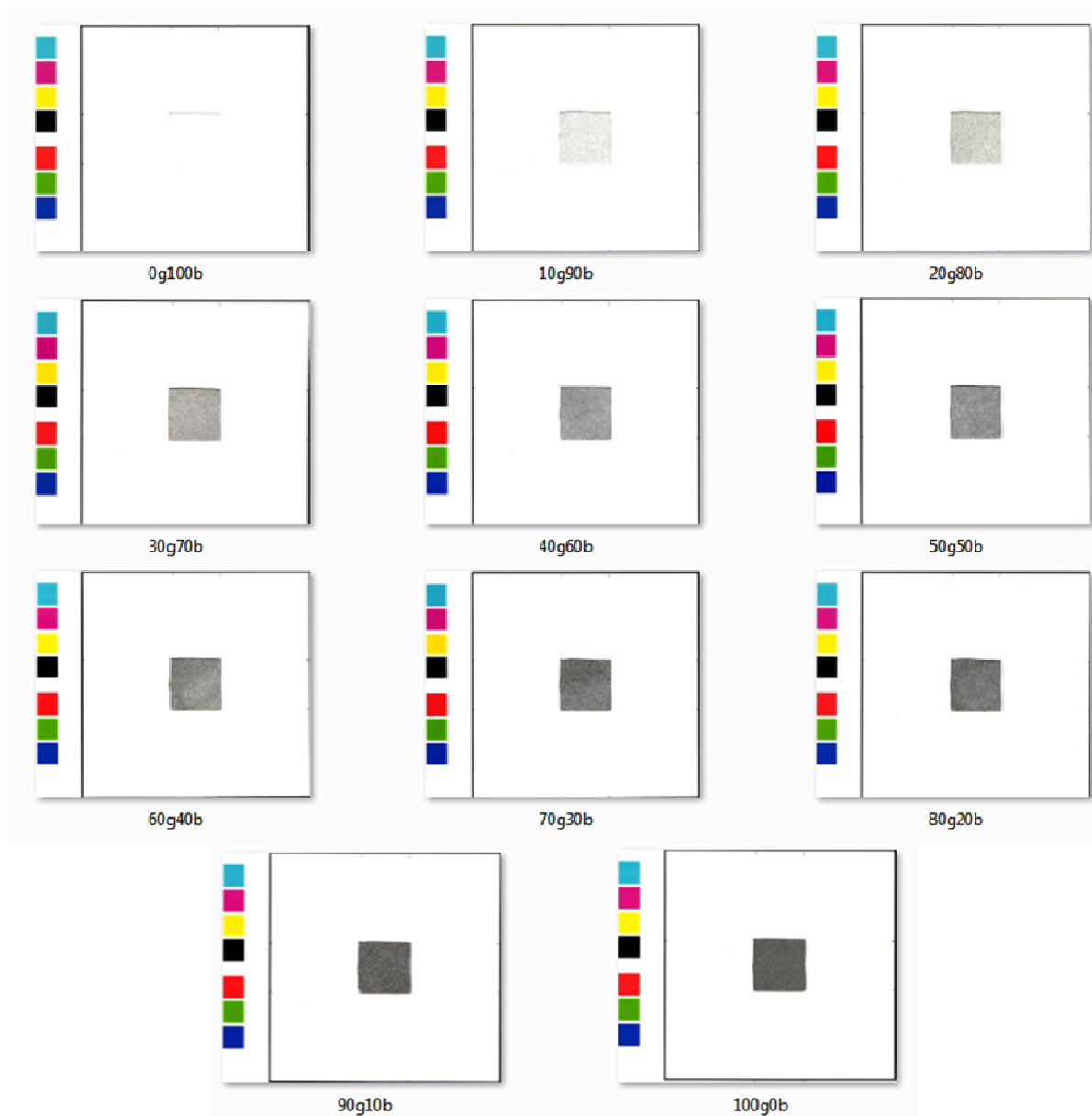


Figure 4.22. Numérisation des échantillons de référence

Dans chaque photo, nous avons identifié 9 zones {(1) blanche ; (2) cyan ; (3) magenta ; (4) jaune ; (5) noir ; (6) rouge ; (7) vert ; (8) bleu ; (9) couleur de l'échantillon du produit} (Figure 4.23). Chaque zone peut être décomposée en trois calques (Rouge ; Vert ; Bleu) ou (RVB). Théoriquement, les couleurs (1 jusqu'à 8) forment les sommets d'un cube (Figure 4.24). En pratique, les pixels de chaque calque possèdent des niveaux de gris dont la valeur peut varier de 0 à 255.

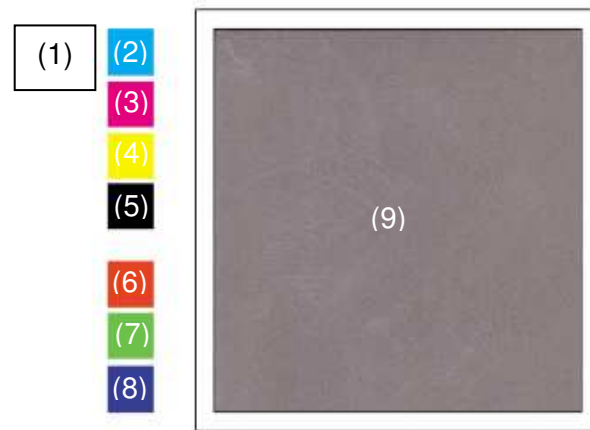


Figure 4.23. Couleur de l'échantillon du produit

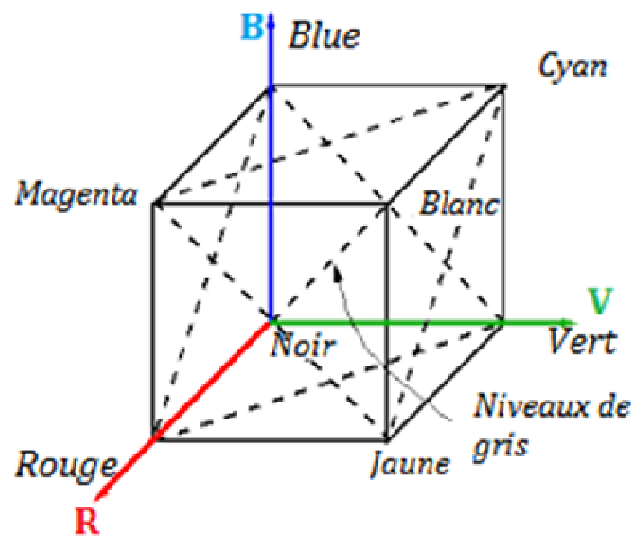


Figure 4.24. La position des couleurs dans un repère RVB

Les histogrammes de la figure 4.25 montrent la distribution des niveaux de gris dans chaque calque. Pour simplifier les calculs, les distributions des niveaux de chaque couleur est représenté par sa moyenne.

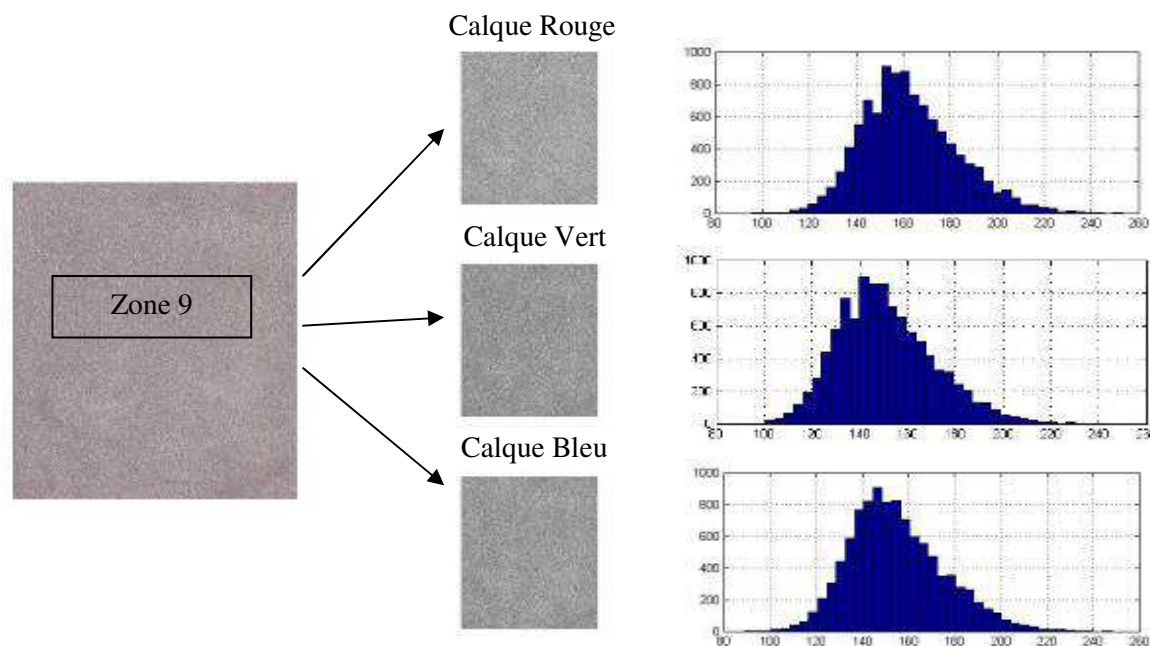


Figure 4.25. Calques associées à la zone 9 de la photo Ref_70g30b

Pour faire une comparaison entre les couleurs de la zone 9 de chaque expérience il faut s'assurer que la couleur de la zone 1 est identique au blanc théorique [255 255 255] la zone 2 est identique au cyan théorique [0 255 255]etc. Puisque les couleurs théoriques sont différents des couleurs expérimentales dans ce cas nous sommes obligés de passer par une correction de couleur.

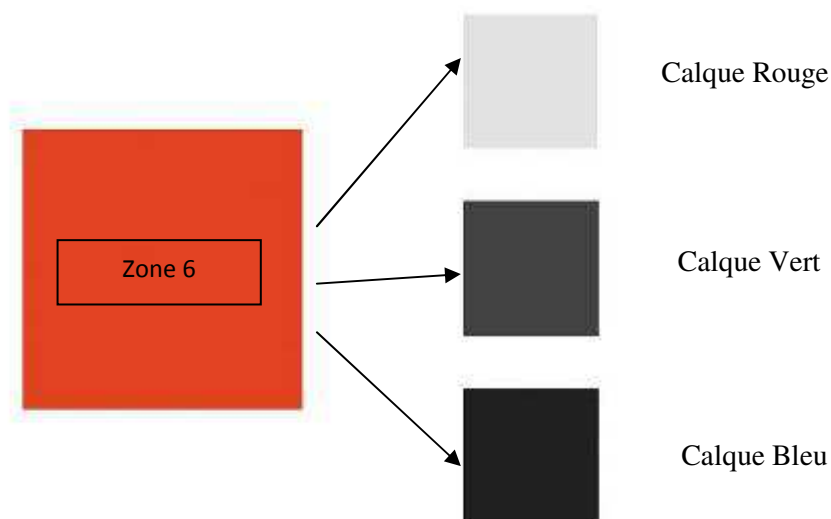


Figure 4.26. Calques RVB associées à la zone 6 de la photo 70g30b

Pour ajusté la couleur de la zone 9 il faut prendre en considération l'écart entre les sommets du cube expérimentale et les sommets du cube théorique. Pour réaliser cette opération nous avons utilisé une méthode d'interpolation. Les résultats de la correction sont groupés dans le tableau 4.11 et 4.12

Tableau 4.11. Correction de la couleur du produit.

UPVC(%)		Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone du produit avant correction	Zone du produit après correction
100	R	1,00000	0,18298	0,83817	0,99816	0,00106	0,97221	0,29473	0,03545	0,99974	0,99974
	V	0,99999	0,70616	0,08373	0,93301	0,00090	0,10194	0,63787	0,17161	0,99971	0,99968
	B	0,99999	0,77702	0,46628	0,01819	0,00081	0,09673	0,00840	0,63580	0,99950	0,99944
90	R	0,99998	0,18123	0,84707	0,99807	0,00163	0,97407	0,29471	0,03809	0,92554	0,92636
	V	0,99998	0,69764	0,08302	0,92897	0,00151	0,10068	0,63059	0,16658	0,92361	0,91853
	B	0,99998	0,77174	0,46124	0,02112	0,00140	0,09951	0,00937	0,62897	0,90306	0,89106
80	R	0,99999	0,17840	0,86409	0,99801	0,00148	0,99114	0,29228	0,02681	0,81737	0,82092
	V	0,99999	0,71156	0,07232	0,94890	0,00133	0,08716	0,64131	0,16469	0,81427	0,80509
	B	0,99998	0,78730	0,46424	0,01628	0,00125	0,08412	0,00892	0,64152	0,78266	0,75954
70	R	0,99998	0,15719	0,79191	0,99806	0,00117	0,95147	0,27263	0,02339	0,69316	0,69520
	V	0,99998	0,65389	0,02142	0,88098	0,00112	0,09427	0,58857	0,14916	0,68114	0,66213
	B	0,99997	0,74592	0,42951	0,01488	0,00108	0,10189	0,00759	0,60321	0,66238	0,62891
60	R	0,99998	0,12396	0,81204	0,99806	0,00122	0,96818	0,25829	0,00937	0,61763	0,62060
	V	0,99998	0,66442	0,01856	0,91666	0,00110	0,04985	0,60285	0,12617	0,61419	0,59466
	B	0,99998	0,77632	0,45284	0,01249	0,00110	0,05528	0,00868	0,63896	0,60858	0,57462
50	R	0,99999	0,11692	0,83132	0,99801	0,00079	0,97119	0,22943	0,00544	0,57130	0,57493
	V	0,99999	0,67153	0,01530	0,92318	0,00068	0,02796	0,59448	0,08890	0,57043	0,54916
	B	0,99998	0,77846	0,45320	0,01170	0,00081	0,05727	0,00552	0,62252	0,56411	0,52985
40	R	0,99998	0,17310	0,86658	0,99790	0,00138	0,99173	0,27938	0,01910	0,55717	0,56646
	V	0,99998	0,71685	0,04891	0,95687	0,00124	0,06030	0,62984	0,14571	0,55115	0,53721
	B	0,99998	0,81197	0,47946	0,01483	0,00125	0,06789	0,00800	0,65310	0,53880	0,50853
30	R	0,99997	0,12003	0,79717	0,99794	0,00082	0,94723	0,23258	0,00696	0,44609	0,45031
	V	0,99996	0,63280	0,04318	0,86664	0,00076	0,05764	0,56446	0,11009	0,44442	0,42258
	B	0,99997	0,75270	0,42631	0,01105	0,00076	0,05535	0,00644	0,60754	0,43350	0,40091
20	R	0,99998	0,15915	0,84827	0,99794	0,00132	0,98526	0,28319	0,02248	0,45035	0,46056
	V	0,99998	0,69577	0,07196	0,94196	0,00127	0,08954	0,62726	0,15867	0,44889	0,43650

	B	0,99997	0,80065	0,48724	0,01865	0,00131	0,10293	0,00954	0,66190	0,43843	0,41236
	R	0,99998	0,15492	0,85915	0,99801	0,00130	0,99010	0,27075	0,01137	0,39077	0,40089
10	V	0,99997	0,68899	0,05017	0,93688	0,00116	0,06669	0,61169	0,13341	0,38178	0,36781
	B	0,99997	0,80106	0,47485	0,01637	0,00113	0,08235	0,00775	0,64243	0,37293	0,34808
	R	0,99999	0,15604	0,87442	0,99812	0,00104	0,99470	0,28628	0,01531	0,37162	0,38317
0	V	0,99999	0,70883	0,06436	0,96303	0,00103	0,08612	0,63273	0,14794	0,36667	0,35619
	B	0,99999	0,81420	0,49098	0,01928	0,00102	0,09602	0,00613	0,65757	0,35658	0,33428

Tableau 4.12. Moyenne des nuances RVB des pixels dans la zone du produit.

Image	Couleur de la zone de produit				UPVC [%]
	<i>R</i>	<i>V</i>	<i>B</i>	$x=(R+V+B)/3$	
1	0.9997	0.9997	0.9994	0.9996	100
2	0.9264	0.9185	0.8911	0.9120	90
3	0.8209	0.8051	0.7595	0.7952	80
4	0.6952	0.6621	0.6289	0.6621	70
5	0.6206	0.5947	0.5746	0.5966	60
6	0.5749	0.5492	0.5298	0.5513	50
7	0.5665	0.5372	0.5085	0.5374	40
8	0.4606	0.4365	0.4124	0.4365	30
9	0.4503	0.4226	0.4009	0.4246	20
10	0.4009	0.3678	0.3481	0.3723	10
11	0.3832	0.3562	0.3343	0.3579	0

La méthode des moindres carrées est utilisée pour élaborer un modèle mathématique de la concentration du UPVC en fonction des nuances de couleur RVB du produit. Les modèles obtenus sont présentés dans les figures 4.27 - 4.30

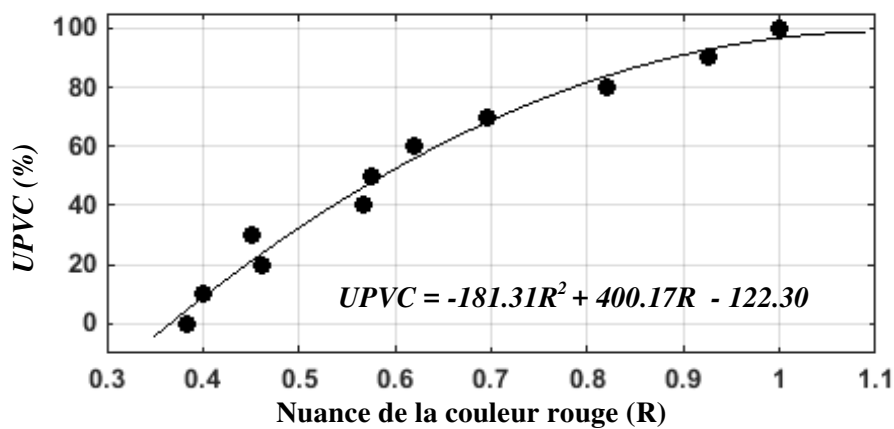


Figure 4.27. Modèle de la concentration du UPVC en fonction de la nuance de la couleur Rouge du produit

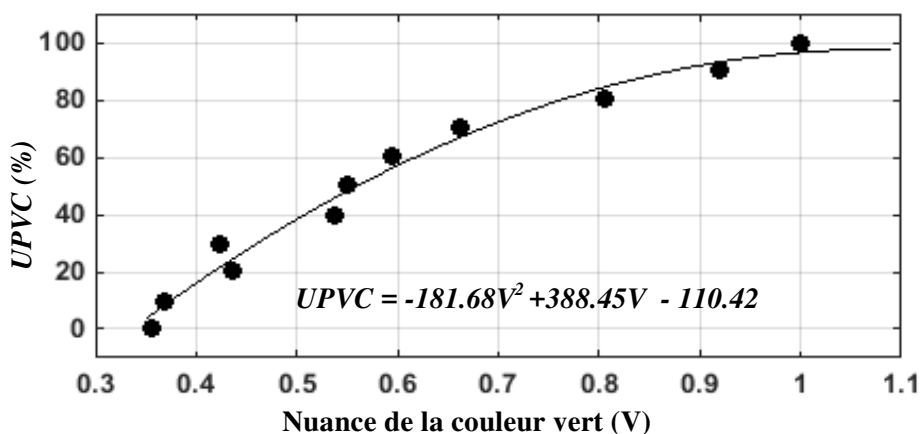


Figure 4.28. Modèle de la concentration du UPVC en fonction de la nuance de la couleur vert du produit

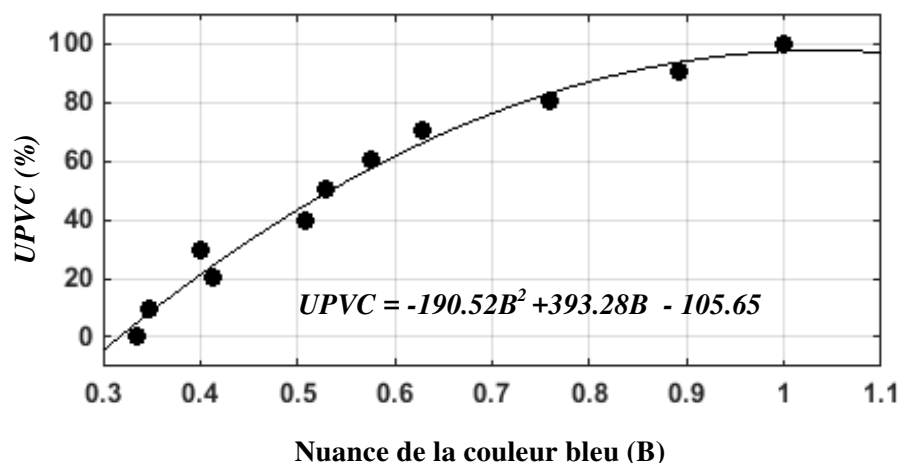


Figure 4.29. Modèle de la concentration du UPVC en fonction de la nuance de la couleur bleu du produit

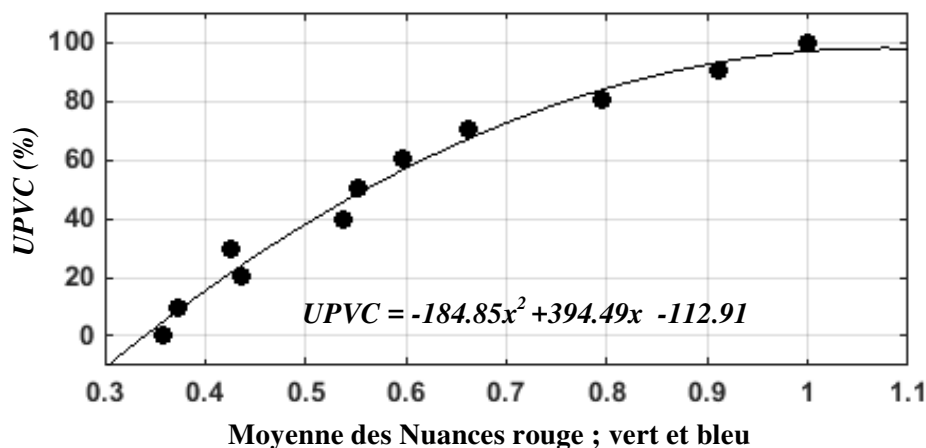


Figure 4.30. Modèle de la concentration du PVC en fonction de la moyenne des nuances rouge ; vert et bleu du produit

En connaissant les concentrations de UPVC (Tableau 4.13), la masse de chaque produit peut être calculée indépendamment pour chaque cellule (MPVC (g) et MUPVC (g)). Les matériaux contenus dans les neuf cellules ont été assemblés en trois produits : «U PVC » (cellules 1, 2, 3 et 4) ; « mixte » (cellule 5) ; « PVC » (cellules 6, 7, 8 et 9). La pureté et la récupération du PVC et du UPVC collectés ont été calculés selon les formules suivantes:

$$P_{UPVC} = \left(\frac{\text{la mass du UPVC dans le compartiment}_{1,2,3 \text{ et } 4} \text{ du UPVC}}{\text{la masse totale collectée dans le compartiment}_{1,2,3 \text{ et } 4} \text{ du UPVC}} \right) \times 100. \quad (4.3)$$

$$R_{UPVC} = \left(\frac{\text{la mass du UPVC dans le compartiment}_{1,2,3 \text{ et } 4} \text{ du UPVC}}{\text{la mass total du UPVC dans le compartiment}_{1...9}} \right) \times 100. \quad (4.4)$$

Tableau 4.13. Pourcentage du UPVC(%)

Essai	N° Cellule								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	93.32	83.22	77.82	76.49	69.50	72.01	52.92	35.68	48.21
2	95.69	91.80	91.87	89.54	79.36	69.73	64.74	41.14	42.27
3	91.03	74.80	61.53	59.61	60.20	52.09	64.75	35.51	57.45
4	73.94	86.29	74.37	69.69	74.56	64.15	65.15	63.58	65.97
5	86.33	61.88	57.34	62.43	60.23	55.76	55.08	41.72	56.67
6	95.63	92.21	85.38	82.48	71.32	75.87	77.19	33.82	34.54
7	90.73	84.46	73.32	75.43	67.33	65.49	66.80	50.91	61.79
8	94.62	85.18	77.89	72.40	68.76	68.51	72.71	43.09	74.66
9	89.39	80.40	68.66	63.28	61.76	54.80	53.26	24.93	48.28
10	89.53	90.95	88.30	78.34	75.16	69.82	69.19	46.53	79.44
11	94.10	89.26	80.95	75.33	66.87	66.71	68.05	43.99	79.33
12	94.73	85.88	77.59	74.04	69.98	69.51	67.58	49.68	60.88
13	95.44	90.12	77.08	73.42	69.46	65.44	57.79	28.04	70.50
14	94.81	89.74	83.03	74.83	70.17	71.21	69.79	35.46	76.97
15	92.03	85.69	71.82	71.47	62.89	72.32	68.17	42.57	72.22
16	92.26	81.97	73.87	65.22	67.43	65.43	67.91	53.56	79.11
17	95.12	86.89	76.98	72.25	67.65	66.48	65.39	52.15	76.23

4.3.3 Résultat et discussion

La pureté et la récupération du PVC et du UPVC sont rapportés dans le tableau 4.14.

Tableau 4.14. Pureté et Récupération du PVC et du UPVC (%)

Essai	Tension [kV]	Vitesse [tr/min]	Distance [cm]	Récupération UPVC [%]	Pureté UPVC [%]	Mixte [g]	Récupération PVC [%]	Pureté PVC [%]
1	15	3	5	79,4	92.2	8.4	75.9	89.1
2	20	3	5	85.7	97.4	1.6	98.4	83.1
3	15	4	5	76	67	9.5	64.9	85.6
4	20	4	5	72.3	77.3	50.8	56.8	70.4
5	15	3	15	15.7	69.4	85.1	27.5	81.3
6	20	3	15	69.2	85.5	24.1	49.3	69.9
7	15	4	15	31.3	73.7	48.9	49.5	81.7
8	20	4	15	72.7	92.5	32.5	38.2	61.7
9	15	3.5	10	63.1	73.4	13.3	65.1	87.2
10	20	3.5	10	88.5	86.2	2.8	68.1	72.5
11	17.5	3	10	52.1	84	25.8	46.7	73.1
12	17.5	4	10	53.8	76	31.3	37.8	67.7
13	17.5	3.5	5	70.3	82	17.7	76.4	75.4
14	17.5	3.5	15	41.1	78.7	46.9	44.9	65.8
15	17.5	3.5	10	64.5	79.5	16.4	53.9	72
16	17.5	3.5	10	63.5	78.7	17.6	50.5	73.6
17	17.5	3.5	10	63.3	79.2	16.2	50.5	71.8

Les modèles mathématiques des réponses: R_{PVC} ($R^2 = 99,2 \%$, $Q^2 = 96,3 \%$), P_{PVC} ($R^2 = 99,5 \%$, $Q^2 = 97,7 \%$), R_{UPVC} ($R^2 = 99,7 \%$, $Q^2 = 98,6 \%$), et P_{UPVC} ($R^2 = 99,9 \%$, $Q^2 = 98,2 \%$) calculés avec MODDE 5.0, [182] étaient:

$$R_{PVC} = 53.6 + 2.8 U - 16.2 D - 5 n - 7.9 Un + 7.9 Dn + 11.5 U^2 + 5.5 D^2 - 12.8 n^2 \quad (4.5)$$

$$P_{PVC} = 72 - 6.7 U - 4.3 D - 2.9 n - 1.2 UD - 2.2 Un + 1.05 Dn + 8.1 U^2 - 1.3 n^2 \quad (4.6)$$

$$R_{UPVC} = 62.5 + 12.2 U - 15.3 D + 11.5 UD - 2.7 Un + 4.5 Dn + 14.3 U^2 - 8.5 n^2 \quad (4.7)$$

$$P_{UPVC} = 79.1 + 6.3 U - 1.6 D - 4.1 n + 2.4 UD + 0.9 Un + 7 Dn + 0.6 U^2 + 1.1 D^2 + 0.8 n^2 \quad (4.8)$$

L'analyse statistique des coefficients des modèles (4.5) à (4.8) montre que tous les facteurs considérés dans cette étude ont un effet significatif sur les performances du séparateur.

4.3.3.1 Influence des facteurs choisis sur la récupération et la pureté de PVC et UPVC

D'après l'analyse de la figure 4.31 on constate que :

- ✓ L'augmentation de la haute tension intensifie le champ électrique dans la zone active du séparateur et améliore considérablement la récupération et la pureté du produit PVC et UPVC.
- ✓ L'augmentation de la vitesse de rotation du chargeur renforce l'effet triboélectrique, mais de manière surprenante diminue la qualité de la séparation. Le meilleur résultat pour la plupart des réponses est obtenu à de faibles valeurs de la vitesse de rotation du chargeur. L'augmentation de cette vitesse entraîne une agglomération des particules, ce qui rend le mélange difficile à séparer.
- ✓ L'éloignement des électrodes d'un même signe diminue considérablement la valeur des réponses. De petites valeurs de la distance entre les électrodes du même signe donnent une meilleure récupération du PVC et du UPVC, ainsi qu'une meilleure pureté du PVC et du UPVC ; l'augmentation de cette distance diminue l'intensité du champ électrostatique dans les parties actives de la zone de séparation.
- ✓ La masse plus élevée du mixte est obtenue par un minimum de la haute tension U et un maximum de la distance entre les électrodes D, ce qui est conforme aux considérations théorétiques précédentes concernant l'augmentation de l'intensité du champ électrique et donc des forces électrostatiques exercées sur les particules chargées

4.3.3.2 Détermination du point de fonctionnement optimal

Selon les modèles mathématiques obtenus avec le logiciel MODDE 5.0, les meilleures performances globales du processus sont :

($R_{PVC} = 98.63 \%$, $P_{PVC} = 82.79 \%$, $R_{UPVC} = 85.79 \%$, $P_{UPVC} = 97.41 \%$, et $M_{Mixte} = 2.35 \text{ g}$), correspond aux valeurs optimales suivantes des facteurs de contrôle: $U = 20 \text{ kV}$, $D = 5 \text{ cm}$ et $n = 305 \text{ tr/min}$.

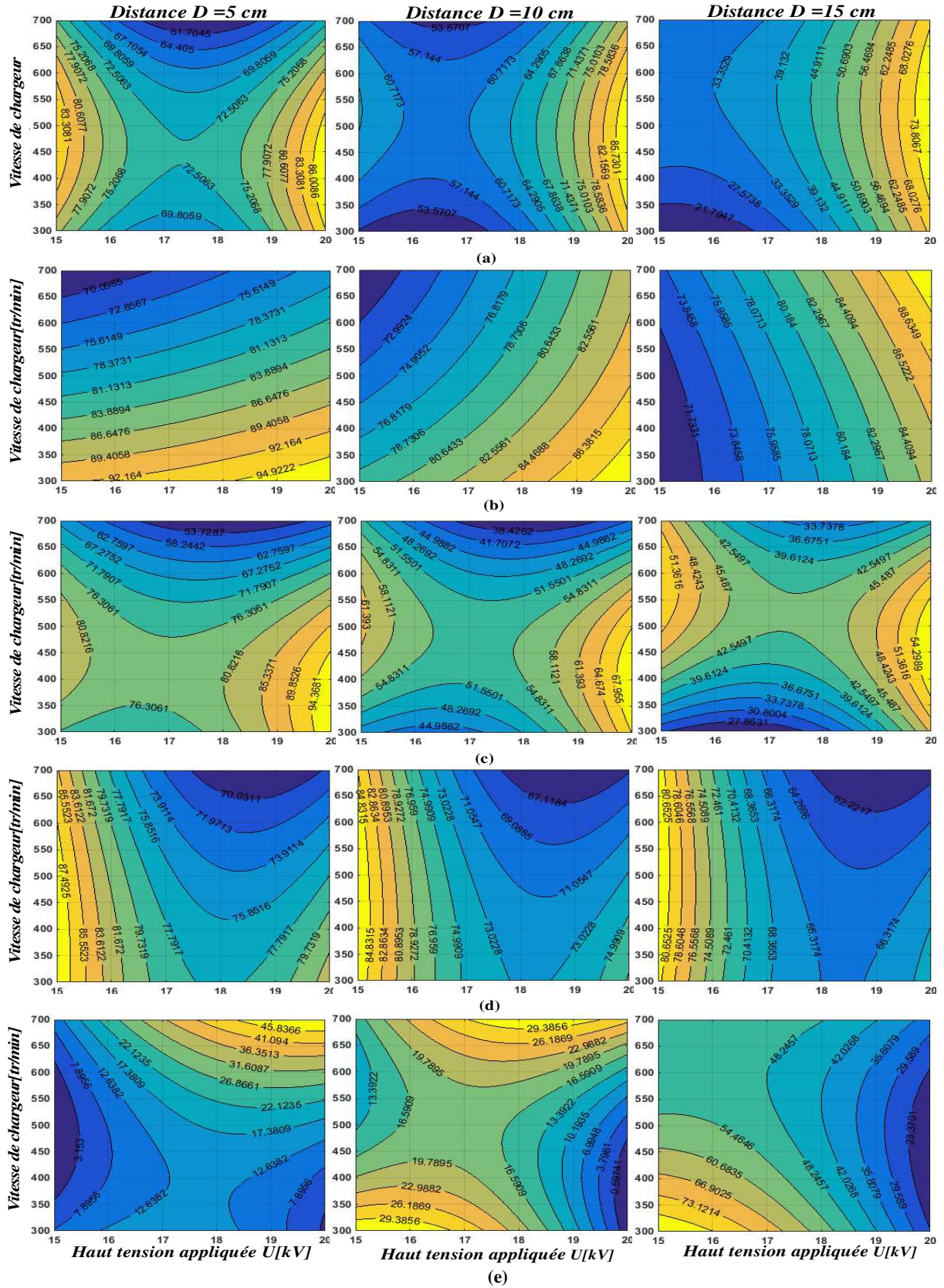


Figure 4.31. Contours prédit R_{UPVC} (a), P_{UPVC} (b), R_{PVC} (c), P_{PVC} (d) et la masse de mixte (e) en fonction de la haut tension U et la vitesse de rotation de chargeur n , pour les trois valeurs de la distance D

4.4 Conclusion

La nouvelle conception du chargeur triboélectrique à lames a permis d'empêcher la formation d'agglomérats de particules fines et par conséquent améliorer le résultat de la séparation.

Les résultats d'expériences obtenus montrent que le séparateur à quatre électrodes cylindrique a prouvé son efficacité dans la séparation des particules granulaires et micronisés. Pour la séparation de mélanges micronisés, les électrodes doivent être tournantes et mises en contact continu avec des balais pour empêcher la formation d'une couche sur ses surfaces.

L'estimation de la pureté du produit par des méthodes basées sur la colorimétrie peut donner des résultats suffisamment précis. La méthode des moindres carrés a permis de mettre au point un modèle mathématique qui exprime la composition d'un produit en fonction de sa nuance RVB.

Le plan d'expérience composite centré a permis de dériver des modèles comportementaux des quatre principales réponses du processus de séparation, à savoir la récupération et la pureté des produits de UPVC et de PVC, respectivement. Les valeurs optimales calculées des variables de contrôle ont été confirmées par des expériences réalisées dans les conditions recommandées par ces modèles.



CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Les DEEE constituent le flux de déchets qui croît le plus rapidement sur la planète. Il est essentiel de bien comprendre leur comportement pour créer des technologies de recyclage qui permettent de récupérer et valoriser les matériaux précieux provenant de ces déchets de manière écologiquement durable. Le procédé de séparation électrostatique représente une bonne technologie économiquement viable pour le recyclage de ces matériaux usagés issus des déchets industriels. Cette thèse étudie le recyclage des plastiques issus des déchets des DEEE, par des nouveaux procédés de chargement et de séparation. Elle présente en premier lieu un état de l'art sur le tri des déchets industriels en particulier les DEEE, puis elle offre une synthèse globale de la séparation électrostatique, en classant les différents procédés de séparation en fonction de leurs conceptions. Une grande partie de ce travail a consisté à la conception, la réalisation et la mise en marche de plusieurs procédés expérimentaux destinés à la séparation électrostatiques au niveau du laboratoire IRECOM de l'Université de Sidi Bel-Abbés. La modélisation et l'optimisation est naturellement la suite d'une nouvelle réalisation. Nous avons effectué des dizaines d'expériences préliminaires pour chaque procédé et les résultats de ces expériences facilitent considérablement cette modélisation, en utilisant la méthode des plans d'expériences et le logiciel Modes 5.0.

La conclusion de ce travail peut être formulée ainsi: la réalisation du nombreux séparateurs nous a permis de réaliser une installation de séparation efficace pour le tri de plusieurs tailles des particules plastiques issues des DEEE (granulaire, sous-millimétrique et micronisé). Une amélioration a été faite au niveau d'un des séparateurs réalisés (à 4 cylindres). L'introduction d'un nouveau chargeur à lames, ainsi qu'un système de rotation/balayage a donné la possibilité de séparer des particules de différentes tailles sans passer par divers séparateurs en cascade.

a) Les principales contributions originales

1. Réalisation de deux séparateurs à plan incliné au niveau du laboratoire IRECOM de l'Université de Sidi Bel-Abbés : le SPI qui est destiné au tri des mélanges granulaire de taille millimétrique et le STI conçu pour la séparation des mélanges micronisés.
2. Etude paramétrique des facteurs variables ainsi que leurs effets sur le rendement des deux séparateurs réalisés : le SPI et le STI.
3. Conception, réalisation et mise en œuvre d'un chargeur triboélectrique à lames destiné au chargement des particules isolantes micronisées.

4. Réalisation d'un séparateur à quatre électrodes cylindrique pour la séparation des mélanges granulaires de taille millimétrique et de grosses particules.
5. Simulation du champ électrique dans le séparateur à quatre électrodes cylindrique.
6. Etude numérique de trajectoires des particules dans le séparateur à 4 cylindres.
7. Etude paramétrique du processus de séparation des matériaux granulaire de taille millimétrique dans le dispositif à quatre électrodes cylindriques.
8. Amélioration du séparateur à quatre électrodes cylindriques pour le rendre compatible à d'autres tailles des particules isolantes, en lui ajoutant un système de rotations/balayage.
9. Analyse de la pureté des produits isolants micronisés séparés par une méthode basée sur la colorimétrie.
10. Modélisation et optimisation du séparateur à quatre électrodes rotatives à l'aide de la méthodologie des plans d'expériences.



REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie

- [1] R. Chandra, « Environmental waste nagement,» CRC Press. 2016.
- [2] A.Gürses,K.Güneş,M.E. Korucu and M.Açıkyildiz,« Industrial waste, » Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, pp.1-26,2000.
- [3] L.Lombardi,E. Carnevale, and A.Corti, « A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste, » Waste management, vol .37, pp. 26-44,2015.
- [4] Rédaction AE, « Le volume des déchets en Algérie, atteindra les 73 millions de tonnes en 2035,» Consulté sur: <https://www.algerie-eco.com/2018/12/06/le-volume-des-dechets-en-algerie-atteindra-les-73-millions-de-tonnes-en-2035/>.
- [5] R. M .Grigorescu, M. E. Grigore, P. Ghioca, L. Iancu, C. A. Nicolae, R. M .Ion,S. Teodorescu,andE.R.Andrei« Waste Electrical and Electronic Equipment, » Materiale Plastice, vol. 56(1), pp.77 ,2019 DEEE.
- [6] R.M.Grigorescu, M. E. Grigore, L. Iancu, P.Ghioca,and R.M.Ion, « Waste Electrical and Electronic Equipment: A Review on the Identification Methods for Polymeric Materials, » Recycling, vol. 4(3).pp. 32, 2019.
- [7] C.P.Baldé, V. Forti,V. Gray,R.Kuehr, and P.Stegmann, «The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows and resources,» United Nations University, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association. 2017.
- [8] F. Maisel, P. Chancerel, G. Dimitrova, J.Emmerich, N. F. Nissen, and M.Schneider-Ramelow, «Preparing WEEE plastics for recycling–How optimal particle sizes in pre-processing can improve the separation efficiency of high quality plastics. » Resources, Conservation and Recycling, vol. 154, pp.104619. 2020.
- [9] A. Iuga, R. Morar, A. Samuila et L. Dascalescu, «Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes,» IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, vol. 148, pp. 47-54, 2001.
- [10] A.Damien, «guide du traitement des déchets, 7ème édition : réglementation et choix des procédés,»2016.

- [11] Loi n° 75-633 du 15/07/75 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux.
- [12] Décret n°2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets.
- [13] B. Savary, R. Vincent, C. Rodriguez, A. Chollot ,« Caractérisation des risques chimiques professionnels de la filière de gestion des déchets : Analyse à priori des risques potentiels ,» Note Scientifique et technique NST 240 , Mars 2004.
- [14] Guide de gestion des déchets en Ile de France-Edition 2002- collection guides de l'entreprise environnement –CCIP- Centre d'information environnement pour les entreprises.
- [15] AFSSA «Avis de l'agence française de sécurité sanitaire des aliments en date du 7 avril 2001- Réponse à la saisine du 31 octobre 2000- Les risques sanitaires liés aux différents usages des farines et des graisses d'origine animale et aux conditions de leur traitement et de leur élimination, » Avril 2001- P 106.
- [16] ADEME – Dossier «les déchets du BTP» - Déchets des entreprises.
- [17] Décret n° 97-1048 du 6 novembre 1997 relatif à l'élimination des déchets d'activité de soins à risque infectieux et assimilés et des pièces anatomiques et modifiant le code de la santé publique.
- [18] IFEN-Chiffres clé 2002.
- [19] DIRECTIVE 2002/96/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Journal officiel de l'Union européenne, n° L037 du 13/02/2003, pp. 24-38. 2003.
- [20] E.Ademe Labouze , M.Hestin, A.Deprouw , G.Pageot Rapport annuel sur la mise en oeuvre de la réglementation sur les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques(DEEE). Données 2009.2010.
- [21] C. Desachy, 1996. « Wastes. Growing public awareness of an ecological management ; Les déchets, sensibilisation à une gestion écologique, » 1996.
- [22] S. Gouilliard, et A. Legendre, «Déchets ménagers, » : Ed. Economica. Paris 2003.
- [23] P. Peck, 2003. Interest in material cycle closure? Exploring evolution of industry's responses to high-grade recycling from an Industrial Ecology perspective. Lund University,2003.
- [24] G. Miquel, Recyclage et valorisation des déchets ménagers et des déchets industriels banals. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, rapport 415. 1999.
- [25] T. E. Graedel, « On the concept of industrial ecology,» Annual Review of Energy and the Environment , vol. 21 (1), pp. 69-98. 1996.

- [26] L.Berreur, B. Bellot, B.Rivollet, R.Lilamand Les voies de l'innovation dans les métiers de la métallurgie. 2005.
- [27] G. Martinho,A.Pires,L.Saraiva, R.Ribeiro, «Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling,» Waste Management, vol.32(6), pp.1213-1217.2012.
- [28] L. Flahaut et al, «Etude pour une filière de recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques sur le territoire national, » 2004.
- [29] C.Delavelle, D. Fayolle, «Caractérisation des plastiques contenus dans les DEEE et état des lieux de la valorisation de ces plastiques,» AJI-EUROPE, ADEME, 138p, 2006.
- [30] J.Hopewell, R.Dvorak, « E.Kosior, «Plastics recycling: Challenges and opportunities, » Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, vol. 364(1526), pp. 2115-2126, 2009.
- [31] S.Jofre, T. Morioka, «Waste management of electric and electronic equipment: Comparative analysis of end-of-life strategies, » Journal of Material Cycles and Waste Management, vol. 7(1), pp. 24-32, 2005.
- [32] M.Schlummer, L.Gruber, A.Mäurer, G.Wolz, R.Van Eldik , «Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management, » Chemosphere, vol. 67(9), pp. 1866-1876. 2007.
- [33] S. M.AL-Salem, P.Lettieri, J.Baeyens , «Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review, » Waste Manage, vol. 29(10), pp. 2625-2643,2009.
- [34] P.Brachet, L. T. Høydal, E. L.Hinrichsen, F. Melum, «Modification of mechanical properties of recycled polypropylene from post-consumer containers, » Waste Management, vol. 28(12), pp. 2456-2464, 2008.
- [35] X. Fu, M.Ding, C.Tang, B.Li, Z.Zhao, D. Q.Chen, Q.Zhang, Q.Fu, H.Long, T.Tan , «Toughening of recycled polystyrene used for TV backset, » J ApplPolymSci, vol. 109(6), pp. 3725-3732. 2008.
- [36] C. G. Hagberg, J. L. Dickerson, «Recycling Nylon carpet via reactive extrusion, » Plastics Engineering, vol. 53(4),pp. 41-43, 1997.
- [37] P.Chancerel, S.Rotter, «Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment, » Waste Manage, vol. 29 (8), pp. 2336-2352. 2009.
- [38] N.Menad, S.Guignot, J. A.Van Houwelingen ,«New characterisation method of electrical and electronic equipment wastes (WEEE), » Waste Management, vol. 33(3), pp.706-713. (2013).

- [39] R.Taurino, P.Pozzi, T.Zanasi ,«Facile characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) for mechanical recycling,»Waste Management, vol. 30 (12), pp. 2601-2607. 2010.
- [40] L. Dascalescu, T. Zeghloul, K. Medles, «Method and device for electrostatic separation of granular materials,»F.R. Pat. no. 3,078,638, issued Sep. 13. 2019.
- [41] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, R. Ouiddir, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, ,«Modeling and optimization of a separator for granular mixtures composed of multiple insulating materials, » IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 51(6), pp. 4743–4751, Nov. 2015.
- [42] R. Siddique, J.Khatib, I.Kaur , «Use of recycled plastic in concrete: A review,» Waste Management, vol. 28(10), pp. 1835-1852.2008.
- [43] D. S.Achilias, E. V.Antonakou, E.Koutsokosta, A. A. Lappas, «Chemical recycling of polymers from waste electric and electronic equipment,» Journal of Applied Polymer Science, vol. 114(1), pp. 212-221, 2009.
- [44] A. Arostegui, M. Sarrionandia, J.Aurrekoetxea, I. URRUTIBEASCOA, «Effect of dissolution-based recycling on the degradation and the mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer,» PolymDegradationStab, vol. 91(11) pp. 2768-2774. 2006.
- [45] M. T. García, I.Gracia, G.Duque, A. Lucas, J. F. Rodríguez, « Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process,» Waste Manage, vol. 29(6) pp. 1814-1818. 2009.
- [46] F.Vilaplana, S.Karlsson, «Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials: A review,» Macromol Mater Eng, vol. 293(4), pp. 274-297, 2008.
- [47] I.González, J. I.Eguiazábal, J.Nazábal, « On the use of the essential work of fracture procedure in the determination of the fracture energy of tough polymeric materials,» Polymer Testing, vol. 28(7), pp. 760-763, 2009.
- [48] B. E.Tiganis, L. S.Burn, P.Davis, A. J.Hill , « Thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) blends,» Polym Degradation Stab, vol. 76(3) pp. 425-434, 2002.
- [49] S. Touhami, W. Aksa, K. Medles, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, « Numerical simulation of the trajectories of insulating particles in a tribo-aero-electrostatic separator, » IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 51(5), pp. 4151–4158, Sep. 2015.
- [50] D.Fletcher, R.Gerber, P. Lawson, and J.Boehm, « Eddy-current separation of non-ferrous conductors and non-conductors: theory and initial experiments,» IEEE transactions on magnetics ,vol.27(6), pp.5375–5377. 1991.

- [51] S. Hayashi, F. Mishima, Y. Akiyama and S. Nishijima, « Study on high gradient magnetic separation for selective removal of impurity from highly viscous fluid,» IEEE Trans Appl Supercond ,vol.21(3), pp.2055–2058. (2011).
- [52] D.Wang, X.Ma, , X.Zhi, , S.Zhang, « Research review of scrap metals eddy current separation technology,» Sens. Transducers, vol.158 (11), pp.242–248,2013.
- [53] H.M. Veit, A.M. Bernardes, «Electronic Waste : Generation and Management,». Electronic waste. Springer, Cham ,pp. 3-12, Springer, 2015.
- [54] A.C. Kasper, A.P. Gabriel, E.L.B. de Oliveira, N.C. de Freitas Juchneski , H.M. Veit, , «Electronic waste recycling, » Electronic Waste, pp 87-127, Springer, Cham2015.
- [55] M. Goosey, «Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook: The materials of WEEE, » pp.123-144, 2012.
- [56] K. Makenji , M. Savage, «Mechanical methods of recycling plastics from WEEE, » Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook , pp.212-238, Woodhead, Publishing. 2012.
- [57] A.C. Kasper, N. Cristina, F. Juchneski , H.M. Veit, «Electronic Waste : Mechanical Processing, » pp. 19-38,2015.
- [58] W. Schubert, J. Tomas, «Liberation of valuables embedded in particle compounds and solid waste, » Hand book Powder Technol,Vol. 12, pp. 989–1017, 2007.
- [59] S. Zhang, E. Forssberg, « Intelligent Liberation and classification of electronic scrap, » Powder Technol, vol. 105 (1-3), pp. 295–301, 1999.
- [60] H. Masuda, K. Higashitani, H. Yoshida, « Powder technology : handling and operations, process instrumentation, and working hazards, » CRC Press. 2006.
- [61] K. Freegard, G. Tan, S. Frisch, « WEEE Plastics Separation Technologies, » Final Report DEFRA. 2007.
- [62] T. S. Hart, J. L. Ritchie, «Granulator, » U.S. Patent No. 6,749,138. 15 Jun. 2004.
- [63] J.Cui, and E.Forssberg, « Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review, » Journal of hazardous materials, vol.99(3), pp.243-263.2003.
- [64] V.Lahtela, and T. Kärki, « Mechanical Sorting Processing of Waste Material Before Composite Manufacturing-A Review, » Journal of Engineering Science & Technology Review, vol. 11(6), 2018.
- [65] T. C. Eisele , H. J. Walqui , and S. K. Kawatra, « Coal comminution and sizing ,» In The Coal Handbook: Towards Cleaner Production pp. 240-262,2013.
- [66] Trommel Screen consulté sur :

- https://fr.made-in-china.com/co_chinaminingmachinery/product_Rotary-Mining-Trommel-Screen-for-Gold-Coal-Washing_eunosuogy.html
- [67] Joyal-Vibration Screen consulté sur : <http://www.chinaminingequipment.fr/4-8-vibrating-screen.html>
- [68] Cribles à Disques Elliptiques consulté sur : <http://www.atmoshandling.com/portfolio/cribles-a-disques-elliptiques/>
- [69] A.C. Kasper, « Caracterização e reciclagem de materiais presentes em sucatas de telefones celulares,» 2011.
- [70] C. P.Bergmann, and A. Stumpf, « Topics in mining, metallurgy and materials engineering, » Porto Alegre: Springer 2017.
- [71] N.BOUZIDI, Techniques de tri des déchets.
- [72] Séparation aéraulique pour flux de matières plus grands et plus fins consulté sur : <https://www.bulkid.be/fr/machines/separation-aeraulique/>
- [73] He, Wenzhi, et al, « WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China, » Journal of hazardous materials, vol. 136 (3) ,pp.502-512, 2006.
- [74] L. Luo, and A. V. Nguyen, « A review of principles and applications of magnetic flocculation to separate ultrafine magnetic particles, » Separation and Purification Technology, vol.172, pp.85-99,2017.
- [75] H. D. Young, and R. A. Freedman, « Física III: eletromagnetismo, » São Paulo: Person Education do Brasil ,2009.
- [76] A.Chagnes, G.Cote, C.Ekberg, M. Nilsson, and T. Retegan, « WEEE Recycling: Research, development, and policies, » Elsevier.2016.
- [77] S. Bell , B. Davis , A. Javaid et E. Essadiqi, « Rapport final sur la gestion de la ferraille, le tri et la classification de l'aluminium, » laboratoire de la technologie des matériaux Ottawa 2003.
- [78] J.D. Brown, «an industrial electrostatic separation process, » TECH talk. 2(1), 1998.
- [79] Association of Plastics Manufactures in Europe. (2000) Insight into consumption and recovery. Western Europe 2000.
- [80] American Plastics Council. (2000). Plastics from residential electronics recycling. The report analyzes the types of plastics found in consumer electronics and the current technologies available to recycle. these plastics.2000.
- [81] HG448/2005,«Waste Electric and Electronic Equipment,» Romanian Government Decision, 2005.

- [82] I. Inculet, G.S.P. Castle, and J.D. Brown, « electrostatic separation of plastics for recycling, » *Part. Sci. Technol*, vol. 16 (1), pp. 91-100, 1998.
- [83] K. Medles, L. Dascalescu, A. Tilmatine, A. Bendaoud, and M. Younes, «experimental modeling of the electrostatic separation of granular materials, » *Part. Sci. Technol*, vol. 25 (2), pp.163-171, 2007.
- [84] K. Medles, A. Tilmatine, F. Miloua, A. Bendaoud, M. Younes, M. Rahli, and L. Dascalescu, «set point identification and robustness testing of electrostatic separation processes, » *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 43 (3), pp. 618–626, 2007.
- [85] A. Tilmatine, K. Medles, S.E. Bendimered, F. Boukhoulda, K. Medles, and L. Dascalescu, «electrostatic separators of particles. Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures,» *Waste Manage*, vol. 29(1), pp. 228–232, 2009.
- [86] Ralston, O.C, «*Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids*,» Elsevier, Amsterdam, 1961.
- [87] S. Atroune, A. Tilmatine, R. Alkama, A. Samuila and L. Dascalescu, « Comparative experimental study of tribo-electric charging of two size-classes of granular plastics, » *Part. Sci. Technol*, vol.33, pp. 652-658, 2015.
- [88] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, V. Neamtu and I. Suarasan, «Corona charging of particulates in the corona field of roll-type electro separators, » *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 27, pp. 1242-1251, 1994.
- [89] J.M. Crowley, « *Fundamentals of Applied Electrostatics*, » Morgan Hill, California: Laplacian Press, 1999.
- [90] C.H. Park, N. Subasinghe and H.S. Jeon, « Separation of covering plastics from particulate copper in cable wastes by induction electrostatic separation, » *Materials Transactions*, vol. 56, pp. 1140-1143, 2015.
- [91] M. Govi, « Quelques expériences sur l'induction électrostatique, » *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, vol. 4, pp. 264-266, 1875.
- [92] A. Younes, H. Sayah, M. Younes, A. Samuila and L. Dascalescu, «Behavior of Conducting particles in a new electrostatic separator with two high-voltage electrodes, » vol. 28, pp. 207-216, 2010.
- [93] C. Mayer-Laigle, A. Cadin, S. Messal, L. Dascalescu, and X. Rouau, «Dry fractionation of plant material powders using an electrostatic corona separator: a model study, » *5th International Congress on Green Process Engineering*, 2016 Canada.

- [94] B.He, , T.Li, , Y.Xiu, , H. Zhao, , Z.Peng, , and Y.Meng, « Study on law of negative corona discharge in microparticle-air two-phase flow media, » *Aip Advances*, vol. 6(3), pp.035114, 2016.
- [95] J.A. Giacometti, S. Fedosov and M.M. Costa, « Corona charging of polymers: recent advances on constant current charging, » *Brazilian Journal of Physics*, vol. 29, pp. 269-279, 1999.
- [96] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila and V. Neamtu, « Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes, » *Part. Sci. Technol*, vol. 16, pp. 25-42, 1998.
- [97] K. Senouci, K. Medles and L. Dascalescu, « Effective solutions for monitoring the electrostatic separation of metal and plastic granular waste from electric and electronic equipment ,» *Waste Management and Research*, vol. 31, pp. 160-168, 2013.
- [98] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, I. Saurasan, A. Samuila and D. Rafiroiu, « Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators, » *J. Electrostat*, vol. 29(3), pp. 221-225, 1993.
- [99] B. Tabti, R. Mekideche, M. Plopeanu, L. Dumitran and L. Dascalescu, «Corona Charging and Charge Decay Characteristics of Non-woven Filter Media, » *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 46, pp. 634-640, 2010.
- [100] A. Antoniu, B. Tabti, M. Plopeanu and L. Dascalescu, «Accelerated discharge of corona-charged non-woven fabrics, » *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 46, pp. 1188-1193,2010.
- [101] M. K. Forward, D. J. Lacks and R. Mohan Sankaran, «Triboelectric Charging of Granular Insulator Mixtures Due Solely to Particle-Particle Interactions ,» *Ind. Eng. Chem. Res*,vol.48, pp.2309–2314 2009.
- [102] W.R. Harper, «Contact and Frictional Electrification,» Morgan Hill, CA: Laplacian Press, 1998.
- [103] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, and L. Dascalescu, «Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device,» *J. Electrostat*, vol. 63, pp. 937-942, 2005.
- [104] M. Blajan, R. Beleca, A. Iuga, and L. Dascalescu, «Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation,»*IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 46, pp.1558 – 1563, 2010.
- [105] G. Buda, A. Samuila, S. Atroune, M. Bilici, and L. Dascalescu, «Set point identification of a tribocharging process for mixed granular solids,»*J.Electrostat*, vol. 71,pp. 407-412, 2013.

- [106] L.H. Lee, «Dual mechanism for metal polymer contact electrification, » J. Electrostat ,vol. 32, pp. 1-29, 1994.
- [107] S. Nicoara, L. Calin, A. Iuga, and N. Serban,«Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose, » Environment and Progress, vol. 6, pp.341- 346, 2006.
- [108] G.S.P. Castle,«Contact charging between insulators,» J. Electrostat, vol. 40 and 41, pp. 13- 18, 1997.
- [109] E.G. Kelly and D.J. Spottiswood,«The theory of electrostatic separations: a review, part 1, Fundamentals,» Miner Eng, vol. 2, pp. 33-46, 1989.
- [110] W. Jing, and M.J. Realff,«Design and optimization of free-fall electrostatic separators for plastics recycling,» AIChE J, vol. 49, pp. 3138-3149.2003.
- [111] V. Gente, F.L. Marca, F. Lucci and P. Massacci,«Electrical separation of plastics coming from special waste,» Waste Manag, vol. 23, pp. 951-958,2003.
- [112] R.D. Pascoe, and B.O. Connel, «Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation ,» Miner Eng, vol. 16, pp. 1205-1212, 2003.
- [113] Y. Matsushita, N. Mori and T. Sometani, « Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades, » Electrical Engineering in Japan, vol. 127, pp. 33-40, 1999.
- [114] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami and L. Dascalescu, « Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials, » J. Electrostat, vol. 69, pp. 631-637, 2011.
- [115] M. Blajan, A. Samuila, V. Neamtu, R. Beleca, L. Caliap, D. Vadan, A. Iuga and L. Dascalescu, « Experimental modeling of particle electrification in vibrated zigzag shaped metallic tubes, ». In: Proceedings of ESA/IEJ/IEEE-IAS/SFE Joint Conference on Electrostatics, June 6-9, 2006, University of California, and Berkeley, California. pp. 538-543, 2006. ISBN-0-7803-9209-4.
- [116] M. Lungu, « Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect, »Mineral Engineering, vol. 17, pp. 69–75, 2004.
- [117] Y. Higashiyama, Y. Ujiie and K. Asano, « Triboelectrification of plastic particles on a vibrating feeder laminated with a plastic film, » J. Electrostat, vol. 42, pp. 63–68, 1997.
- [118] G. Buda, M. Bilici, A. Samuila and L. Dascalescu, « Experimental study of the tribocharging process of plastic granular materials on a vibratory feeder device,»IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, pp. 1489-1496, 2013.

- [119] G. Buda, A. Samuila, M. Bilici and L. Dascalescu, « Premises for the statistical control of a tribocharging process for granular materials, » *Part. Sci. Technol*, vol. 32, pp. 138-143, 2014.
- [120] D. K. Yanar and B. A. Kwetkus, « Electrostatic separation of polymer powders, » *J. of Electrostat*, vol. 35, pp. 257–266, 1995.
- [121] M. Zelmat, A. Tilmatine, M. Rizouga, R. Gouri, K. Medles and L. Dascalescu, « Experimental analysis of a cyclone tribocharging device for free-fall triboelectric separation of plastic particles, » *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20(5), pp.1584-1589, October 2013.
- [122] G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki and T. Fujita, « Electrostatic separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone,» *Magnetic and Electrical Separation*, vol. 11, pp. 63-92, 2002.
- [123] M. Zelmat, M. Rizouga, A. Tilmatine, A. Bendaoud, K. Medles and L. Dascalescu,« Experimental analysis of a vibrating tribocharging device of plastic particles for a free-fall electrostatic separator, » *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 50, pp. 4228-4232, 2014.
- [124] L. Eriksson, E. Johansson, N. Kettaneh-Wold, C. Wikstöm and S. Wold, «Design of Experiments. Principles and applications,» *Learnways AB, Umetrics, Umeaa, Sweden*, 2000.
- [125] L. Calin, A. Mihalcioiu, A. Iuga and L. Dascalescu, « Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification, » *Part. Sci. Technol*, vol. 25, pp. 205-211, 2007.
- [126] M. Sarki et A. Masumoto, «Electrostatic separation of chopped waste electric cables,» *Journal of Environmental Engineering*, vol. 2, pp. 227-236, 2007.
- [127] A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S. Bendimerad, M. Miloudi et K. Medles,«Experimental investigation of electrostatic separators of plastic particles using different charging devices,» *Separation Science and Technology*, vol. 49, n° %13, pp. 464-468, 2014.
- [128] M. Zelmat, A. Rizouga, K. Medles et L. Dascalescu, «Experimental comparative study of different tri-bocharging devices for triboelectric separation of insulating particles,» *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 49, pp. 1113-1118, 2013.
- [129] J. Li, G. Wu et Z. Xu, «Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation,» *Waste Management*, vol. 35, pp. 36-41, 2014.
- [130] S. Masuda, M. Toraguchi, T. Takahashi et K. Haga, «Electostatic beneficiation of coal using a cyclone-tribocharger,» *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 19, pp. 789-793, 1983.

- [131] M. Blajan, R. Beleca, A. Iuga, and L. Dascalescu, «Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation,» *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol.46, pp.1558 – 1563, 2010.
- [132] L. Dascalescu, A. Urs, S. Bente, M. Huzau, and A. Samuila, « Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices, »*J. Electrostat*, vol.63, pp. 705-710, 2005.
- [133] I.E. Achouri, T. Zeghloul, G. Richard, K. Medles, L. Dascalescu, and K. Senouci, « Endurance Test for Evaluating the Performances of a Novel Rotating-Cylinder-Type Triboelectric Charging Device, » *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 56(6), pp.7005-7011, 2020.
- [134] Y. Higashiyama et K. Asano, «Recent progresses in electrostatic separation technology,» *Part. Part. Sci. Technol*, vol. 16, pp. 77-90, 1998.
- [135] S. Kazmierczak, P. Anglaret et J. Filippi, «Technologie génie chimique,» Tome 3, Centre Régional De Documentation Pédagogique, 1989.
- [136] S. Escalante, G. Touchard et G. Dominguez, «Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes,» *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 694-697, 2002.
- [137] L. Dascalescu, M. Bilici, C. Dragan, A. Samuila, Y. Ramdani et A. Tilmatine, «Robust design and capability evaluation of a tribo-aerodynamic charging process for fine particles,» *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 47, pp. 1086-1092, 2011.
- [138] C. Dragan, M. Bilici, S. Das, A. Samuila et L. Dascalescu, « Tribocharging of insulating powders in the annular ducts of pneumatic devices,» *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 46, pp. 1138-1143, 2010.
- [139] C. Dragan, A. Samuila, S. Das, D. Iancu, M. Bilici et L. Dascalescu, « Factors that influence the tribo-charging of insulating ducts in suction-type dilute-phase pneumatic transport systems, » *J. Electrostat*, vol.67, pp. 184-188, 2009.
- [140] Z. Chen, F. Liu, L. Wang, Y. Li, R. Wang et Z. Chen, «Tribocharging properties of wheat bran fragments in air-solid pipe flow,» *Food Research International*, vol. 62, pp. 262-271, 2014.
- [141] F. S. Ali, I. I. Inculet et A. Tedoldi, «Charging of polymer powder inside a metallic fluidized bed,» *J. Electrostat*, vol. 45, pp. 199-211, 1999.
- [142] E. Gate, «Electrostatic separation,» *United States Patent Office*, 1900.US653343.
- [143] R.K. Dwari, K.H. Rao, «Fine coal preparation using novel tribo electrostatic separator,» *Min. Eng*, vol. 22, pp.119–127, 2009.
- [144] S.E. Bendimerad, A. Tilmatine, K. Medles, M. Miloudi, Y. Brahami, L. Dascalescu, « Robustness testing of a free-fall triboelectric separation process for plastic waste

- recovery, »International Journal of Sustainable Engineering, vol. 7(4), pp.284-292,2014.
- [145] A. Tilmatine, L. Dascalescu, «Set-point identification of a free-fall triboelectrostatic separation process for plastic particles, » International Journal of Environmental Studies, vol. 67(1),pp. 27–40, 2010.
- [146] R. Ouiddir, A. Tilmatine, A. Bendaoud, M.EM. Zelmat, K. Medles, L. Dascalescu,« Recovery of water bottles plastic using tribo-electrostatic separation process , » IEEE Ind. App. Society. Ann. Meet, pp. 1-5 ,2015.
- [147] K. Younes, M. Younes, R. Meziane, A. Samuila, L. Dascalescu, «Modified tribo-charging device for the electrostatic separation of plastics from granular industrial wastes, » Separation. Sci. Technol, vol. 52, pp. 1246-1256, 2017.
- [148] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, M.F. Boukhoulda, M. Bilici, L. Dascalescu, « two stage electrostatic separator for the recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment, »J. Electrostat, vol 71, p 681-688,2013.
- [149] S. Das, K. Medles, M. Younes, C. Dragan et L. Dascalescu, «Separation of fine granular mixtures in S-plate-type electrostatic separators,» IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 43, pp. 1137-1143, 2007.
- [150] C. Barron, J. Abécassis, M. Chaurand, V. Lullien-Pellerin, F. Mabilille, X. Rouau, A. Sadoudi, et M.F. Samson, «Accès à des molécules d'intérêt par fractionnement par voie sèche,» Innovations Agronomiques, vol. 19, pp. 51-62, 2012.
- [151] Y. Hemery, X. Rouau, V. Lullien-Pellerin, C. Barron, and J. Abecassis, « Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality,»Journal of Cereal Science, vol.46, pp. 327–347, 2007.
- [152] L. Calin and L. Dascalescu, « Method for electrostatically separating a granular mixture made of different materials and device for implementing same ,» Patent FR2943561/2009, WO2010109096/2010, October 1, 2009.
- [153] M. Miloudi, K. Medles, A. Bendaoud, A. Tilmatine and L. Dascalescu, « Improvement of the industrial pilot of a tribo-aero-electrostatic separator for binary mixtures of granular insulating materials, » IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 51, pp. 3479-3484, 2015.
- [154] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine and L. Dascalescu,« Experimental study of the optimum operating conditions of a pilote-scale tribo aroelectrostatic separator of mixed granular solids, » IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 49, pp. 699-706, 2013.
- [155] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, S. El-Mossouess and K. Medles, « Tribo aroelectrostatic separator for coarse granular insulating materials,»IEEE

- Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20(5), pp. 1510-1515, 2013.
- [156] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, K. Medles and A. Tilmatine, « Improved overall performances of a tribo-aero-electrostatic separator for granular plastics from Waste Electric and Electronic Equipment, » IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 51, pp. 4159- 4165, 2015.
- [157] *** Carpco Inc., Jacksonville, USA, « Carpco application sheet. Rejection of PVC from PET flake using the Carpco V-STAT separator, » In: Bulletin No. 97713.
- [158] *** Carpco Inc., Jacksonville, USA, « The Solution to Separation, » Tehnical Information Bulletin, 1997.
- [159] M. F. Boukhoulda et al, «Experimental modelling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers, » IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 49(6), pp. 2375–2381, Nov./Dec. 2013.
- [160] A. Mekhalef Benhafssa, K. Medles, M.F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, and L. Dascalescu, «study of a tribo-aero electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials, » IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 51(5), pp. 4166–4172, 2015.
- [161] A. Mekhalef Benhafssa, K. Medles, M.F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, and L. Dascalescu, «study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials, » IEEE/IAS Annual Meeting (session: Electrostatic Processes), Vancouver, BC Canada, October 5-9, 2014.
- [162] A. Mekhalef Benhafssa, K. Medles, and M.F. Boukhoulda, « Etude d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges de matériaux pulvérulents isolants issus des deee,» International Conference in Integrated Management of Environment ICIME 2014, Hammamet, Tunisia, September 25-28, 2014.
- [163] A. Mekhalef Benhafssa, K. Medles, M.F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, and L. Dascalescu, « étude d'un séparateur tribo-aero-électrostatique des mélanges de matériaux poudreux,» Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Génie Electrique CONFREGÉ 2014, Albi, France, Mai 25-28, 2014.
- [164] S. Messal, A. Mekhalef, K. Medles, T. Zeghloul et L. Dascalescu, «Factors that influence the efficiency of a tribo-aero-electrostatic separator for finely grinded matter,» chez Proc. Electrostatics Joint Conference, West Lafayette, USA, 2016.
- [165] H. Ban, T. X. Li, J. C. Hower, J. L. Schaefer and J. M. Stencel, « Dry triboelectrostatic beneficiation of fly ash, » Fuel, vol. 76, pp. 801-805, 1997.
- [166] S. Messal, T. Zeghloul, A. Mekhalef Benhafssa, and L. Dascalescu, «sorting of finely-grinded granular mixtures using a belt-type corona-electrostatic separator, »Conf. Rec. IEEE/IAS Annual Meeting, Dallas, October 18-22, 2015.

- [167] L.Dascalescu, C. Dragan, M. Bilici, R. Beleca, Y. Hemery, and X. Rouau, «electrostatic bases for separation of wheat bran tissues, » IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 46, pp. 659 – 665, 2010.
- [168] S. Messal, R. Corondan, I. Chetan, R. Ouidir, K. Medles, and L. Dascalescu, «electrostatic separator for micronized mixtures of metals and plastics originating from waste electric and electronic equipment, »Electrostatics2015, Southampton, UK, 2015.
- [169] S. Messal, T. Zeghloul, A. Mekhalef Benhafssa, and L. Dascalescu, « belt-type corona electrostatic separator for the recovery of conductive and non-conductive products from micronized wastes,» IEEE Trans. Ind. Appl, October 2016.
- [170] S. Messal, A. Mekhalef Benhafssa, C. Mayer-Laigle, X. Rouau, and L. Dascalescu, «séparation électrostatique des matières végétales finement divisées,» 10^{ème} conférence de la Société française d'électrostatique (SFE), Poitiers, France, Aout 29-31, 2016.
- [171] Hamos EKS electrostatic plastic separator consulté sur : <https://www.hamos.com/products/electrostatic-separators,35,eng,39>
- [172] **H. Reriballah**, W. Aksa, M. F.Boukhoulda, S.Touhami, K.Medles, et A.Tilmatine, « Realization and Optimization of a New Inclined Plane Electro-Separator, » In 2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE). IEEE, pp. 1-6, 2019, November.
- [173] Poly (acrylonitrile/butadiène/styrène) ABS consulté sur : [file:///C:/Users/TM%20161/Downloads/POLYMER_ABS%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/TM%20161/Downloads/POLYMER_ABS%20(4).pdf)
- [174] Polyamide-Nylon-6,6, consulté sur : <http://www.goodfellow.com/F/Polyamide-Nylon-6,6.html>
- [175] Types de polymères consulté sur: <https://www.resinex.fr/types-de-polymeres/pa.html>
- [176] L. Eriksson, E. Johansson, N. Kettaneh-Wold, C. Wikström, and S. Wold, «Design of Experiments. Principles and Applications, ». Umeaa, Sweden:Umetrics, 2000.
- [177] N. L. Frigon and D. Mathews, Practical guide to experimental design, New York: Wiley,1996.
- [178] **H. Reriballah**, W. Aksa, S. Touhami, K. Medles, T. Zeghloul and L. Dascalescu, «Experimental analysis of the operation of a free-fall separator equipped with four rotating cylinders, »presented at IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Baltimore, MD (USA), 29 September - 3 October, 2019.
- [179] **H.Reriballah**, W. Aksa, S. Touhami, K. Medles, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, «Experimental Modeling and Optimization of a Free-Fall Electrostatic Separator

- Equipped With Four Rotating-Cylinder Electrodes,»IEEE Trans.Ind. Appl, vol.56(5), pp. 5472-5479, 2020.
- [180] S. Touhami, W. Aksa, M. Maammar, T. Zeghloul, K. Medles, and L. Dascalescu, «Numerical simulation of the behavior of insulating particles in a free fall tribo-electrostatic separator with four vertical cylindrical electrodes, » J. Electrostat., vol. 97, pp. 8–14, Jan. 2019.
- [181] N. Bouhamri, M. E. Zelmat, and A. Tilmatine, «Micronized plastic waste recycling using two-disc tribo-electrostatic separation process,»Advanced Powder Technology, vol. 30(3), pp. 625–631, 2019.
- [182] Umetrics AB,MODDE 5.0. User Guide and Tutorial, Umetrics, Umea,Sweden, 1999.

Résumé

La production d'équipements électriques et électroniques est un secteur industriel en croissance rapide, qui entraîne également une production croissante de déchets (DEEE). Une séparation efficace est une condition primordiale pour obtenir une recyclabilité élevée des plastiques des DEEE et produire des types de plastiques de bonne qualité. Les technologies électrostatiques se sont imposées comme la solution de choix pour le recyclage des matériaux isolants contenus dans ces déchets. L'objectif de ce travail est de séparer un mélange de particules de différentes tailles (granulaires à micronisées) par un seul procédé. C'est pour cela trois dispositifs ont été réalisés : séparateur à plan incliné (SPI), séparateur à tambour incliné (STI) et le dernier c'est un séparateur à quatre électrodes cylindriques rotatives qui est capable de trier un mélange de particules de différentes tailles (millimétriques, sous millimétriques et micronisées). Des puretés et des récupérations très élevées ont été obtenues par le séparateur à quatre cylindres rotatifs. L'utilisation d'une nouvelle méthode de colorimétrie a permis d'analyser la pureté des produits pulvérulents avec une grande précision. La modélisation et l'optimisation du séparateur à quatre électrodes cylindriques tournantes a été faite à l'aide de la méthodologie des plans d'expériences.

Mots clés : DEEE, séparateur électrostatique, colorimétrie, plans d'expériences.

Abstract

The production of electrical and electronic equipment is a fast-growing industrial sector, which also results in growing generation of waste electrical and electronic equipment (WEEE). An efficient separation is a pre-requisite in order to achieve a high recyclability of WEEE plastics and producing good quality plastic types. Electrostatic technologies have emerged as the best solution for recycling the insulating materials that contained in these wastes. The objective of this work is to separate particle mixture of different sizes (granular to micronized) by a single process. For this purpose three devices have been realized: inclined plane separator (SPI), inclined drum separator (STI) and the last one is a separator with four rotating cylindrical electrodes that is able to sort particle mixture of different sizes (millimetric, submillimetric and micronized). Very high purities and recoveries have been obtained by the separator with four rotating cylinders. The use of a new colorimetric method allows analyzing the purity of the powdery products with high accuracy. The modeling and optimization of the separator with four rotating cylindrical electrodes was done by using the design of experiments methodology.

Keywords : WEEE, Electrostatic separator, colorimetry, experimental designs.

ملخص

يعد إنتاج المعدات الكهربائية والإلكترونية قطاعًا صناعيًا سريع النمو ، مما يؤدي أيضًا إلى زيادة إنتاج النفايات . يعتبر الفصل الفعال شرطًا أساسيًا لتحقيق قابلية عالية لإعادة تدوير بلاستيك نفايات الأجهزة الكهربائية والإلكترونية وإنتاج أنواع عالية الجودة من البلاستيك. ظهرت التقنيات الكهروستاتيكية كحل أفضل لإعادة تدوير المواد البلاستيكية الموجودة في هذه النفايات. الهدف من هذا العمل هو فصل خليط من الجسيمات بأحجام مختلفة (من حبيبية إلى مسحوق) بعملية واحدة. هذا هو السبب في إنتاج ثلاثة أجهزة: فاصل المستوى المائل ، فاصل الأسطوانة المائلة والأخير هو عبارة عن فاصل بأربعة أقطاب أسطوانية دوارة قادرة على فرز خليط من الجسيمات ذات الأحجام المختلفة (مليمتر ، تحت المليمتر و مسحوق) . تم الحصول على درجات نقاء عالية جدًا وعمليات استرداد بواسطة فاصل بأربع أسطوانات دوارة. استخدام طريقة جديدة لقياس الألوان لقد سمحت لنا بتحليل نقاوة منتجات المساحيق بدقة عالية. تم عمل نمذجة فاصل بأربعة أقطاب أسطوانية دوارة باستخدام منهجية المخطط التجريبي.

الكلمات المفتاحية: المعدات الكهربائية والإلكترونية ، فاصل كهرباء ، قياس الألوان ، مخطط تجريبي.