

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université d'A. Mira de Bejaia
Faculté de technologie
Département du génie électrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention d'un diplôme de master

Option : Réseaux électriques

Thème

Simulation des trajectoires des particules isolantes granulaires en plastique dans le séparateur triboélectrique à chute libre

Préparé par :
Boussafi Maria

Encadré par :
Mr Atourne Salah

Devant le jury :
Mm Bendahmane
M Mebarki Nacer

Année universitaire : 2022 / 2023

Remerciement

Nous tenons, tous d'abord à remercier en premier lieu et avant tous DIEU tout puissant, qui nous a donné la force, la patience de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer, de tout cœur, nos sincères remerciements à notre promoteur, monsieur **S.ATROUNE**, pour avoir bien voulu nous accompagner tout au long de la préparation de notre projet de fin d'étude, pour les dérangements que nous lui avons occasionnés pour nous suivre et surtout pour les sages conseils et recommandations utiles qui nous ont permis de réaliser ce modeste mémoire. Qu'il trouve ici, l'expression de notre profonde gratitude, respect et éternelle reconnaissance.

Nos remerciements vont aussi s'adresser à tous les enseignants d'Electrotechnique qui ont contribué à notre formation. Enfin nos remerciements s'adressent également pour les membres de jury d'avoir accepté d'être témoins et de juger le fruit de notre cursus.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

*Aux deux êtres qui me sont les plus chers au monde **mon père et ma mère** à qui je dois le mérite d'être arrivée là, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude et mon affection.*

A ma tante

Akila

A mes très chers frères

Ali et Sofiane

A ma belle sœur

Louisa

A celui qui ma aider et soutenu tout au long de ma dernière année

Mon mari Adel

A ma meilleure copine

Missou

A tous ceux qui m'aiment

' B. Maria '

Fig I.1 : Eléments de base d'une ligne de tri des déchets d'équipement Electriques et Électronique DEEE.	4
Fig I.2 : Signe de la charge acquise par les particules en fonction de leur travail d'extraction ($W_A < W_B < W_D$).	5
Fig I.3 : Séparateur électrostatique a chute libre.	7
Fig I.4 : Séparateur triboélectrique a tapis roulant.	8
Fig I.5 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-statique a bandes transporteuses.	9
Fig I.6 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-statique à disques tournants.	9
Fig I.7 : Schéma du séparateur tribo-aéro-statique a électrodes verticales.	10
Fig I.8 : Dispositif vibreur de triboélectrisation.	11
Fig I.9 : Régime d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation. Erreur ! Signet non défini.	12
Fig I.10 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone.	13
Fig I.11 : Dispositif de chargement à vis sans fin.	13
Fig I.12 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur.	14
Fig I.13 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique.	15
Fig I.14 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro- statique. ...	15
Fig II.1 : Forces agissant sur une particule chargée négativement dans un séparateur à chute libre.	18
Fig II.2 : Nombre de Reynold Re en fonction du diamètre de la particule D_p et sa vitesse relative à la vitesse de l'air v	20
Fig II.3 : coefficient du frottement C_D en fonction du nombre de Reynold Re et le facteur de la particule.	21
Fig II.4 : Organigramme du programme de simulation MATLAB.	23
Fig III.1 : Principe de séparateur triboélectrostatique a chute libre.	25

Fig III.2: Influence de la charge sur la déviation de la particule.....	26
Fig III.3 : Comportement de la particule avec une vitesse de 10(m/s).	27
Fig III.4 : Le comportement des deux particules avec une vitesse de 30(m/s).	28
Fig III.5 : Le comportement des deux particules avec une vitesse a 50(m/s).....	28
Fig III.6 : Influence du champ électrique sur la particule chargé positivement à 100nC/g. ...	29
Fig III.7 : Influence du champ électrique sur la particule chargé négativement a -100nC/g..	30

Remerciement**Dédicace****Liste de figures**

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR LA SEPARATION ELECTROSTATIQUE	
I-1 INTRODUCTION	3
I-2 PRINCIPE DE LA SEPARATION TRIBO-ELECTROSTATIQUE.....	3
I-3 SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE	6
I-3-1 Séparateur a chute libre :	6
I.3.2 Séparateur triboélectrique a tapis roulant	7
I-3.3 Séparateur tribo-aéro-statique	8
I-4 DESPOSITIFS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE	10
I-4-1 Vibreur	10
I-4-2 Lit fluidisé.....	11
I-4-3 Cyclone	12
I-4-4 Convoyeur à vis sans fin.....	13
I-4-5 Chargement par ventilateur.....	14
I-4-6 Chargement statique	14
I-4-7 Chargement tribo-aéro-statique	15
I-5 CONCLUSION	16
CHAPITRE II: EQUATION PHYSIQUE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES	
II-1 INTRODUCTION	17
II-2 EQUATION DU MOUVEMENT	17
II-2-1 Mouvement libre	17
II.3 MODELE DU CHAMP ELECTROSTATIQUE	21
II.4 PROGRAMME DE SIMULATION DE LA TRAJECTOIRE	22

II.5 CONCLUSION :	24
CHAPITRE III: SIMULATION DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES	
III.1 INTRODUCTION.....	25
III.2 SEPARATEUR A CHUTE LIBRE	25
III.2.1 Modèle du champ électrostatique	25
III.2.2 Résultats de simulation.....	26
III.3 CONCLUSION	31
CONCLUSION GENERALE	32
Références	

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La technologie moderne engendre une explosion de la consommation des Equipements Electriques et Electroniques (EEE) et des déchets qui y sont associés appelés DEEE. Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) sont une catégorie de déchets constituée d'équipements en fin de cycle de vie, fonctionnant à l'électricité ou via des champs électromagnétiques, ce sont surtout des ordinateurs, imprimantes, téléphones portables, appareils photos numériques, réfrigérateurs, jeux électroniques ou télévisions qui sont jetés par dizaines de millions de tonnes dans la nature [1,4].

Conscients que les déchets électroniques sont une source de pollution et de danger pour la nature et par conséquent l'homme, de nombreux pays industrialisés et moins industrialisés s'organisent peu à peu afin de récupérer notamment les matériaux contenus dans ces déchets. Aux États-Unis ou en France, le recyclage devient obligatoire et les déchets doivent être pris en charge par des filières et entreprises spéciales, ces mêmes entreprises sont financées par des taxes imposées aux industriels en suivant le principe du « pollueur - payeur » [5].

Cette opération de récupération étant précédée par une étape de séparation assurée par les procédés gravitationnels ou par flottation sont concurrencés par des dispositifs électrostatiques de séparation caractérisés par une faible consommation d'énergie, ainsi que par les coûts réduits d'exploitation et d'entretien [6].

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

L'objectif principal de ce travail consiste à étudier la simulation des trajectoires des particules isolantes granulaires en plastique dans le séparateur triboélectrique à chute libre. Le mémoire comporte trois chapitres qui se présentent comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la description du principe de la séparation tribo-électrostatique par une brève description du principe de fonctionnement, et quelques notions sur les techniques de chargement tribo-électrique et les différents dispositifs utilisés.

Le deuxième chapitre, est consacré au développement de l'équation du mouvement des particules dans la zone de séparation électrostatique.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'influence de quelques paramètres sur la position des particules récupérées au niveau du collecteur du séparateur à chute libre. Cette étude est effectuée à l'aide d'un programme de simulation élaboré à partir des notions théoriques présentées dans le deuxième chapitre. Les résultats obtenus dans cette étude montrent l'influence de plusieurs paramètres tel que : la charge électrique acquise par les granules lors de leurs chargement triboélectrique, la vitesse initial d'entrée des particules dans le séparateur à chute libre et l'influence de l'intensité du champ électrique, sur la position finale de la particule récupérée au niveau du collecteur de l'installation étudiée.

Enfin, la conclusion générale mettra en valeur les apports de cette étude et proposera des perspectives de notre travail.

CHAPITRE I :

Etat de l'art sur la séparation triboélectrostatique

I-1 INTRODUCTION

Les déchets en plastiques occupent un volume important dans les points de collecte et d'autres sites de gestion de déchet tel que les centres d'enfouissements techniques. La dissémination de ce type de déchets dans la nature est durable et inesthétique car leur biodégradabilité est dans la plupart des cas faible. Il y a donc lieu d'encourager leur recyclage. Actuellement, le recyclage des déchets en plastique est devenu une industrie qui consiste à récupérer les granules de polymère séparées afin de les réutiliser comme matière première.

Les produits en plastiques issues des déchets d'équipements électriques et électroniques DEEE sont très utilisés dans l'industrie, et assez rentable après recyclage [1,2,6].

C'est ce type de déchet qui a captivé notre attention et qui a été utilisé dans les expériences de la séparation des mélanges granulaires.

La récupération des matériaux homogènes à partir des mélanges granulaires issus des DEEE nécessite l'emploi des techniques fiables dont les procédés conventionnels ont montrés dans certaines applications une efficacité modeste par rapport aux dispositifs électrostatiques caractérisés par une faible consommation d'énergie et par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien.

I-2 PRINCIPE DE LA SEPARATION TRIBO-ELECTROSTATIQUE

La séparation tribo-électrostatique est un procédé de séparation à sec qui permet le tri des mélanges granulaires, sans aucun additif. Dans l'ensemble des installations triboélectrostatiques le mélange granulaire est introduit dans une installation de triboélectrisation (Fig I.1). Dans cette installation les particules en plastique sont soumises à une agitation continue. Au cours de leurs mouvements, les particules du mélange entrent en collision entre elles et avec les parois de la chambre de triboélectrisation. Les contacts particules/particules et particules/parois chargent électriquement les particules. Cette méthode de chargement est reconnue comme l'un des processus les plus économiques utilisés dans le chargement des particules en plastique destinées à la séparation électrostatique. Les particules chargées par triboélectrisation sont soumises à l'action d'un champ électrostatique intense généré entre deux ou plusieurs électrodes d'un séparateur électrostatique.

Ce type de procédé est entièrement automatique et continu. Il permet d'obtenir des fractions d'une grande pureté pouvant dépasser les 99,5 % Le procédé est caractérisé par sa

faible consommation d'énergie ; un faible taux de défaillance et d'entretien et une capacité productive qui peut atteindre 2 T/h dans quelques installations industrielles. [7]

L'utilisation de ce type de procédé requiert des étapes importantes de Préparation utilisée généralement dans les chaînes de traitement des minerais et des produits pharmaceutique Ces étapes sont : broyage, dépoussiérage, lavage et séchage.

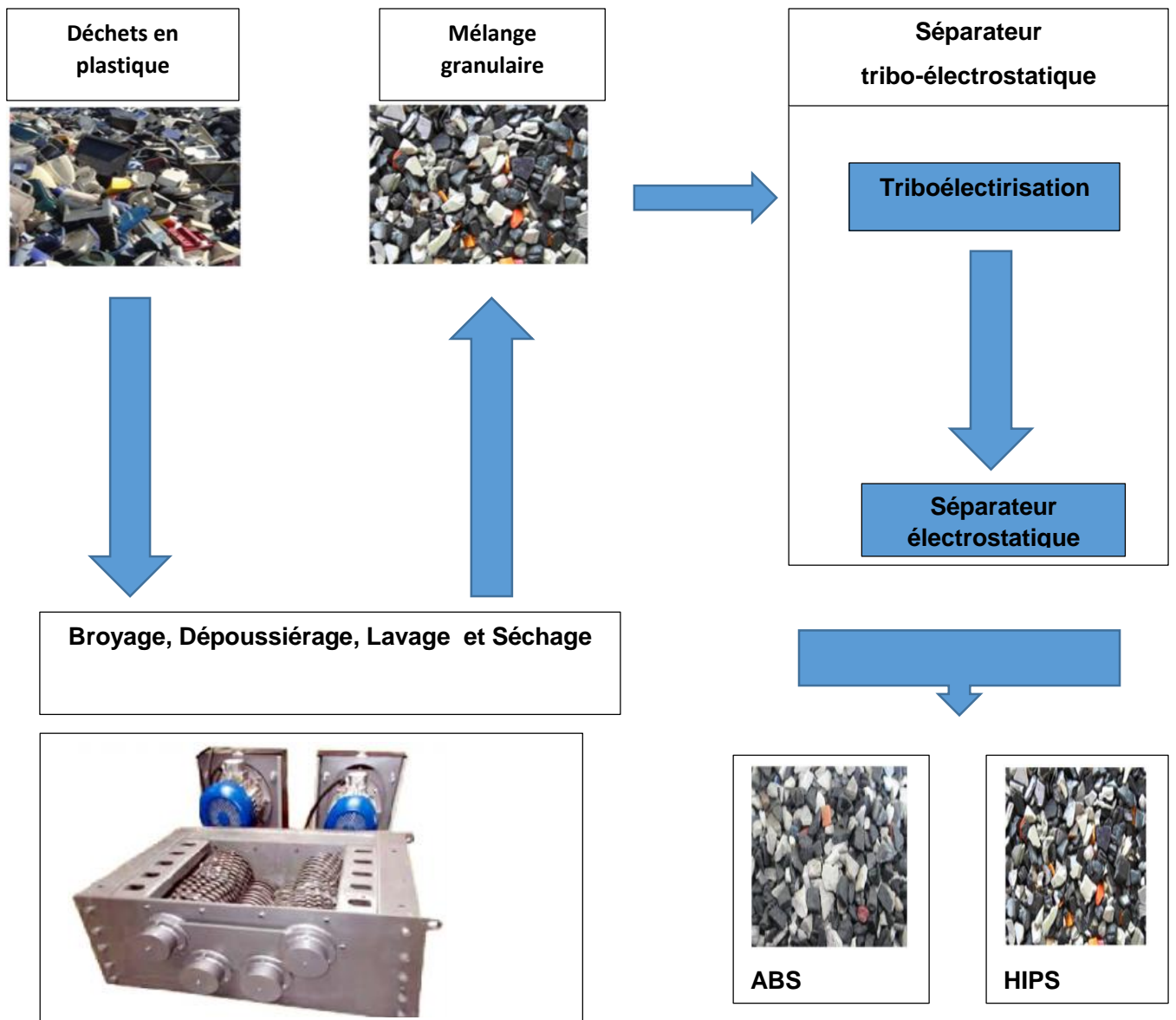


Fig I.1 : Eléments de base d'une ligne de tri des déchets d'équipement électriques et Électronique.

Le rendement de n'importe quel procédé électrostatique de séparation dépend fortement de l'efficacité du processus de chargement des particules. La quantité de charge acquise par les particules dans un processus de chargement triboélectrique dépend de la matière des matériaux en contact, de leurs surfaces, et de bien d'autres facteurs [8]. La présence d'un film de graisse ou d'humidité sur la surface des particules peut affecter grandement la quantité de charge acquise [9].

Certains matériaux ont une grande propension à perdre des charges ou à en acquérir. L'introduction de la notion de travail d'extraction pour un isolant a permis de constater que le signe de la charge prise par un isolant mis en contact avec un autre isolant dépend des valeurs respectives des travaux d'extraction de ces deux matériaux. Le travail d'extraction est défini en tant que l'énergie nécessaire pour arracher un électron à partir de la surface des particules [8].

Un élément quelconque de la série se charge positivement lorsqu'il est mis en contact avec un matériau situé au-dessus de lui et négativement au contact d'un matériau situé plus bas dans la série (Fig I.2).

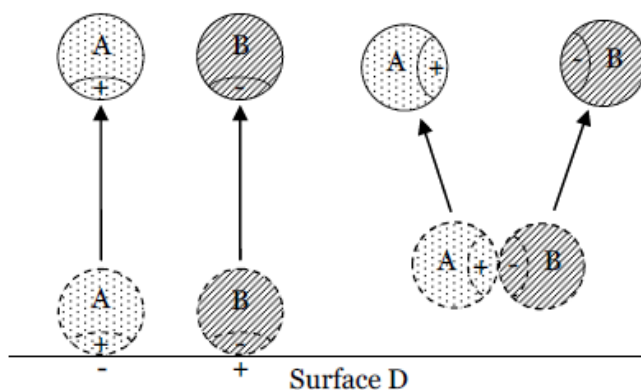


Fig I.2 : Signe de la charge acquise par les particules en fonction de leur travail d'extraction ($W_A < W_B < W_D$).

L'acquisition de charge par effet triboélectrique se produit au niveau surfacique entre deux corps. La charge statique acquise se produit dans un système où généralement la conductivité du matériau est faible, ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés. Cette charge importante est nécessaire pour le tri des granules dans un champ électrique intense.

I-3 SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE

Un séparateur électrostatique est un dispositif utilisé pour séparer les particules en fonction de leurs charges électrique. Les particules sont introduites dans le séparateur, ou elles passent à travers un champ électrique. En fonction de leur charge électrique, les particules seront attirées ou repoussées par les électrodes du séparateur, ce qui permet de les séparer.

Les séparateurs électrostatiques sont couramment utilisés dans l'industrie pour séparer les particules de matières premières telles que le charbon, le sable, les cendres volantes. Ils peuvent également être utilisés dans le traitement des déchets pour séparer les matériaux recyclables des déchets non recyclables.

Ces séparateurs peuvent être conçus pour fonctionner en continue ou en batch et leur efficacité dépend de nombreux facteurs, tels que la taille des particules, leur densité, leur forme et leur charge électrique.

I-3-1 Séparateur a chute libre :

Un séparateur électrostatique à chute libre est un équipement utilisé pour séparer les particules en fonction de leur charge électrique. Ce type de séparateur fonctionne en utilisant la force électrostatique pour attirer les particules chargées vers une électrode opposée de charge opposée. Les particules non chargées continuent à tomber et sont collectées à la base du séparateur.

Le principe du fonctionnement de séparateur électrostatique à chute libre est assez simple. Les particules à séparer sont introduites dans une chambre en haut de séparateur, ou elles sont soumises à un champ électrique haut tension entre deux électrodes. Les particules chargées sont alors attirées vers l'électrode opposée de la charge opposée, laissant les particules non chargées tomber librement.

Le séparateur électrostatique à chute libre est largement utilisé dans le tri et la purification des minerais de taille sous-millimétrique [10-11]. Actuellement, le processus est appliqué avec succès dans le tri des produits granulaire en plastique issus des déchets d'équipement électriques et électronique [12]. La Fig I.3 représente un modèle du laboratoire d'un séparateur à chute libre.

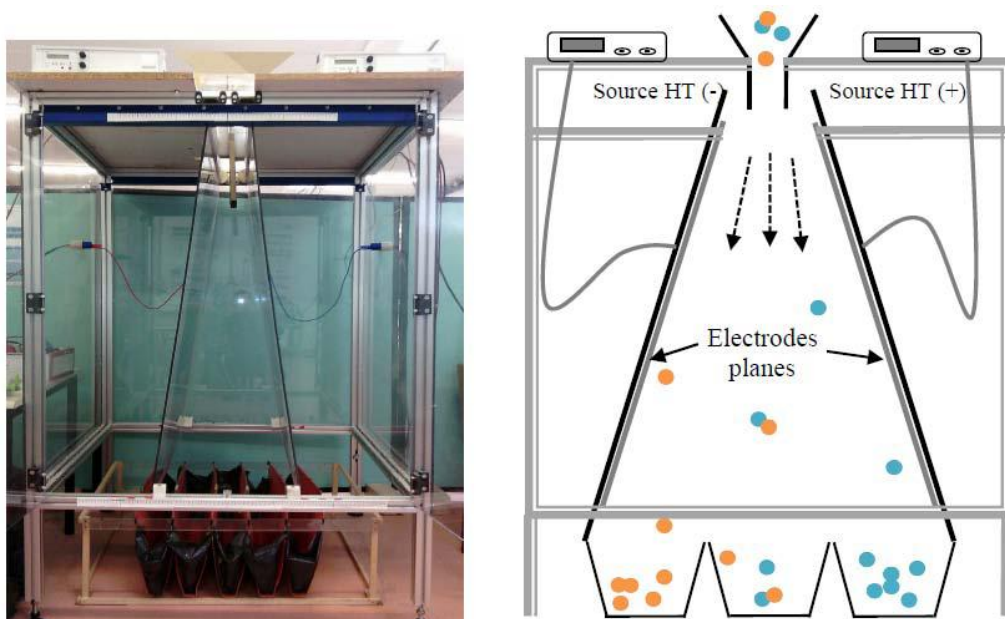


Fig I.3 : Séparateur électrostatique a chute libre.

I.3.2 Séparateur triboélectrique a tapis roulant

Un séparateur triboélectrique a tapis roulant est un équipement utilisé pour séparer les matériaux en fonction de leur propriété triboélectrique, c'est-à-dire leur capacité à se charger électriquement lorsqu'ils rentrent en contact avec d'autres matériaux. Le séparateur triboélectrique a tapis roulant est composé d'un tapis roulant qui transporte les matériaux vers une zone de séparation, où des charges électriques sont induites sur les particules de matériaux en frottement les unes contre les autres. Les particules sont ensuite séparées en fonction de leur charge électrique et de leur propriété triboélectrique, grâce à des électrodes ou des champs électriques.

Ce type de séparateur est utilisé dans diverses industries telles que l'exploitation minière, la production des métaux et des minéraux, le recyclage des déchets, etc. Il peut être utilisé pour séparer différents types de matériaux, tels que les plastiques, les minéraux, les métaux, les produits chimiques, etc.

Il représente plusieurs avantages par rapport aux méthodes de séparation traditionnelle. Il permet une séparation plus précise des matériaux en fonction de leur propriété triboélectrique, ce qui produit à une plus grande efficacité et une meilleure qualité de produit finale. La Fig I.4 représente un schéma d'un séparateur triboélectrique a tapis roulant.

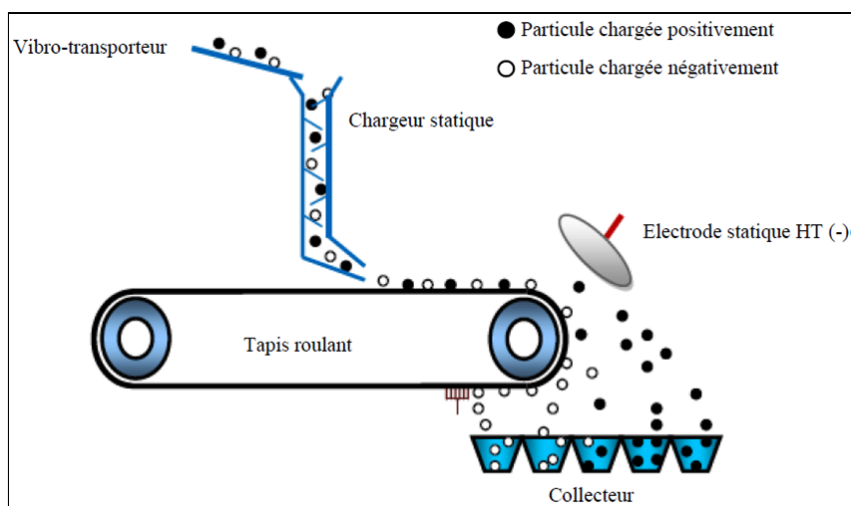


Fig I.4 : Séparateur triboélectrique a tapis roulant.

I-3.3 Séparateur tribo-aéro-statique

Plusieurs études ont été déjà faites sur cette gamme de séparateur électrostatique, le principe de fonctionnement de ces procédés est basé sur la triboélectricité et l'aérodynamique, en d'autre terme ce sont des dispositifs ayant le même mode de chargement (lit fluidisé), mais non pas la même technique de séparation.

La particularité de ces dispositifs est la simultanée des deux opérations : la charge triboélectrique des particules par collisions dans le lit fluidisé et la séparation électrostatique de celles-ci dans un champ électrique intense généré par des électrodes connectées aux générateurs de haute tension continue de polarités inversées, la séparation s'effectue par le fait que les électrodes attirent les particules contrairement polarisées.

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

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

On distingue les différents types de séparateur tribo-aéro-électrostatique :

La figure I.5 représente un séparateur tribo-aéro-statique à bandes transporteuses

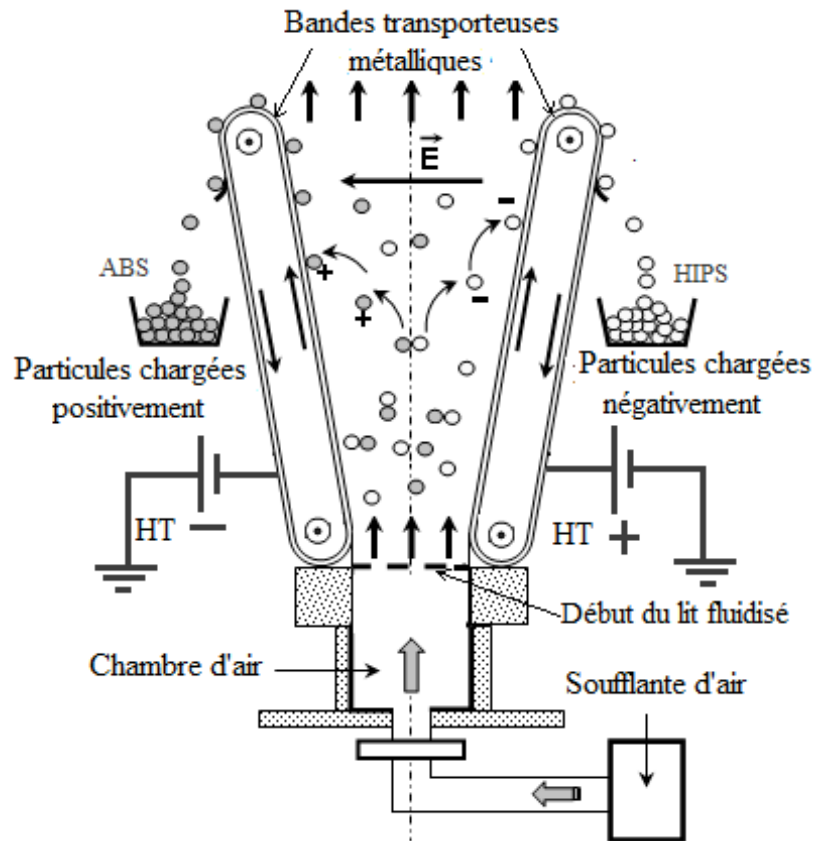


Fig I.5 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-statique a bandes transporteuses.

La figure I.6 représente un séparateur tribo-aéro-statique à disques tournants :

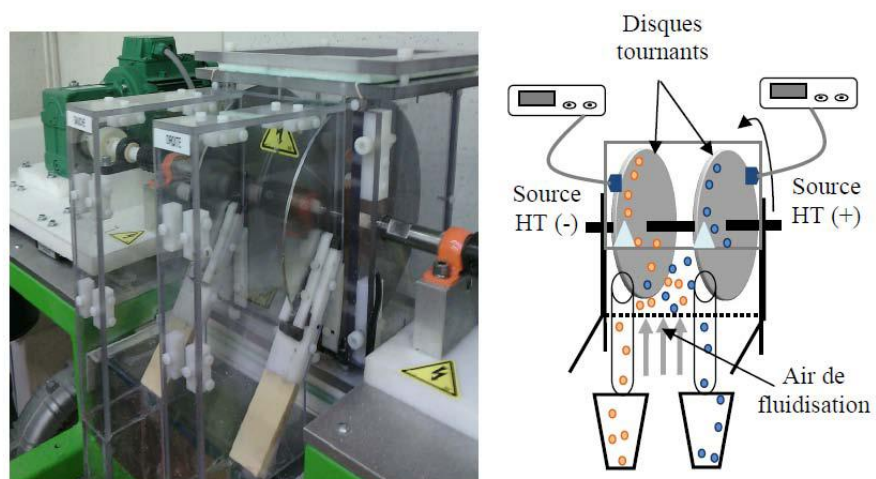


Fig I.6 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-statique à disques tournants.

La figure I.7 représente un séparateur tribo-aéro-statique à électrodes verticales :

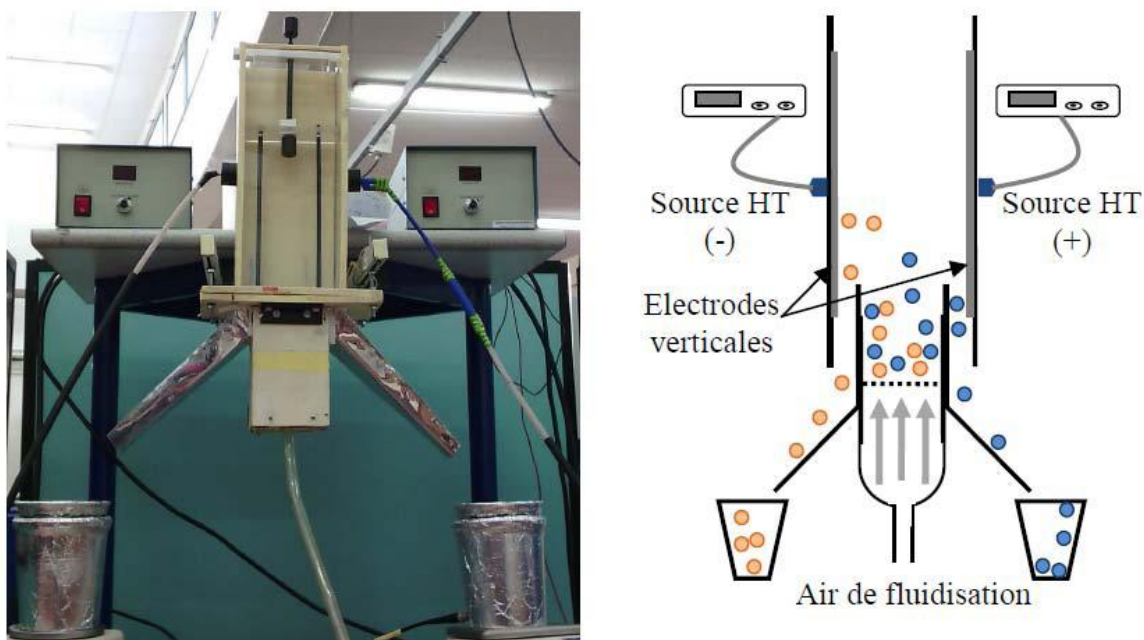


Fig I.7 : Schéma du séparateur tribo-aéro-statique a électrodes verticales.

I-4 DESPOSITIFS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE

I-4-1 Vibreur

Le vibreur comprend un ensemble d'éléments permettant aux granules l'acquisition, d'une charge triboélectrique (Fig I.8). L'entonnoir servant à recueillir et acheminer le mélange granulaire, est solidaire d'une chambre de triboélectrisation à hauteur variable, dont la longueur est de 32cm, la largeur de 10cm. Les hauteurs des trois étages est obtenue en insérant une paroi longitudinale permettant d'introduire, selon la hauteur de l'étage choisi, une fine lame métallique à usage d'étagère. Le premier étage correspond à une hauteur de 1cm, le second 2cm et le troisième étage à une hauteur de 3 cm [13].

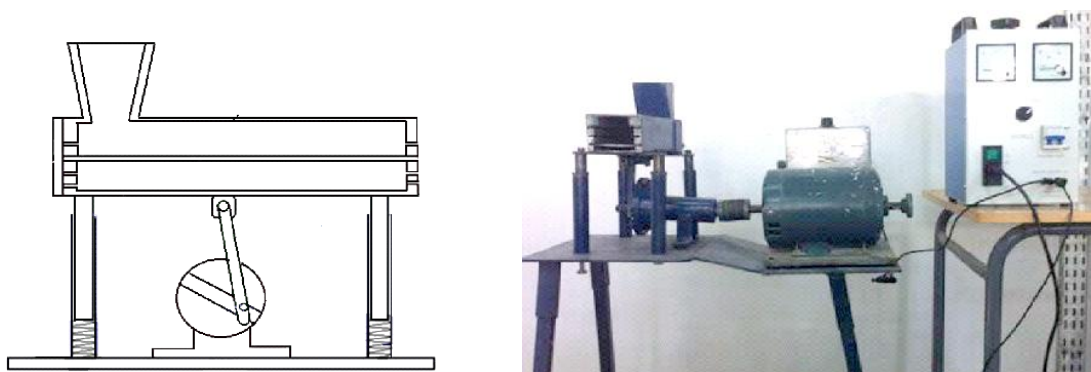


Fig I.8 : Dispositif vibreur de triboélectrisation.

L'ensemble "chambre de triboélectrisation plus entonnoir" est supporté par quatre cylindres. Chaque cylindre est un ensemble constitué d'un premier cylindre externe fixe reposant sur la table, à l'intérieur duquel se loge un second cylindre dont la partie supérieure est fixée au caisson tandis que la partie inférieure est munie d'un ressort lui aussi fixé à la table. Le ressort sert à amortir les vibrations dues aux mouvements oscillatoires.

I-4-2 Lit fluidisé

Le lit fluidisé est la solution la plus utilisée pour le chargement tribo-électrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (Fig I.9) [14]. On considère une couche de particules solides reposant sur une plaque poreuse horizontale à l'intérieur d'un cylindre vertical. On injecte un gaz à travers la plaque dans le sens ascendant:

- **La vibration :** pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le tamis sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.
- **La formation :** le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques similaires aux fluides: ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation U_{mf} .
- **Le 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** : un excès au-delà d' U_{mb} , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.
- **Le renardage** : les particules s'accrochent et créent des passages préférentiels pour le gaz.
- **L'entraînement** : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos U_t , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation.

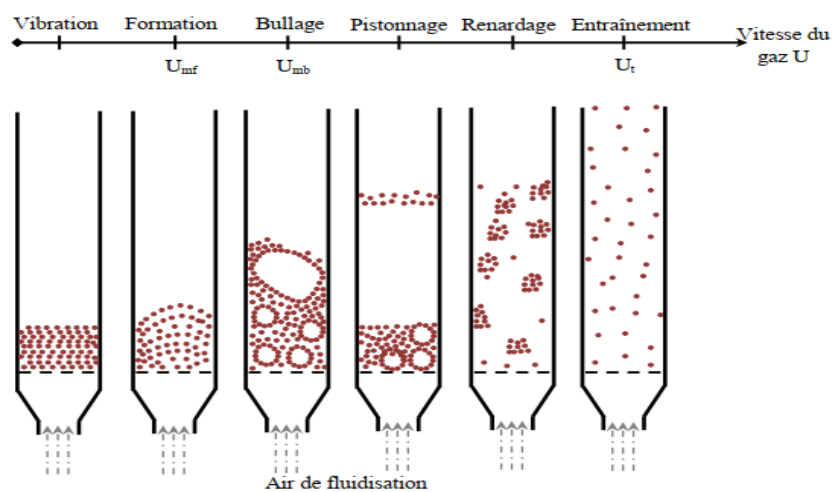


Fig I.9 : Régime d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation.

I-4-3 Cyclone

Le dispositif est constitué d'un cylindre isolant et un ventilateur dont la vitesse de rotation peut être modifiée (Fig I.10). Le dispositif permet de souffler les particules à charger par frottement avec les parois internes du cylindre, où elles subissent un frottement continu contre la paroi interne. La majorité de charge acquise s'effectue lors du contact des particules avec cette paroi [15].

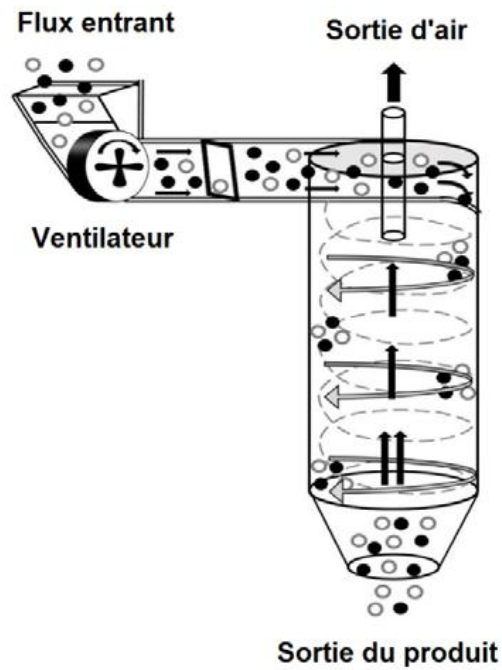


Fig I.10 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone.

I-4-4 Convoyeur à vis sans fin

L'installation est composée d'une vis sans fin qui se trouve dans un cylindre rotatif en polyamide, d'un rayon $R=10\text{ cm}$ et d'une longueur de 90cm , la rotation de la vis provoque la culbute des particules qui se chargent partiellement par contact répété entre eux même et avec la paroi interne du cylindre qui constitue la quasi-totalité du chargement (démontré par la suite), l'installation a un double rôle, celui du chargement mais aussi celui de l'acheminement de ces dernières vers la zone de séparation (Fig I.11) [16].

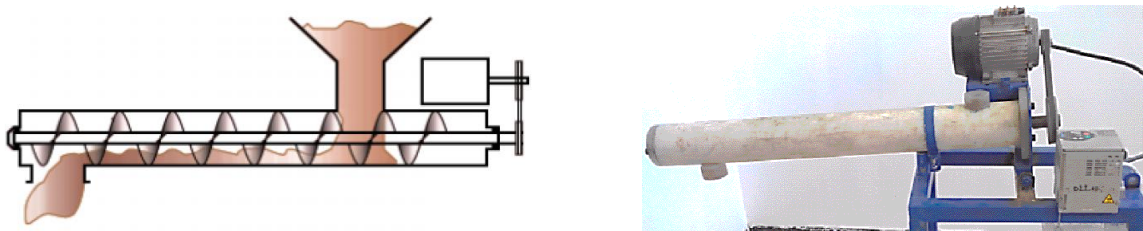


Fig I.11 : Dispositif de chargement à vis sans fin.

I-4-5 Chargement par ventilateur

Les principaux éléments de cette installation sont: un tube cylindrique isolant, un moteur à courant continu entraînant une hélice isolante et un support métallique (Fig I.12). Le dispositif utilise l'air ascendant donnant naissance à des turbulences dans la chambre cylindrique isolante en polyvinyle chlorure PVC contenant le mélange granulaire, provoquant ainsi une triboélectrification des particules par des collisions entre elles ou bien entre les particules et les parois [17-18]. La récupération du mélange chargé, s'effectue par le pivotement du cylindre sans faire arrêter le moteur afin d'éviter le collage des particules sur les parois et aussi de vider tous le contenu du récipient.

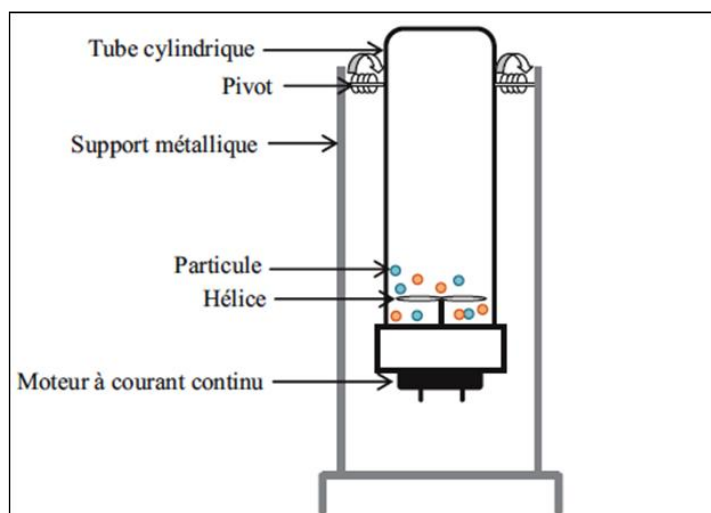


Fig I.12 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur.

I-4-6 Chargement statique

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique en matière isolante (Fig I.13), à l'intérieur de laquelle sont disposées plusieurs plaques inclinées et détachables. Les particules glissent le long de ces plaques par gravitation et se chargent par frottement avec celles-ci [15,18].

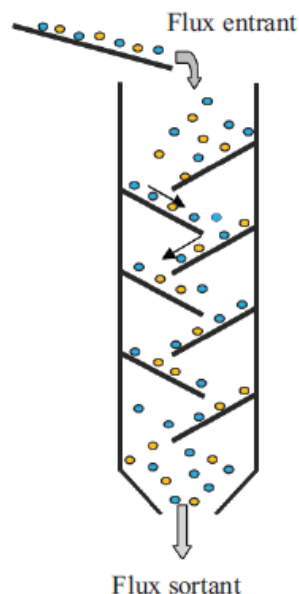


Fig I.13 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique.

I-4-7 Chargement tribo-aéro-statique

Cette technique est une combinaison de deux modes de chargement en cascade, le procédé est une chambre parallélépipédique isolante (Fig I.14) comprend deux partie: la première pour le chargement aéro-triboélectrique (à lit fluidisé), après avoir mettre les particules en agitation dans un lit fluidisé, elles sont dirigés vers la deuxième partie du dispositif destiné au chargement statique par des parois inclinées, dont le but de pouvoir mieux contrôler la charge acquise, multipliant les paramètres de chargement [19].

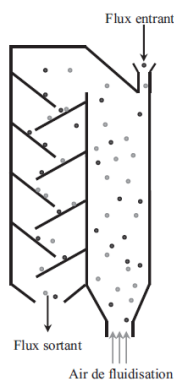


Fig I.14 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro- statique.

I-5 CONCLUSION

Le développement rapide des nouvelles technologies et l'amélioration des performances des équipements ont réduit la durée de vie de ces derniers, le cout qui a multiplié la quantité de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) et de matériaux de tous types à la fin de leurs essais, qui à leur tour font des ravages. Sur l'humanité dans son ensemble. La quantité faramineuse de déchets rejetés dans la nature et les retombées économiques a incité les chercheurs à multiplier leurs recherches dans le domaine du recyclage, nécessairement précédé par le récent procédé de séparation amélioré par l'introduction de l'électrostatique, qui peut désormais faire ses preuves. Dans cette optique, les différentes techniques de séparation électrostatique que nous avons présentée dans ce chapitre, ont fait l'objet de plusieurs études dans des laboratoires aux États-Unis, au Japon, en Europe, au Canada et en Algérie.

CHAPITRE II :

Equation physique de la trajectoire des particules

II-1 INTRODUCTION

L'étude des trajectoires des particules plastiques dans les champs électrostatiques représente l'un des problèmes les plus importants de l'industrie pour la séparation électrostatique des mélanges de particules.

Le but de cette étude vise généralement à estimer les paramètres optimaux du processus de séparation. Ce chapitre est consacré au développement d'une équation physique des trajectoires des particules, dans un séparateur électrostatique à chute libre.

II-2 EQUATION DU MOUVEMENT

La simulation de la trajectoire d'une particule dans un séparateur électrostatique consiste à définir trois grandeurs fondamentales caractérisant la cinématique de la particule en fonction du temps. Ces grandeurs représentées par l'accélération, la vitesse et la position de la particule sont obtenues par la résolution de l'équation de mouvement.

II-2-1 Mouvement libre

Le mouvement libre d'une particule granulaire en plastique dans un séparateur électrostatique dépendra de plusieurs facteurs tels que la charge de la particule, la masse de la particule, l'intensité du champ électrique et de la densité des matériaux à séparer.

Dans un séparateur électrostatique, une particule granulaire en plastique est soumise à un champ électrique qui génère une force électrostatique sur la particule. Si la force électrostatique est suffisamment forte pour convaincre la gravité et les forces du frottement, la particule pourra avoir un mouvement libre dans un séparateur électrostatique.

La charge de la particule granulaire en plastique est importante car elle détermine l'interaction de la particule avec le champ électrique

La masse de la particule est également importante car elle détermine la force de gravité plus faible et seront plus susceptibles d'avoir un mouvement libre dans le séparateur électrostatique.

L'intensité du champ électrique est autre facteur important. Si l'intensité du champ électrique est trop faible, la force électrostatique ne sera pas suffisante pour convaincre la gravité et les forces de frottement, et la particule ne pourra pas avoir de mouvement libre. Si l'intensité du champ électrique est trop élevée, la particule pourrait être soumise à des forces électrostatiques excessives qui pourraient la faire se déplacer dans des directions non souhaités.

Enfin, la densité des matériaux à séparer est également importante car elle peut influencer la direction du mouvement de la particule granulaire en plastique. Les particules granulaires en plastique seront attirées ou repoussées par les matériaux en fonction de leurs propriétés électrostatique et de leur densité.

En résumé, le mouvement libre d'une particule granulaire en plastique dans un séparateur électrostatique dépendra de plusieurs facteurs, notamment la charge de la particule, la masse de la particule, l'intensité du champ électrique et de la densité des matériaux à séparer.

Dans cette phase le mouvement de la particule est régit par l'équation (II.1) dite de Newton.

$$m_p \frac{dv}{dt} = \sum F \quad (\text{II.1})$$

D'où :

- m_p et $\frac{dv}{dt}$ la masse et l'accélération instantanée de la particule;
- $\sum F$ la somme des forces appliquées sur la particule sans la zone d'étude.

La figure II.1 nous donne un aperçu sur la direction des forces agissant sur une particule chargée négativement en chute libre dans un champ électrostatique généré entre deux électrodes parallèles.

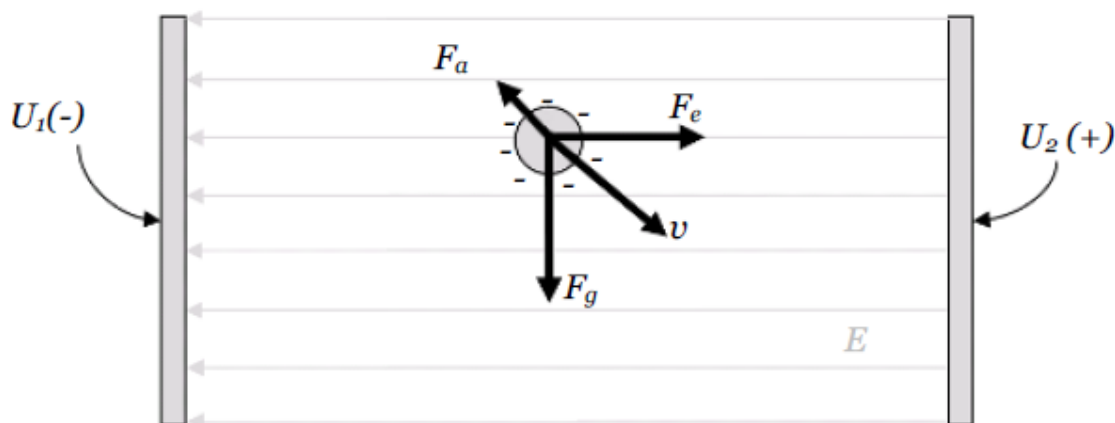


Fig II.1 : Forces agissant sur une particule chargée négativement dans un séparateur à chute libre

Dans un séparateur à chute libre une particule de taille millimétrique est soumise à l'action de trois forces à savoir : Force électrostatique F_{el} due à l'action du champ électrostatique sur la charge acquise par la particule au cours de la triboélectrification ; Force gravitationnelle F_g

due à l'action de la pesanteur sur la masse de la particule ; Force de frottement exercée par le milieu de séparation sur la surface de la particule F_a .

$$F_g = m \times g \quad (\text{II.2})$$

Où :

- g est l'accélération gravitationnelle.

$$F_{el} = q \times E \quad (\text{II.3})$$

Où :

- q est la charge des particules ;
- E est l'intensité du champ électrique.

$$F_a = \frac{1}{2} C_D \rho_A S v^2 \quad (\text{II.4})$$

Où :

- C_D est le coefficient de frottement ;
- ρ_A est la densité de l'air ;
- S est la surface projetée dans la direction du mouvement ;
- v est la vitesse des particules.

Le coefficient de frottement des particules avec l'air C_D peut être obtenu à partir du nombre de Reynold Re et le facteur de forme \emptyset de la particule.

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + b_1 Re^{b_2}) + \frac{b_3 Re}{b_4 Re} \quad (\text{II.4.1})$$

D'où Re : Nombre de Reynold donné par la relation suivante :

$$Re = \frac{\rho_{air} D_p v}{\mu} \quad (\text{II.4.2})$$

$$b_1 = \exp(2.33 - 6.46\emptyset + 2.45\emptyset^2) \quad (\text{II.4.3})$$

$$b_2 = 0.10 + 0.56\emptyset \quad (\text{II.4.4})$$

$$b_3 = \exp(4.91 - 13.89\emptyset + 18.42\emptyset^2 + 10.26\emptyset^3) \quad (\text{II.4.5})$$

$$b_4 = \exp(1.47 + 12.26\emptyset + 20.73\emptyset^2 + 15.89\emptyset^3) \quad (\text{II.4.6})$$

D'où :

- $\rho_{air} = 1.204 \text{ kg/m}^3$ et $\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{ N s/m}^2$ représente respectivement la densité volumique et la viscosité dynamique de l'air dans les conditions normale de température et de pression ;
- \emptyset facteur de forme de la particule (sphéricité de la particule) calculé à partir de la surface de la particule sphérique de même volume " s " et la surface réel de la particule " S ".

$$\phi = \frac{s}{S} \tag{II.4.7}$$

Le nombre de Reynold calculé par l'équation (II.4.2) est représenté dans la figure II.2. Cette figure nous montre la variation du nombre de Reynold en fonction du diamètre de la particule D_p de volume équivalent est sa vitesse relative à la vitesse de l'air dans la zone de séparation v .

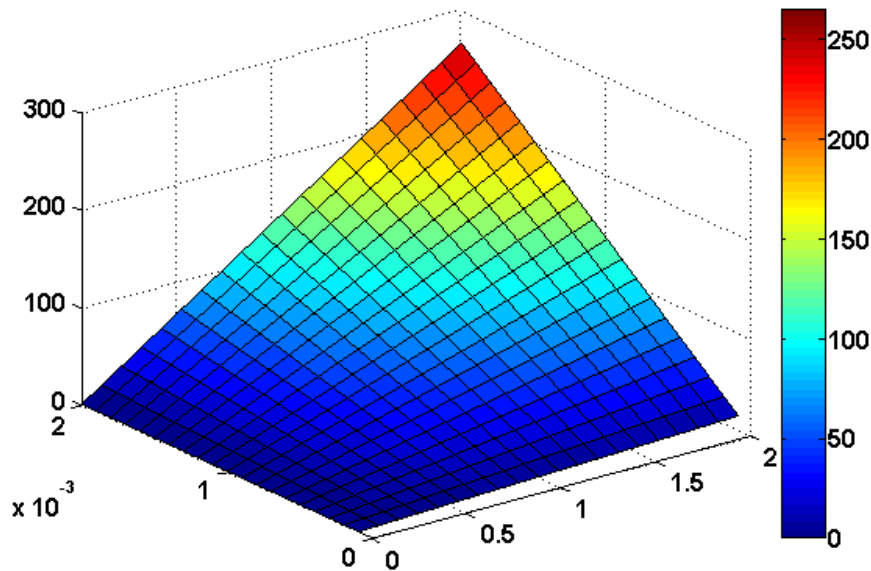


Fig II.2 : Nombre de Reynold Re en fonction du diamètre de la particule D_p et sa vitesse relative à la vitesse de l'air v .

Le nombre de Reynold est utilisé dans l'équation (II.4.1) pour déterminer le coefficient de frottement de la particule avec l'air. La valeur du coefficient de frottement C_D en fonction du nombre de Reynold et le facteur de forme de la particule est représentée dans la figure II.3.

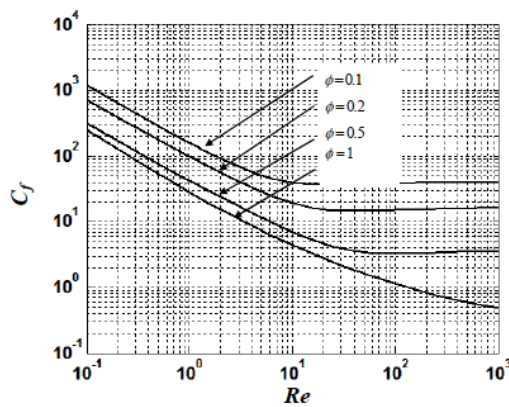


Fig II.3 : coefficient du frottement C_D en fonction du nombre de Reynold Re et le facteur de la particule.

II.3 MODELE DU CHAMP ELECTROSTATIQUE

Le calcul de la trajectoire des particules dans un séparateur électrostatique exige la disponibilité d'un modèle physique capable de fournir la valeur du champ électrostatique dans quelques points appartenant à la zone de séparation.

Le champ électrostatique du séparateur à chute libre a un plan parallèle symétrie. La trajectoire des particules, décrite par le vecteur position $r(x, y)$, représente une courbe plane qui peut être approximée par segments linéaires. Sur chaque segment de trajectoire, correspondant à l'incrément du temps Δt , le mouvement est considéré comme rectiligne et uniformément accéléré (l'accélération est constante), et la vitesse augmente avec une quantité $a_i \Delta t$.

Ainsi, pour le segment $[i, i+1]$, où le vecteur initial les quantités $r_i(x_i, y_i)$, $v(v_{ix}, v_{iy})$, et $a_i(a_{ix}, a_{iy})$ sont connues, le vecteur position du point $(i+1)$ est donné par l'équation vectorielle

$$r_{(i+1)} = r_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} a_i \Delta t^2 \quad (\text{II.5})$$

Pour déterminer le point suivant de la trajectoire $r_{(i+2)}$, il faut calculer la vitesse $v_{(i+1)}$ et l'accélération $a_{(i+1)}$ en point $(i+1)$

$$v_{(i+1)} = v_i + a_i \Delta t \quad (\text{II.6})$$

$$a_{(i+1)} = \frac{1}{m} [F_G + F_{E(i+1)} + F_{A(i+1)}] \quad (\text{II.7})$$

Les équations paramétriques de la trajectoire sous forme cartésienne, correspondant aux équations vectorielles (II.5)-(II.7) sont :

$$\begin{cases} x_{(i+1)} = x_i + v_{ix} \Delta t + \frac{1}{2} a_{ix} \Delta t^2 \\ y_{(i+1)} = y_i + v_{iy} \Delta t + \frac{1}{2} a_{iy} \Delta t^2 \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

$$\begin{cases} v_{(i+1)x} = v_{ix} + a_{ix} \Delta t \\ v_{(i+1)y} = v_{iy} + a_{iy} \Delta t \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

$$\begin{cases} a_{(i+1)x} = \frac{1}{m} [-qE_{(i+1)x} + F_{A(i+1)x}] \\ a_{(i+1)y} = \frac{1}{m} [-mg + qE_{(i+1)y} + F_{A(i+1)y}] \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Ou

$$\begin{cases} F_{A(i+1)x} = \frac{1}{2} C_D \rho_{air} v_{(i+1)x}^2 \sin[v_{(i+1)x}] \\ F_{A(i+1)y} = \frac{1}{2} C_D \rho_{air} v_{(i+1)y}^2 \sin[v_{(i+1)y}] \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Au début de la trajectoire les grandeurs initiales sont :

$$\begin{cases} r_0(x_0, y_0 = 0) \\ v_0(v_{0x} = v_0 \sin \alpha, v_{0y} = -v_0 \cos \alpha) \\ a_0(a_{0x} = 0, a_{0y} = -g) \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

II.4 PROGRAMME DE SIMULATION DE LA TRAJECTOIRE

La simulation de la trajectoire d'une particule dans un séparateur électrostatique se fait par la résolution numérique de l'équation de mouvement (II.1). Dans cette étude le problème de simulation est fragmenté en plusieurs problèmes élémentaires. L'ensemble est mise en œuvre sous forme d'un programme MATLAB

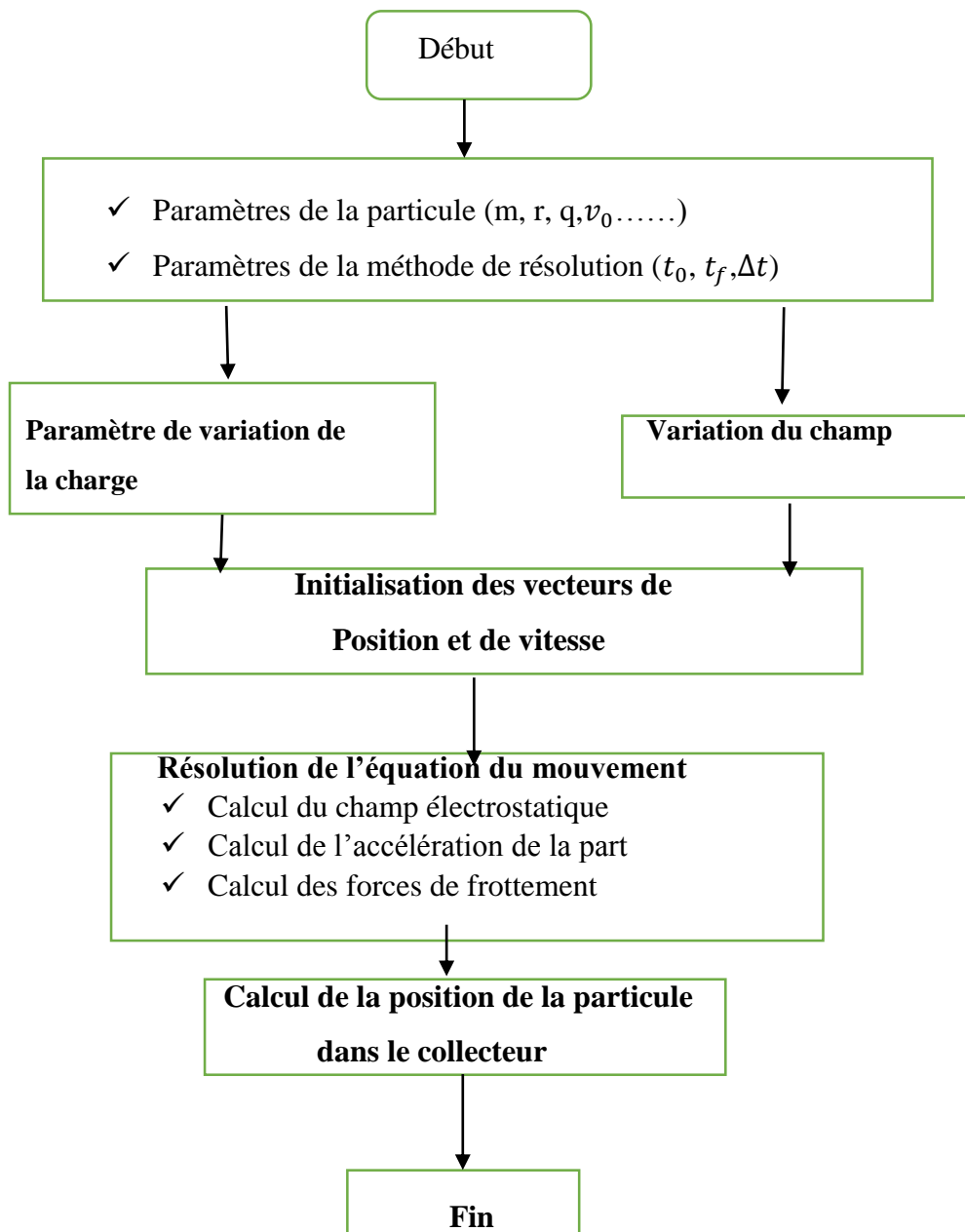


Fig II.4 : Organigramme du programme de simulation MATLAB.

II.5 CONCLUSION

Le modèle et le programme de simulation de la trajectoire des particules dans un séparateur électrostatique sont des outils puissants pour étudier et optimiser le fonctionnement de ce dispositif. Ils permettent de comprendre les mécanismes physiques impliqués et d'améliorer la performance de séparation des particules en ajustant les paramètres du séparateur.

CHAPITRE III :

Simulation de la trajectoire des particules

III.1 INTRODUCTION

Le comportement des particules en plastique dans un séparateur électrostatique dépend de la force et de la direction du champ de force agissant simultanément sur les particules dans la zone de séparation électrostatique. Dans ce chapitre, nous visons à étudier et simuler le comportement des particules dans un séparateur à chute libre. Le modèle de simulation utilisé dans cette étude est basé sur le modèle théorique développé dans le chapitre précédent. Tous les modèles sont implémentés sous la forme du programme MATALAB, qui permet de simuler le comportement des particules en fonction des paramètres électriques et géométriques du dispositif étudié et des paramètres du mélange de tri. La simulation permet de prédire et de comprendre l'influence des paramètres étudiés sur la distribution particulière des particules de mélange récupérées au niveau du collecteur de l'installation étudiée.

III.2 SEPARATEUR A CHUTE LIBRE

III.2.1 Modèle du champ électrostatique

Dans ce type de séparateur le mélange granulaire à séparer chute librement dans un champ électrique généré par deux électrodes liées à la haute tension (Fig III.1). Les forces électrostatiques qui agissent sur les granules chargés les conduisent vers l'électrode de polarité opposée où ils sont collectés dans des bacs.

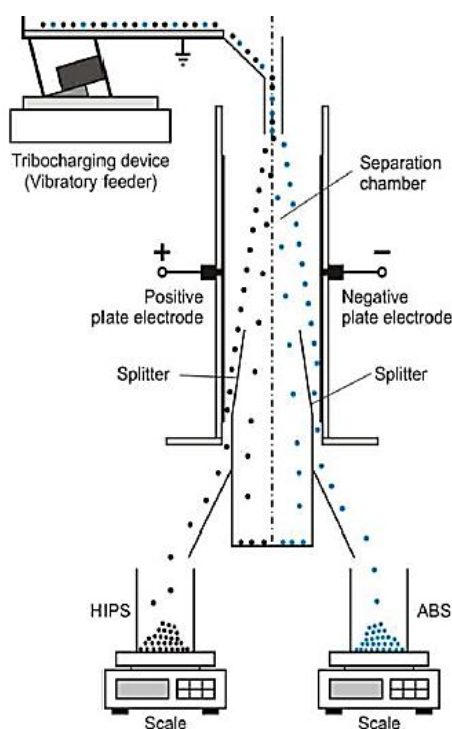


Fig III.1 : Principe de séparateur triboélectrostatique a chute libre.

III.2.2 Résultats de simulation

➤ Influence du rapport de charge

Pour effectuer la simulation de l'influence du rapport charge, nous avons fixé la vitesse initiale de la particule à 0(m/s), coefficient du frottement de la particule avec l'air à 0, la position initiale de la particule à (0,0) selon les axes (x, y) et le champ électrique appliqué à l'intérieur du séparateur est de 20kV. Dans chaque simulation la trajectoire d'une particule est calculé pour une valeur fixe du rapport Charge. Les valeurs choisies dans cette simulation sont: $\pm 5(\text{nC/g})$, $\pm 10(\text{nC/g})$, $\pm 15(\text{nC/g})$. Les résultats sont présentés dans la figure III.2.

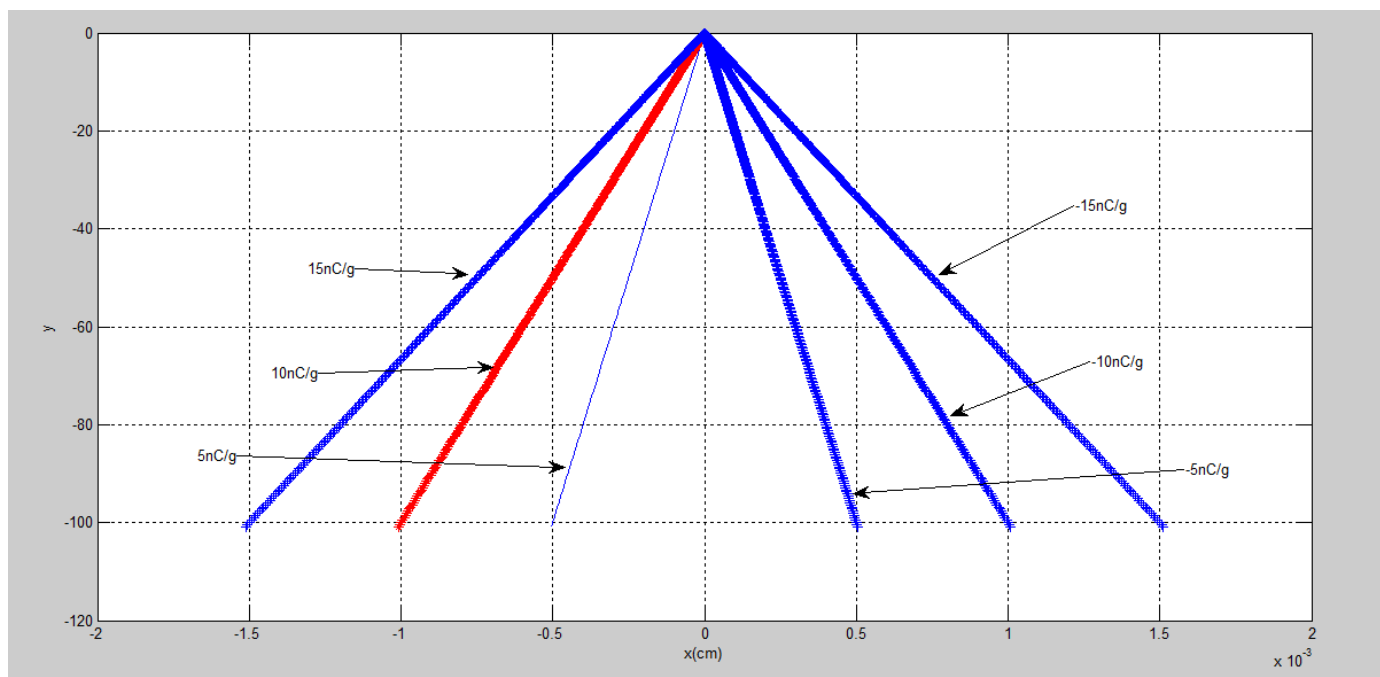


Fig III.2: Influence de la charge sur la déviation des deux particules.

Le résultat de simulation, montre que, pour chaque valeur du rapport charge électrique/masse, nous avons obtenus une déviation différente selon l'axe x, plus le rapport charge électrique- masse augmente, plus la déviation selon x augmente. Ceci est expliqué par le fait que la force électrique est proportionnelle à la charge électrique des particules.

La déviation selon l'axe x des particules chargées positivement est : $Q/m = -15 \text{ nC/g}$, $x = -1.5 \text{ cm}$, $Q/m = 10 \text{ nC/g}$, $x = -1 \text{ cm}$ et $Q/m = 5 \text{ nC/g}$, $x = -0.5 \text{ cm}$.

La déviation selon l'axe x des particules négativement est : $Q/m = -15 \text{ nC/g}$, $x = 1.5 \text{ cm}$, $Q/m = -10 \text{ nC/g}$, $x = 1 \text{ cm}$ et pour $Q/m = -5 \text{ nC/g}$, $x = 0.5 \text{ cm}$.

Comme nous l'avons illustré sur la figure III.1, le séparateur à chute libre est composé de deux électrodes rectangulaire une alimentée par une tension positive et l'autre par une tension négative, entre elle il y a espace variable selon l'axe x.

Si on choisit de prendre comme espace entre les deux électrodes $d=3\text{cm}$, nous constatons que pour le rapport charge/masse = $\pm 15\text{ nC/g}$ qui nous donne une position $x=\pm 1.5$, les particules percuteraient les électrodes ce qui va induire une déviation de la retomber des granules par apport à leurs collecteur qui par la suite affecterai le résultat de séparation.

Pour éviter ce phénomène de collision entre les particules et les électrodes, le rapport charge électrique /masse doit être inférieur à $\pm 15\text{nC/g}$ pour un intervalle $d=3\text{cm}$

➤ Influence de la vitesse initiale

La vitesse initiale de la particule à l'entrée du séparateur est l'une des facteurs qui influence la trajectoire des particules. Les différentes valeurs de vitesse initiale choisies suivant l'axe Oy sont : 10 (m/s), 30 (m/s), 50 (m/s). Le comportement des particules est examiné sur deux types de particule. Elles sont caractérisées par une charge de $\pm 10(\text{nC/g})$. La figure III.3 représente le comportement des deux particules avec une vitesse de 10(m/s)

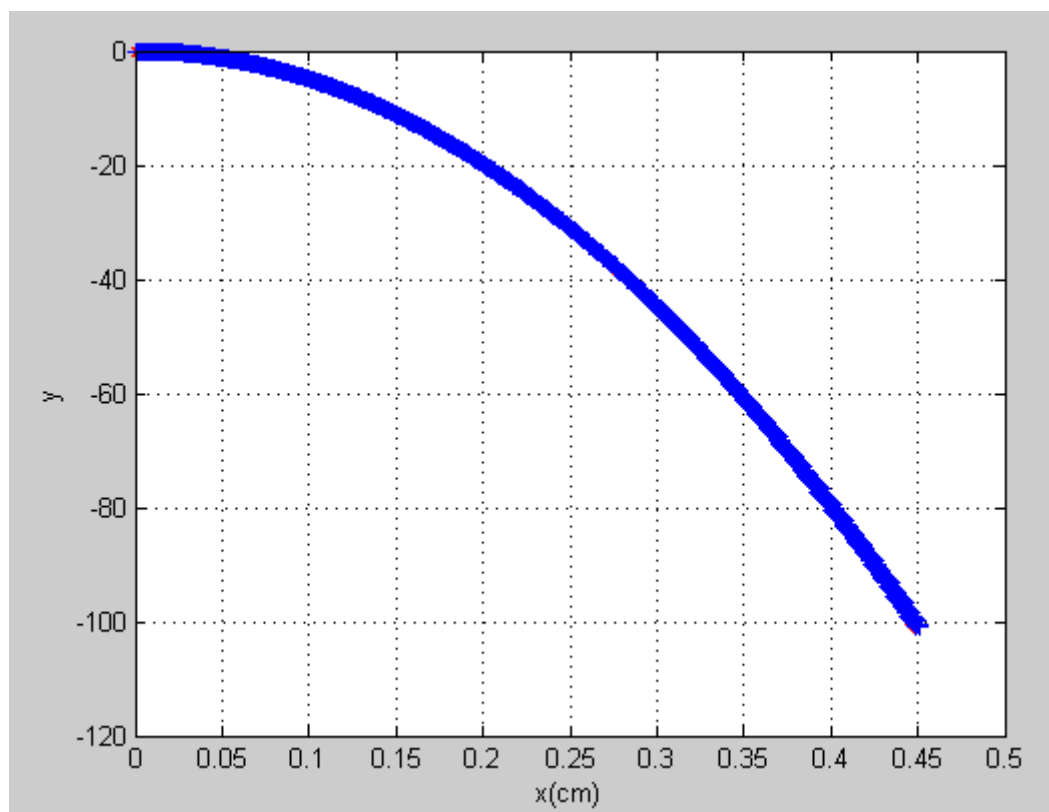


Fig III.3 : Comportement des deux particules avec une vitesse de 10(m/s).

La figure III.4 représente le comportement des deux particules avec une vitesse de 30 m/s.

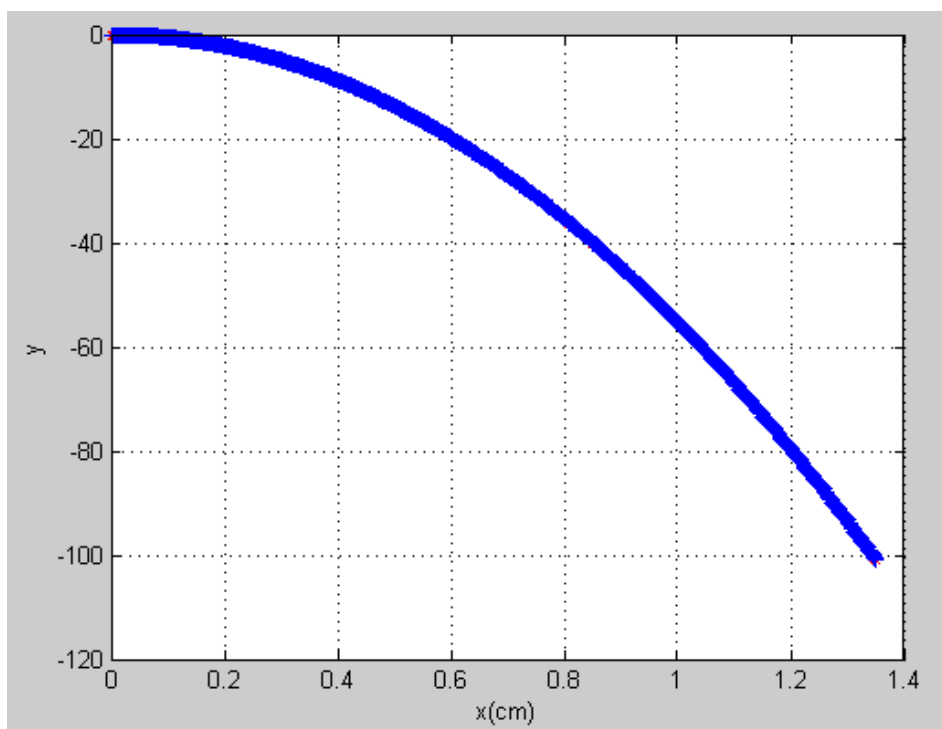


Fig III.4 : Le comportement des deux particules avec une vitesse de 30 m/s.

La figure III.5 représente le comportement des deux particules avec une vitesse de 50(m/s).

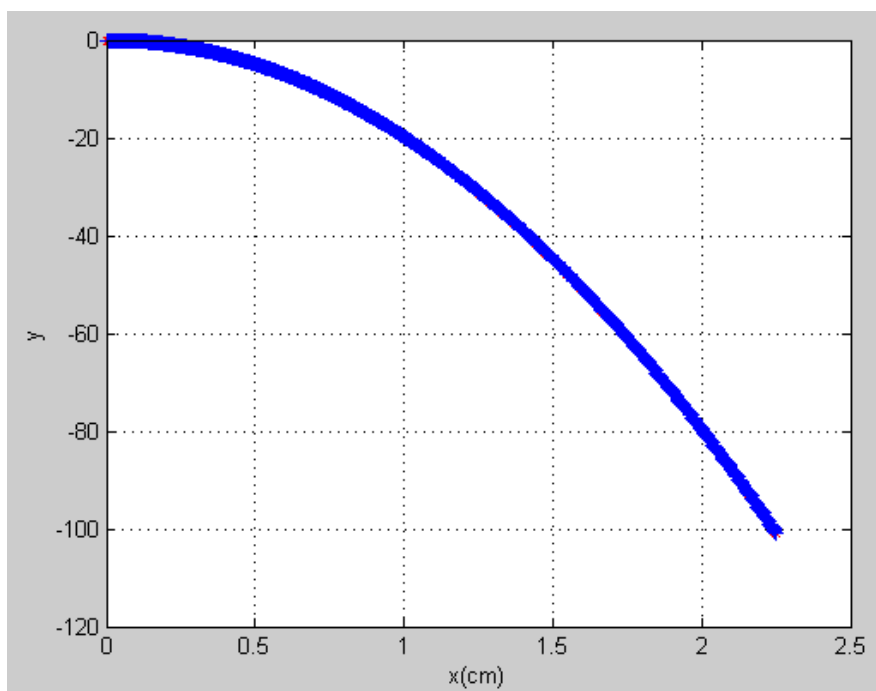


Fig III.5 : Le comportement des deux particules avec une vitesse a 50 m/s.

D'après les résultats de simulation obtenus la projection des particules avec une grande vitesse est accompagnée par une augmentation de la distance horizontale parcourue par la particule (pour les deux types).

Les résultats de simulation nous montrent que la vitesse initiale influence considérablement la trajectoire des particules ainsi leur position dans le collecteur.

➤ Influence du champ électrique

La figure III.6, III.7 représente les résultats obtenus de la trajectoire des particules lors de la variation du champ électrique appliquées aux particules pour un rapport charge /masse $Q/m = 100$ (nC/g). Les valeurs que nous avons simulées sont $E= 20$ (kV/cm), $E = 40$ (kV/cm), $E= 60$ (kV/cm), $E= 80$ (kV/cm)

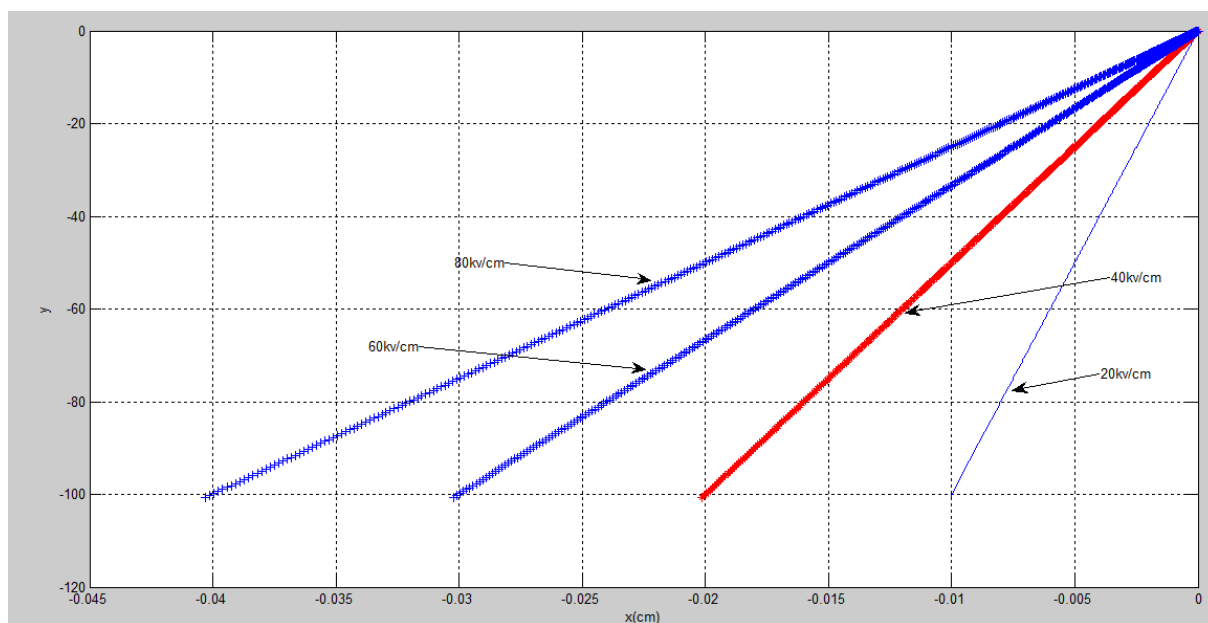


Fig III.6 : Influence du champ électrique sur la particule chargé positivement à 100nC/g.

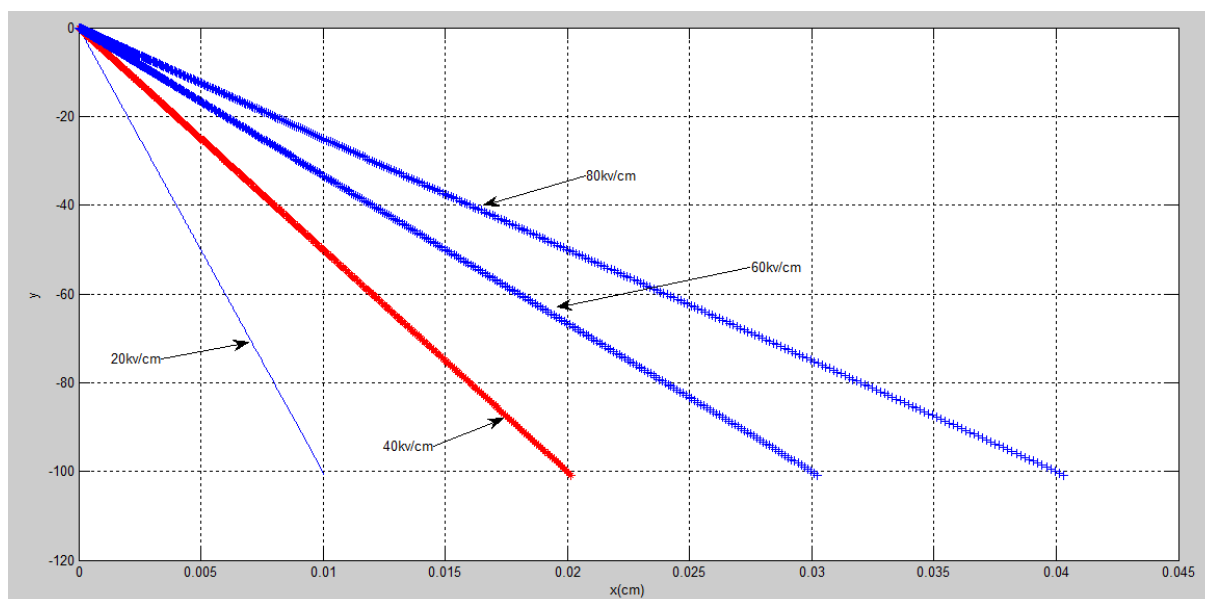


Fig III.7 : Influence du champ électrique sur la particule chargée négativement a -100nC/g

D'après les résultats obtenus, nous constatons que plus le champ électrique augmente plus la déviation des particules selon l'axe x augmente. Ceci est expliqué par le fait que la force électrique est proportionnelle au champ électrique. Le champ électrique exerce une influence sur les particules qui peut les dévier de leur trajectoire initiale et les séparer en fonction de leurs propriétés électrostatiques.

Si on choisit de prendre comme espace entre les deux électrodes $d=8\text{cm}$, nous constatons que pour le $E=80\text{ kV/cm}$ qui nous donne une position $x=\pm 4\text{cm}$, les particules percuteraient les électrodes ce qui va induire une déviation de la retomber des granules par rapport à leurs collecteur qui par la suite affectera le résultat de séparation.

Pour éviter ce phénomène de collision entre les particules et les électrodes, le champ électrique doit être inférieur à $E = 80 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$ pour un intervalle $d=4\text{cm}$.

III.3 CONCLUSION

Les programmes de simulation élaborés dans cette étude fournissent la position horizontale des particules récupérées au niveau du collecteur de l'installation. Les résultats de simulation montrent aussi que la position des particules dans le collecteur est liée à plusieurs paramètres tels que le rapport charge électrique /masse des particules, leurs vitesse initiale et l'intensité du champ électrique appliqué par les électrodes.

Les résultats de simulation montrent aussi que l'augmentation excessive du rapport charge/masse des particules et/ou l'intensité du champ électrostatique peut provoquer l'apparition des phénomènes indésirables tel que l'impact entre particule et électrode. Ce phénomène provoque généralement la projection des particules suivant une nouvelle trajectoire indésirable à leur collecte.

CONCLUSION GENERALE

Dans une perspective de développement durable, les industriels doivent réduire les DEEE à la source, prolonger au maximum la durée de vie des équipements et recycler systématiquement les équipements en fin de vie. Atteindre les objectifs de recyclage nécessite aujourd'hui une combinaison de processus, notamment en ce qui concerne le plastique collecté, qui doit être trié avant d'être recyclé.

La pureté du matériau obtenu est essentielle pour un recyclage rentable. Il est donc impératif de développer des procédés de tri performants qui garantissent en permanence l'excellente qualité des plastiques recyclés

Dans cette étude, nous avons simulé les trajectoires des particules dans un séparateur électrostatique à chute libre sur la base de trois grandeurs fondamentales. Les résultats sont obtenus en résolvant l'équation du mouvement.

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé en utilisant le séparateur tribo-électrostatique à chute libre, le plus couramment utilisé en laboratoire et dans l'industrie. Compte tenu de ces multiples avantages, il est certain que ce procédé aura un avenir prometteur dans un avenir proche et dans divers domaines de l'industrie du recyclage pour la protection de l'environnement et le développement durable.

Le but ultime est avant tout de répondre au mieux aux attentes des constructeurs qui veulent des performances techniques à un rapport qualité/prix attractif.

Plusieurs vues intéressantes sont possibles, à savoir :

- Améliorer en continu les performances des séparateurs électrostatiques pour préserver les ressources naturelles en épuisant autant que possible le produit à la fin de son cycle de vie.
- L'énergie est réduite lors de la séparation et du recyclage pour préserver au maximum la nature et en tirer le meilleur parti.
- Optimisation du processus de séparation d'une électrode cylindrique rotative en tenant compte de nouveaux paramètres et facteurs d'influence tels que le bruit du signal

REFERENCES

- [1] C. Chevalier, (2012) ‘Valorisation des polymères styréniques issus des déchets d’équipements électroniques et électriques’. Université Jean Monnet-Saint-Etienne. France.
- [2] A. Ausset, (2013) ‘Procédé de recyclage de mélanges ABS-PC issus de déchets D’équipements électriques et électroniques (DEEE)’. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I. France.
- [3] J.B. Bahers, (2012) ‘Dynamiques des filières de récupération-recyclage et écologie territoriale : L’exemple de la filière de traitement des déchets d’équipements électriques et électroniques (DEEE) en Midi-Pyrénées’. Thèse Doctorat .Univ. Toulouse II. France.
- [6] K. Makenji, M. Savage, (2012) ‘Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook: Mechanical methods of recycling plastics from WEEE ’, (V. Goodship and L. N. Stevels, Eds), pp 212-238, Woodhead, UK.
- [7]] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, A. Samuila, (2011) ‘Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices’, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 18, pp. 1476-1483.
- [8] S.E. Bendimerad. (2013) ‘Etude et réalisation d’un procédé de séparation triboélectrique des particules isolantes’, Thèse Doctorat. Univ. SBA, Algérie.
- [9] A. Nadjem, M. Kachi, F. Bekkara, T. Zeghloul, L. Dascalescu, (2017) ‘ Triboelectrification of granular insulating materials as affected by dielectric barrier discharge (DBD) treatment’ , J. Electrostat, vol. 86, pp. 18-23.
- [10] E. Gate (1900) ‘Electrostatic separation’, United States Patent Office, *US653343*.
- [11] R.K. Dwari, K.H. Rao, (2009) ‘Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator’, Min. Eng., vol. 22, pp.119–127.
- [12] S.E. Bendimerad, A. Tilmatine, K. Medles, M. Miloudi, Y. Brahami, L. Dascalescu,(2014) ‘Robustness testing of a free-fall triboelectric separation process for plastic waste recovery’, International Journal of Sustainable Engineering, vol. 7, No. 4, pp. 284-292.
- [13] M.EM. Zelmat, M. Rizouga, A. Tilmatine, A. Bendaoud, K. Medles, L. Dascalescu, (2014) ‘Experimental Analysis of a Vibrating Tribocharging Device of Plastic Particles for a Free-Fall Electrostatic Separator’, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, No. 6, pp. 4228-4232

- [14] Escalante S.L., Touchard G., Dominguez G., “Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes”, Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, pp. 694-697, 2002.
- [15] Benabboun A., Tilmatine A., Medles K., Miloudi M., Dascalescu L., “Etude expérimentale des procédés d’acquisition de charge triboélectrique pour séparateurs électrostatiques de particules de déchets en plastique”, Conférence Francophone sur l’Eco-conception en Génie Electrique (CONFREG-2012), Montréal, 28-30 Mai 2012, Canada.
- [16]] H. Labair, S. Touhami, A. Tilmatine, S. Hadjeri, K. Medles, L. Dascalescu, (2017) ‘Study of charged particles trajectories in free-fall electrostatic separators’, J. Electrostat., vol. 88, pp. 10-14.
- [17] Miloudi M., Medles K., Tilmatine A., Brahami M., Dascalescu L., “Modeling and Optimization of a Peopeller-type Tribocharger for Granular Materials”, Journal of Electrostatics, vol 69, 2011.
- [18] Aksa W., “ Réalisation et étude d’un séparateur aérodynamique semi-industriel pour la récupération de particules isolantes”, Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2014.
- [19] Rezoug M., Ouiddir R., Aksa W., Medles K., Bilici M., Dascalescu L., “Tribo-aeroelectrostatic separator for ternary mixtures of granular plastics”, IEEE/IAS annual meeting, October 6-10, 2013 Orlando, USA.
- [20] S. Touhami, W. Aksa, K. Medles, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, (2015) ‘Numerical simulation of the trajectories of insulating particles in a tribo-aero-electrostatic separator’, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 51, No. 5, pp. 4151-4158.