

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 :

**Mme LABAIR Hakima**

Pour l'obtention du diplôme de :

**Doctorat en sciences en Électrotechnique**

Option : Haute Tension

Intitulé de thèse :

*Simulation Des Trajectoires Des Particules Isolantes Dans Les  
Séparateurs Triboélectriques à Chute Libre et à cylindre tournant*

Présentée devant le jury composé de :

|                         |                       |            |                              |
|-------------------------|-----------------------|------------|------------------------------|
| Président :             | Pr. Bendaoud Abdelber | Professeur | Université de Sidi Bel Abbès |
| Directeur de thèse :    | Pr. Tilmatine Amar    | Professeur | Université de Sidi Bel Abbès |
| Co-directeur de thèse : | Pr. Hadjri Samir      | Professeur | Université de Sidi Bel Abbès |
| Examineurs :            | Pr. Hamid Azzeddine   | Professeur | UST MB Oran                  |
|                         | Pr. Ouiddir Rabah     | Professeur | UST MB Oran                  |
|                         | Pr. Rizzouga Mohamed  | Professeur | UST MB Oran                  |
| Invité :                | Dr. Touhami Seddik    | M.C.B      | Université de Sidi Bel Abbès |

Soutenu en: Septembre 2017

## Remerciements

*Je remercie tout d'abord Dieu le clément et miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage pour achever cette thèse « La louange est à Allah ».*

Ce travail est la consécration de plusieurs années de persévérance, de travail, de succès et parfois même d'échecs passagers qui finissent toujours par nous donner encore plus de courage et de détermination, les résultats obtenus sont le fruit d'efforts communs de plusieurs personnes qui m'ont apporté main forte et assistance au laboratoire IRECOM et APELEC, je citerais principalement mon encadreur Professeur **Tilmatine Amaret** mon co-encadreur Professeur **Hadjeri Samir** qui m'ont éclairés et guidés dans les moments d'échec et de doute, je ne pourrais jamais les remercier assez.

J'exprime ma reconnaissance et mon témoignage de ma profonde gratitude à Monsieur le Professeur **Medles Karim** qui m'a aidé et encouragé, sans oublié mon collègue et ami Monsieur **Touhami Seddik** pour sa contribution de près à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens aussi à remercier les membres de mon jury :

Monsieur **Bendaoud Abdelber**, Professeur à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés d'avoir accepté de présider ce jury. Je suis très honoré que Monsieur **Azeddine Hamid** Professeur à l'USTO, Monsieur **Rizzouga Mohamed** Professeur à l'USTO et Monsieur **Ouidir Rabah** Professeur à l'USTO, aient accepté d'être examinateurs de ce travail.

Enfin, J'adresse mes plus vifs remerciements au personnel de notre laboratoire Monsieur Mokadem et Mademoiselle Senoussaoui, très disponibles et serviables.

## Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>CHAPITRE I : ETAT DE L'ART .....</b>   | <b>3</b>  |
| 1.1 TYPE DES PLASTIQUES ISSUES DES DEEE .....   | 3         |
| 1.2 PRINCIPE DE LA SEPARATION TRIBO-ELECTROSTATIQUE .....   | 4         |
| 1.3 DISPOSITIFS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE .....   | 6         |
| 1.3.1 Lit fluidisé .....  | 7         |
| 1.3.2 Cyclone .....   | 9         |
| 1.3.3 Convoyeur à vis sans fin .....  | 9         |
| 1.3.4 Chargement par ventilateur .....  | 10        |
| 1.3.5 Chargement statique .....   | 11        |
| 1.3.6 Chargement tribo-aéro-statique .....  | 11        |
| 1.4 SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE .....  | 12        |
| 1.4.1 Séparateur à chute libre .....  | 12        |
| 1.4.2 Séparateur triboélectrique à tapis roulant .....  | 13        |
| 1.4.3 Séparateur tribo-aéro-électrostatique .....   | 14        |
| 1.5 INSTALLATION TRIBO – ELECTROSTATIQUE INDUSTRIEL .....   | 18        |
| 1.5.1 HAMOS .....   | 18        |
| 1.5.2 MBA POLYMERS .....  | 19        |
| 1.5.3 CARPCO (GROUPE OUTOKUMPU) .....   | 20        |
| 1.5.4 PLAS-SEP LTD .....  | 21        |
| 1.5.5 HITACHI ZOSEN .....   | 22        |
| 1.6 CONCLUSION .....  | 23        |
| <b>CHAPITRE 2 : MODELE PHYSIQUE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES .....</b>                          | <b>24</b> |
| 2.1 ÉQUATIONS DE MOUVEMENT .....  | 24        |
| 2.1.1 Mouvement sous contraintes .....  | 24        |
| 2.1.2 Mouvement libre .....   | 27        |
| 2.2 MODELE DU CHAMP ELECTROSTATIQUE .....   | 30        |
| 2.3 PROGRAMME DE SIMULATION DE LA TRAJECTOIRE .....   | 32        |
| 2.3.1 Initialisation .....  | 32        |
| 2.3.2 Intégration de l'Equation de Mouvement (IEM) .....  | 34        |
| 2.3.3 Prédiction des paramètres cinématique de la particule au point d'impact .....                 | 38        |
| 2.4 CONCLUSION .....  | 41        |
| <b>CHAPITRE 3 : SIMULATION DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES .....</b>                               | <b>43</b> |
| 3.1 SEPARATEUR A TAPIS CONVOYEUR .....  | 43        |
| 3.1.1 Modèle du champ électrostatique .....   | 43        |
| 3.1.2 Point de détachement de la particule .....  | 44        |
| 3.1.3 Résultats de simulation .....   | 49        |
| 3.2 SEPARATEUR A CHUTE LIBRE .....  | 55        |
| 3.2.1 Modèle du champ électrostatique .....   | 55        |
| 3.2.2 Résultats de simulation .....   | 59        |
| 3.3 CONCLUSION .....  | 65        |
| <b>CHAPITRE 4 : VALIDATION EXPERIMENTALE DES RESULTATS DE SIMULATION .....</b>                      | <b>67</b> |
| 4.1 ETUDE EXPERIMENTALE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES DANS UN SEPARATEUR A CHUTE LIBRE .....     | 67        |
| 4.1.1 Séparateur électrostatique .....  | 67        |
| 4.1.2 Chargeur triboélectrique .....  | 68        |
| 4.1.3 Mélange granulaire .....  | 69        |
| 4.1.3 Procédure expérimentale .....   | 70        |
| 4.1.4 Discussions des Résultats expérimentales .....  | 73        |
| 4.1.5 Validation expérimentale des résultats de simulations .....                                   | 84        |
| 4.2 ETUDE EXPERIMENTALE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES DANS UN SEPARATEUR A TAPIS CONVOYEUR ..... | 86        |
| 4.2.1 Séparateur électrostatique .....  | 86        |
| 4.2.2 Discussions des résultats expérimentaux .....   | 87        |
| 4.2.3 Validation expérimentale des résultats de simulations .....                                   | 95        |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| 4.3. CONCLUSION .....            | 96        |
| <b>CONCLUSION GENERALE .....</b> | <b>98</b> |

# INTRODUCTION GENERALE

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 [6-8] 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 [9-12].

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[13-17].

Le principal objectif de cette thèse est d'améliorer les techniques de séparation électrostatique à chute libre et à tapis roulant par l'étude et l'analyse par simulation des trajectoires des particules.

Notre manuscrit organisé en quatre chapitres comporte tout d'abord **une première partie**, décrivant l'effet tribo-électrique, dans lequel les différents dispositifs de chargement tribo-électrique réalisés au sein des laboratoires APELEC et IRECOM de l'Université Djillali Liabes à Sidi Bel Abbes y sont représentés. Par ailleurs, quelques éléments théoriques généraux sur l'électrostatique sont également

présentés, et un accent classifié est mis sur les séparateurs tribo-électrostatiques avec une brève description de leur principe de fonctionnement.

**Le deuxième chapitre** décrit : - La méthode utilisée dans l'élaboration du modèle physique du champ électrostatique dans le séparateur à chute libre et à tapis convoyeur. Le développement de l'équation de mouvement des particules dans la zone de séparation électrostatique et la méthode numérique utilisée dans l'intégration de cette équation ont été décrits avec l'implantation du modèle de simulation sous forme d'un programme MATLAB.

**Le troisième chapitre** est consacré à l'étude théorique de l'influence de quelques paramètres sur la position des particules récupérées au niveau du collecteur de l'installation. Cette étude est effectuée à l'aide d'un programme de simulation élaboré à partir des notions théoriques présentées dans le premier chapitre. Les résultats obtenus dans cette étude montrent l'influence de plusieurs paramètres « - L'intensité et la direction du champ appliqué dans la zone de séparation électrostatique ; - Les conditions cinématiques initiales de la particule dans cette zone ; - Les paramètres électriques et mécaniques de la particule » sur la position finale de la particule récupérée au niveau du collecteur de l'installation étudiée.

**Le quatrième chapitre** traite principalement des matériaux et des méthodes utilisés dans l'étude expérimentale des trajectoires des particules en plastiques dans un séparateur électrostatique à chute libre et à tapis convoyeur. Il consiste aussi à étudier expérimentalement les trajectoires des particules chargées lorsqu'elles traversent le champ électrique généré par les différents systèmes d'électrodes HT des deux séparateurs. Les résultats de cette étude ont été utilisés pour analyser la qualité du modèle de simulation.

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

Les déchets en plastiques occupent un volume important dans les points de collecte et d'autres sites de gestion de déchets 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 secondaire.

Les produits en plastiques issus 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.

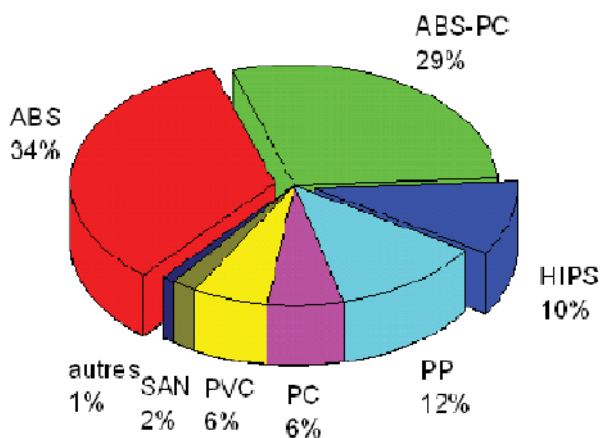
La récupération des matériaux homogènes à partir des mélanges granulaires issus des DEEE nécessite l'emploi des techniques fiables dont les procédés conventionnels ont montrés dans certaines applications une efficacité modeste par rapport aux dispositifs électrostatiques caractérisés par une faible consommation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

## 1.1 Type des plastiques issus des DEEE

Les Equipements Electriques et Electroniques regroupent tous les objets ou les composants d'objets qui fonctionnent grâce à des courants électriques ou électromagnétiques. Un EEE devient un DEEE dès lors que son propriétaire l'a abandonné parce qu'il n'en a plus l'utilité.

Dans une société où le taux d'équipement est de plus en plus élevé et où les produits sont très rapidement obsolètes avec l'évolution rapide des technologies, les quantités de DEEE s'accroissent de 3 à 5% par an. Plus de 50 % de ces déchets sont issus des ménages, ce qui représente 14 kg/hab/an et d'ici 10 ans, leur volume devrait avoir doublé [5,18].

La principale caractéristique des plastiques contenus dans les DEEE est la dominance des produits tels que le PC, l'ABS, l'ABS-PC et le HIPS représentant plus de 70% du contenu total des matières plastiques dans ces déchets (figure 1.1). [3,19-20]



**Figure 1.1:** Proportion matériaux plastiques dans les composants informatiques[20]

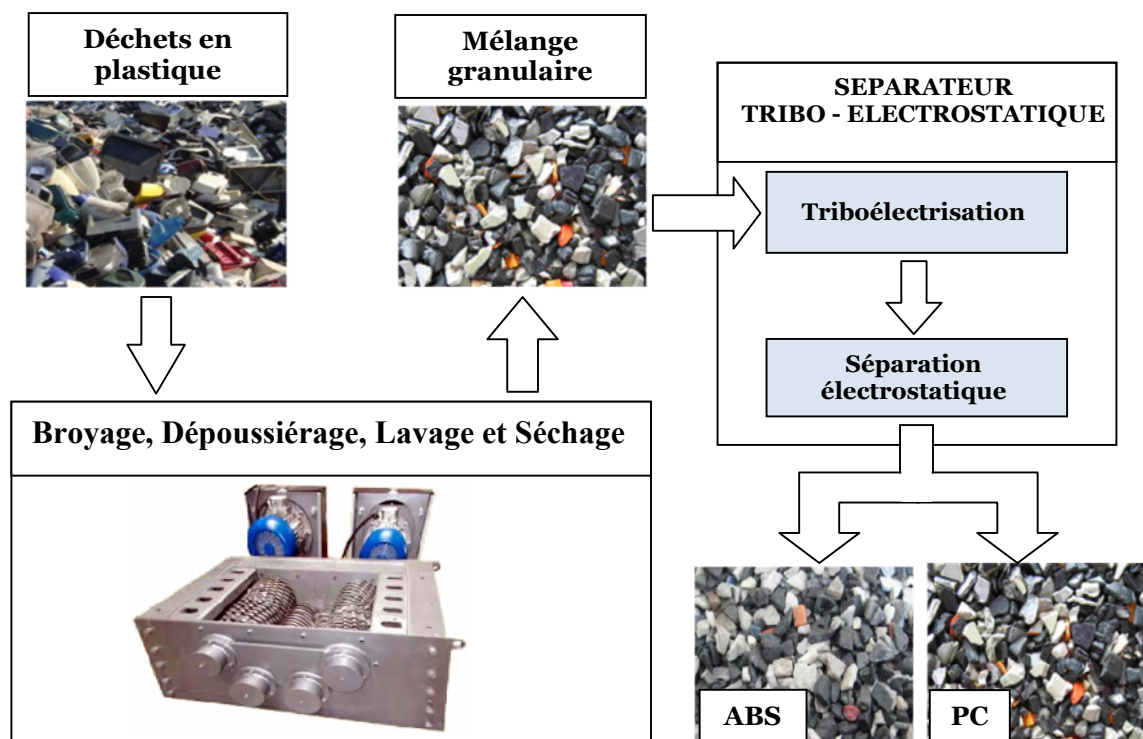
## 1.2 Principe de la Séparation tribo-électrostatique

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 tribo-électrostatiques le mélange granulaire est introduit dans une installation de triboélectrisation (figure 1.2). 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 % [21-30]. 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.

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 pharmaceutiques. Ces étapes sont : broyage, dépoussiérage, lavage et séchage.





**Figure 1.2** : Eléments de base d'une ligne de tri des déchets d'équipement électrique et électronique DEEE

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 nature des matériaux en contact, de leurs surfaces, et de bien d'autres facteurs [31-32]. La présence d'un film de graisse ou d'humidité sur la surface des particules peut affecter grandement la quantité de charge acquise [33].

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 [34-36]. Le travail d'extraction est défini en tant que l'énergie nécessaire pour arracher un électron à partir de la surface des particules [31]. Le tableau 1.1 regroupe le travail d'extraction de quelques matériaux en plastique.

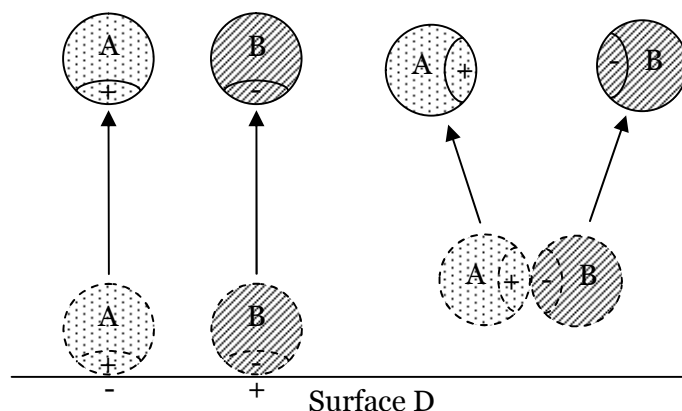
Un élément quelconque de la série se charge positivement lorsqu'il est mis en contact avec un matériau situé au-dessus de lui et négativement au contact d'un matériau situé plus bas dans la série (figure 1.3).

**Tableau 1.1** : Valeurs du travail d'extraction de quelques

*polymères [31]*

|   | Matériau                         | Travail d'extraction (eV) |
|---|----------------------------------|---------------------------|
| - | PVC (polychlorure de vinyle)     | 4,85                      |
|   | Poly imide                       | 4,36                      |
|   | Polycarbonate                    | 4,26                      |
|   | PTFE (polytétrafluoroéthylène)   | 4,26                      |
|   | PETP (polyéthylène téréphtalate) | 4,25                      |
|   | Polystyrène                      | 4,22                      |
| + | Polyamide                        | 4,08                      |

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.



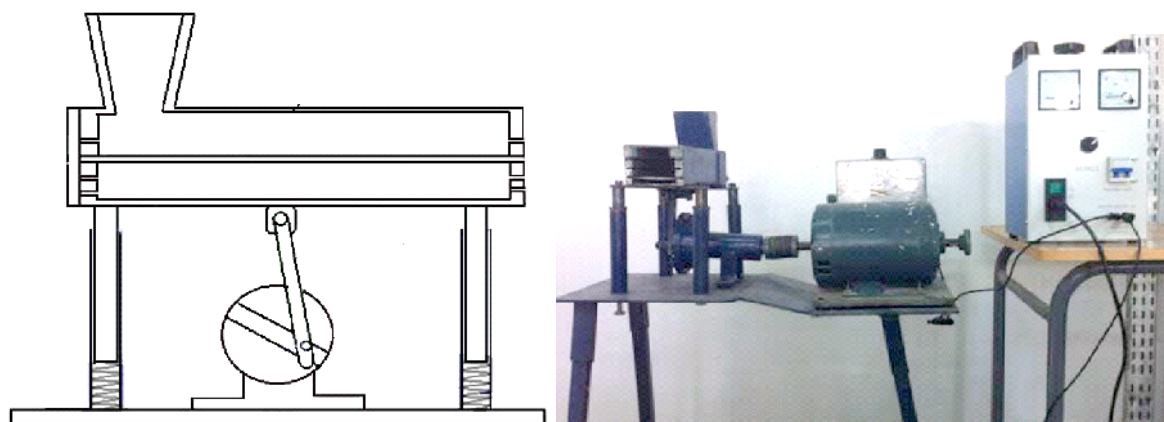
**Figure 1.3 :** *Signe de la charge acquise par les particules en fonction de leur travail d'extraction ( $W_A < W_B < W_D$ ) [37]*

### 1.3 Dispositifs de chargement triboélectrique

De multiples travaux ont été publiés sur les procédés de chargement triboélectrique utilisant : des ventilateurs, des tubes rotatifs, des lits fluidisés (créés par des souffleurs et des compresseurs), des micro-cyclones, des chargeurs statiques.[38-45] Nombreux dispositifs de tribo-chargement destinés à la séparation des mélanges granulaires ont été réalisés au sein de laboratoires IRECOM et APLEC, Université Djillali Liabes à Sidi Bel Abbes, qui sont décrits ci-dessous :

### 1.3.1 Vibreur

Le vibreur comprend un ensemble d'éléments permettant aux granules l'acquisition, d'une charge triboélectrique (figure 1.4). 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 sont obtenues 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 a une hauteur de 3 cm.[46]



**Figure 1.4 :** Dispositif vibreur de triboélectrisation [47]

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.

### 1.3.2 Lit fluidisé

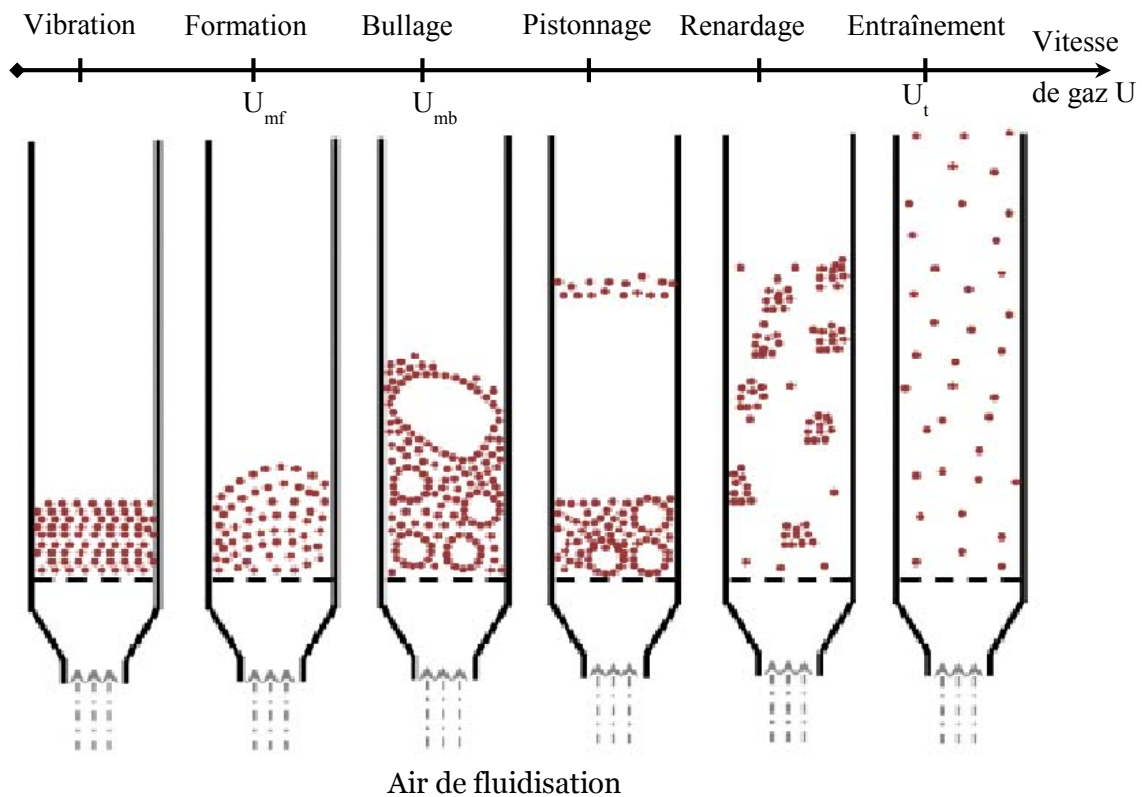
Le dispositif est un tube cylindrique isolant, le mélange de particule est déposé sur le support (une plaque poreuse en matière isolante), on souffle de l'air à l'aide d'une soufflante au bas du cylindre. Les particules sont fluidisées, elles acquièrent des charges électriques de signe opposé grâce aux collisions entre elles.[21,24,38,40,48-53]

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

(figure 1.5). On considère une couche de particules solides reposant sur une plaque poreuse horizontale à l'intérieur d'un cylindre vertical. On injecte un gaz à travers la plaque dans le sens ascendant :

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

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



**Figure 1.5** : Régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation [20,48]

**Bullage** : à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage  $U_{mb}$ , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse de distribution de gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide à ébullition.

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

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

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

### 1.3.3 Cyclone

Le dispositif est un cylindre isolant (figure 1.6), y compris un ventilateur dont le rôle de souffler les particules à charger à l'intérieur 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 [45].

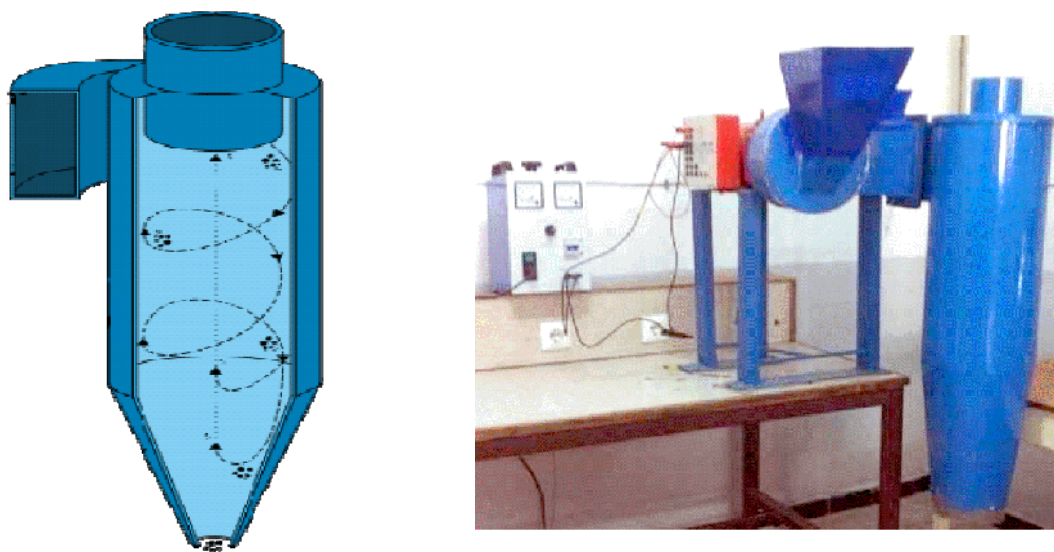


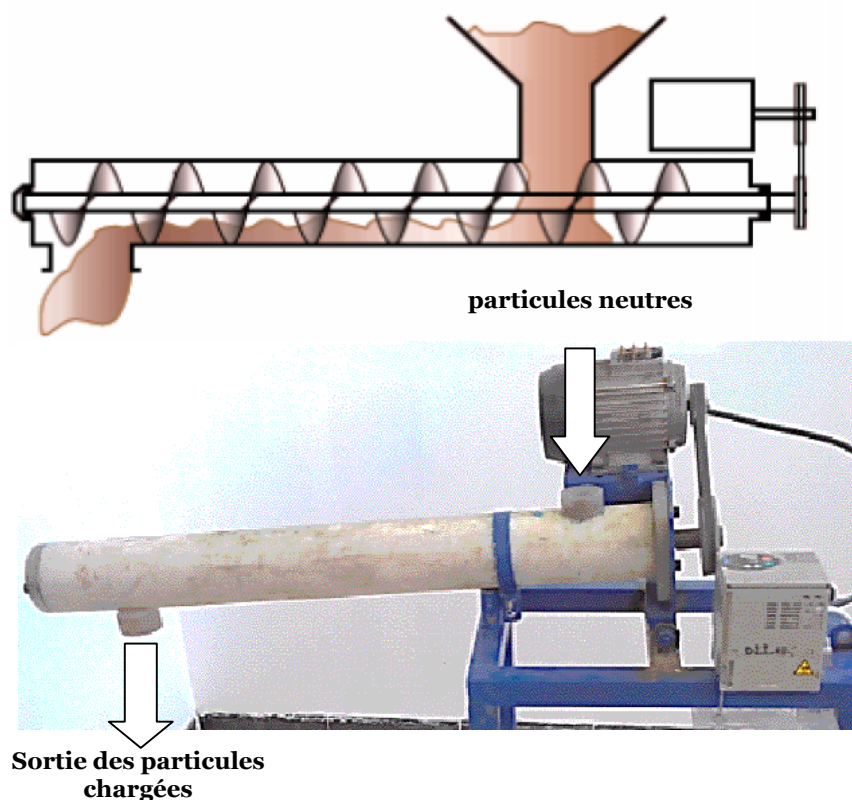
Figure 1.6 : Dispositif de chargement à cyclone [47]

### 1.3.4 Convoyeur à vis sans fin

Le dispositif de chargement tribo-électrique à vis a été conçu au sein de notre laboratoire, Université de Sidi Bel Abbés. La vis sans fin, encore appelée escargot ou vis d'Archimède est un dispositif qu'Archimède aurait mis au point lors d'un

voyage en Égypte et qui aurait permis aux habitants du bord du Nil d'arroser leurs terrains.

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  $90 \text{ cm}$ , 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 (démonstré 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 (figure I.7).[54]



*Figure 1.7 : Dispositif de chargement à vis sans fin [54]*

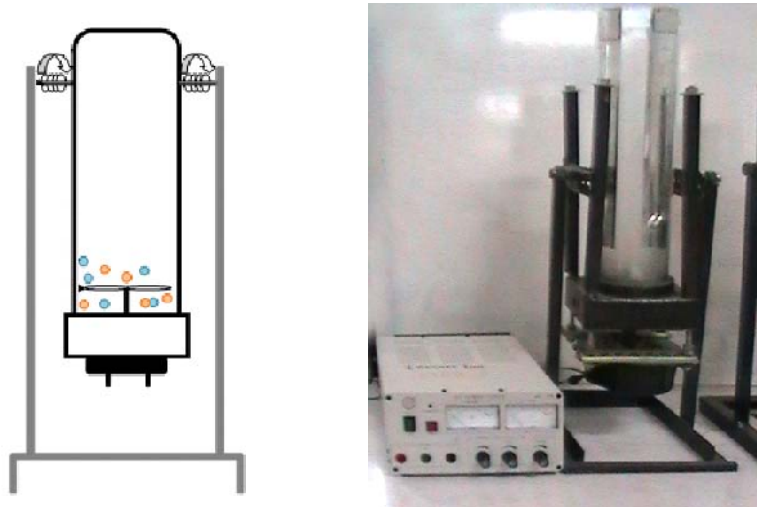
### **1.3.5 Chargement par ventilateur**

Le dispositif est constitué d'un moteur à courant continu entraînant une hélice dans un cylindre en matière isolante (figure 1.8) [19,27,43,55]. La rotation de l'hélice crée un courant d'air ascendant donnant naissance à des turbulences aérodynamiques hélicoïdales multipliant les collisions des particules à l'intérieur du cylindre.

Les particules granulaires isolantes sont placées dans le dispositif de chargement triboélectrique, puis le moteur à courant continu est mis en marche

pendant une durée déterminée et à une vitesse désirée. Les particules isolantes se mettent en mouvement et deux types de collisions se produisent : particules contre les parois du cylindre et particules entre elles.

Le dispositif utilise l'air ascendant donnant naissance à des turbulences dans le récipient cylindrique en PVC contenant le mélange granulaire, provoquant ainsi une tribo-électrification des particules par des collisions entre elles ou bien entre les particules et les parois.



**Figure 1.8** : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur[19]

La récupération du mélange chargé, s'effectue par le pivotement du cylindre du dispositif sans faire arrêter le moteur afin d'éviter le collage des particules contre les parois et aussi de vider tous le contenu.

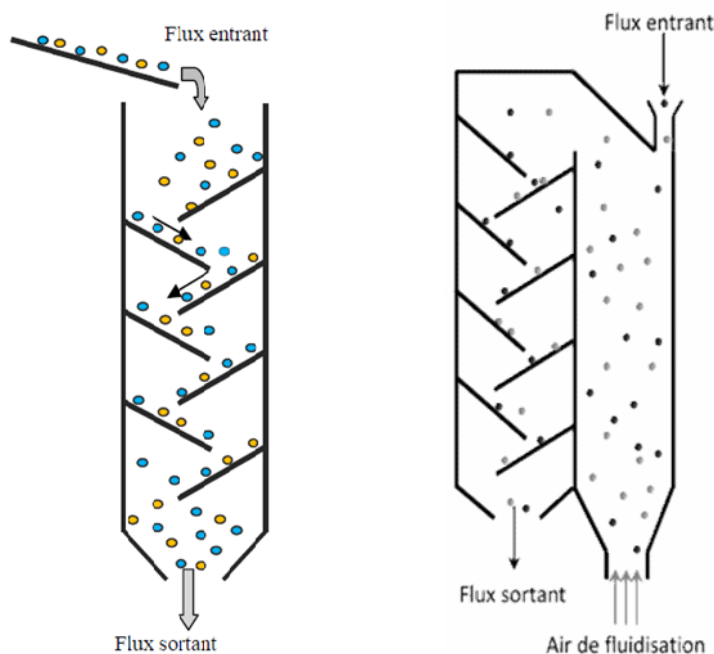
### **1.3.6 Chargement statique**

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique isolante (figure 1.9), y compris des parois inclinées et détachables. Les particules tombent en chute verticale et glissent dans ce dispositif par gravitation. Le chargement de ces particules s'effectue par frottement avec les parois [48,56-57].

### **1.3.7 Chargement tribo-aéro-statique**

C'est une combinaison de deux modes de chargement en cascade, le procédé est un chambre parallélépipédique isolante comprend deux partie (figure 1.9) : la première pour le chargement aéro-triboélectrique (à lit fluidisé), après avoir mis les

particules en agitation dans un lit fluidisé, elles sont dirigées vers la deuxième partie du dispositif destiné au chargement statique par des parois inclinées, dont le but de pouvoir mieux contrôler la charge acquise, multipliant les paramètres de chargement [48,57-58].



**Figure 1.9** : Représentation schématique d'un dispositif de chargement (a) statique et (b) tribo-aero-statique[48,58]

## 1.4 Séparateur électrostatique

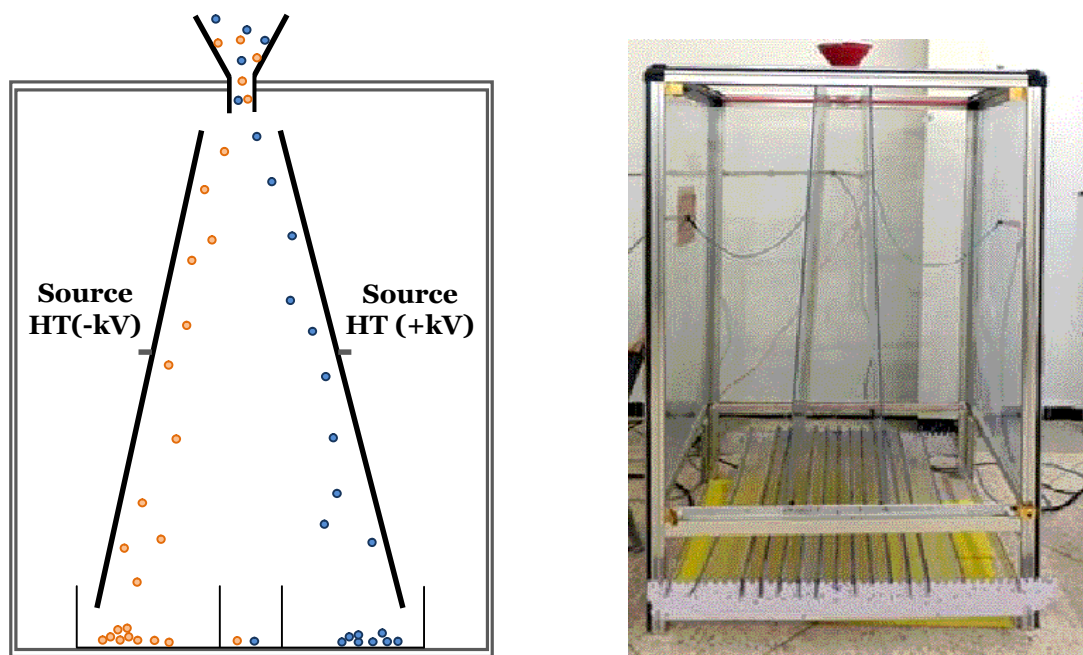
La séparation triboélectrostatique des particules granulaires est une technique qui consiste à séparer, par des moyens électriques seulement, un mélange de granules pré chargée par l'un des processus de triboélectrisation cité précédemment. Dans la plupart des cas, des champs électriques de l'ordre de  $10^6$  V/m sont nécessaires. La variété des installations conçues pour la séparation de mélanges granulaires peut être perçue en examinant les nombreux travaux techniques et scientifiques publiés durant ces dernières décennies par plusieurs laboratoires tel que IRECOM et APELEC de l'université de Sidi bel Abbesse-Algérie et laboratoire de l'électrostatique appliqué de l'IUT d'Angoulême - France [13,-17,22].

### 1.4.1 Séparateur à chute libre

Le séparateur électrostatique à chute libre est largement utilisé dans le tri et la purification des minerais de taille sous-millimétrique [59-60]. Actuellement, le processus est appliqué avec succès dans le tri des produits granulaire en plastique



issus des déchets d'équipement électriques et électronique [61-64]. Dans cette installation, le mélange granulaire est chargé par l'un des dispositifs de chargement triboélectrique, tel que le convoyeur à vis ; chargeur à cylindre rotatif ; à cyclone .....etc. Les particules pré-chargées sont projetées en chute libre entre deux électrodes alimentées en haute tension continue. Dans cette zone les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge acquise. La figure 1.10 représente un modèle du laboratoire d'un séparateur à chute libre.



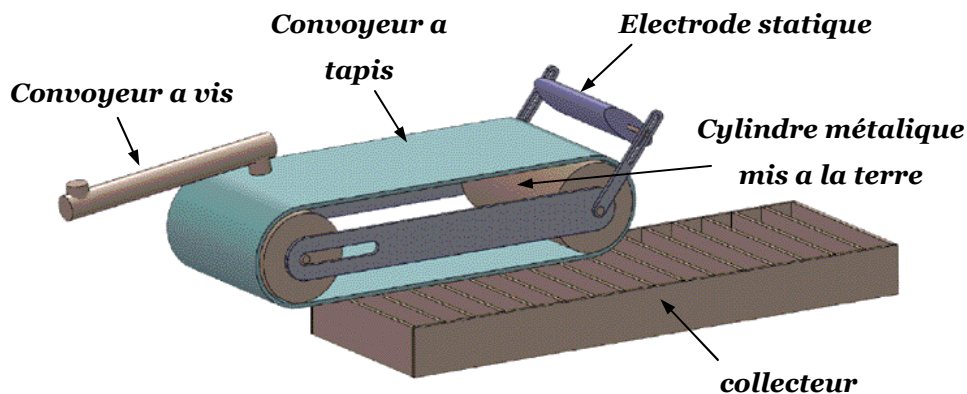
**Figure 1.10** : Séparateur électrostatique à chute libre

#### **1.4.2 Séparateur triboélectrique à tapis roulant**

Dans cette installation les matériaux granulaires pré-chargés (par l'un des dispositifs de chargement cités précédemment) sont déposés sur la bande transporteuse du séparateur d'une façon continue. [65,69]

Le débit de matériaux déposé et la vitesse d'avance du convoyeur sont ajustés, de telle sorte que les granules forment une monocouche à la surface du tapis. Le convoyeur introduit les particules dans la zone de champ électrique généré entre l'électrode statique à haute tension et la bande métallique liée à la terre. Dans le cas d'une bande transporteuse de matière isolante le champ électrostatique est généré entre l'électrode statique et le cylindre d'entraînement.

Dans la zone de séparation électrostatique les granules chargés négativement sont soumis à une force d'attraction exercée par l'électrode de polarité positive, tandis que les autres sont épinglés à la surface du tapis, jusqu'au moment où une brosse les enlève mécaniquement.



**Figure 1.11** : Séparateur électrostatique à tapis convoyeur

### 1.4.3 Séparateur tribo-aéro-électrostatique

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

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

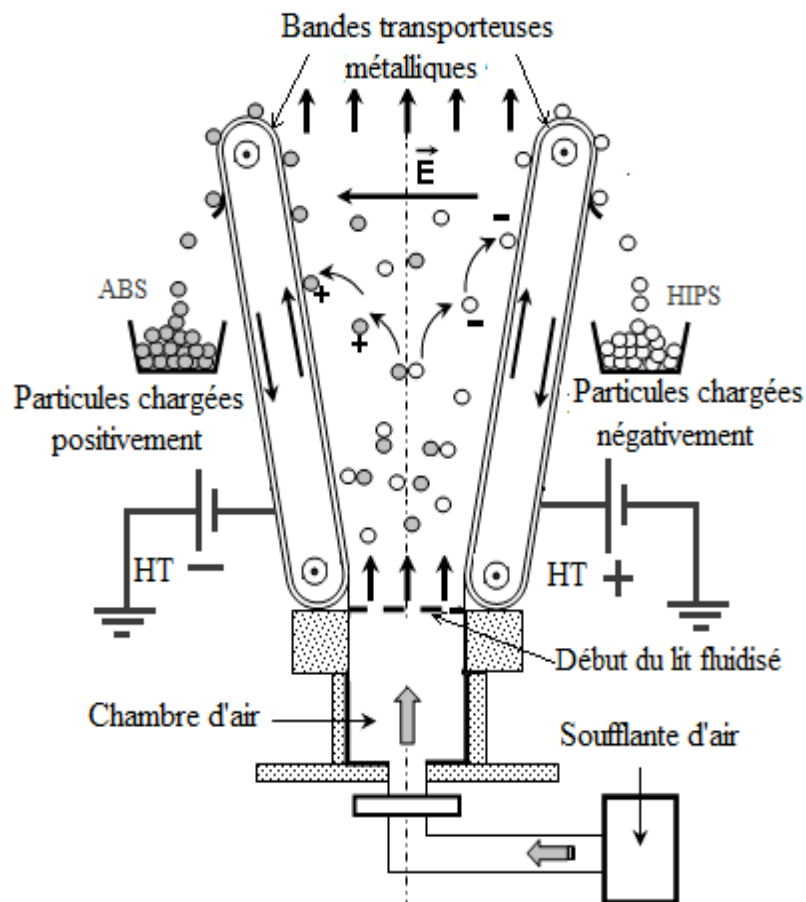
Deux parties sont nécessaires pour la construction et la mise en marche d'un dispositif tribo-aéro-électrostatique :

- 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.

- **Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses**

Les électrodes qui vont attirer la matière granulaire fluidisée sont deux bandes transporteuses du tapis roulant, ils sont à base d'une matière conductrice (figure 1.12), elles s'appuient à des tambours isolants, leur entrainement est assuré par des moteurs triphasés alternatifs, commandés par des variateurs de fréquence. Les particules chargées collent sur la surface des bandes contrairement polarisées, pour être transporté vers la zone de récupération [28,70,71].

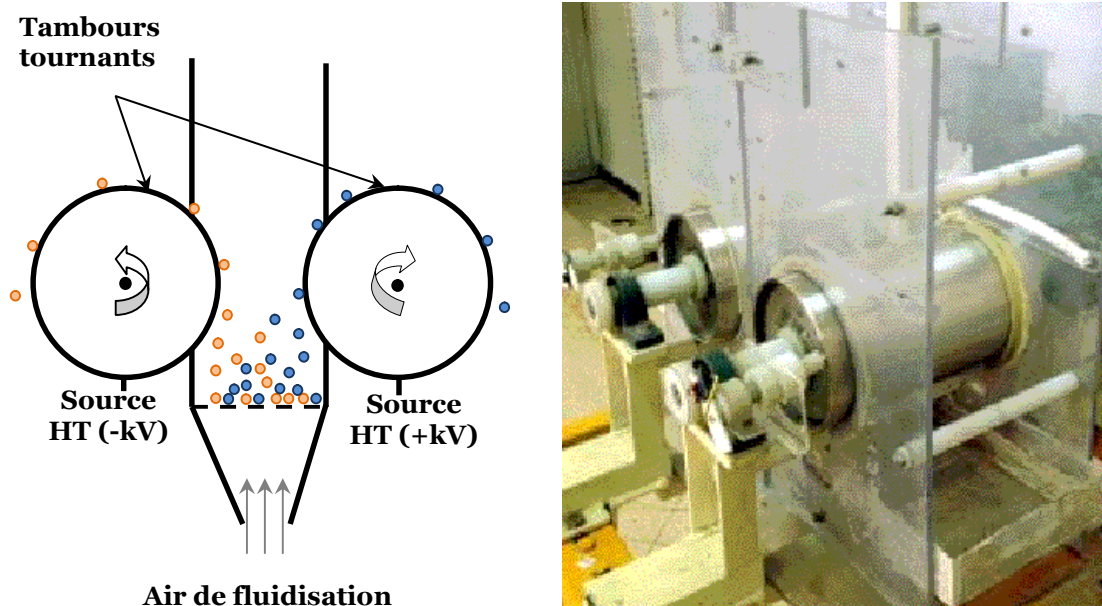


**Figure 1.12** : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses[19]

- **Séparateur tribo-aéro-électrostatique à cylindres tournants**

Ce dispositif a le même principe de fonctionnement de celui précédemment cité, la différence entre les deux procédés se manifeste par les électrodes utilisés. Cette

installation utilise des tambours conducteurs reliés à des arbres entrainés par des moteurs (figure 1.13), dont le but de diminuer la traverse des particules, et de réduire le coût du séparateur ainsi qu'augmenter sa robustesse [72].



**Figure 1.13** : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à tambours transporteurs[]

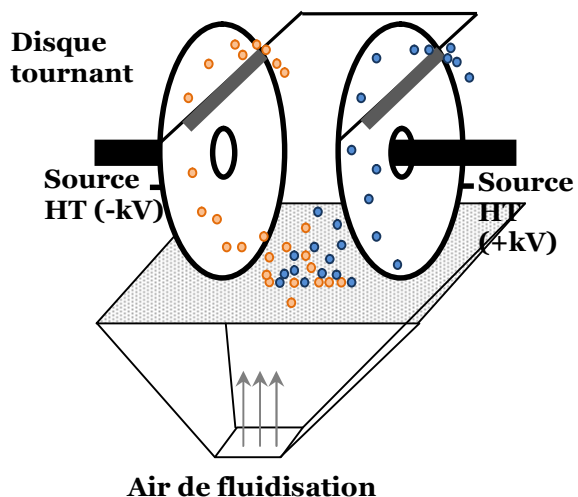
#### - **Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants**

C'est une installation particulièrement adaptée à la séparation des particules de plastique fines [73-74]. Deux disques métalliques sont montés sur un même arbre (figure 1.14), entrainé par un moteur électrique, afin de les tourner dans un mélange de particules fluidisé.

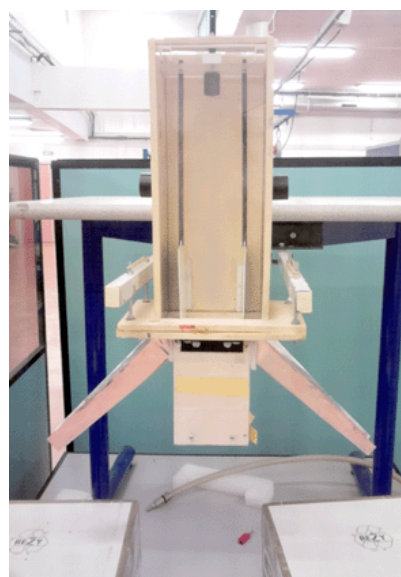
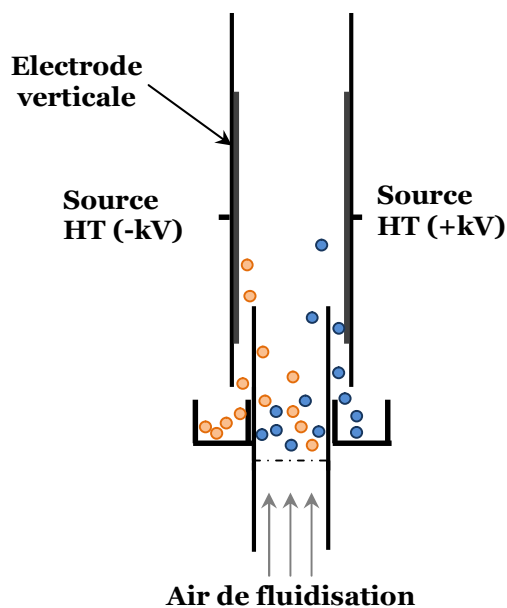
Les deux disques qui sont alimentés à deux sources de haute tension et de polarités opposées, soulèvent les particules chargées. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques.

#### - **Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales**

Deux électrodes verticales collées à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique isolante (figure 1.15), attirent les particules de signe opposé et repoussent celles de même signe, pour les dévier vers les collecteurs [23,49,51,58].



**Figure 1.14** : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants



**Figure 1.15** : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales

Les dispositifs de chargement triboélectrique à lit fluidisés sont considérés comme le moyen le plus efficace pour faire acquérir des charges électriques aux différentes matières plastiques granulaires.

Le chargement avec ce type de dispositif contient deux types de collision : entre des particules de la même matière et entre des particules et des parois. Tandis que lors de la séparation d'un mélange granulaire, le troisième type de collision : entre

des particules de matière différente intervienne intensément, ce nouveau facteur peut inverser les signes obtenus.

### 1.5 Installation tribo – électrostatique industriel

Le projet ELREC, qui a regroupé 9 acteurs Européen (ERA Technology Ltd, Electrostatic solutions Ltd, Hamos GmbH, Centro Technologico Gaiker, HLC Henley Burrowes, KTH Polymerteknologi, Ragn-Sells, Ragn Sells Foundation, Komotini Paper Mill S.A et l'université de Southampton) dans le domaine des séparateurs électrostatiques jusqu'en février 2001, a permis en 4 ans de développer plusieurs types de séparateurs électrostatique dont le séparateur triboélectrique [15]. Le tableau 1.2 montre un recensement des différents constructeurs de séparateurs triboélectriques avec le nombre de modèles conçus et les capacités de traitement proposé.

**Tableau 1.2** : Les différents fabricants de machines avec leurs capacités de traitement [31]

|                                   | <b>Plas-Sep</b> | <b>Outokumpu</b> | <b>MBA polymers</b> | <b>HAMOS GmbH</b> | <b>Hitashi zossen</b> |
|-----------------------------------|-----------------|------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|
| <b>Référence de l'appareil</b>    | N/C             | T-STAT           | N/C                 | EKS               | ES-F                  |
| <b>Nombre de modèles proposés</b> | 1               | 2                | -                   | 4                 | 1                     |
| <b>Capacité des appareils T/h</b> | 1,2             | 0,2              | N/C                 | 0,2 – 0,3         | 1                     |
|                                   |                 | 0,7              |                     | 0,5 – 0,75        |                       |
|                                   |                 |                  |                     | 1 – 1,5           |                       |

On constate que c'est le leader du marché HAMOS qui propose le plus de solutions. Toutefois il est intéressant de comparer les solutions proposées par ces différents fabricants.

#### 1.5.1 HAMOS

Leader sur le marché de la séparation triboélectrique appliquée au traitement des déchets, la société allemande Hamos GmbH a su développer et décliner toute une gamme sur son séparateur. Ce dernier, l'Hamos EKS a été conçu pour une utilisation industrielle 24/24 avec des tonnages élevés (1 tonne/heure).

Comme on peut le voir dans le tableau 1.3 les solutions proposées par HAMOS sont nombreuses suivant la capacité de traitement demandé. De plus ce dernier se distingue avec le modèle EKS 1022-2 qui permet d'atteindre un haut degré de pureté

dans les produits séparés. Cela est important car comme nous le verrons par la suite, il est parfois difficile d'obtenir des puretés correctes sur certaines séparations.



**Figure 1.16** : Séparateur d'HAMOS EKS

Ce haut degré de pureté est obtenu en disposant en série deux séparateurs triboélectriques. Cette solution technique bien que simple est comme nous le verrons discutable en raison du rôle important que joue le ratio entre matériaux dans le rendement de la séparation.

**Tableau 1.3** : Les caractéristiques des différents modèles de machines proposés par HAMOS [31]

| Modèles           | Capacité (T/h) | Etages | Qualité               | Dimension (L×I×H) | Caractéristique générale   |
|-------------------|----------------|--------|-----------------------|-------------------|--|
| <b>EKS 0531-0</b> | 0,2 - 0,3      | 1      | Pureté normale        | N/C               | Faible capacité de traitement  |
| <b>EKS 1021-1</b> | 0,5 - 0,75     | 1      | Pureté normale        | 2×1,5×1           | Moyenne capacité de traitement   |
| <b>EKS 1022-1</b> | 1 - 1,5        | 1      | Pureté normale        | N/C               | Forte capacité de traitement   |
| <b>EKS 1022-2</b> | 0,5 - 0,75     | 2      | Haute pureté possible | 2×3,9×2           | Possible de faire travailler les deux étages soit en parallèle (grosse capacité de traitement) soit en série (pureté élevée) |

### 1.5.2 MBA POLYMERS

Cette société américaine de traitement des plastiques a mis au point des procédés très efficaces de séparations électrostatiques. Elle a déposé de nombreux

brevets et en particulier un, le 6452126 de l'office nationale américaine des brevets décrivant l'utilisation d'un matériau médiateur dans la séparation.



*Figure 1.17 : Séparateur MBA POLYMERS*

Toutefois malgré l'avance technologique que semble avoir acquise cette société cette dernière ne semble pas vouloir vendre sa technologie. Cette dernière a en effet développé certain de ses procédés en interne et réalise d'important profit du fait de la pureté des produits qu'elle obtient grâce à ses procédés. Cette dernière collabore d'ailleurs étroitement avec PLAS-SEP (voir ci-dessous) pour l'amélioration de ses procédés.

### **1.5.3 CARPCO (GROUPE OUTOKUMPU)**

Cette société implantée au Etats-Unis et appartenant au groupe finlandais Outokumpu est la plus récente sur le marché des séparateurs triboélectriques appliqués au traitement des déchets. Elle a toutefois une longue expérience de cette technologie dans le domaine minier et mène une politique très active en matière de R&D (recherche et développement). Elle présente déjà des produits aussi aboutis que son concurrent direct HAMOS.

Le séparateur vendu par CARPCO est le T-STAT, il est utilisable pour l'industrie minière comme pour celle du recyclage. Il est à noter que comme HAMOS, CARPCO a aussi développé d'autres types de séparateurs électrostatiques, ceux fonctionnant par charge corona.

Les modèles présentés par la société CARPCO (groupe Outokumpu) sont similaires techniquement à ceux de HAMOS (tableau 1.4). Toutefois ces derniers sont moins nombreux et ne peuvent pas traiter de très grosses quantités. Ce handicap est



toutefois compensé par la présence d'unités de déshumidification à l'entrée du séparateur.



**Figure 1.18** : Séparateur de CARPCO

Grâce à ces dernières les particules de plastique sont plus sèches et se chargent beaucoup mieux. Le rendement doit donc être beaucoup plus stable et plus élevé avec cette technologie. Il est à noter que la puissance des déshumidificateurs n'est pas comprise dans la puissance totale des modèles T-STAT.

**Tableau 1.4** : Caractéristiques des modèles de machines proposées par CARPCO [31]

| Modèles                   | Puissance (KW) | Capacité (T/h) | Etages | Poids machine | Dimension L×I×H |
|---------------------------|----------------|----------------|--------|---------------|-----------------|
| <b>PS(100)<br/>111-15</b> | 5              | 0.2            | 1      | 1.157         | 2×2×1.5         |
| <b>PS(100)<br/>111-50</b> | 7              | 0.7            | 3      | 3.876         | 2×2×1.6<br>(×3) |

#### 1.5.4 PLAS-SEP LTD

PLAS-SEP est une société canadienne créée en 1996. Ses fonds ainsi que ses dirigeants proviennent en grande partie de l'université de l'ouest Ontario. Cette société a mis au point un modèle de séparateur triboélectrique installé pour le moment à 10 exemplaires dans le monde.

Le rendement de leur modèle est assez élevé car PLAS-SEP, du fait de son statut mixte entreprise-université a effectué des études poussées sur l'optimisation du tri électrostatique dans le cadre d'un programme de recherche universitaire. Aussi,

PLAS-SEP est plus à considérer comme une fondation de recherche ou un consultant sur la technologie du tri électrostatique.



*Figure 1.19 : Séparateur de PLAS-SEP LTD*

### 1.5.5 HITACHI ZOSEN

HITASHI ZOSEN est une importante entreprise japonaise ayant mis au point un séparateur triboélectrique. Il y a peu d'information sur leur produit « electrostatic plastic separator ES-F » car Hitashi semble en priorité orienter ses efforts sur le marché japonais. Aussi sa communication en anglais sur ce produit est très limitée.



*Figure 1.20 : Séparateur de HITACHI ZOSEN*

L'unique information que nous avons pu avoir est qu'il a remporté plusieurs prix d'ingénierie au Japon de divers instituts : Japan Society of Mechanical Engineers-Kansai Branch (16 Mars 2001), the Society of Separation process

---

Engineers (25 Avril 2001), and the Osaka Industrial Research Association (17 Mai 2001).

### **1.6 Conclusion**

L'évolution très rapide des nouvelles technologies et l'augmentation des performances des équipements, a réduit la durée de vie de ces derniers ; ce qui a multiplié les quantités de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ainsi que tous types de matériaux en fin de cycle de vie qui est susceptible de causer de graves dommages à la faune et à la flore et par la suite à toute l'humanité.

Les chiffres alarmants des quantités de déchets jetés à la nature ainsi que les enjeux économiques ont poussé les chercheurs à accroître les recherches dans le domaine du recyclage qui est forcément précédé par le processus de séparation amélioré récemment par l'introduction de l'électrostatique qui a depuis peut fait ses preuves . C'est dans cette optique que divers techniques de séparation électrostatique, que nous avons exposé dans le présent chapitre, ont fait l'objet de plusieurs investigations dans différents laboratoires américains, japonais, européens, canadiens et algériens entre autre le laboratoire de l'Université Djillali Liabes.

## CHAPITRE 2 : MODELE PHYSIQUE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES

L'étude de la trajectoire des particules en plastique dans un champ électrostatique représente l'un des problèmes les plus importants dans l'industrie de la séparation électrostatique des mélanges granulaires. Le but de cette étude vise généralement l'estimation des paramètres optimaux du processus de séparation tels que la taille des particules triés afin de minimiser : - l'énergie consommée dans la phase de broyage ; - le rapport Charge/Masse des particules triés afin de minimisé l'énergie consommée dans la phase du chargement par triboélectrification ; - le niveau de tension utilisé dans la phase de séparation électrostatique afin de réduire le coût et la taille des installations utilisé dans cette phase [75-76].

Le présent chapitre est consacré à l'élaboration des modèles physiques de la trajectoire des particules dans un séparateur électrostatique à chute libre et a tapis convoyeur. Le modèle élaboré peut être utilisé dans l'estimation de l'ensemble des paramètres électrique et géométrique du séparateur et du mélange traité.

### 2.1 Équations de 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.

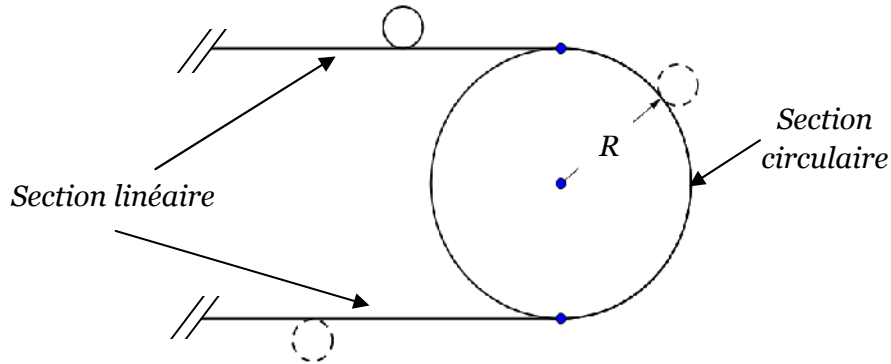
Dans un processus de séparation électrostatique le mouvement d'une particule peut être considéré en tant que ***mouvement libre*** ou ***mouvementsous contraintes***

#### 2.1.1Mouvement sous contraintes

Dans le cas d'un séparateur a bande transporteuse les particules sont déposées à la surface de la tapis convoyeur d'une façon continue. Le mouvement des particules dans ce cas est imposé par le mouvement du tapis convoyeur.

Dans une application réelle les particules sont entraînées généralement avec une vitesse tangentielle constante dans deux et parfois trois sections différente : d'abord une section linéaire qui représente la partie supérieure du tapis convoyeur (figure 2.1)

ensuit, une deuxième section circulaire considérée généralement en tant que zone de séparation électrostatique.



**Figure 2.1:** Positions possibles occupées par la particule dans les différentes sections du tapis convoyeur

Une particule qui adhère à la surface du tapis est entraînée par ce dernier dans une autre section linéaire qui représente la partie inférieure du tapis convoyeur. Dans chaque section l'équilibre de la particule par rapport à la surface du tapis convoyeur est assuré par la condition suivante :

$$\sum \vec{F}_{adh} > \sum \vec{F}_{det} \quad (2.1)$$

Tel que  $\vec{F}_{adh}$  et  $\vec{F}_{det}$  représentent respectivement les forces d'adhésion et de détachement appliqué à la particule. La figure 2.2 nous donne un aperçu sur la direction des forces agissant sur une particule chargée entré par un tapis convoyeur dans différentes sections.

Dans la première section (figure 2.2.a) et dans le cas d'une particule portant une charge de polarité différente par rapport à l'électrode statique les forces d'adhésion et de détachement prennent la forme suivante :

$$\sum \vec{F}_{adh} = \vec{F}_g \quad (2.2)$$

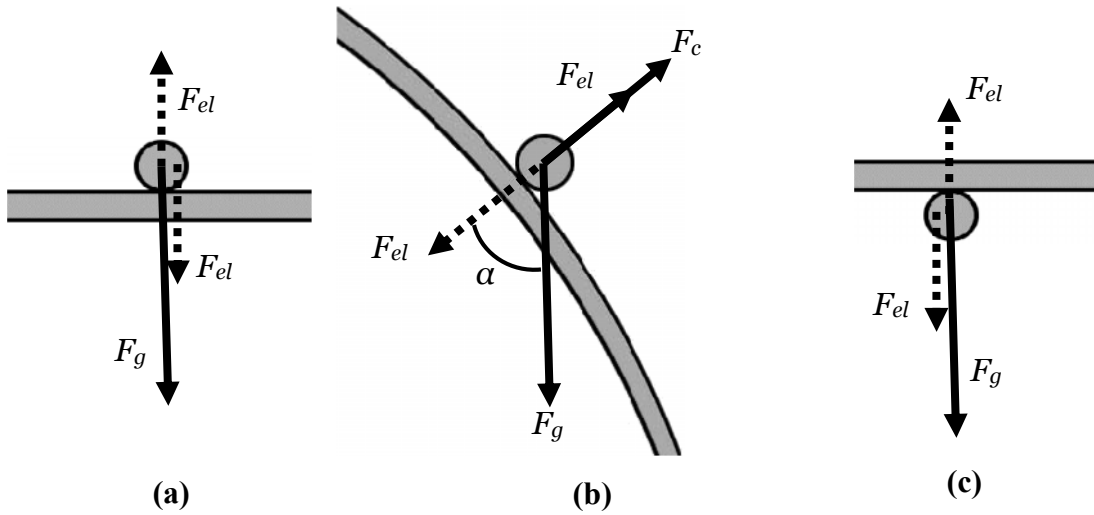
$$\sum \vec{F}_{det} = \vec{F}_{el} \quad (2.3)$$

Avec :

$$\vec{F}_{el} = Q_p \begin{bmatrix} E_x(x, y) \\ E_y(x, y) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\vec{F}_g = m_p \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix} \text{ ou } \vec{F}_g = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

D'où :  $Q_p$  (C) représente la charge de la particule acquise par triboélectrification ;  $E_x(x,y)$  (V/m) et  $E_y(x,y)$  (V/m) : les composant du vecteur champ électrostatique suivant les axe  $Ox$  et  $Oy$  au point  $(x,y)$  occupé par la particule ;  $g$  l'accélération terrestre =  $-9.81(m/s^2)$  ;  $m_p$  (kg) ;  $r_p$  (m) ;  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) la masse le rayon et la masse volumique de la particule.



**Figure 2.2:** Forces agissant sur les particules en contact avec un tapis convoyeur dans (a) : la section linéaire supérieur ; (b) : la section circulaire ; (c) : section linéaire inférieur

Dans la deuxième section (*section circulaire*) une particule portant une charge opposée par rapport à la polarité de l'électrode statique sera soumise à une force électrostatique  $F_{el}$ (2.4) qui contribue avec la force centrifuge  $F_c$ (2.6) pour projeter ces particules vers la partie droite du collecteur.[77-80]

$$\vec{F}_c = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho w^2 R \vec{n} \quad (2.6)$$

Avec  $w$  (rad/s) et  $R$ (m)représentent respectivement la vitesse angulaire et le rayon de la section circulaire.  $\vec{n}$  Vecteur normal à la surface du tapis convoyeur au point occupé par la particule. Les forces d'adhésion et de détachement prennent dans ce cas la forme suivante :

$$\sum \vec{F}_{adh} = \cos(\alpha) \vec{F}_g \quad (2.7)$$

$$\sum \vec{F}_{det} = \vec{F}_{el} + \vec{F}_c \quad (2.8)$$

Avec :  $\alpha$  (*rad*) la position angulaire de la particule pris par rapport à l'axe verticale suivant le sens horaire.

A l'instant où la condition n'est plus satisfaite la particule se détache de la surface du tapis convoyeur pour être projeté vers le collecteur. En absence des collisions type (particule/particule) et (particules/électrode) le mouvement des particules est traité en tant que mouvement libre.

### 2.1.2 Mouvement libre

Au cours de la première phase (*Mouvement sous contraintes*) une analyse de l'équilibre des forces agissant sur la particule dans différentes sections est effectuée pour obtenir les paramètres cinématiques de la particule au point de décollage. Ces paramètres sont utilisés en tant que conditions initiales de la deuxième phase (*Mouvement libre*). Dans cette phase le mouvement de la particule est régi par l'équation (2.9) dite de Newton.

$$m_p \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F} \quad (2.9)$$

D'où  $m_p$  et  $\frac{d\vec{v}}{dt}$  la masse et l'accélération instantanée de la particule; et  $\sum \vec{F}$  la somme des forces appliquées sur la particule dans la zone d'étude. La figure 2.3 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.

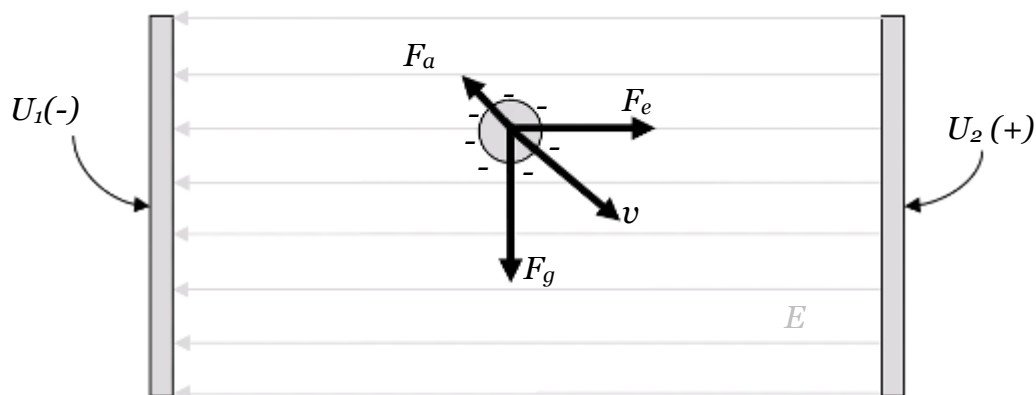
Dans un séparateur à chute libre une particule de taille millimétrique est soumise à l'action de trois forces à savoir : Force électrostatique  $\vec{F}_{el}$  (2.4) due à l'action du champ électrostatique sur la charge acquise par la particule au cours de la triboélectrification ; Force gravitationnelle  $\vec{F}_g$  (2.5) 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  $\vec{F}_a$  (2.10). [81-82]

$$\vec{F}_a = -\left(C_f S_p \rho_{air} v(x, y)\right) \begin{bmatrix} v_x(x, y) \\ v_y(x, y) \end{bmatrix}$$

ou (2.10)

$$\vec{F}_a = -\left(C_f \frac{1}{2} \pi r_p^2 \rho_{air} v(x, y)\right) \begin{bmatrix} v_x(x, y) \\ v_y(x, y) \end{bmatrix}$$

D'où  $C_f$ : coefficient de frottement aérodynamique ;  $S_p$  ( $m^2$ ) la surface pleine que la particule présente à l'air, perpendiculairement dans laquelle se déplace.  $\rho_{air} = 1.204 \text{ kg/m}^3$  la densité volumique de l'air ;  $v(x,y)$ ,  $v_x(x,y)$ ,  $v_y(x,y)$  : représente respectivement le module et les composantes du vecteur vitesse de la particule au point  $(x,y)$  .



**Figure 2.3** : Forces agissant sur une particule chargée négativement dans un séparateur à chute libre

Le coefficient de frottement des particules avec l'air  $C_f$  peut être obtenu à partir du nombre de Reynold  $Re$  et le facteur de forme de la particule  $\phi$  . [83-85]

$$C_f = \frac{24}{Re} \left( 1 + b_1 Re^{b_2} \right) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re} \quad (2.10.1)$$

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

$$Re = \frac{\rho_{air} D_p v}{\mu} \quad (2.10.2)$$

$$b_1 = \exp(2.33 - 6.46\phi + 2.45\phi^2) \quad (2.10.3)$$

$$b_2 = 0.10 + 0.56\phi \quad (2.10.4)$$



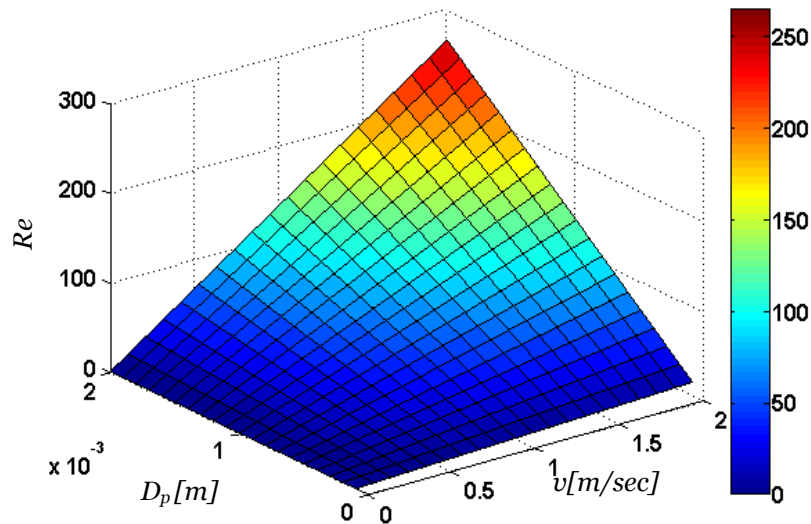
$$b_3 = \exp(4.91 - 13.89\phi + 18.42\phi^2 + 10.26\phi^3) \quad (2.10.5)$$

$$b_4 = \exp(1.47 + 12.26\phi + 20.73\phi^2 + 15.89\phi^3) \quad (2.10.6)$$

D'où  $\rho_{air} = 1.204 \text{ kg/m}^3$  et  $\mu = 1.82 \cdot 10^{-5} \text{ N s/m}^2$  représentent respectivement la densité volumique et la viscosité dynamique de l'air dans les conditions normale de température et de pression et  $\phi$  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  $S$ .

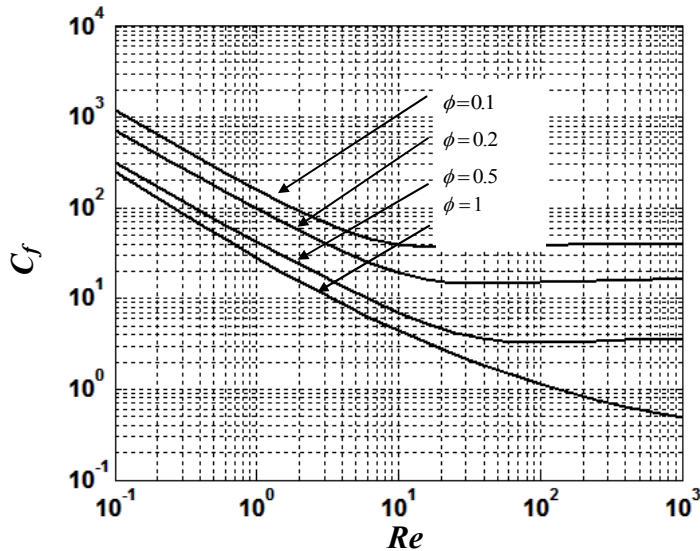
$$\phi = \frac{s}{S} \quad (2.10.7)$$

Le nombre de Reynold calculé par l'équation (2.10.2) est représenté dans la figure 2.4. 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  $v$ .



**Figure 2.4:** Nombre de Reynold  $Re$  en fonction du diamètre de la particule  $D_p$  et sa vitesse relative à la vitesse de l'air  $v$  (obtenue par l'équation (3.10.2)).

Le nombre de Reynold est utilisé dans l'équation (2.10.1) pour déterminer le coefficient de frottement de la particule avec l'air. La valeur du coefficient de frottement  $C_f$  en fonction du nombre de Reynold et le facteur de forme de la particule est représentée dans la figure 2.5.



**Figure 2.5 :** Coefficient de frottement  $C_f$  en fonction du nombre de Reynold  $Re$  et le facteur de forme de la particule

## 2.2 Modèle du champ électrostatique

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.

Dans un domaine d'étude à deux dimensions 2D la distribution du potentiel électrostatique peut être modélisée (*Dans le cas d'une charge d'espace négligeable*) par l'équation de Laplace définie par la relation (2.11) :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0 \quad (2.11)$$

Le champ électrostatique dans ce cas peut être évalué par l'équation (2.12)

$$E = -\nabla U \quad (2.12)$$

La résolution analytique de l'équation au dérivée partiel (2.11) qui satisfait certain conditions aux limites (*par exemple valeur de tension appliquée aux électrodes*) est compliquée, même pour une simple configuration (*séparateur a chute libre avec électrodes inclinées*).[86-87] Dans des situations similaires, le champ électrostatique est obtenu à l'aide d'une méthode numérique. La méthode la plus utilisé actuellement est connue sous le nom de la méthode des éléments finis.[88]

Dans cette étude nous avons utilisé un logiciel spécialisé dans la résolution des équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis connue sous le

nom de COMSOL. Ce logiciel, dispose d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, tel que l'électrostatique. Développé initialement comme une toolbox de MATLAB, COMSOL dispose aujourd'hui son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats.

L'utilisation du logiciel COMSOL, passe par trois étapes bien distinctes par la terminologie couramment utilisée : Préprocesseur ; Processeur de résolution ; Post-processeur ou processeur d'exploitation.

### **Le module Préprocesseur**

Assure l'acquisition complète de l'objet à modéliser avec toutes ses caractéristiques géométriques et physiques et sa décomposition en éléments finis. Ce module assure généralement les opérations suivantes :

*Description de la géométrie* : Est assurée par un module que l'on appelle généralement modelleur géométrique. Dans cette étape l'objet peut être construit en utilisant l'un des deux méthodes suivante : la première consiste à définir l'objet à partir de ses frontières géométriques (points, lignes, surfaces et volumes), dans la deuxième méthode en utilisant des opérations booléennes (union, intersection, transformations géométriques,...) sur des objets de base (polygone, cercle, ellipse, cylindre...).

*Description des caractéristiques physiques* : Cette étape sert à définir le type du problème (électrostatique ; écoulement de fluide ; magnétostatique, magnétodynamiques, magnétothermique,...); à associer un matériau à chaque région qui compose le domaine d'étude et à décrire les conditions aux limites.

*Maillage* : Consiste à déterminer l'ensemble des nœuds et des éléments qui composent le domaine d'étude. Cette discrétisation doit bien entendu respecter les limites du domaine et des objets.

### **Le module Processeur**

Le module est chargé de mettre en œuvre des éléments finis, c'est-à-dire, la résolution du système d'équations linéaires ou non linéaires provenant de l'application de la méthode des éléments finis. Ce module reçoit en entrée le

domaine d'étude discrétisé, les caractéristiques physiques et les conditions aux limites. Il produit en sortie les valeurs des inconnues en chaque nœud du maillage.

### **Le module Post-processeur**

Le module permet de visualiser des grandeurs locales scalaires ou vectorielles sur des plans de coupes, le long d'une ligne, il permet aussi de calculer des grandeurs globales comme les forces et les couples qui s'exercent sur une région ou sur tout le domaine.

### **2.3 Programme de simulation de la trajectoire**

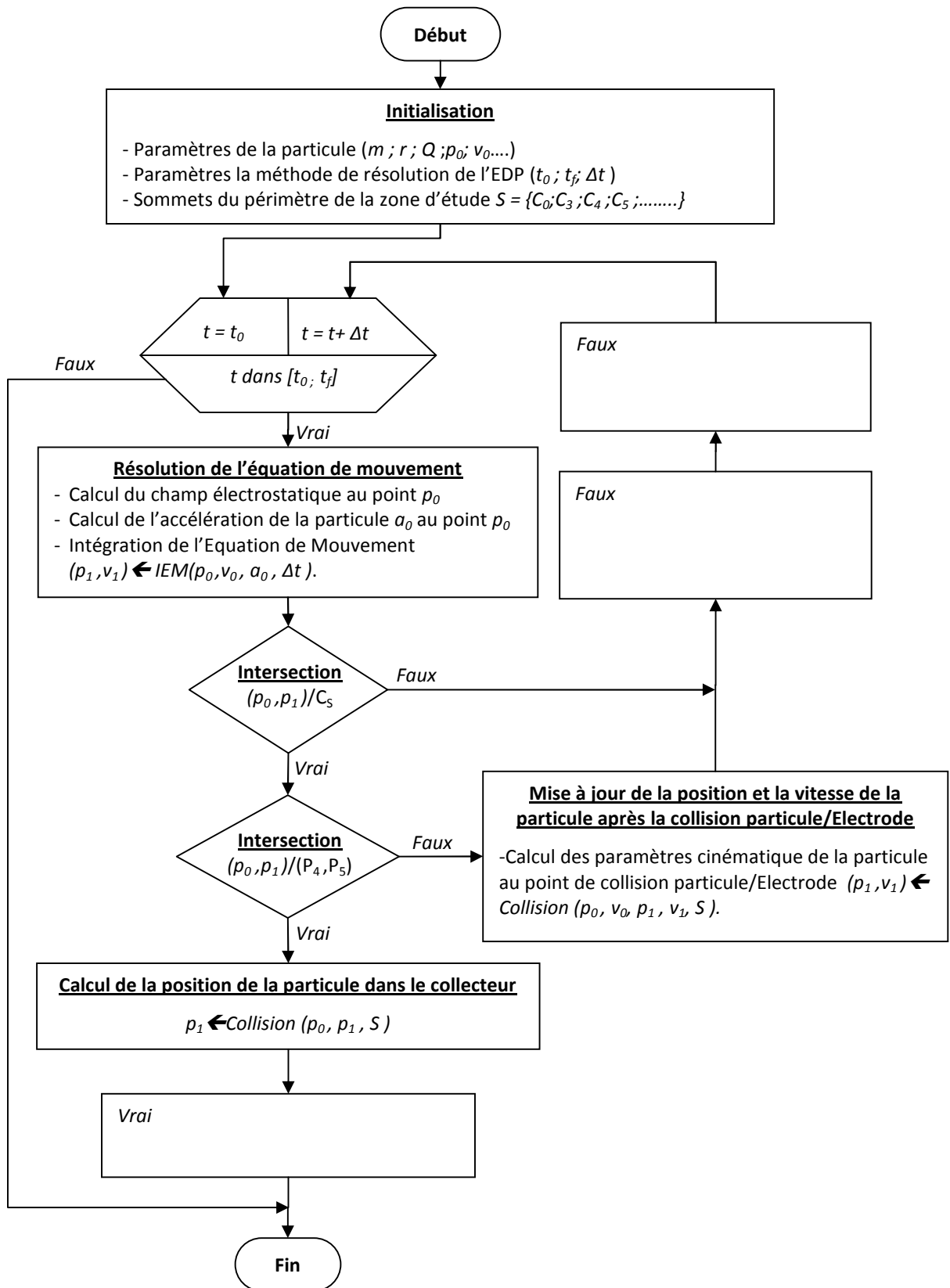
La simulation de la trajectoire d'une particule dans un séparateur électrostatique se fait par la résolution numérique de l'équation de mouvement (2.9). Dans cette étude le problème de simulation est fragmenté en plusieurs problèmes élémentaires. L'ensemble est mise en œuvre sous forme d'un programme MATLAB qui regroupe plusieurs fonctions conçue pour résoudre des problèmes élémentaires suivants :

- Initialisation ;
- Intégration de l'équation de mouvement ;
- Prédiction de la position d'impacts type particule/électrode ;
- Calcul des paramètres cinématique de la particule au point d'impact.

La structure du programme de simulation est représentée par l'algorithme de la figure 2.6.

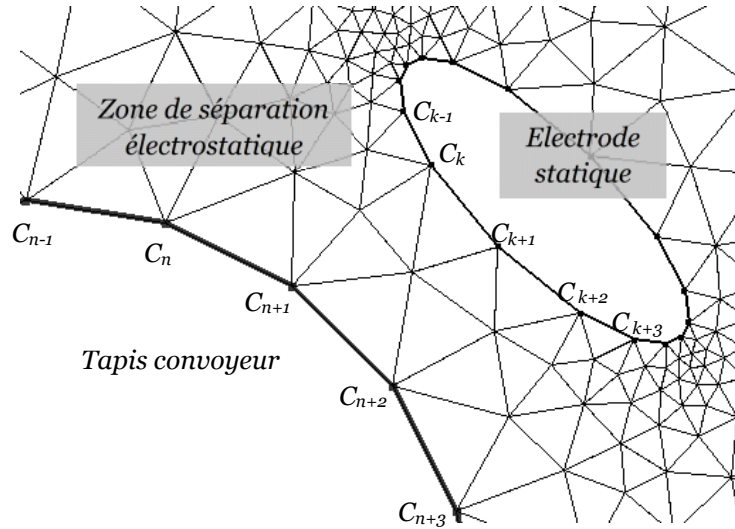
#### **2.3.1 Initialisation**

Le modèle de simulation peut être utilisé dans la prédiction de la position d'une particule dans le collecteur en fonction des paramètres géométriques de l'installation. Dans cette étude les paramètres de l'installation sont définis au niveau du modèle COMSOL ensuite communiqués au programme de simulation sous forme de base de données qui contient les coordonnées des sommets appartenant au périmètre de la zone d'étude  $\{C_0, C_1, \dots, C_k, \dots, C_n, \dots\}$ . Cette base de données est utilisée par le programme pour simuler les collisions type (*Particules/Electrode*). La figure 2.7 nous montre un exemple des sommets délimitent la zone de séparation électrostatique dans le cas d'un séparateur à tapis convoyeur.



**Figure 2.6 :** Organigramme du programme de simulation ; (m ; r ; Q ; p ; v) : Masse, Rayon ; Charge ; vecteur position; vecteur vitesse de la particule. t<sub>0</sub> ; t<sub>f</sub> ; Δt : Début, Fin et le pas d'intégration de l'équation de mouvement suivant l'axe du temps.

D'autres paramètres sont indispensables pour l'exécution du programme tel que la masse de la particule en kilogramme ( $kg$ ) ; Rayon de la particule en mètre ( $m$ ) ; Charge acquise par la particule au cours de la triboélectrification en coulomb ( $C$ ) ; la position et la vitesse initiale de la particule ; ...etc.



**Figure 2.7 :** Discretisation du domaine d'étude

Dans le cas d'un séparateur à tapis convoyeur un module de calcul de la position et la vitesse de la particule au point de décollage est exécuté dans la phase de l'initialisation. Les valeurs obtenues sont utilisées ensuite comme valeurs initiales dans le calcul de la trajectoire des particules après décollage.

### 2.3.2 Intégration de l'Equation de Mouvement (IEM)

L'équation de mouvement dite de Newton (2.9) est une équation différentielle ordinaire avec condition initiale. Ce type d'équations peut être résolu par plusieurs méthodes différentes. Ces méthodes fournissent généralement une solution approchée de l'équation de mouvement en certains points  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$  de l'intervalle d'intégration.

La méthode la plus simple utilisée actuellement est connue sous le nom de la méthode d'Euler. L'application de cette méthode exige la présentation de l'équation de mouvement sous forme de deux équations différentielles ordinaires du premier ordre :

$$\frac{dv}{dt} = a(t) \quad (2.13.1)$$

$$\frac{dp}{dt} = v(t) \quad (2.13.2)$$

D'où :  $a$ ,  $v$ ,  $p$  représentent respectivement l'accélération, la vitesse et la position de la particule. Le but de la méthode d'Euler consiste à déterminer la valeur de  $v_{n+1}$ ,  $p_{n+1}$  à l'instant  $t_{n+1}=t_n+\Delta t$  à partir des valeurs de  $a_n$ ,  $v_n$ ,  $p_n$  à l'instant  $t_n$ . Le schéma itératif de cette méthode est obtenu à partir du développement de (2.9) en série de Taylor :

$$v_{n+1} = v_n + a_n \Delta t \quad (2.14.1)$$

$$p_{n+1} = p_n + v_n \Delta t \quad (2.14.2)$$

La méthode d'Euler-Cromer [89] est obtenue par une simple modification du schéma itératif (2.14). Cette méthode est représentée par le système d'équations (2.15) :

$$v_{n+1} = v_n + a_n \Delta t \quad (2.15.1)$$

$$p_{n+1} = p_n + v_{n+1} \Delta t \quad (2.15.2)$$

Dans cette étude la méthode de résolution de l'équation de mouvement est implantée sous forme d'une équation MATLAB. L'exécution de la fonction dans chaque itération exige la disponibilité l'accélération  $a_n$ , la vitesse  $v_n$  et la position  $p_n$  de la particule à l'instant  $t_n$ . La fonction renvoie la valeur de la vitesse  $v_{n+1}$  et la position  $p_{n+1}$  à l'instant  $t_{n+1}$ .

Une autre méthode peut utiliser pour améliorer les résultats obtenues par la méthode d'Euler-Cromer cette méthode consiste à utiliser la vitesse moyenne dans chaque intervalle du temps pour obtenir la nouvelle position de la particule. Cette méthode est connue sous le nom de l'algorithme du point milieu

$$v_{n+1} = v_n + a_n \Delta t \quad (2.16.1)$$

$$p_{n+1} = p_n + \frac{1}{2}(v_{n+1} + v_n) \Delta t \quad (2.16.2)$$

La substitution de (2.16.1) dans (2.16.2) donne :

$$p_{n+1} = p_n + v_n \Delta t + \frac{1}{2} a_n \Delta t^2 \quad (2.16.3)$$

Cette méthode donne des solutions suffisamment proches de la solution exacte lorsque l'accélération de la particule est constante. Dans le cas contraire d'autres méthodes peuvent être utilisées.

La méthode la plus connue dans ces cas est la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4. [89] L'application de cette méthode dans la résolution de l'équation de mouvement est représenté par l'algorithme suivant :

$$v_{n+1} = v_n + \frac{1}{6} (k_{1v} + 2k_{2v} + 2k_{3v} + k_{4v}) \quad (2.17.1)$$

$$p_{n+1} = p_n + \frac{1}{6} (k_{1p} + 2k_{2p} + 2k_{3p} + k_{4p}) \quad (2.17.2)$$

Avec :

$$k_{1v} = a(p_n, v_n, t_n) \quad (2.17.3)$$

$$k_{1p} = v_n \Delta t \quad (2.17.4)$$

$$k_{2v} = a\left(p_n + \frac{k_{1p}}{2}, v_n + \frac{k_{1v}}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (2.17.5)$$

$$k_{2p} = \left(v_n + \frac{k_{1v}}{2}\right) \Delta t \quad (2.17.6)$$

$$k_{3v} = a\left(p_n + \frac{k_{2p}}{2}, v_n + \frac{k_{2v}}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (2.17.7)$$

$$k_{3p} = \left(v_n + \frac{k_{2v}}{2}\right) \Delta t \quad (2.17.8)$$

$$k_{4v} = a(p_n + k_{3p}, v_n + k_{3v}, t + \Delta t) \quad (2.17.9)$$

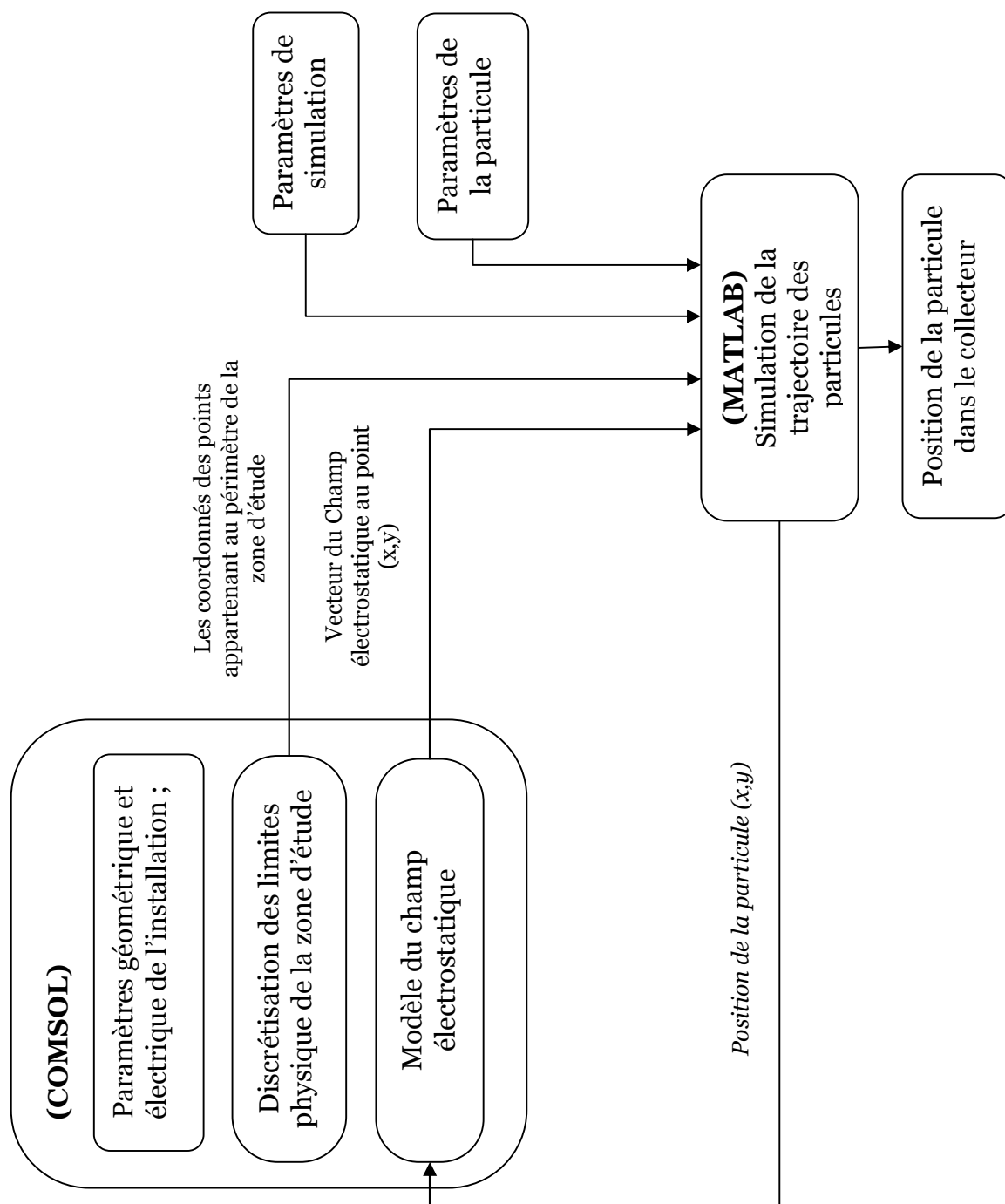
$$k_{4p} = (v_n + k_{3v}) \Delta t \quad (2.17.10)$$

Dans cette étude le calcul de l'accélération d'une particule passe par le traitement des données numériques fournies par la méthode des éléments finies.



Dans cette étape une méthode d'interpolation est utilisée pour obtenir l'intensité du champ électrostatique au point occupé par la particule à l'instant  $t_n$ .

La figure 2.8 nous montre le flux de données échangées entre le programme de simulation élaboré dans logiciel MATLAB et le modèle du champ électrostatique élaboré dans logiciel COMSOL. Cette opération exige un effort de calcul important l'effort devient plus important lorsqu'on utilise la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 qui exige le calcul de l'accélération plusieurs fois pour prédire la position et la vitesse de la particule à l'instant  $t_{n+1}$ .



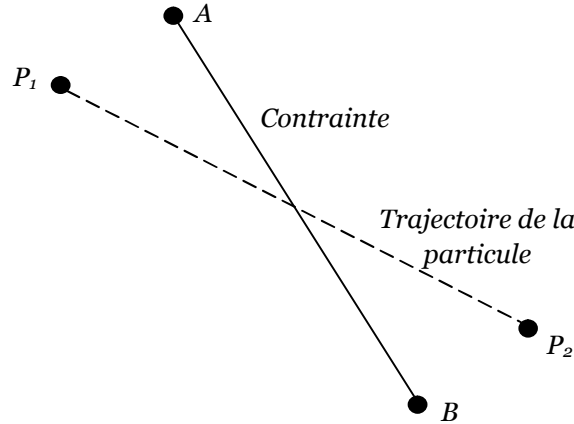
**Figure 2.8 :** Flux de données échangée entre COMSOL et MATLAB

### 2.3.3 Prédiction des paramètres cinématique de la particule au point d'impact

Pour simuler le comportement réel de la particule, dans chaque itération le programme test la violation des contraintes par la particule. Si la particule traverse l'un des limites physique de l'installation (qui peuvent être la surface d'une électrode ; une parois ...etc. ) Le module (*intersection*) renvoie une valeur qui provoque

l'exécution d'un autre module (*collision*). Ce dernier est utilisé dans le calcul des paramètres cinématiques de la particule au point d'impact.

Dans chaque itération le module (*intersection*) reçoit les positions de la particule  $P_1$  et  $P_2$  calculés à l'instant  $t_n$  et  $t_{n+1}$ . Il compare la trajectoire de la particule définie par la ligne  $P_1P_2$  avec les lignes du périmètre de l'installation AB qui représentées par les points  $C_k C_{k+1}$  (figure 2.7).



**Figure 2.9** : Intersection trajectoire/Contour de la zone d'étude

Pour chaque contrainte le module *intersection* calcul les quantités suivante :

$$\begin{aligned} dx &= A_x - B_x & dx_1 &= P_{1x} - A_x & dx_2 &= P_{2x} - B_x \\ dy &= A_y - B_y & dy_1 &= P_{1y} - A_y & dy_2 &= P_{2y} - B_y \end{aligned} \quad (2.18)$$

La quantité  $W_1 = (dx \, dy_1 - dy \, dx_1)$  et  $W_2 = (dx \, dy_2 - dy \, dx_2)$  possèdent des signe opposé lorsque  $P_1$  et  $P_2$  se trouvent dans deux cotés différents par rapport à la ligne AB. Donc lorsque la particule traverse la contrainte ( $S_i$ ) la quantité  $W_1 \cdot W_2$  prend une valeur négative (c'est-à-dire  $W_1 \cdot W_2 \leq 0$ ) [90]. Dans ce cas le module *intersection* renvoi l'indice de la contrainte violée.

Le module (*collision*) est exécuté lorsqu'il aura une intersection entre la trajectoire de la particule et l'un des contraintes physiques de l'installation.

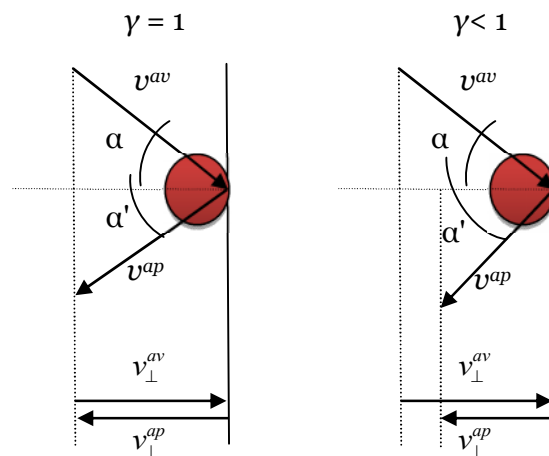
Théoriquement lorsqu'une particule entre en collision avec une électrode ou une paroi l'intensité et la direction de la vitesse de cette particule change. Le changement de la vitesse est calculé à l'aide d'un coefficient de restitution  $\gamma$  [91] par la relation suivante :

$$v_{\perp}^{ap} = \gamma v_{\perp}^{av} \quad (2.19.1)$$

$$v_t^{ap} = v_t^{av} \tag{2.19.2}$$

D'où :  $v_{\perp}^{av}$  et  $v_{\perp}^{ap}$  la composante normal de la vitesse avant et après l'impact ;  
 $v_t^{av}$  et  $v_t^{ap}$  la composante tangentielle de la vitesse avant et après l'impact.

Au cours de l'exécution le module collision reçoit la position et la vitesse de la particule à l'instant  $t_n$  et  $t_{n+1}$  et l'indice de la contrainte violée fournie par le module intersection. Les coordonnées du point d'impact sont obtenues par résolution de l'équation (2.20)



**Figure 2.10** : Influence du coefficient de restitution

$$T(x) - C(x) = 0 \tag{2.20}$$

Avec  $T(x)$  la fonction de la ligne droite passant par les points  $P_1$  et  $P_2$  et  $C(x)$  la fonction de la ligne droite passant par les points  $A$  et  $B$ . La forme des fonctions  $T(x)$  et  $C(x)$  est donnée par :

$$T(x) = a_t x + b_t \tag{2.21.1}$$

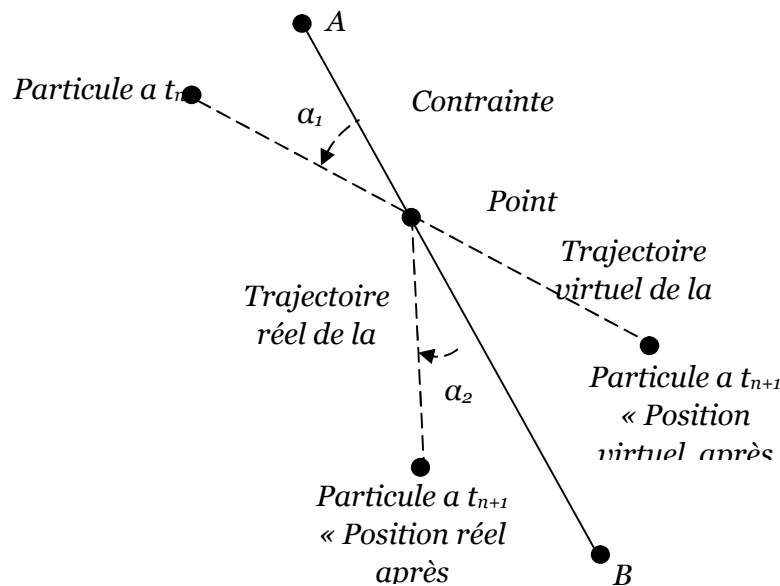
$$C(x) = a_c x + b_c \tag{2.21.2}$$

Tel que  $a_t, b_t, a_c, b_c$  représentent les coefficients des fonctions qui peuvent être obtenues par régression linéaire.

Le calcul du point d'impact est suivi par :

- Une estimation du temps et la vitesse de la particule au point d'impact ;

- La décomposition du vecteur vitesse en deux vecteurs : Vitesse normal  $v_{\perp}^{av}$  par rapport à la ligne  $C(x)$  et la vitesse tangentielle  $v_t$  ;
- Calcul de la vitesse normal  $v_{\perp}^{ap}$  de la particule après l'impact (2.9) ;
- Calcul des de la valeur des composantes cartésiennes du vecteur vitesse au point d'impact ;
- Calcul de la position de la particule après  $t_n + \Delta t$ .



**Figure 2.11:** Position de la particule avant et après l'impacte

## 2.4 Conclusion

Dans un processus de séparation électrostatique l'élaboration d'un modèle physique de la trajectoire des particules exige la modélisation des champs de forces qui rènes dans la zone de séparation électrostatique. Les études réalisées nous montrent que l'élaboration du modèle du champ électrostatique est indispensable dans cette étude. Dans la plus part des installations, l'élaboration de ce type de modèles exige le calcul d'une solution particulière à l'équation de Laplace dans la zone de séparation électrostatique.

La solution analytique de cette équation reste trais compliqué même pour une simple configuration géométrique (*séparateur a chute libre avec deux électrode parallèle*). Pour surmonter le problème la résolution de l'équation de Laplace se fait généralement par des méthodes numériques telles que la méthode des éléments finie.

L'utilisation d'un modèle numérique du champ électrostatique impose l'utilisation d'une méthode d'intégration numérique pour résoudre l'équation de mouvement. La méthode d'Euler ; Euler-Cromer et Runge-Kutta d'ordre 4 (RK4) sont les méthodes les plus utilisées dans ce domaine. L'utilisation de ce type de méthode nous donne la possibilité de simuler d'autres phénomènes tels que les phénomènes d'impact particule/parois (électrodes).

---

## CHAPITRE 3 : SIMULATION DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES

Le comportement des particules en plastique dans un séparateur électrostatique dépend de l'intensité et la direction des champs de forces qui agissent en même temps sur la particule dans la zone de séparation électrostatique. Dans le présent chapitre on vise l'étude et la simulation du comportement des particules dans un séparateur a chute libre et un séparateur a tapis convoyeur. Le modèle de simulation utilisé dans cette étude est basé sur les modèles théoriques élaborés dans le chapitre précédent. L'ensemble des modèles sont implantés sous forme d'un programme MATALAB qui permet la simulation du comportement des particules en fonction des paramètres électriques et géométrique de l'installation étudiée et les paramètres du mélange trié. Cette simulation permet la prédiction et la compréhension de l'influence des paramètres étudiées sur la distribution spéciales des particules du mélange récupéré au niveau du collecteur de l'installation étudiée.

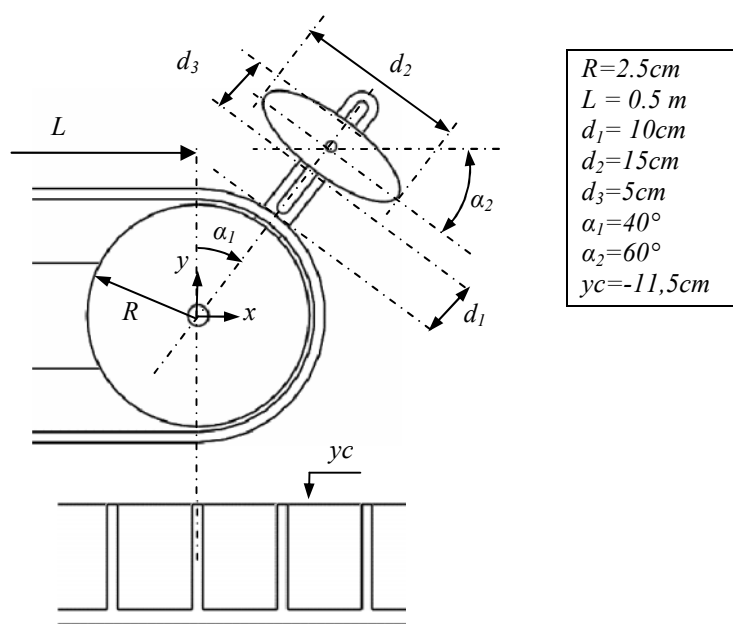
### 3.1 Séparateur à tapis convoyeur

#### 3.1.1 Modèle du champ électrostatique

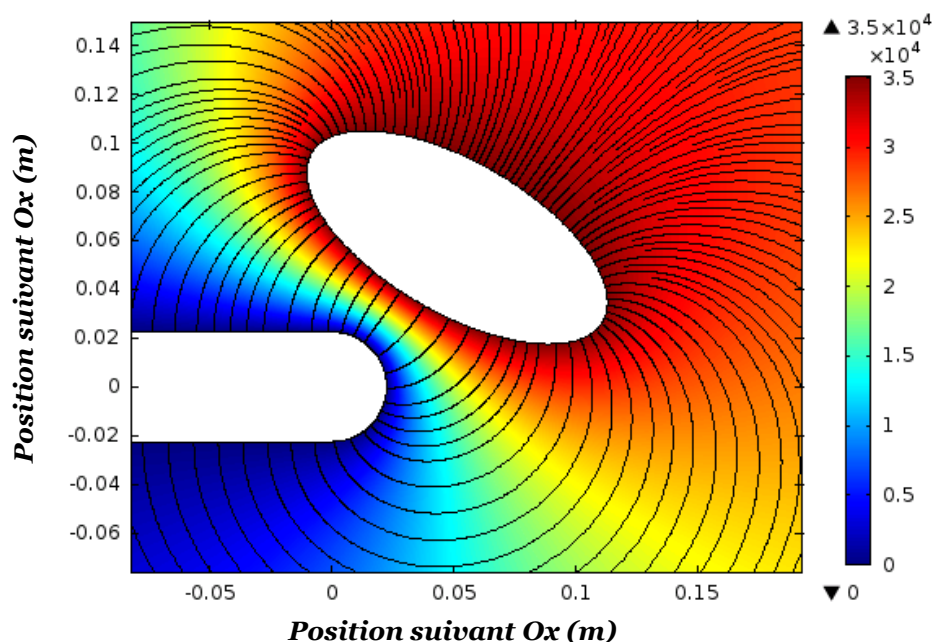
Le modèle du champ électrostatique dans un séparateur à tapis convoyeur est obtenu par la résolution de l'équation de Laplace (Eq.2.11) dans l'espace entourant le profil 2D du tapis et l'électrode elliptique.

Dans cette étude la solution de l'équation de Laplace est obtenue par la méthode des éléments finis implantée au niveau du logiciel COMSOL. L'utilisation de cette méthode exige la définition de la géométrie de l'espace d'étude et les conditions aux limites appliquées aux extrémités du domaine d'étude. Les dimensions de l'installation utilisée dans cette application sont représentées dans la figure 3.1.

Dans cette étude, la géométrie du domaine d'étude est représentée par le profil 2D de l'installation représenté au niveau du modeleur géométrique du COMSOL par plusieurs formes élémentaires. Une union entre cercles et rectangle est utilisé pour représenter le profil du tapis convoyeur et une ellipse est utilisée pour représenter le profil de l'électrode statique. Le résultat obtenu par cette méthode est représenté dans la figure 3.2



**Figure 3.1:** Paramètres géométriques du séparateur à tapis convoyeur



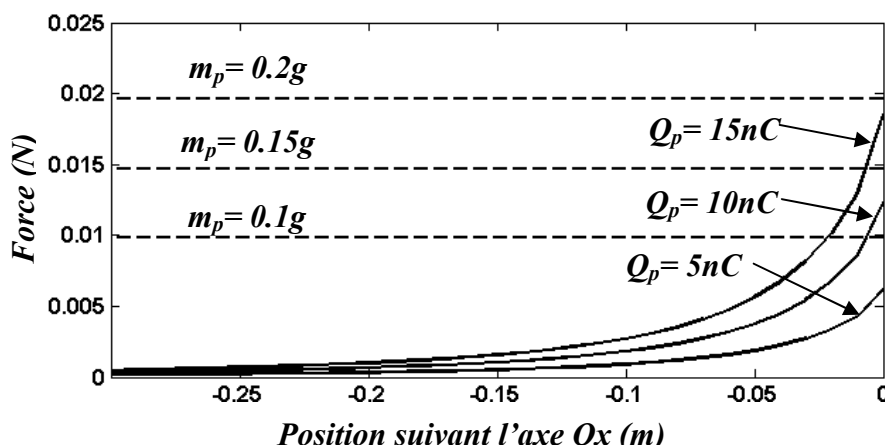
**Figure 3.2:** Distribution du potentiel et lignes du champ dans un séparateur à tapis convoyeur

### 3.1.2 Point de détachement de la particule

La simulation de la trajectoire des particules dans un séparateur à tapis convoyeur est exécutée en deux étapes. Dans la première étape une analyse des forces appliquées aux particules en contact avec le tapis est effectuée pour obtenir le point de décollement de la particule. Cette analyse consiste à identifier le point où la somme des forces de détachement devient supérieure à la somme des forces d'adhésion.



La figure 3.3 montre l'intensité de la force électrostatique appliquée à une particule en fonction de sa charge et de sa position sur la section linéaire du tapis convoyeur. Cette force est considérée autant que force de détachement lorsque la polarité de la charge acquise par la particule est opposée par rapport à la polarité de l'électrode statique. Dans ce cas le détachement de la particule de la surface du tapis peut apparaître lorsque la force électrostatique devient supérieure au poids de la particule.



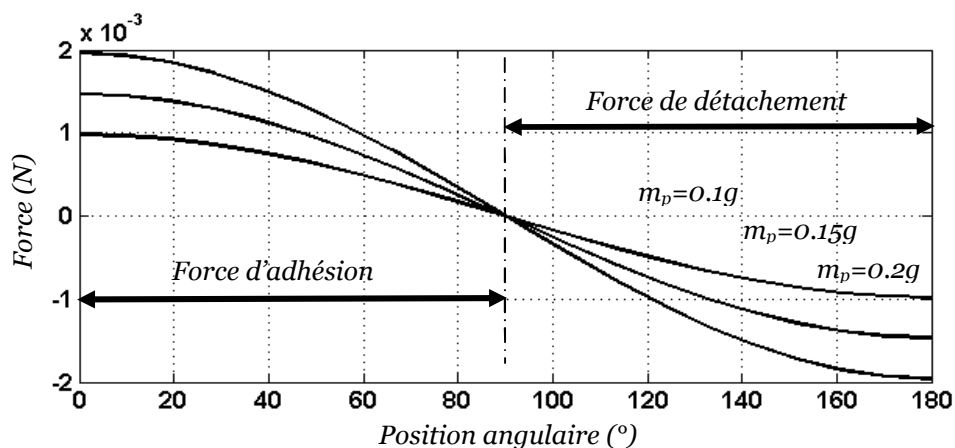
**Figure 3.3** : Forces électrostatiques et gravitationnelles appliquées sur une particule en fonction de sa position sur la section linéaire du tapis convoyeur

Les particules entraînées dans la section circulaire subissent une force centrifuge normale à la surface du tapis. L'intensité de cette force est constante en fonction de la position angulaire de la particule. Dans la même section les particules qui adhèrent à la surface du tapis sont soumises à une force gravitationnelle et électrostatique dont l'intensité de leurs composantes normales est variable en fonction de la position angulaire de la particule.

La figure 3.4 montre la variation de la force gravitationnelle normale à la surface du tapis appliquée à une particule dans la section circulaire. De  $0^\circ$  à  $90^\circ$  la composante normale de cette force est dirigée vers le centre du cercle. Dans ce cas la force est considérée autant que force d'adhésion.

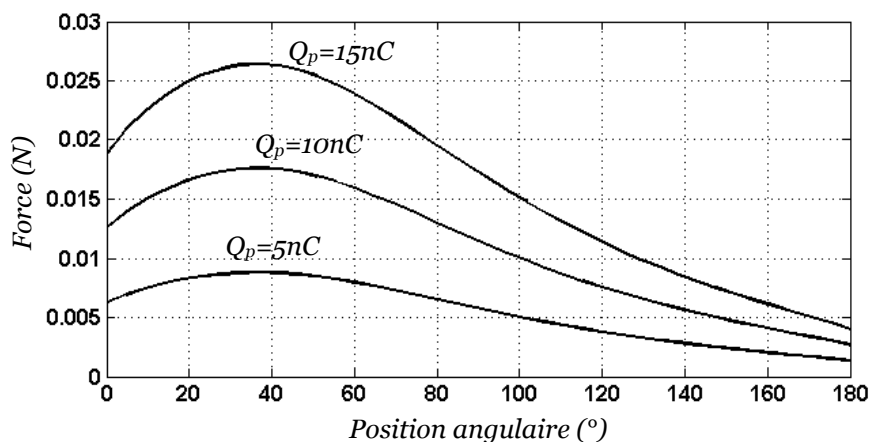
De  $90^\circ$  à  $180^\circ$  la direction de la composante normale de la force gravitationnelle s'inverse. Dans ce cas la force est considérée autant que force de détachement. La figure 3.5 montre la variation de la composante normale de la force électrostatique en fonction de la position angulaire de la particule. Dans cette figure on remarque une

augmentation de l'intensité de la force électrostatique. Cette force atteint une valeur maximale au voisinage de la position angulaire qui égale à  $40^\circ$ .



**Figure 3.4 :** Composantes normales des forces gravitationnelles appliquées sur une particule en fonction de sa position angulaire dans la section circulaire du tapis convoyeur

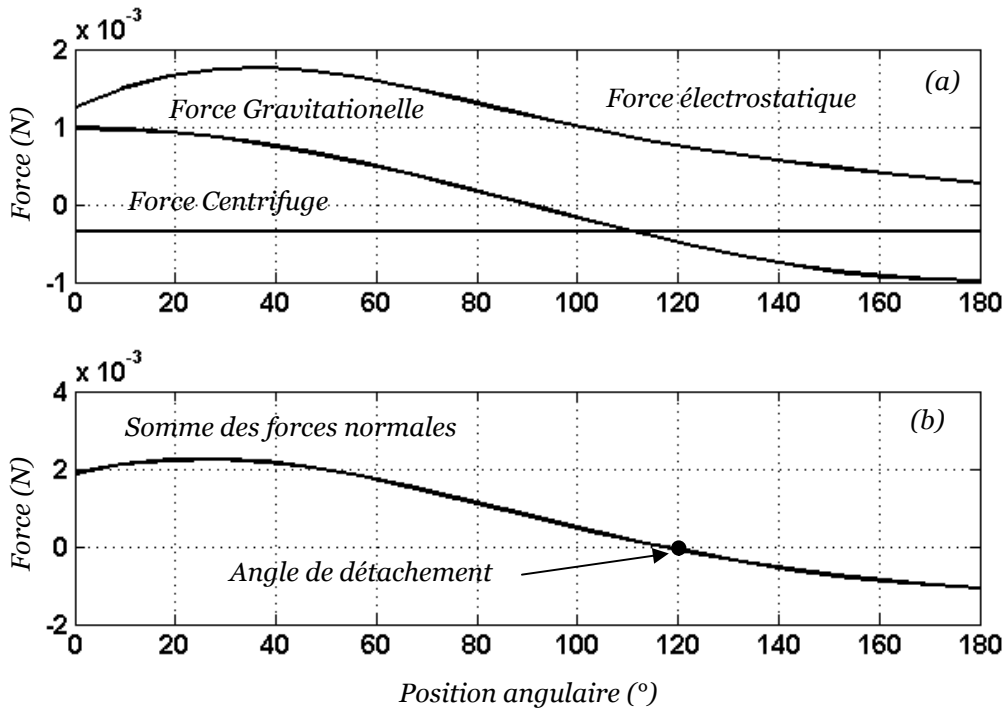
En examinant le modèle du champ électrostatique on déduit que à cette position caractérise la valeur minimale de la distance inter électrode et la valeur maximale du champ électrostatique. Les particules entraînées par le tapis à des positions supérieures à  $40^\circ$  subissent des forces électrostatiques dont la composante normale devient de plus en plus faible. Au-delà de  $180^\circ$  la force électrostatique peut être négligeable.



**Figure 3.5 :** Composantes normales des forces électrostatiques appliquées sur une particule en fonction de sa position angulaire dans la section circulaire du tapis convoyeur

Pour obtenir les coordonnées du point de décollage une analyse de l'équilibre des forces doit être effectuée. La figure 3.6 nous montre un exemple de cette analyse. Dans cette application une particule de charge  $Q = 1nC$  est de polarité identique à la polarité de l'électrode statique est soumise à une force électrostatique dont la

composante normale est dirigée vers la surface du tapis. Dans ce cas la force électrostatique est considérée dans ce cas autant que force d'adhésion.



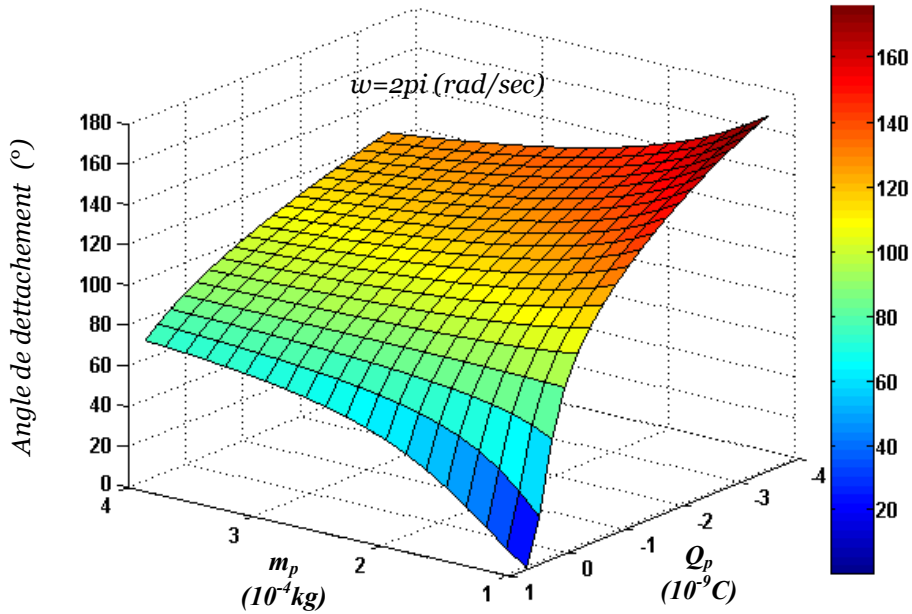
**Figure 3.6 :** (a) : Forces normales appliquées a une particule dans la section circulaire du tapis ; (b) : la somme des forces normale ( $m_p=0.1g$  ;  $w=4\pi$  rad/sec ;  $Q=1nC$ )

La force gravitationnelle est considérée en tant que force d'adhésion de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  et comme une force de détachement de  $90^\circ$  à  $180^\circ$ . Tandis que la force centrifuge est considérée autant que force de détachement de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ .

La variation de la somme des forces (normales) appliquées à la particule est représenté dans la figure 3.6. Cette figure nous montre que la somme des forces est positive de  $0^\circ$  à  $120^\circ$ . Dans ce cas la somme des forces est considérée autant que force d'adhésion. Cette somme s'annule au voisinage de  $120^\circ$  ensuite, elle devient négative au-delà de  $120^\circ$ . C'est-à-dire au-delà de  $120^\circ$  elle est considérée autant que force de détachement. Dans cette simulation l'angle de détachement de la particules est caractérisé par une somme des forces nulles. Dans cette application l'angle de détachement est de l'ordre de  $120^\circ$ .

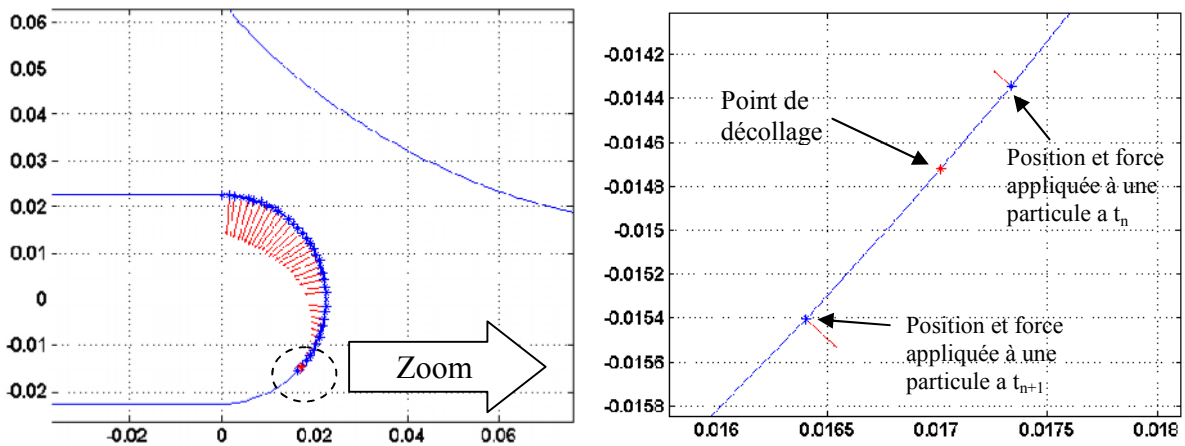
Cette application nous montre que l'angle de détachement de la particule varie en fonction de l'intensité est la direction des forces appliquées sur cette particules. Une étude paramétrique (figure 3.7) nous montre que la variation de l'angle de

détachement d'une particule devient moins sensible à la variation de la charge acquise par la même particule lorsque sa masse augmente.



**Figure 3.7 :** Angle de détachement d'une particule en fonction de sa charge et sa masse.

Au cours de la simulation l'équilibre des forces est analysé dans des temps discrets  $t_n + \Delta t$ . L'utilisation de cette méthode au cours de la simulation peut donner une fausse position du point de détachement ainsi que la direction de la vitesse de la particule au point considéré. Pour résoudre ce type de problème une correction de la position du point de détachement et effectuer une fois que la condition (2.1) devient fausse.

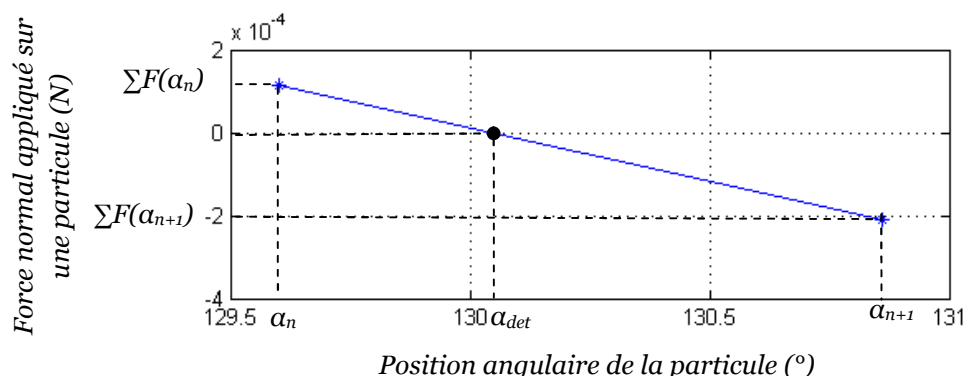


**Figure 3.8 :** Correction de l'angle de détachement ;  $\rightarrow$  Vecteur somme des forces appliquées à une particule à l'instant  $t_n$

La méthode de correction utilisée dans ce cas est basée sur le calcul de l'angle associé à une valeur nulle de la somme des forces normales appliquées sur la particule considéré. La figure 3.8 montre un cas particulier du détachement de la particule de la surface du tapis. Dans ce cas la somme des forces appliquées à une particule passe d'une valeur positive (*Dans notre cas le sens positive des forces est représenté par le sens opposé du vecteur normal à la surface du tapis*) vers une valeur négative dans un intervalle  $[t_n t_{n+1}]$ .

Dans le même intervalle la variation de la somme des forces peut être considérée linéaire en fonction de la variation de l'angle. Dans ce cas la variation de la somme des forces peut être représentée par une ligne droite (figure 3.9). Une estimation de l'angle de détachement dans ce cas peut être obtenue par la résolution de l'équation :

$$\sum F(\alpha) = 0 \quad \text{avec} \quad \alpha \in [\alpha_n \alpha_{n+1}] \quad (3.1)$$



**Figure 3.9 :** Correction de l'angle de détachement de la particule

Le calcul du point de détachement nous donne la possibilité d'obtenir les informations sur l'intensité et la direction de la vitesse de la particule dans le point considéré. Ces paramètres sont utilisés comme paramètres initiaux dans le calcul de la trajectoire de cette particule au cours de leurs projections vers le collecteur.

### 3.1.3 Résultats de simulation

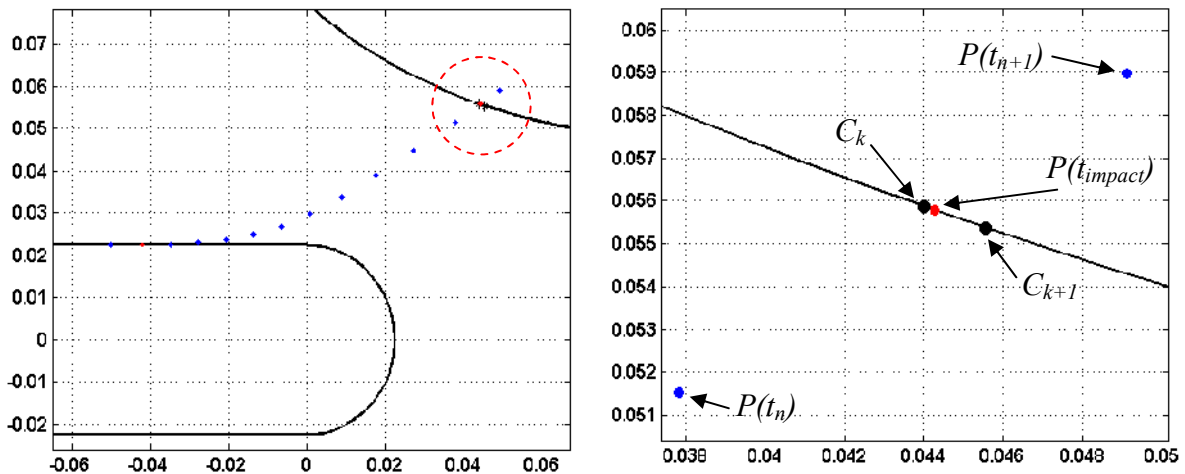
Après le détachement la particule est projetée avec une vitesse initiale non nulle vers le collecteur. Le mouvement des particules dans ce cas est considéré autant que mouvement libre. Au cours de leurs mouvements les particules de taille millimétriques sont soumises à plusieurs forces. Dans notre étude nous avons pris en

considération l'influence de la force gravitationnelle ; électrostatique et forces de frottement particule/air. Le mouvement de la particule dans ce cas est régi par l'équation dite de Newton qui prend la forme suivante ;

$$m \frac{dv}{dt} = QE_x(x, y) - \frac{1}{2} C_f S_p \rho_{air} v(x, y) v_x(x, y) \quad (3.2.1)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = -mg + QE_y(x, y) - \frac{1}{2} C_f S_p \rho_{air} v(x, y) v_y(x, y) \quad (3.2.2)$$

Au cours de la simulation les particules peuvent entrer en impacte avec l'électrode statique. La figure 3.10 nous montre un cas particulier du problème d'impact type particule/électrode. Au cours de la simulation le programme détecte l'intersection entre la trajectoire de la particules (Ligne formée par les deux points  $P(t_n)$   $P(t_{n+1})$ ) et l'un des segments linéaires formants le périmètre de l'électrode (Ligne formée par les deux points  $C_k$  et  $C_{k+1}$ ).

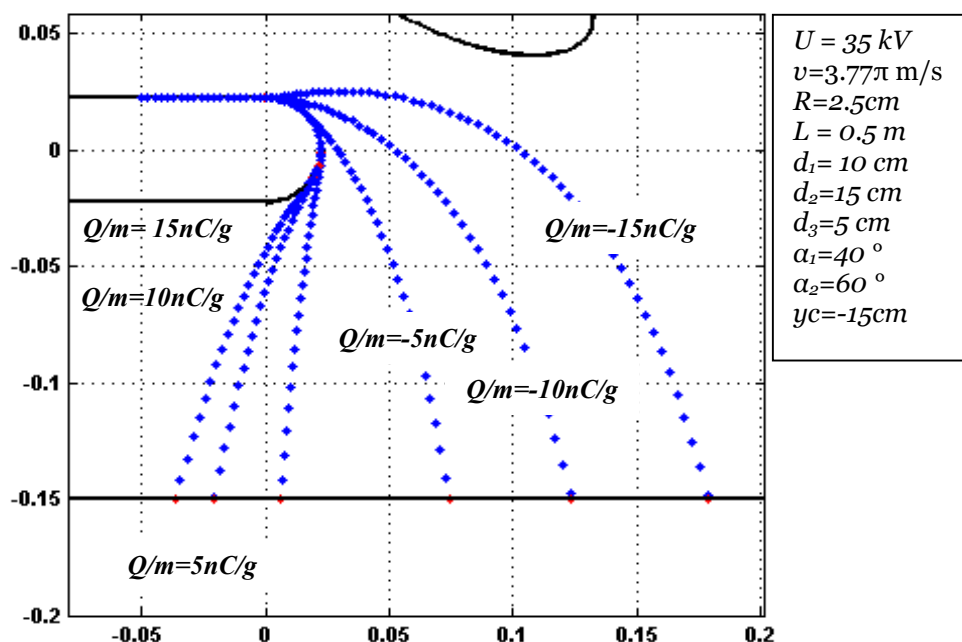


**Figure 3.10** : Simulation de l'impact Particule/Electrode

### ➤ Influence du rapport Charge/Masse

Pour simuler l'influence du rapport Charge/Masse nous avons fixé la vitesse tangentielle du tapis sur la valeur  $v = 21 \text{ cm/s}$  ; la tension appliquée à l'électrode elliptique sur 35 kV et dans chaque simulation la trajectoire d'une particule est calculée pour une valeur fixe du rapport Charge/Masse. Les valeurs choisies dans cette simulation sont :  $\pm 15 \text{ nC/g}$  ;  $\pm 10 \text{ nC/g}$  ;  $\pm 5 \text{ nC/g}$ .

Le résultat de simulation montre le cas d'une installation équipée d'une électrode statique alimentée par une source haute tension de polarité positive. Cette simulation nous montre que les particules chargées négativement peuvent être collectées dans la partie droite du collecteur. La simulation nous montre que la déviation horizontale des particules chargées positivement égale à  $-3.6\text{ cm}$  pour  $15\text{ nC/g}$  ;  $-1.9\text{ cm}$  pour  $10\text{ nC/g}$  et  $0.6\text{ cm}$  pour  $5\text{ nC/g}$ . La déviation horizontale des particules chargées négativement égale à  $7.5\text{ cm}$  pour  $-5\text{ nC/g}$  ;  $12.3\text{ cm}$  pour  $-10\text{ nC/g}$  et  $17.9\text{ cm}$  pour  $-15\text{ nC/g}$ .



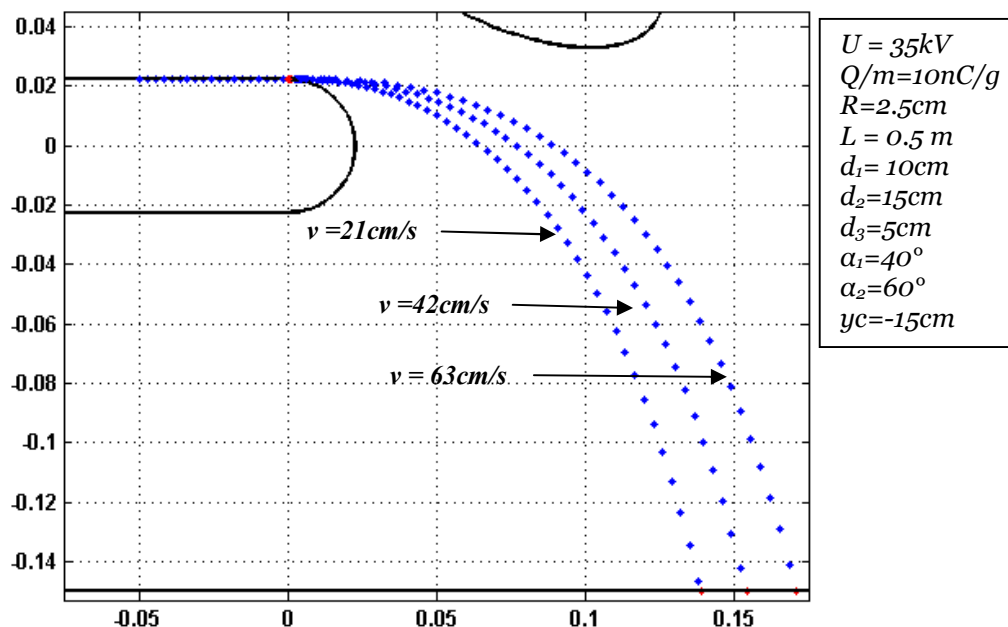
**Figure 3.11** : Influence de la charge massique sur la déviation de la particule

Cette simulation nous montre que la distance horizontale qui sépare les particules d'une charge massique de  $-5\text{ nC/g}$  et  $-15\text{ nC/g}$  est de l'ordre de  $10.4\text{ cm}$ . Par contre la distance horizontale qui sépare les particules d'une charge massique de  $5\text{ nC/g}$  et  $15\text{ nC/g}$  est de l'ordre de  $3\text{ cm}$ . Dans ce cas on peut dire que la dispersion des particules chargées négativement est plus grande que la dispersion des particules chargées positivement.

En pratique une grande dispersion nous facilite la sélection d'une gamme précise du produit traité. Donc pour assurer cette opération le choix de la polarité de l'électrode statique doit prendre en considération la polarité de la charge acquise par la gamme du produit ciblé.

### ➤ Influence de la vitesse du tapis

L'influence de la vitesse du tapis sur le comportement des particules est examinée sur deux types de particule. Les deux particules sont caractérisées par une charge massique de  $\pm 10 \text{ nC/g}$ . Les résultats de la simulation sont représentés dans la figure 3.12 et 3.14. La figure 3.12 nous montre le comportement d'une particule caractérisée par une charge massique suffisamment élevé (de l'ordre de  $-10 \text{ nC/g}$ ).



**Figure 3.12 :** Influence de la vitesse du tapis sur les particules chargées négativement

Dans cette simulation la vitesse tangentielle du tapis  $v = 21 \text{ cm/s}$  assure la projection de la particule à une distance de  $14 \text{ cm}$ . Les distances de  $15.5 \text{ cm}$  et  $17.2 \text{ cm}$  sont obtenues respectivement avec une vitesse de  $v = 42 \text{ cm/s}$  et  $v = 63 \text{ cm/s}$ . Donc d'après les résultats de simulation on peut dire qu'une augmentation de la vitesse du tapis est accompagnée par une augmentation de la distance horizontale parcourue par la particule. La variation de la distance provoquée par la variation de la vitesse du tapis est de l'ordre de  $3.2 \text{ cm}$ .

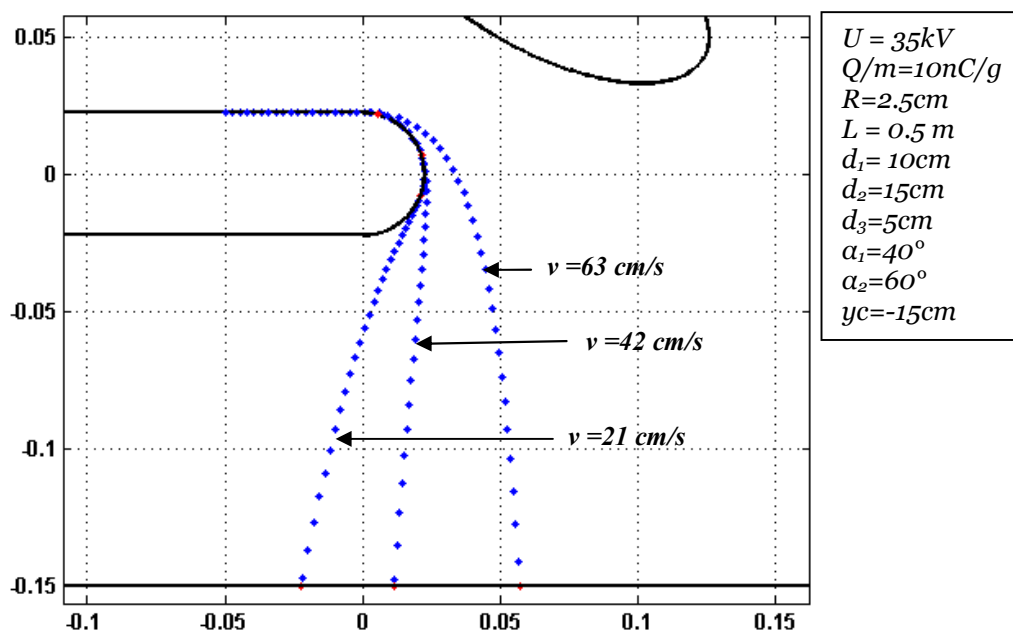
Le résultat de simulations présentées dans la figure 3.13 nous montre le comportement d'une particule chargée positivement obtenu pour différentes valeurs de la vitesse tangentielle du tapis convoyeur. Les résultats de simulation nous montrent que les déplacements horizontaux de l'ordre de  $-2.3 \text{ cm}$  ;  $1.3 \text{ cm}$  et  $5.7 \text{ cm}$  sont associés respectivement à l'application des vitesses de l'ordre de  $21 \text{ cm/s}$  ;  $v = 42$



$cm/s$  et  $v = 63cm/s$ . dans cette simulation la plage de variation de la vitesse est de l'ordre de  $8cm$ .

On examine les résultats de cette simulation on remarque que la variation de la vitesse du tapis convoyeur est accompagnée par une variation de la vitesse de la particule et la direction de cette vitesse au point de détachement. Les résultats de cette simulation nous montrent que l'application d'une vitesse de  $v = 21cm/s$  provoque le détachement de la particule dans un angle  $\alpha = 111.60^\circ$ . La même figure nous montre que l'augmentation de la vitesse de  $v = 42 cm/s$  à  $v = 63 cm/s$  est accompagné par une diminution de l'angle de  $\alpha = 72^\circ$  à  $\alpha = 13.94^\circ$ .

En pratique une grande dispersion nous facilite la sélection des gammes précise de particule. Pour réduire le chevauchement de deux produits de charge opposé le choix de la vitesse doit assurer le détachement de la particule à des angles supérieur à  $90^\circ$



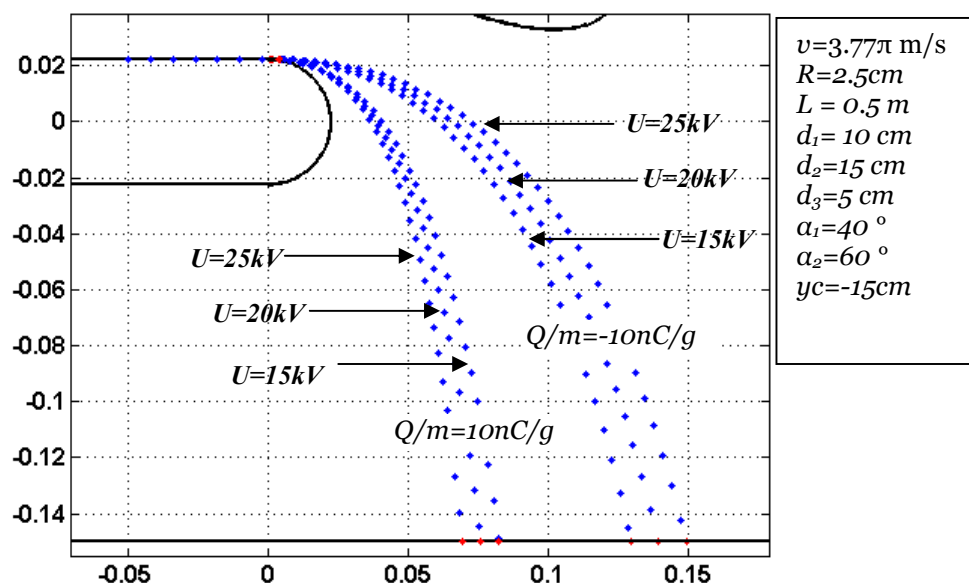
**Figure 3.13** : Influence de la vitesse du tapis sur les particules chargées positivement

### ➤ Influence de la différence de potentiel appliquée aux électrodes

Cette simulation (figure 3.14) nous montre l'influence de la valeur de la haute tension appliquée à l'électrode statique sur le comportement de deux particules de charge opposées. La valeur de la charge massique prise dans cette simulation égale à  $\pm 10 nC/g$ . les résultats obtenus nous montrent que l'augmentation de la valeur de la

haute tension exerce un effet inverse sur les particules de charge opposée. Dans le cas d'une particule de charge positive l'augmentation de la valeur de la haute tension de 15 kV à 20kV ensuite à 25kV provoque une diminution de la distance horizontale parcourue par la particule. Dans cette simulation la distance varie de 8.2cm à 7.7cm ensuite à 6.9 cm.

Dans le cas d'une particule de charge négative l'augmentation de la valeur de la haute tension de 15 kV à 20kV ensuite à 25kV provoque une augmentation de la distance horizontale parcourue par la particule dans ce cas la distance varie de 13cm à 13.9cm ensuite à 14.9 cm.



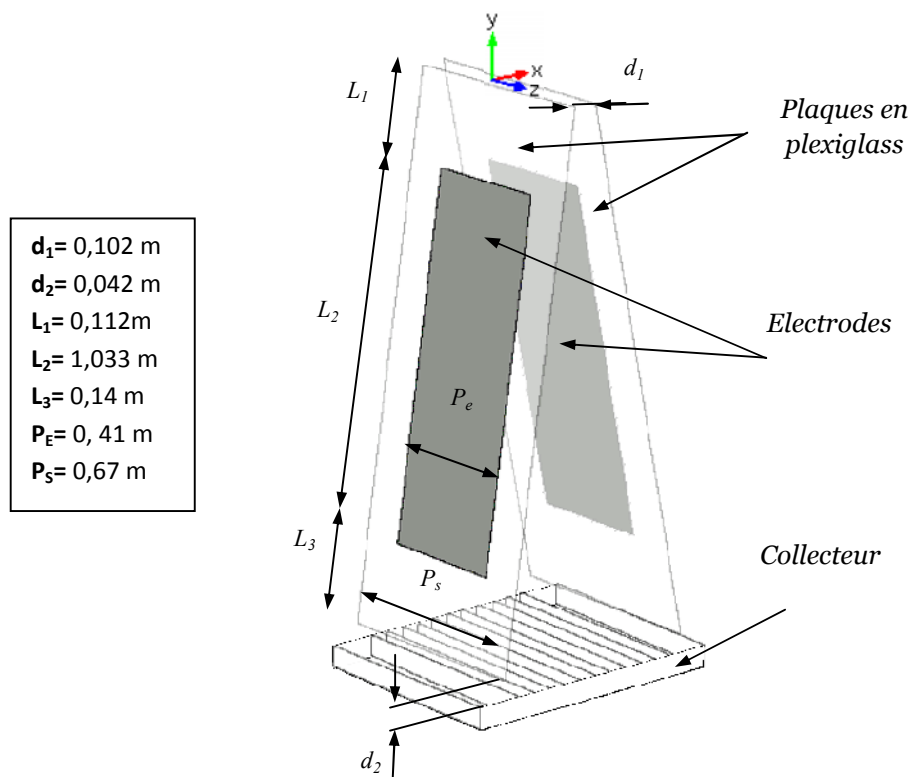
**Figure 3.14** : Influence de la valeur de la haute tension appliquée à l'électrode statique

## 3.2 Séparateur à chute libre

### 3.2.1 Modèle du champ électrostatique

Le modèle physique du champ électrostatique dans un séparateur à chute libre est élaboré en fonction de quelques paramètres géométriques de l'installation. Les dimensions de l'installation utilisées dans cette étude sont représentées dans la figure 3.15. Les valeurs numériques des dimensions sont regroupées dans la même figure.

Pour construire le modèle géométrique de l'installation nous avons commencé par la construction d'un profil 2D de cette installation dans le modelleur géométrique du COMSOL. Dans cette étape nous avons utilisé des lignes dont les coordonnées des sommets sont calculées en fonction des paramètres géométriques de l'installation. La position des points et leurs coordonnées sont présentées dans la figure 3.18 et le tableau 3.1. Dans cette figure les segments  $\{(C_0, C_3), (C_6, C_9)\}$  sont utilisés pour définir la position et les dimensions des parois utilisées comme support pour les électrodes HT.

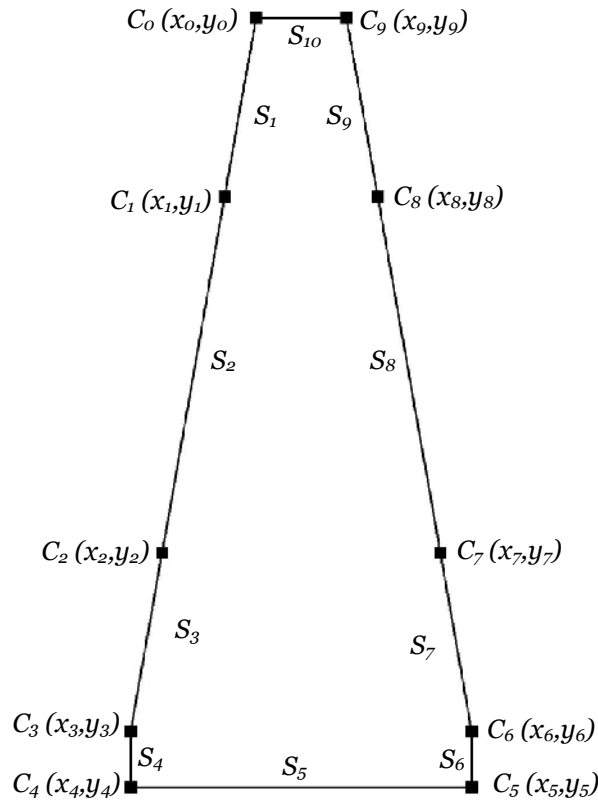


**Figure 3.15 :** Paramètres géométriques de l'installation

Dans cette étude les supports sont censés d'être symétriques par rapport au plan  $x = 0$ . Dans ce cas les couples de points  $(C_0, C_9)$ ,  $(C_3, C_6)$  possèdent la même position

suivant l'axe  $Oy$  mais des positions opposées suivant l'axe  $Ox$ . La même chose pour les couples de points  $(C_1, C_8)$ ,  $(C_2, C_7)$ .

Ces points sont utilisés pour définir la position des électrodes HT par rapport à leurs supports. Donc, d'un côté les points  $(C_1, C_2)$  doivent appartenir à la ligne droite  $(C_0, C_3)$ , d'un autre coté les points  $(C_7, C_8)$  doivent appartenir à la ligne droite  $(C_6, C_9)$ .



**Figure 3.16** : La position des points de l'installation

Le segment  $S_5$  de la figure 3.16 représente le niveau du collecteur de l'installation. Ce segment est défini par les points  $(C_4, C_5)$  qui possèdent la même position suivant l'axe  $Oy$  est des positions opposées suivant l'axe  $Ox$ . La méthode utilisée dans le calcul des coordonnées des points  $C_0$  jusqu'à  $C_9$  et représenter dans le tableau 3.1.

En utilisant quelques opérations géométriques telles que : le déplacement, l'extrusion et l'union ; nous avons obtenus un modèle 3D à partir d'un Modèle 2D. Le modèle final de l'installation doit être incluse dans un solide sous forme d'un cube, une sphère...etc. Cette opération est nécessaire pour la description des caractéristiques physiques de l'installation. Cette étape exige que le domaine d'étude soit un domaine fermé caractérisé par des conditions aux limites bien définies.

**Tableau 3.1** : Coordonnées des points appartenant au périmètre de l'installation

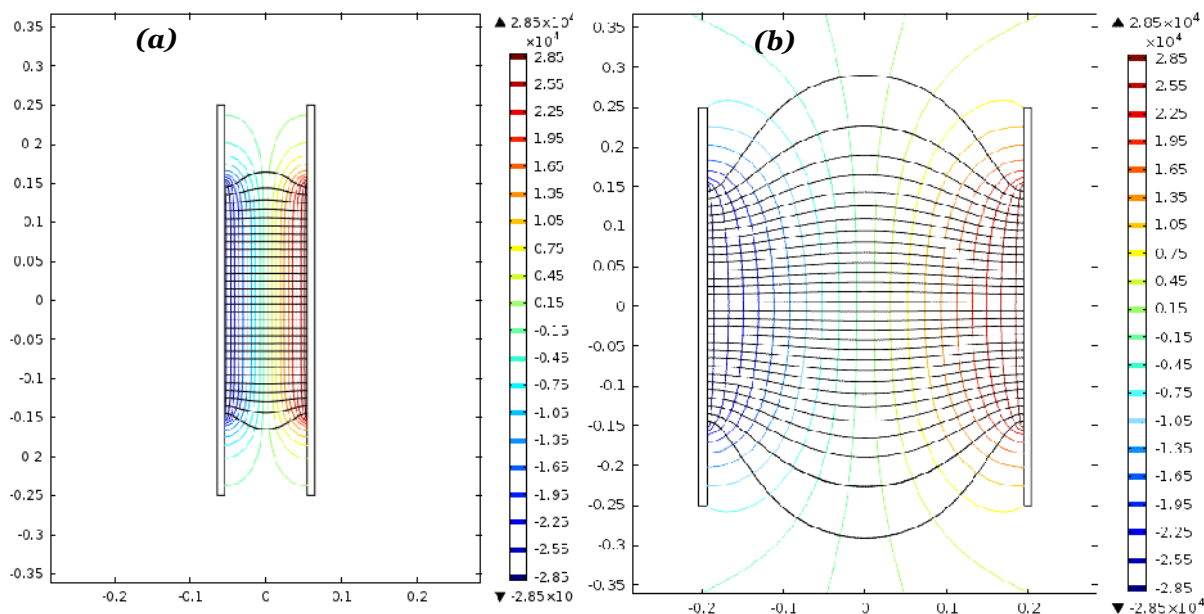
| Point N° | x  | y                                       |
|----------|--|---|
| 0        | $\frac{-d_1}{2}$   | 0                                       |
| 1        | $x_0 - \sqrt{L_1^2 - y_1^2}$                                       | $-L_1 \cos(\alpha)$                     |
| 2        | $x_0 - \sqrt{(L_1 + L_2)^2 - y_2^2}$                               | $-(L_1 + L_2) \cos(\alpha)$             |
| 3        | $x_0 - \left( \frac{(L_1 + L_2 + L_3)^2 - y_3^2}{2} \right)^{0.5}$ | $-(L_1 + L_2 + L_3) \cos(\alpha)$       |
| 4        | $x_3$  | $-(L_1 + L_2 + L_3) \cos(\alpha) - d_2$ |
| 5        | $-x_4$   | $y_4$                                   |
| 6        | $-x_3$   | $y_3$                                   |
| 7        | $-x_2$   | $y_2$                                   |
| 8        | $-x_1$   | $y_1$                                   |
| 9        | $-x_0$   | $y_0$                                   |

La définition du domaine d'étude est assurée par un module de discrétisation (Maillage) dont le rôle consiste à déterminer l'ensemble des nœuds et des éléments qui composent ce domaine. Les résultats de calcul et leurs présentations graphiques assurées respectivement par le module processeur et post-processeurs du logiciel COMSOL sont présentés dans la figure 3.17.

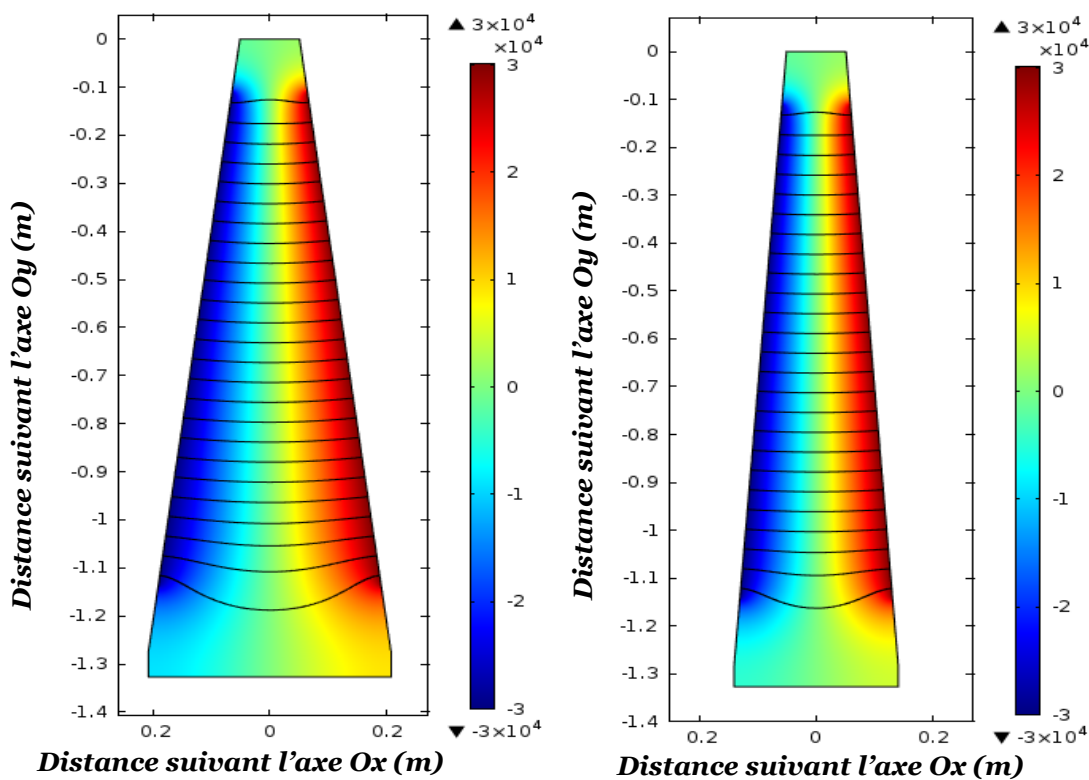
Cette figure nous montre la distribution du potentiel dans deux plans différents :  $y_1 = L_1 \cos(\alpha)$  ; et  $y_2 = -(L_1 + L_2) \cos(\alpha)$ . À l'entrée du séparateur les particules traversent le premier plan  $y_1$ , cette zone est caractérisée par une faible distance inter électrode. Cela engendre l'apparition d'une forte graduation de potentiel ainsi qu'un champ électrostatique intense. Au cours de leur chute libre les particules sont soumises à un champ électrostatique de plus en plus faible.

Au voisinage du plans  $z=0$  ; les lignes du champ électrostatique sont perpendiculaires aux électrodes de l'installation. Dans cette zone la composante  $E_z$  du champ électrostatique est négligeable devant la composante  $E_x$  donc l'étude de la trajectoire des particules dans un séparateur à chute libre peut être réduite à une étude de la trajectoire en 2D dans le plan  $z=0$ . Le résultat de la modélisation du champ électrostatique en 2D dans le plan  $z=0$  est représenté par la figure 3.18. Cette

figure nous montre le champ dans deux configurations différentes caractérisées par une inclinaison des électrodes de  $7^\circ$  et  $4^\circ$ .



**Figure 3.17 :** Distribution de potentiel et lignes du champ électrostatique (a) au niveau supérieur et (b) inférieur de l'électrode haute tension



**Figure 3.18 :** Lignes du champ électrostatique et distribution du potentiel électrique dans le plans  $Z=0$  du séparateur à chute libre ; (a) : inclinaison des électrodes  $\alpha=7^\circ$  ; (b) : inclinaison des électrodes  $\alpha=4^\circ$

### 3.2.2 Résultats de simulation

Le mouvement des particules dans le plan  $z = 0$  d'un séparateur à chute libre est régi par l'équation de mouvement (3.3) obtenue par la substitution de (2.5),(2.5)et(2.10) dans l'équation (2.9)

$$m \frac{dv}{dt} = QE_x(x, y) - \frac{1}{2} C_f S_p \rho_{air} v(x, y) v_x(x, y) \quad (3.3.1)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = -mg + QE_y(x, y) - \frac{1}{2} C_f S_p \rho_{air} v(x, y) v_y(x, y) \quad (3.3.2)$$

#### ➤ Influence du rapport Charge/Masse

Pour simuler l'influence du rapport Charge/Masse, nous avons maintenu la différence du potentiel  $\Delta U$  à 60(kV) ; la position initiale de la particule a (0,0) ; la vitesse initiale de la particule a 0 (m/s) ; le rayon de la particule à 2mm ; coefficient de frottement particule/air  $C_f = 0$  ; la densité volumique de la particule 1100 (kg/m<sup>3</sup>) la masse de la particule dans ce cas est calculée à partir du volume et la masse volumique. Dans chaque simulation la trajectoire d'une particule est calculée pour une valeur fixe du rapport Charge/Masse. Les valeurs choisies dans cette simulation sont : 10 (nC/g) ; 7.5 (nC/g) ; 5 (nC/g) ; 2.5 (nC/g). Les résultats sont présentés dans la figure 3.19.

La déviation horizontale des particules égale à -0.206 (m) pour 7.5 (nC/g) ; -0.139 (m) pour 5 (nC/g) et -0.069 (m) pour 2.5 (nC/g). Dans cette simulation la valeur maximale de la déviation horizontale est obtenue avec des rapports Charge/Masse de l'ordre de 7.5 (nC/g). Pour éviter les phénomènes de collisions particules / Electrode, la charge doit être inférieure à la valeur mentionnée.

#### ➤ 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. La figure 3.20 nous montre les résultats de simulation obtenus avec différentes valeurs de vitesse initiale suivant l'axe  $Oy$  : 0(m/s) ; -1(m/s) ; -2(m/s). Les résultats obtenus nous montrent que la projection des particules avec une grande vitesse vers le collecteur, engendre une diminution de leurs déviations par rapport à l'axe de symétrie. La déviation obtenue pour une vitesse de 0 (m/s) est de l'ordre de -0.139 (m) ; avec une vitesse de -2 (m/s) la déviation devient -0.08 (m) et pour -4 (m/s) la déviation diminue jusqu'à -0.04 (m).

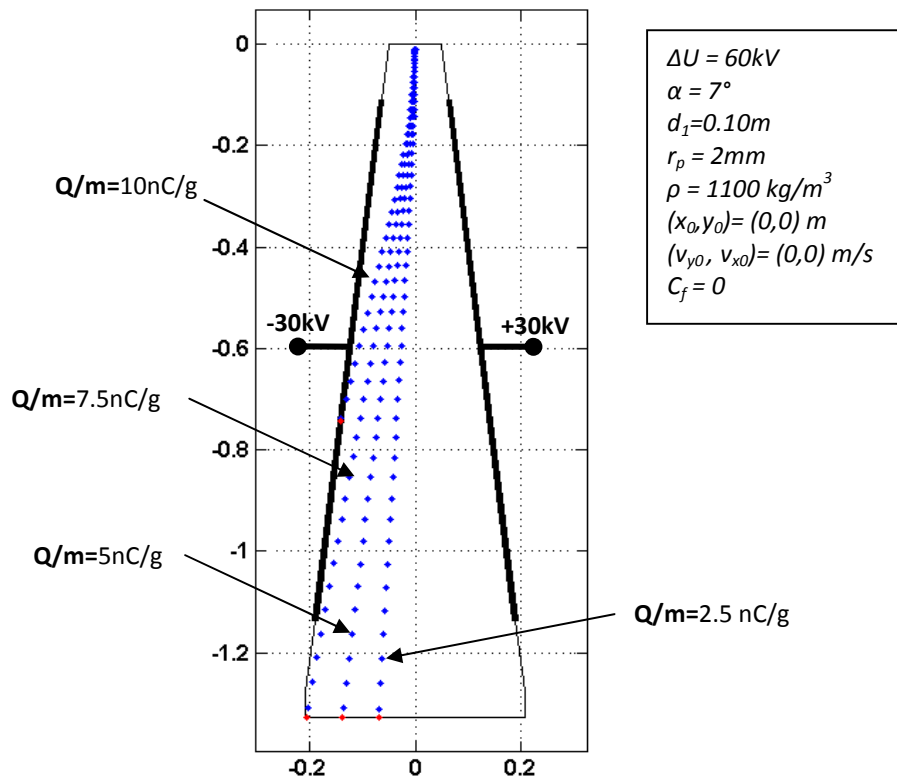
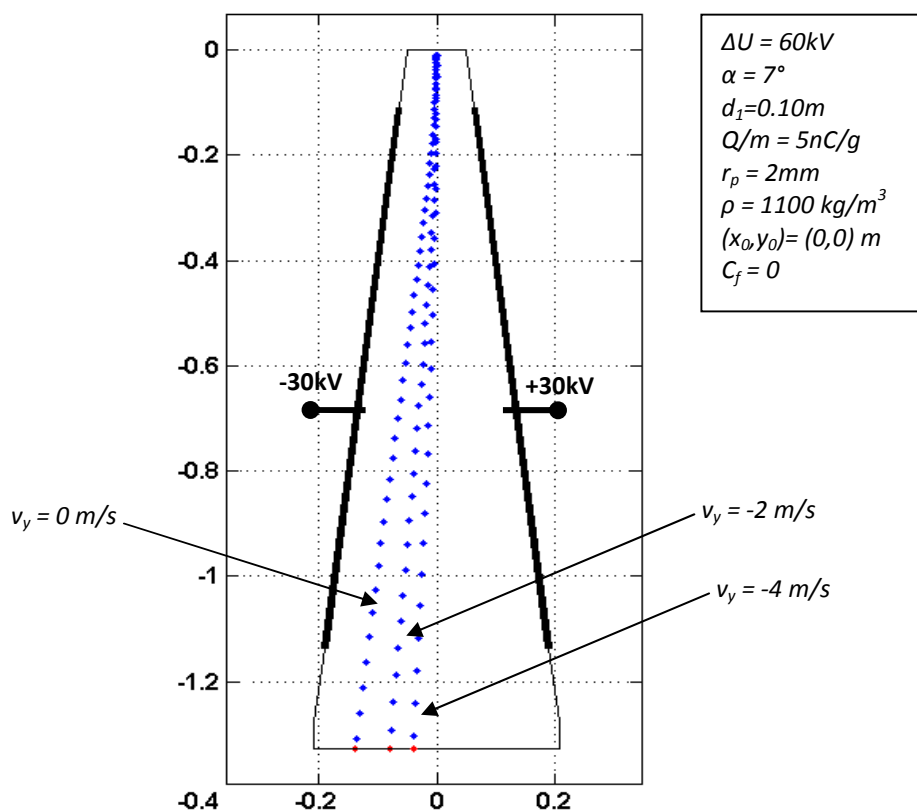


Figure3.19 : Trajectoire des particules en fonction du rapport Q/m Entré des



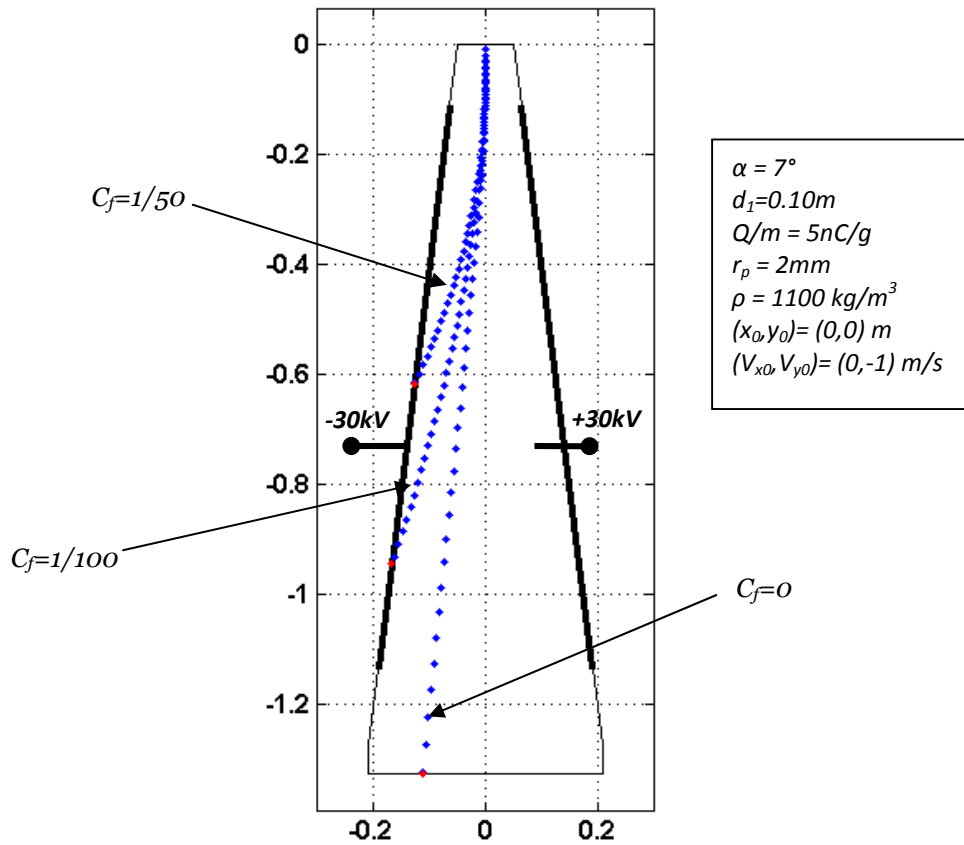


**Figure 3.20 :** Trajectoire des particules en fonction de la vitesse initiale de la particule

Les résultats de simulation nous montrent que la vitesse initiale influence considérablement la trajectoire des particules ainsi leur position dans le collecteur. Donc, au cours de l'exploitation de ce type d'installation il serait plus raisonnable de réserver une partie du travail au développement d'un système d'alimentation qui permet de réduire la vitesse des particules à l'entrée du séparateur.

### ➤ Influence du Coefficient de frottement Particule/l'air

Le coefficient de frottement particule/air est un paramètre lié à la forme de la particule et à la nature de l'écoulement de l'air au voisinage de la particule au cours de leur mouvement. La force de frottement particule/air est proportionnelle à la valeur du coefficient de frottement. La figure 3.21 montre les résultats de simulation obtenus avec différentes valeurs de  $C_f$ . Ces résultats nous montrent que le temps de séjour des particules dans la zone de séparation dépend de la valeur de leurs coefficients de frottement.

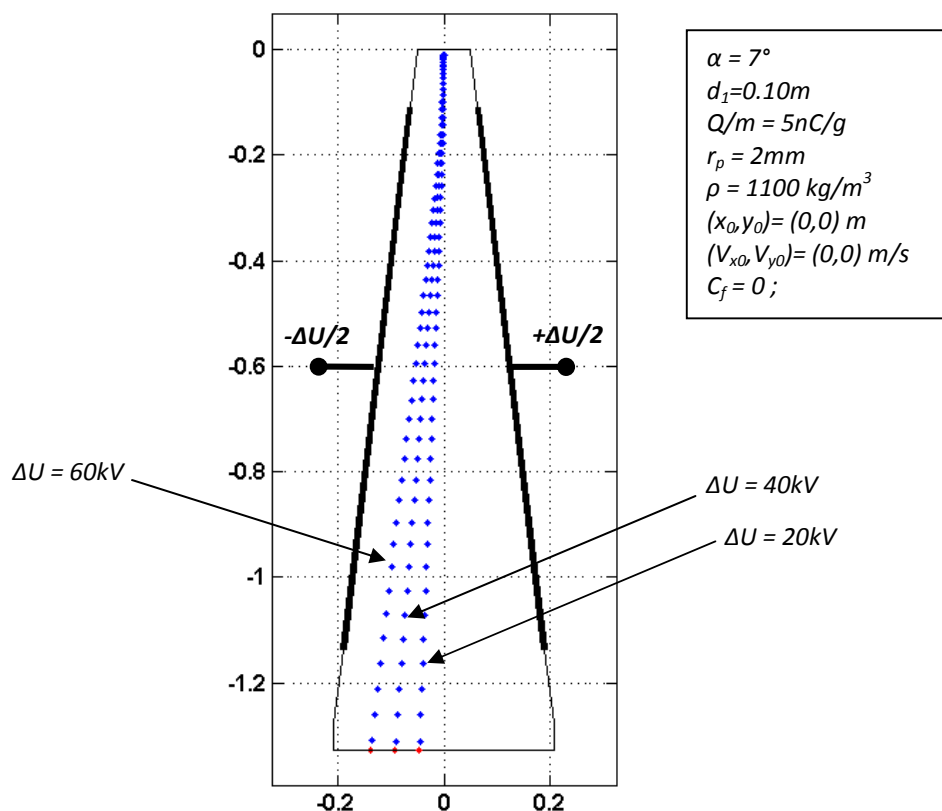


**Figure 3.21 :** Trajectoire des particules en fonction de coefficient de frottement Particule/Air

Un temps de séjour important est équivalent à une application de la force électrostatique pendant une période plus longue. Donc une déviation plus importante. Pour un coefficient de frottement  $C_f=1/50$  ; la particule entre en collision avec l'électrode au point  $(-0.1267m, -0.6164m)$  pour une valeur de  $C_f=1/100$  la particule entre en collision avec l'électrode au point  $(-0.1664m, -0.9401m)$  et pour  $C_f=0$  la particule tombe directement dans le collecteur a une distance de  $(-0.1122m)$  par rapport à l'axe de symétrie.

### ➤ Influence de la différence de potentiel appliquée aux électrodes

La figure 3.22 représente les résultats de calcul de la trajectoire des particules en fonction de différentes valeurs de potentiel appliquées aux électrodes de l'installation. Les valeurs utilisées dans cette simulation sont  $\pm 10(kV)$  ;  $\pm 20(kV)$  et  $\pm 30(kV)$ .



**Figure 3.22** : Trajectoire des particules en fonction de la différence de potentiel appliqué aux électrodes

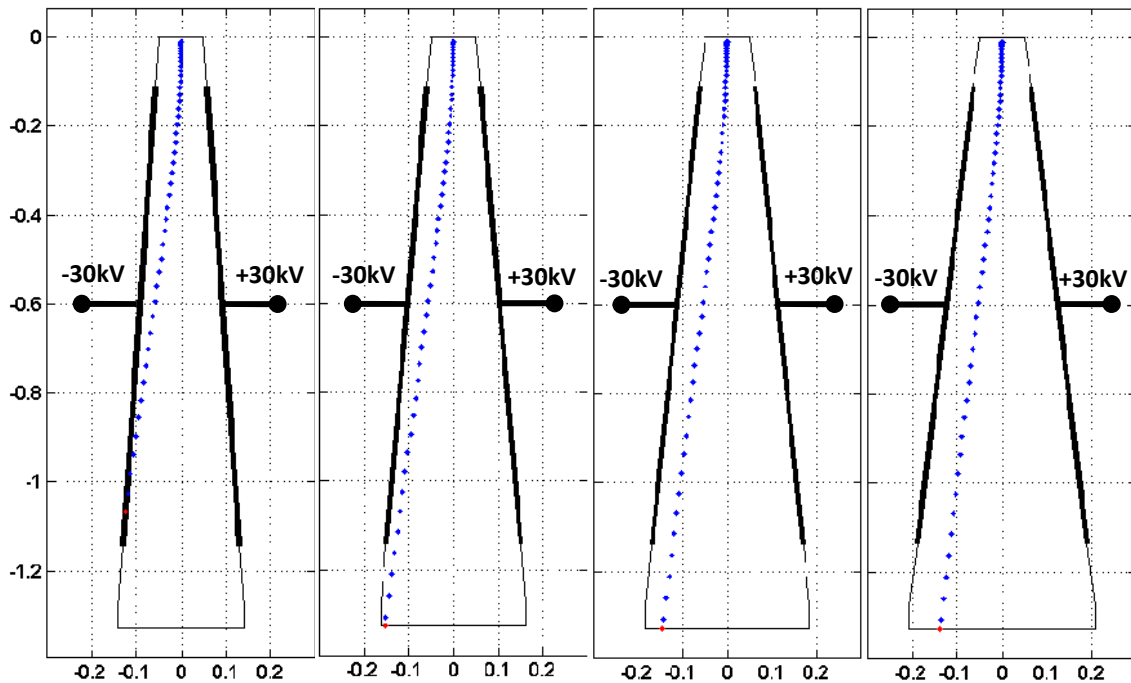
Les résultats de simulation nous montrent que l'élévation de la différence de potentiel engendre une augmentation de la déviation des particules par rapport à l'axe de symétrie de l'installation. Pour  $\pm 10(kV)$  la déviation est de l'ordre de  $-0.046(m)$  ; pour  $\pm 20(kV)$  elle est de l'ordre de  $-0.091(m)$  et pour  $\pm 30(kV)$  la déviation égale  $-0.137(m)$ .

En premier lieu, on peut dire qu'une augmentation de la différence de potentiel est souhaitée pour obtenir une bonne séparation. Cependant, une augmentation excessive de la différence de potentiel en présence des particules caractérisées par un rapport élevé de Charge/Masse peut provoquer des collisions entre particules et électrode cela influe considérablement la qualité du produit récupéré à la sortie du séparateur. Il faut rappeler aussi que l'augmentation excessive de la valeur de la tension provoque aussi des claquages de l'air dans l'espace inter électrode.

### ➤ Influence de l'inclinaison des électrodes

La figure 3.23 nous montre les résultats de calcul de la trajectoire pour différente valeur de l'inclinaison des électrodes. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de l'inclinaison provoque la diminution de la déviation horizontale

des particules par rapport à l'axe de symétrie de l'installation. Pour une inclinaison  $\alpha = 5^\circ$  la déviation est de l'ordre de  $-0.153$  (m) ; pour  $\alpha = 6^\circ$  la déviation est  $-0.146$  (m) ; pour  $\alpha = 7^\circ$  la déviation diminue jusqu'au  $-0.139$  (m).

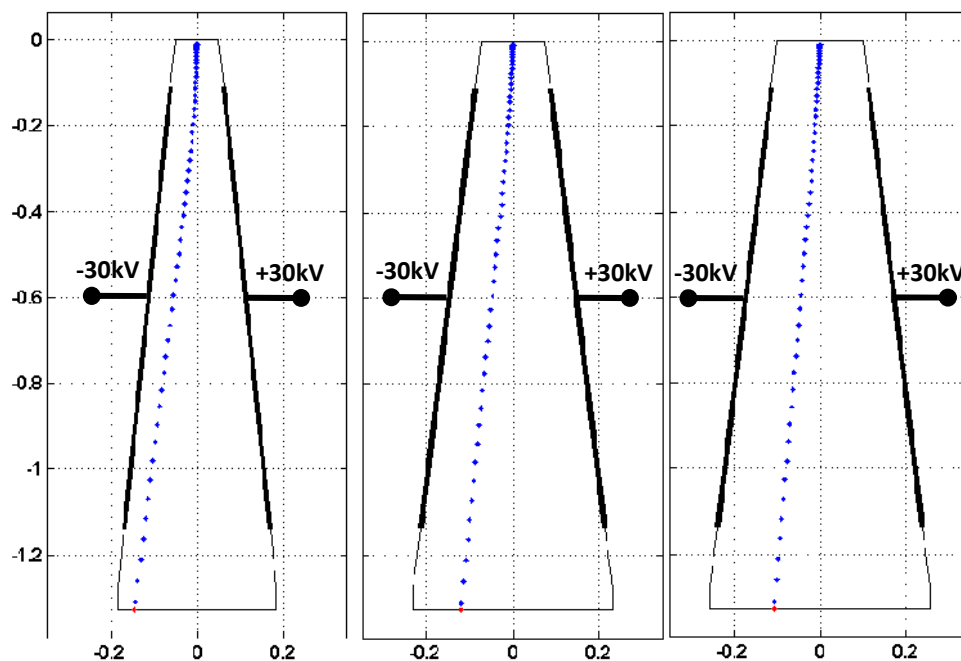


**Figure 3.23** : Trajectoire des particules en fonction de l'inclinaison des électrodes

Le résultat obtenu nous montre aussi que le choix d'une faible valeur de l'inclinaison provoque la collision des particules suffisamment chargées avec les électrodes de l'installation. Pour une inclinaison  $\alpha = 4^\circ$ , une particule dont les caractéristiques cinématiques et électriques sont mentionnées dans la figure 3.23 peut entrer en collision avec l'électrode de l'installation. Le point de collision dans ce cas est définie par  $(x,y) = (-0.126 \text{ m}, -1.065 \text{ m})$ . Donc pour avoir une bonne séparation on doit choisir une faible valeur d'inclinaison qui donne un maximum de déviation et qui évite en même temps la collision des particules avec les électrodes de l'installation.

### ➤ Influence de la distance inter électrode

Dans l'installation du laboratoire les électrodes sont réalisées avec des feuilles en aluminium collées sur des plaques en plexiglass. Les plaques sont suspendues sur deux axes rotatifs la partie supérieure de chaque plaque est fixée à l'un des axes rotatifs. Dans ce cas la distance inter électrode est définie en fonction de la distance  $d_l$  qui sépare les axes de rotations des électrodes.



**Figure 3.24** : Trajectoire des particules en fonction de la distance inter électrode

Les résultats de simulations obtenues pour différentes valeurs de  $d_1$  nous montrent que l'augmentation de la distance engendre une diminution de la déviation des particules par rapport à l'axe de symétrie de l'installation. Pour  $d_1 = 0.10(m)$  la déviation est de l'ordre de  $-0.146(m)$  pour une distance de  $d_1 = 0.15(m)$  la déviation atteint  $-0.12m$  et pour une distance  $d_1 = 0.2(m)$  la déviation diminue jusqu'à  $-0.106(m)$ .

### 3.3 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 tel que le rapport charge/masse de la particule ; l'intensité et la direction du champ électrostatique ; les paramètres cinématique initial de la particule ; ....etc.

La méthode la plus évidente utilisée dans l'amélioration de la qualité des produits récupérés au niveau du collecteur consiste à augmenter la distance qui sépare les positions finales des produits de charge opposés. Cette solution peut être obtenue par : - Une augmentation du rapport Charge/masse de la particule qui peut être obtenue par une réduction de la taille des particules afin de réduire leurs masse

et d'augmenter leurs surface utile (surface de contact) au cours du chargement triboélectrique ; - Une augmentation de l'intensité et la durée d'application du champ électrostatique.

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.

---

# CHAPITRE 4 : VALIDATION EXPERIMENTALE DES RESULTATS DE SIMULATION

Le présent chapitre traite principalement les matériaux et les méthodes utilisées dans l'étude expérimentale de la trajectoire des particules en plastiques dans un séparateur électrostatique à chute libre et un séparateur à tapis convoyeur. Les dispositifs de chargements et les installations de séparation électrostatique utilisées dans cette étude sont des prototypes d'installation industrielle réalisée au sein des laboratoires APELEC & IRECOM de l'université de Sidi Bel Abbès/Algérie.

Le travail expérimental est suivi par une quantification de la qualité des modèles physiques de la trajectoire des particules présenté dans le chapitre 3. La qualité des modèles est obtenue par une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulation fournie par les modèles physiques.

## **4.1 Etude expérimentale de la trajectoire des particules dans un séparateur à chute libre**

### **4.1.1 Séparateur électrostatique**

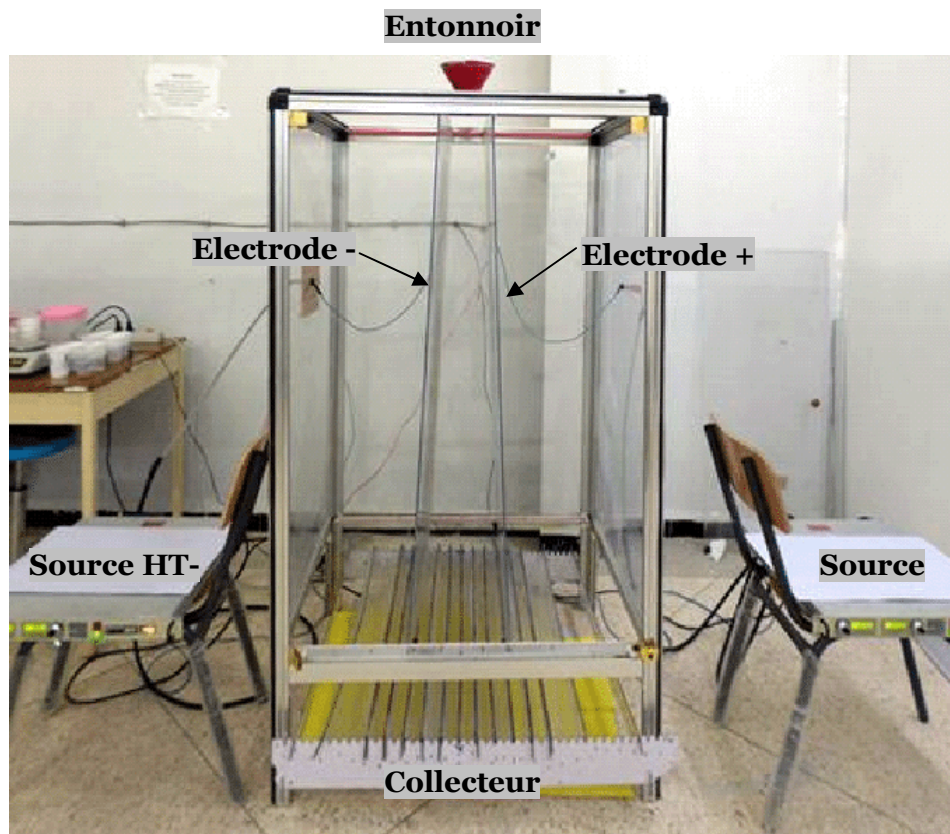
Pour effectuer une étude expérimentale du comportement des particules en plastique dans un séparateur à chute libre nous avons utilisé un modèle de laboratoire (figure 4.1). Cette installation est constituée par les éléments suivants :

1 - Une tour fermée en plexiglass ;

2- Deux électrodes en aluminium collées sur deux plaques en plexiglass. Les deux plaques sont suspendues à l'intérieur de la tour sur deux axes pivotants. La distance horizontale entre les axes est ajustable. Ce mécanisme va nous permettre d'ajuster l'inclinaison des plaques par rapport à l'axe vertical et en même temps la distance inter électrode. Les deux électrodes sont reliées, aux sources de haute tension à courant continu de polarité inverse. La tension des sources utilisées dans cette étude varie de 0 à  $\pm 30$  kV.

3- Un collecteur à plusieurs cellules démontables : ce type de collecteur nous permet de quantifier la charge, la masse et la taille des particules à une déviation connue caractérisée par la position des parois de chaque cellule du collecteur.

4- Un entonnoir de forme conique terminé par un tube reçoit les particules venant du dispositif de chargement afin de les guider en chute libre dans la zone de séparation électrostatique. L'entonnoir permet d'introduire les particules dans le séparateur avec une vitesse horizontale nulle.



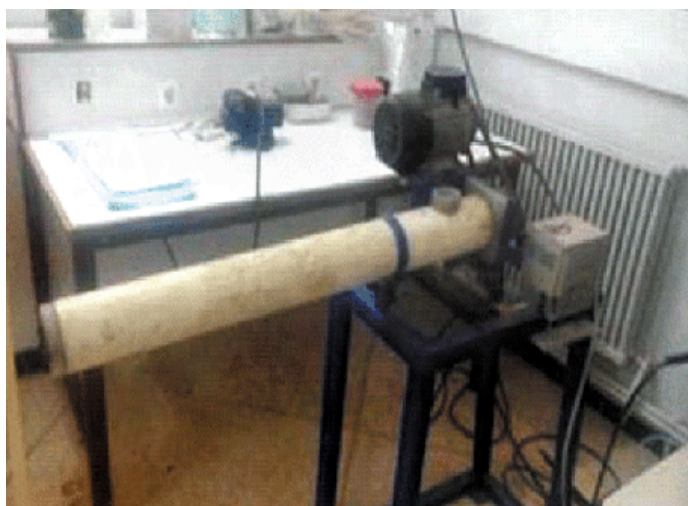
*Figure 4.1 : Photographie du séparateur à chute libre*

#### 4.1.2 Chargeur triboélectrique

Dans cette étude le chargement des particules par effet triboélectrique est produit à l'aide d'un convoyeur à vis (figure 4.2) conçu au sein du laboratoire IRECOM de l'université de Sidi Bel Abbés.

Le convoyeur est constitué d'une vis en matière isolante centrée à l'intérieur d'un tube de même matière fixé sur un support métallique. La vis est entraînée à une vitesse de rotation constante à l'aide d'un moteur triphasé alimenté par un variateur de fréquence. L'inclinaison du convoyeur est ajustée à une valeur de  $0^\circ$  par rapport au plan horizontal.

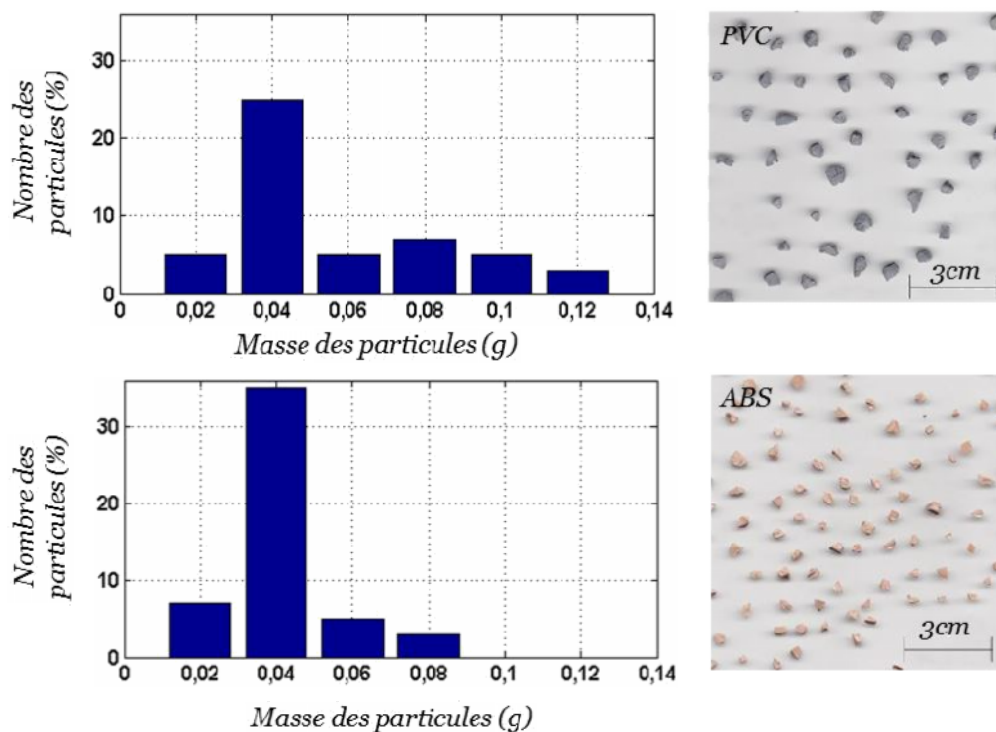




**Figure 4.2:** Convoyeur à vis

### 4.1.3 Mélange granulaire

Dans l'ensemble des expériences, nous avons utilisé un mélange granulaire de deux produits constitué de 50(g) de Chlorure de polyvinyle (PVC) rigide et 50 (g) de l'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS).



**Figure 4.3 :** Distribution de la masse des particules de l'ABS et PVC

Le PVC est un polymère thermoplastique dont la densité volumique est de l'ordre de (1190 kg/m<sup>3</sup> à 1410 kg/m<sup>3</sup>); la rigidité du PVC 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. 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'autres. Il est recyclable et peut se fabriquer dans de multiples finitions et couleurs.[1]

L'ABS est un thermoplastique couramment utilisé pour rendre léger, rigide, des produits moulés ; sa densité volumique varie entre ( $1040\text{kg}/\text{m}^3$  et  $1060\text{kg}/\text{m}^3$ ) ses propriétés fondamentales étant la ténacité, la résistance aux chocs et la dureté superficielle, il est surtout employé dans la fabrication de meubles, éléments pour l'industrie automobile, les coques d'appareils électro-ménagers, jouets, ordinateurs, châssis de téléviseurs, radios et autres[1].

Pour obtenir la distribution de la masse des particules de chaque produit nous avons mesuré la masse de 50 particules. Dans chaque mesure la masse d'une particule ( $m$ ) est estimée à partir de la masse totale de 10 particules ( $m_{10}$ ) choisies aléatoirement à partir d'un gisement de particules de même nature. La masse totale de 10 particules ( $m_{10}$ ) est mesurée à l'aide d'une balance électronique de haute résolution (0.001g) (figure 4.3). Les résultats obtenus sont groupés dans un tableau de calcul (tableau 3.1) ensuite présentés sous forme d'un histogramme (figure 3.2).



**Figure 4.4** : Balance électronique

**Tableau 4.1** : Masse des particules

| N° | ABS (g) | PVC (g) |
|----|---------|---------|
| 1  | 0,0711  | 0,0869  |
| 2  | 0,065   | 0,0416  |
| 3  | 0,0725  | 0,0319  |
| ⋮  | ⋮       | ⋮       |
| 48 | 0,0289  | 0,0304  |
| 49 | 0,0268  | 0,0394  |
| 50 | 0,0224  | 0,03    |

### 4.1.3 Procédure expérimentale

Cette étude vise à l'analyse expérimentale de la liaison qui existe entre le déplacement horizontal des particules par rapport à l'axe de symétrie de l'installation, l'intensité et la direction des forces agissent sur les particules au cours

de leurs mouvements du point de départ (c'est-à-dire la sortie de l'entonnoir) jusqu'au point final (c'est-à-dire la position finale de la particule dans le collecteur).

Dans cette étude on s'intéresse aux facteurs qui apparaissent dans l'équation de mouvement d'une façon direct ou indirect et qui sont mesurables avec les moyennes disponibles dans notre laboratoire. Les résultats obtenus sont comparés ensuite avec les résultats de simulation.

Revenons à l'équation de mouvement des particules (3.3) on remarque que la trajectoire des particules ainsi que leurs déviations par rapport à l'axe de symétrie de l'installation dépend de l'intensité de la force électrostatique, gravitationnelle et aérodynamique appliquée à ces particules.

Le banc d'essais utilisé dans cette étude nous donne la possibilité de contrôler l'intensité et la direction du champ électrostatique appliqué aux particules dans la zone limitée par le point d'alimentation qui représente le point de référence ( $ox$ ,  $oy$ ) et le collecteur positionné à une hauteur de  $-1.27$  m par rapport au point de référence.

L'intensité et la direction du champ électrostatique dans cette zone sont ajustées par l'action sur : la valeur de la haute tension appliquée aux électrodes et leurs inclinaisons par rapport à l'axe de symétrie de l'installation.

La charge acquise par les particules représente un autre facteur qui apparait dans l'équation de mouvement de la particule et qui influe sur l'intensité de la force électrostatique. Ce facteur est incontrôlable donc dans l'ensemble des expériences, on se contente à estimer la charge acquise par les particules par une méthode de mesure indirecte. Cette méthode consiste à mesurer le rapport Charge/Masse du produit récupéré dans chaque cellule. Ce rapport est considéré en tant que valeur moyenne du rapport Charge/Masse des particules récupérées de la même cellule.

Dans l'ensemble des expériences, l'intensité de la force gravitationnelle et aérodynamique sont imposées par la gamme du produit utilisé dans chaque expérience. A ce niveau, Il faut rappeler que pour le même type de produit il y a une dispersion de la masse et la taille des particules (figure 4.4).

Théoriquement les particules de masse et de taille différente sont sollicitées par des forces gravitationnelles et aérodynamiques différentes. Dans cette étude nous nous contentons de quantifier cette dispersion (c'est-à-dire la dispersion de la taille et la masse des particules) avant et après la séparation.

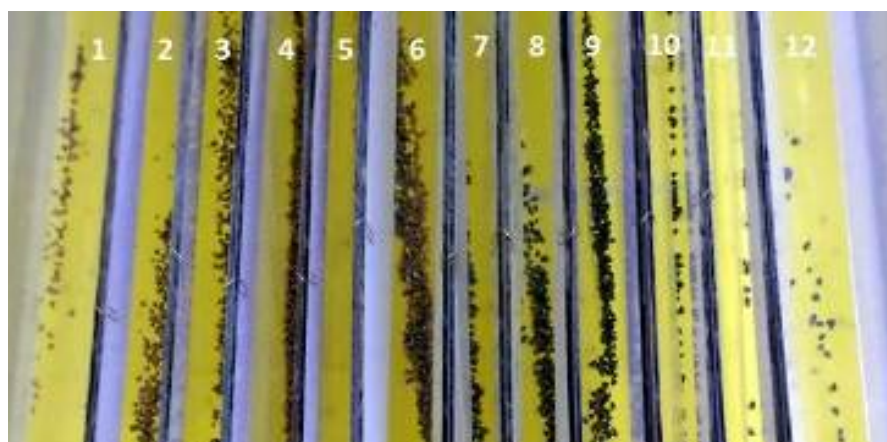
---

D'après les informations disponibles et les informations nécessaires à la validation du modèle physique de la trajectoire nous avons défini un domaine expérimental en fonction de deux facteurs : la différence de potentiel appliquée entre les électrodes de l'installation  $\Delta U$  (V) et l'inclinaison de ces électrodes par rapport à l'axe vertical  $\alpha$  (°). Après quelques essais préliminaires nous avons défini le domaine expérimental caractérisé par l'ensemble des points regroupés dans le tableau 4.2

**Tableau 4.2 : Domaine expérimental**

| <b>Expérience<br/>N°</b> | <b><math>\alpha</math> (°)</b> | <b><math>\Delta U</math> (kV)</b> |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| <b>1</b>                 | 7                              | 60                                |
| <b>2</b>                 | 7                              | 30                                |
| <b>3</b>                 | 4                              | 60                                |
| <b>4</b>                 | 4                              | 30                                |

Dans chaque expérience, un mélange de 50g de PVC et 50g d'ABS pré chargé par triboélectrification puis introduit dans la zone de séparation électrostatique à l'aide d'un entonnoir. Au cours de leurs mouvement dans la zone de séparation électrostatique les particules chargées positivement sont attirées vers l'électrode de polarité négative et les particules chargées négativement sont attirées vers l'électrode de polarité positive. La figure 4.4 nous montre la distribution du produit dans le collecteur après un essai préliminaire.



**Figure 4.5 :** Distribution du produit ABS/PVC dans le collecteur après la séparation électrostatique

Pour quantifier la charge des particules en fonction de leurs déviations par rapport à l'axe de symétrie de l'installation, nous avons mesuré la masse et la charge totale du produit récupéré dans chaque cellule. La mesure de la charge du

produit récupéré dans une cellule, est réalisée à l'aide d'un seau de Faraday et un électromètre modèle Keithley6514 (figure 4.5).

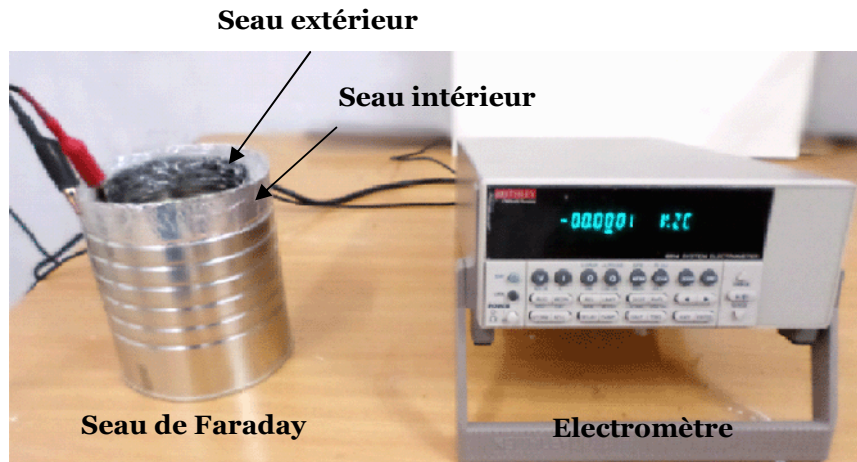


Figure 4.6 : Dispositif utilisé dans la mesure de la charge des particules.

Chaque expérience est répétée deux fois avec une polarité (positive/négative) et deux fois avec une polarité (négative/positive). Cette méthode est utilisée afin de réduire les erreurs liées à :

- la non uniformité de la charge des particules récupérées dans la même cellule ;
- la méthode utilisée dans la mesure de la charge des particules ;
- le déclin de charge en fonction du temps ;
- la dissymétrie de l'installation et du collecteur ;
- les phénomènes aléatoires dus aux collisions Particules / Electrodes et Particules/Parois du collecteur ;
- Mouvement aléatoire des particules du au frottement Particules/l'air et d'autres sources de perturbation.

#### 4.1.4 Discussions des résultats expérimentaux

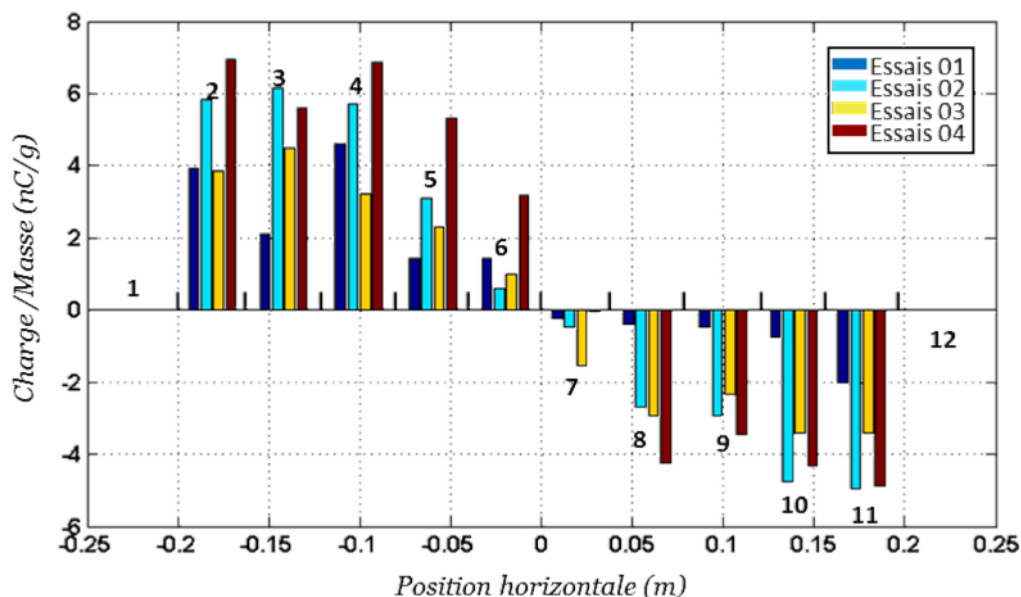
##### Expérience 1 : ( $\Delta U = 60 \text{ kV}$ ; $\alpha = 7^\circ$ )

L'expérience 01 est réalisée au point expérimentale définie par une différence de potentiel  $\Delta U = 60 \text{ kV}$  est une inclinaison  $\alpha = 7^\circ$ . Les résultats de mesure du rapport Charge/Masse du produit récupéré dans chaque cellule sont groupés dans le tableau 4.3.

**Tableau 4.3 :** Rapport Charge/Masse ( $nC/g$ ) du produit récupéré dans les cellules du collecteur ( $\Delta U = 60 \text{ kV}$ ,  $\alpha = 7^\circ$ )

| Position des cellules ( $\pm 0.005 \text{ m}$ ) |         |         | Essai 01 | Essai 02 | Essai 03 | Essai 04 | Moyenne |
|---|---------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|
| N°  | Min (m) | Max (m) |          |          |          |          |         |
| 1   | -0,3    | -0,2    | -        | -        | -        | -        | -       |
| 2   | -0,2    | -0,16   | 3,92     | 5,83     | 3,84     | 6,93     | 5,13    |
| 3   | -0,16   | -0,12   | 2,12     | 6,15     | 4,48     | 5,62     | 4,59    |
| 4   | -0,12   | -0,08   | 4,61     | 5,71     | 3,22     | 6,87     | 5,10    |
| 5   | -0,08   | -0,04   | 1,42     | 3,09     | 2,29     | 5,31     | 3,03    |
| 6   | -0,04   | 0       | 1,42     | 0,59     | 0,99     | 3,19     | 1,55    |
| 7   | 0       | 0,04    | -0,21    | -0,45    | -1,53    | -0,04    | -1,01   |
| 8   | 0,04    | 0,08    | -0,4     | -2,7     | -2,94    | -4,23    | -2,66   |
| 9   | 0,08    | 0,12    | -0,45    | -2,91    | -2,32    | -3,44    | -2,28   |
| 10  | 0,12    | 0,16    | -0,76    | -4,77    | -3,4     | -4,3     | -3,22   |
| 11  | 0,16    | 0,2     | -2,01    | -4,94    | -3,41    | -4,88    | -3,36   |
| 12  | 0,2     | 0,3     | -        | -        | -        | -        | -       |

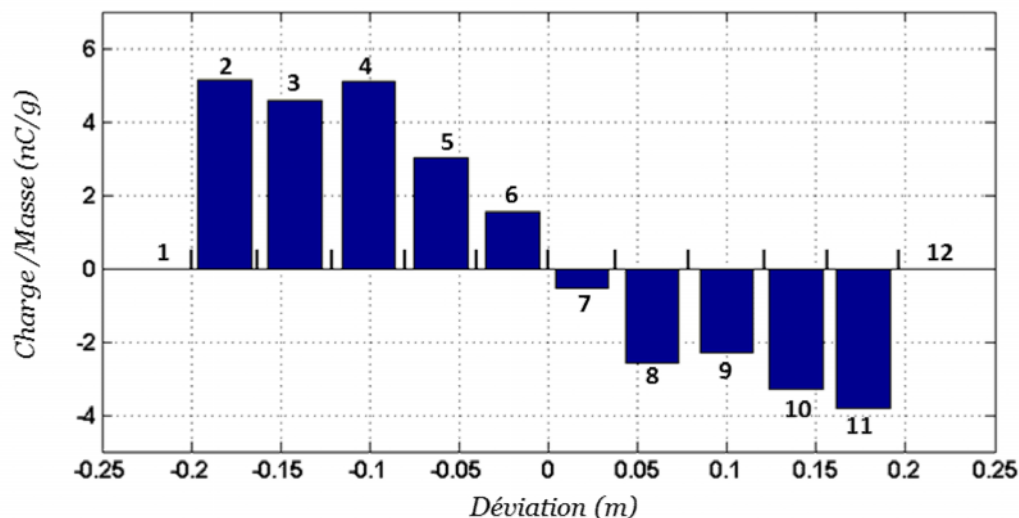
La figure 4.7 montre une comparaison entre les résultats obtenus dans l'ensemble des essais 1-4. La moyenne du rapport Charge/Masse calculée à partir de l'ensemble de ces essais est représentée dans la figure 4.8.



**Figure 4.7 :** Distribution du rapport charge /Masse du produit récupéré dans le collecteur (cellule 2-11)( $\Delta U = 60 \text{ kV}$ ,  $\alpha = 7^\circ$ )

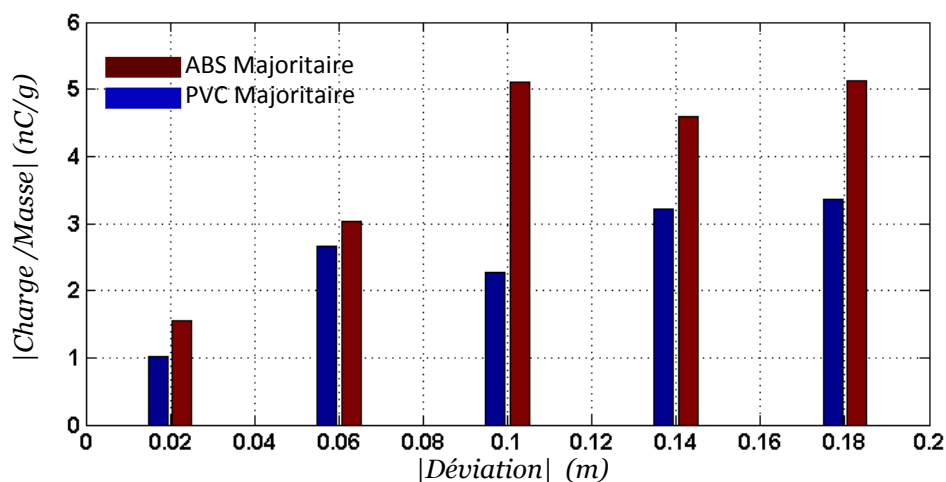
Les résultats expérimentaux affirment que les particules caractérisées par un rapport Charge/Masse élevé en valeur absolue sont récupérées dans les extrémités du collecteur (c'est-à-dire dans les cellules 2 et 11) ; et les particules caractérisées par un faible rapport Charge/Masse en valeur absolue sont récupérées dans les cellules qui

se trouvent au voisinage de l'axe de symétrie de l'installation (c'est-à-dire dans les cellules 6 et 7).



**Figure 4.8 :** Moyenne du rapport Charge/Masse du produit récupéré dans les cellule (2-11)( $\Delta U = 60 \text{ kV}$ ,  $\alpha = 7^\circ$ )

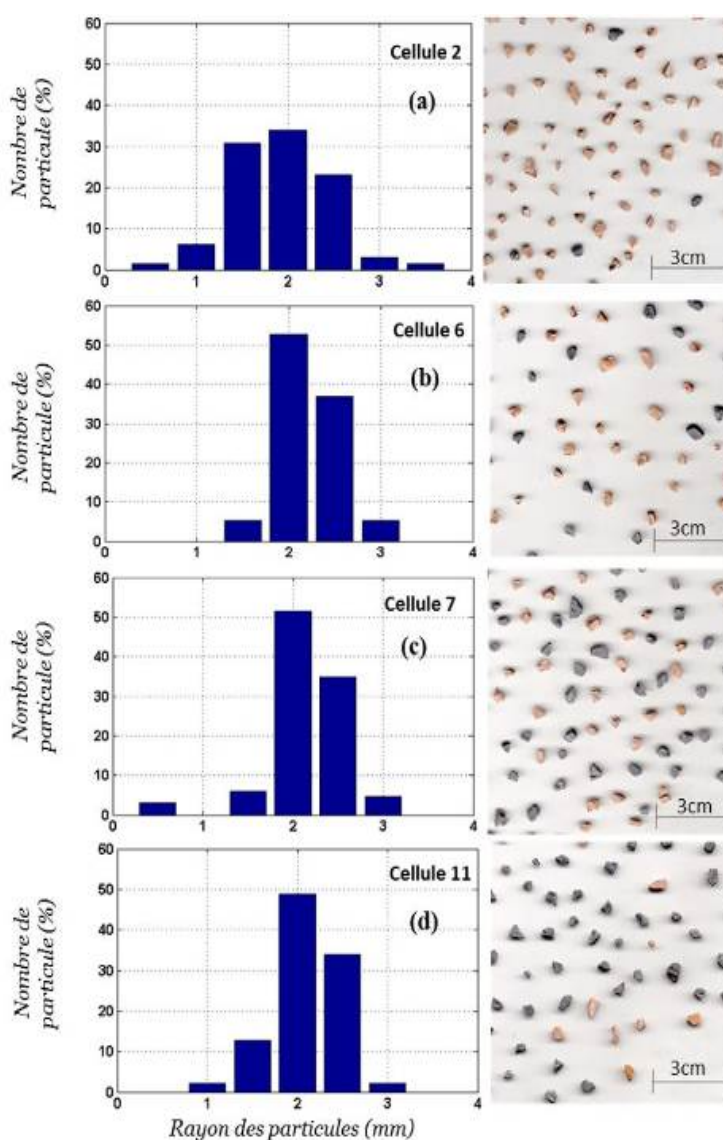
La figure 4.9 représente une comparaison entre les valeurs mesurées du rapport Charge/masse du produit récupéré dans les deux côtés du collecteur. Cette figure nous montre que la distribution du rapport charge/masse du côté gauche de l'axe de symétrie est différente par rapport à la distribution du côté droit cela est due à la différence qui existe au niveau de la nature des produits récupérés dans les deux côtés du collecteur.



**Figure 4.9 :** Moyenne du rapport Charge/Masse du produit récupéré dans les cellules (2-11)( $\Delta U = 60 \text{ kV}$ ,  $\alpha = 7^\circ$ )

Pour avoir plus d'information sur les produits récupérés dans chaque cellule du collecteur nous avons analysé la taille des particules à l'aide d'une méthode optique présentée dans le sous chapitre (*Procédure expérimentale*).

L'analyse de la taille du produit récupéré dans le premier essai (figure 4.10) montre que les particules d'ABS de faible taille représentent la majorité du produit récupérés à l'extrémité gauche du collecteur (figure 4.10.a). Les particules de PVC de faible taille représentent la majorité du produit récupéré à l'extrémité droite (figure 4.10.d). Un mélange de grosses particules (ABS+PVC) est récupéré autour de l'axe de symétrie figure 4.10.b-c



**Figure 4.10** : Rayon des particules récupérés dans les cellules du collecteur essais 01



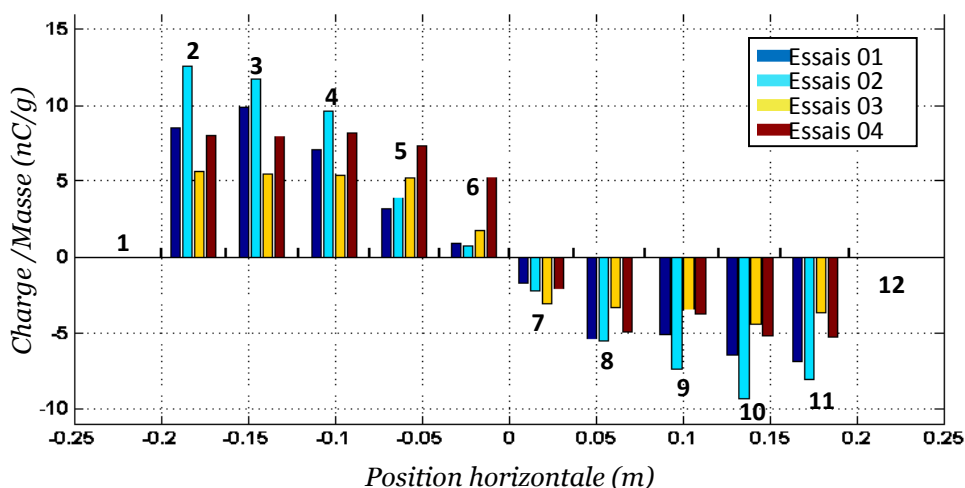
**Expérience 2 : ( $\Delta U = 30$  kV ;  $\alpha = 7^\circ$ )**

Cette expérience est réalisée avec le même échantillon (50g PVC et 50g ABS). Avec une valeur réduite de la différence de potentiel  $\Delta U = 30$  kV et la même valeur de l'inclinaison  $\alpha = 7^\circ$  nous avons obtenu les résultats groupés dans le tableau 4.4.

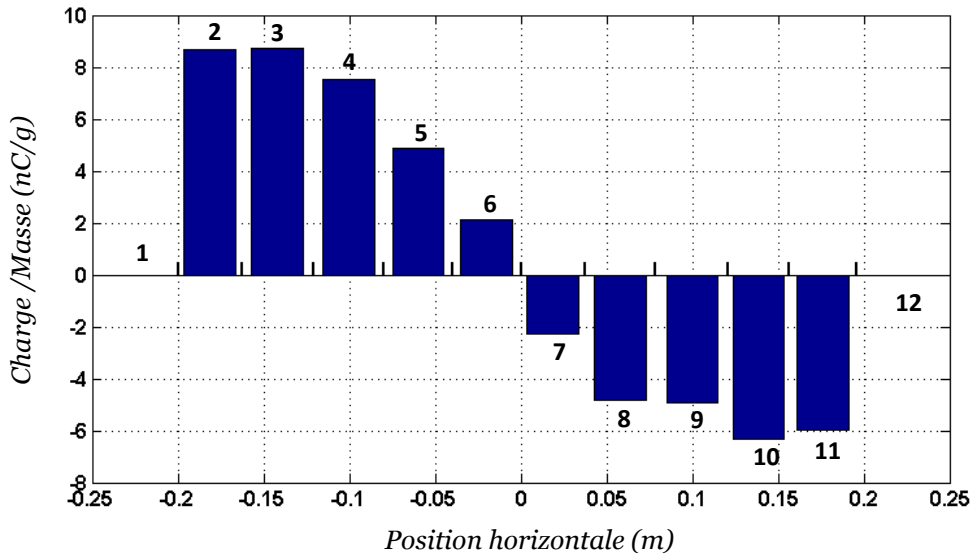
**Tableau 4.4 :** Rapport Charge/Masse (nC/g) du produit récupéré dans les cellules du collecteur ( $\Delta U = 30$  kV ,  $\alpha = 7^\circ$ )

| Position des cellules ( $\pm 0.005$ m) |         |         | Essais 01 | Essais 02 | Essais 03 | Essais 04 | Moyenne |
|--|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| N°                                     | Min (m) | Max (m) |           |           |           |           |         |
| 1                                      | -0,3    | -0,2    | -         | -         | -         | -         | -       |
| 2                                      | -0,2    | -0,16   | 8,46      | 12,54     | 5,64      | 8,03      | 8,67    |
| 3                                      | -0,16   | -0,12   | 9,79      | 11,70     | 5,48      | 7,95      | 8,73    |
| 4                                      | -0,12   | -0,08   | 7,02      | 9,58      | 5,42      | 8,14      | 7,54    |
| 5                                      | -0,08   | -0,04   | 3,16      | 3,91      | 5,14      | 7,37      | 4,90    |
| 6                                      | -0,04   | 0       | 0,87      | 0,75      | 1,70      | 5,26      | 2,15    |
| 7                                      | 0       | 0,04    | -1,72     | -2,25     | -3,08     | -2,10     | -2,29   |
| 8                                      | 0,04    | 0,08    | -5,41     | -5,59     | -3,34     | -4,93     | -4,82   |
| 9                                      | 0,08    | 0,12    | -5,09     | -7,33     | -3,46     | -3,78     | -4,92   |
| 10                                     | 0,12    | 0,16    | -6,45     | -9,28     | -4,40     | -5,18     | -6,33   |
| 11                                     | 0,16    | 0,2     | -6,89     | -8,02     | -3,68     | -5,25     | -5,96   |
| 12                                     | 0,2     | 0,3     | -         | -         | -         | -         | -       |

Les résultats obtenus (figures 4.11-12) montrent que la forme de la liaison entre le rapport Charge/Masse et la déviation reste la même, c'est-à-dire l'augmentation du rapport Charge/Masse engendre une augmentation de la déviation des particules par rapport à l'axe de symétrie.



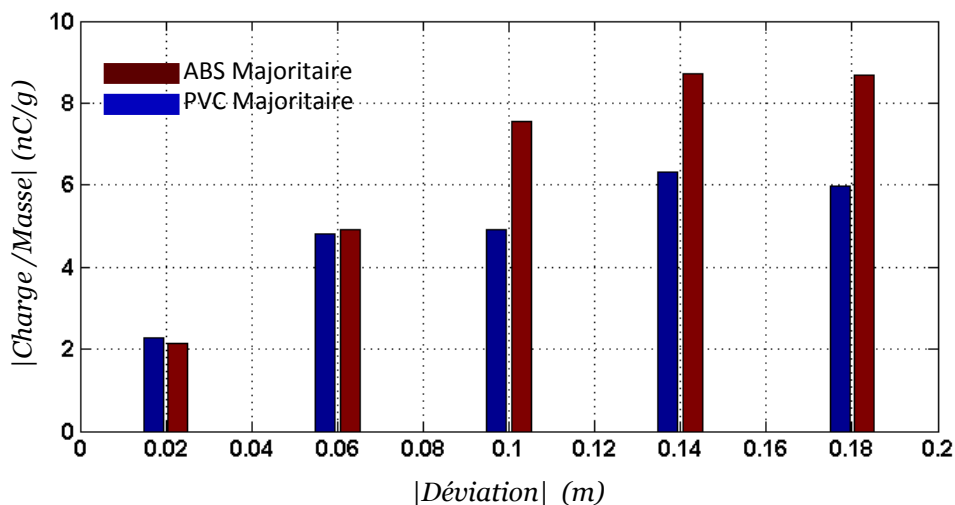
**Figure 4.11 :** Distribution du rapport charge /Masse du produit récupéré dans le collecteur (cellule 2-11) ( $\Delta U = 30$  kV ,  $\alpha = 7^\circ$ )



**Figure 4.12** : Moyenne du rapport Charge/Masse du produit récupéré dans les cellules (2-11) ( $\Delta U = 30 \text{ kV}$ ,  $\alpha = 7^\circ$ )

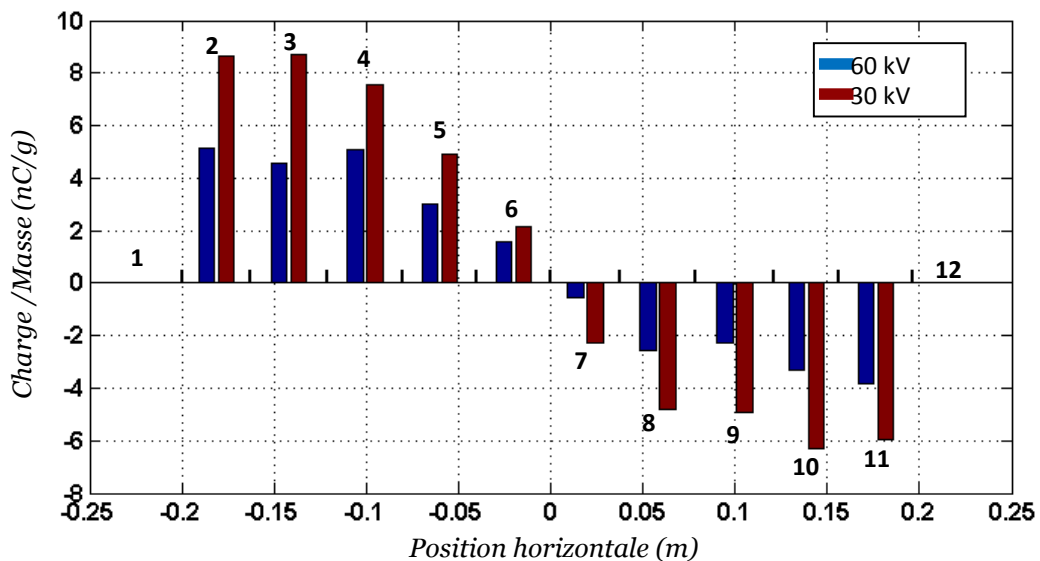
Dans cette expérience on remarque une dissymétrie au niveau de la valeur mesurée du rapport Charge/Masse (figure 4.13). Cette dissymétrie est due à la différence qui existe entre la nature des produits récupérés dans les deux côtés du collecteur. Dans les cellules 2-6 les particules en ABS sont majoritaires. Dans les cellules 7-11 les particules en PVC sont majoritaires.

Au cours de cette expérience nous avons remarqué que les particules de faible taille sont récupérées aux extrémités du collecteur, les particules de grosse taille sont récupérées au voisinage de l'axe de symétrie.



**Figure 4.13** : Moyenne du rapport Charge/Masse du produit récupéré dans les cellules (2-11)

La figure 4.14 nous montre l'influence de la différence de potentiel sur la distribution du rapport Charge/Masse dans les cellules du collecteur. Une augmentation de la différence de potentiel est accompagnée par une diminution au niveau des valeurs mesurées du rapport Charge/Masse. Par exemple dans une installation alimentée par une différence de potentiel de 60kV pour que les particules atteignent la cellule de leur rapport charge/masse doivent être aux alentours de 5nC/g .Si la même installation est alimentée par une différence de potentiel de 30kV. Pour que les particules gardent la même déviation il faut que leur rapport Charge/masse augmente à 8.6 nC/g. L'augmentation du rapport charge/masse des particules est liée généralement à l'augmentation des performances du processus de chargement triboélectrique.



**Figure 4.14** : Distribution du rapport charge/Masse en fonction de la différence de potentiel

Comme conclusion on peut dire que l'application de faibles valeurs de différence de potentiel doit être compensée par une augmentation du rapport charge/masse des particules dans l'étage de chargement par triboélectrification. Et vice-versa c'est-à-dire si la performance du processus de chargement est très faible nous devons la compenser par une augmentation de la différence de potentiel dans l'étage de séparation électrostatique.

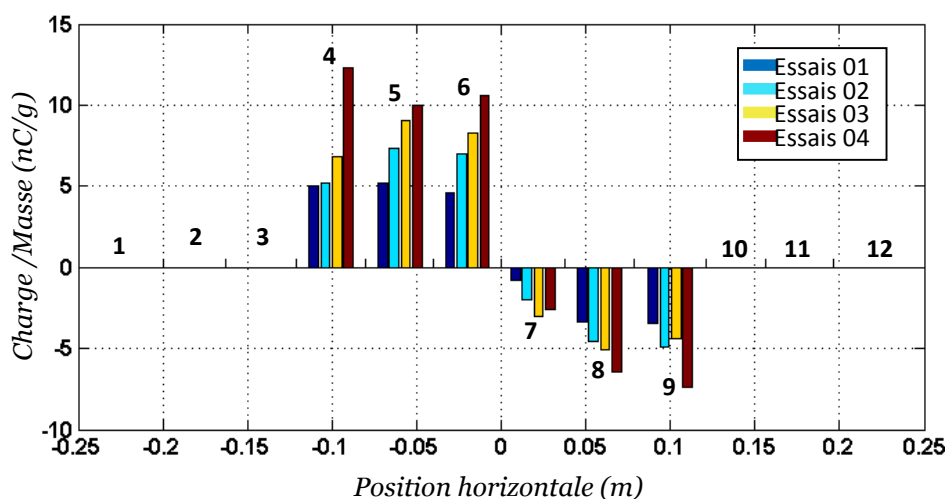
### Expérience 3 : ( $\Delta U = 60 \text{ kV}$ ; $\alpha = 4^\circ$ )

Dans l'expérience 3 nous avons réduit l'inclinaison des électrodes à  $4^\circ$ . Pour une différence de potentiel  $\Delta U = 60 \text{ kV}$  nous avons obtenu les résultats groupés dans

le tableau 4.5. Dans cette expérience nous avons remarqué que la diminution de l'inclinaison des électrodes provoque le recouvrement des cellules 1-3 et 10-12. La déviation maximale dans ce cas est de l'ordre de  $0.12m$  en valeur absolue.

**Tableau 4.5 :** Rapport Charge/Masse ( $nC/g$ ) du produit récupéré dans les cellule du collecteur ( $\Delta U = 60 kV$ ,  $\alpha = 4^\circ$ )

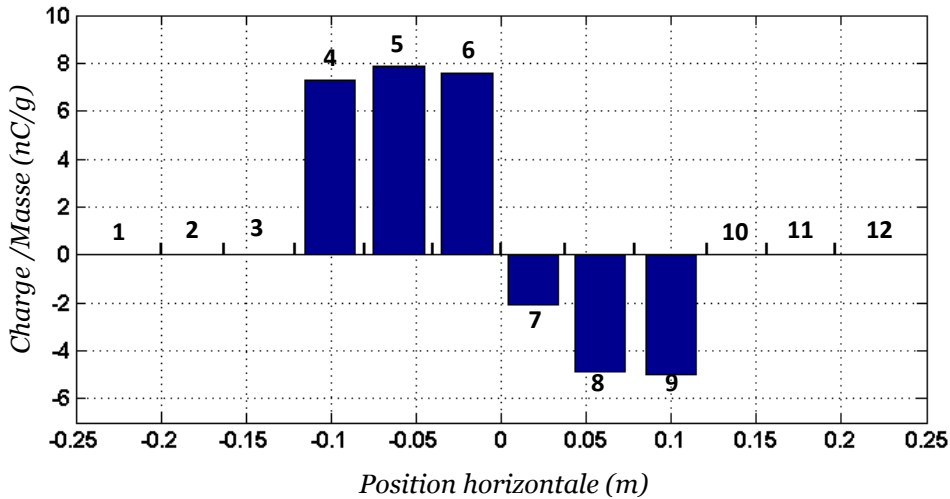
| Position des cellules ( $\pm 0.005 m$ ) |         |         | Essais 01 | Essais 02 | Essais 03 | Essais 04 | Moyenne |
|---|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| N°                                      | Min (m) | Max (m) |           |           |           |           |         |
| 1                                       | -0,3    | -0,2    | -         | -         | -         | -         | -       |
| 2                                       | -0,2    | -0,16   | -         | -         | -         | -         | -       |
| 3                                       | -0,16   | -0,12   | -         | -         | -         | -         | -       |
| 4                                       | -0,12   | -0,08   | 4,99      | 5,16      | 6,79      | 12,29     | 7,31    |
| 5                                       | -0,08   | -0,04   | 5,17      | 7,35      | 9,01      | 9,99      | 7,88    |
| 6                                       | -0,04   | 0       | 4,59      | 6,96      | 8,27      | 10,60     | 7,61    |
| 7                                       | 0       | 0,04    | -0,83     | -1,98     | -2,98     | -2,57     | -2,09   |
| 8                                       | 0,04    | 0,08    | -3,34     | -4,54     | -5,10     | -6,48     | -4,87   |
| 9                                       | 0,08    | 0,12    | -3,44     | -4,87     | -4,35     | -7,38     | -5,01   |
| 10                                      | 0,12    | 0,16    | -         | -         | -         | -         | -       |
| 11                                      | 0,16    | 0,2     | -         | -         | -         | -         | -       |
| 12                                      | 0,2     | 0,3     | -         | -         | -         | -         | -       |



**Figure 4.15 :** Distribution du rapport charge /Masse du produit récupéré dans le collecteur (cellule 4-9) ( $\Delta U = 60 kV$ ,  $\alpha = 4^\circ$ )

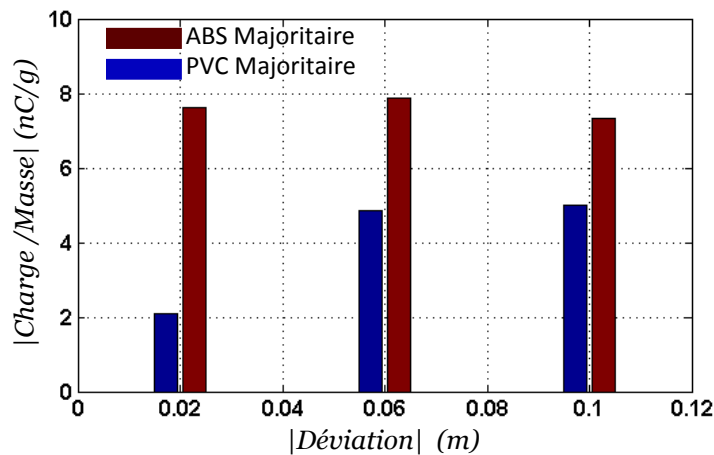
La valeur mesurée du rapport charge/masse dans l'ensemble des cellules 4-6 est presque constante (figure 4.16) ; cette valeur est de l'ordre de  $7.5 nC/g$ . Il y a deux hypothèses les plus probables qui peuvent être utilisées pour expliquer ce phénomène :

- 1- La différence qui existe au niveau de la taille et la forme des particules ;
- 2- L'apparition des collisions particules/ électrode qui provoque le retour des particules caractérisées par un rapport Charge/Masse élevé vers les cellules du centre.



**Figure 4.16 :** Moyenne du rapport Charge/Masse du produit récupéré dans les cellules (4-9) ( $\Delta U = 60 \text{ kV}$ ,  $\alpha = 4^\circ$ )

On compare les deux côtés du collecteur (figure 4.17) et on remarque que le rapport Charge/masse coté ABS est plus élevé que le rapport Charge/masse coté PVC. Ce phénomène a été observé dans tous les expériences.



**Figure 4.17 :** Moyenne du rapport Charge/Masse du produit récupéré dans les cellule (4-9) ( $\Delta U = 60 \text{ kV}$ ,  $\alpha = 4^\circ$ )

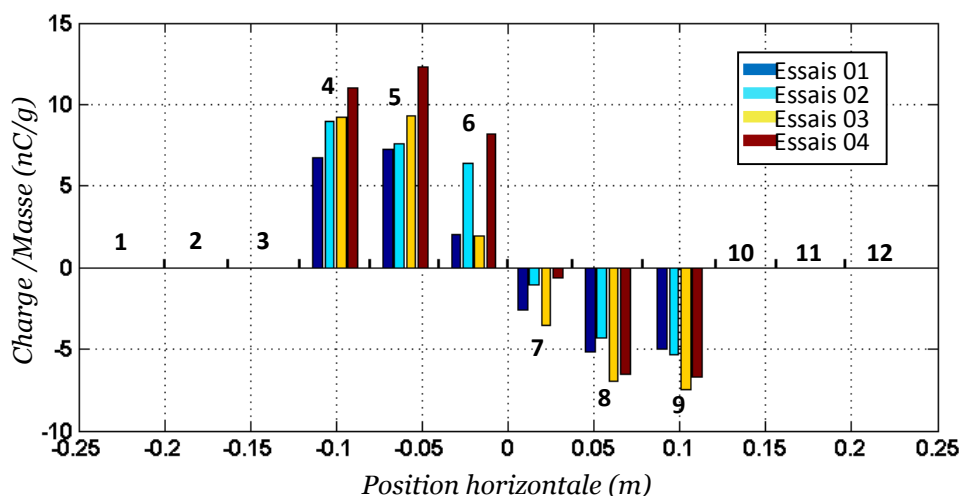
#### Expérience 4 : ( $\Delta U = 30 \text{ kV}$ ; $\alpha = 4^\circ$ )

Dans cette expérience nous avons gardé la même valeur de l'inclinaison  $\alpha = 4^\circ$  et nous avons diminué la tension appliquée aux électrodes pour obtenir une

différence de potentiel de 30kV. Les résultats obtenus dans cette configuration sont groupés dans le tableau 4.6. Le rapport Charge/masse obtenu dans les quatre essais est représenté graphiquement dans la figure 4.18. La moyenne de ces essais est représentée dans la figure 4.19.

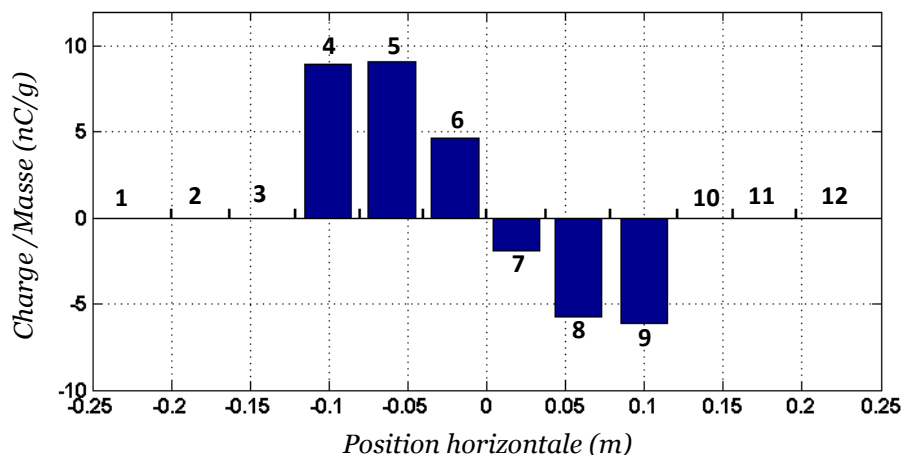
**Tableau 4.6** : Rapport Charge/Masse (nC/g) du produit récupéré dans les cellules du collecteur ( $\Delta U = 30 \text{ kV}$ ,  $\alpha = 4^\circ$ )

| N° | Position des cellules<br>( $\pm 0.005 \text{ m}$ ) |            | Essais<br>01 | Essais<br>02 | Essais<br>03 | Essais<br>04 | Moyenne |
|----|--|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------|
|    | Min<br>(m)   | Max<br>(m) |              |              |              |              |         |
| 1  | -0,3   | -0,2       | -            | -            | -            | -            | -       |
| 2  | -0,2   | -0,16      | -            | -            | -            | -            | -       |
| 3  | -0,16  | -0,12      | -            | -            | -            | -            | -       |
| 4  | -0,12  | -0,08      | 6,70         | 8,93         | 9,25         | 11,02        | 8,98    |
| 5  | -0,08  | -0,04      | 7,26         | 7,56         | 9,34         | 12,31        | 9,12    |
| 6  | -0,04  | 0          | 2,02         | 6,40         | 1,98         | 8,16         | 4,64    |
| 7  | 0  | 0,04       | -2,60        | -1,02        | -3,52        | -0,60        | -1,94   |
| 8  | 0,04   | 0,08       | -5,18        | -4,27        | -6,95        | -6,53        | -5,73   |
| 9  | 0,08   | 0,12       | -5,01        | -5,36        | -7,50        | -6,69        | -6,14   |
| 10 | 0,12   | 0,16       | -            | -            | -            | -            | -       |
| 11 | 0,16   | 0,2        | -            | -            | -            | -            | -       |
| 12 | 0,2  | 0,3        | -            | -            | -            | -            | -       |

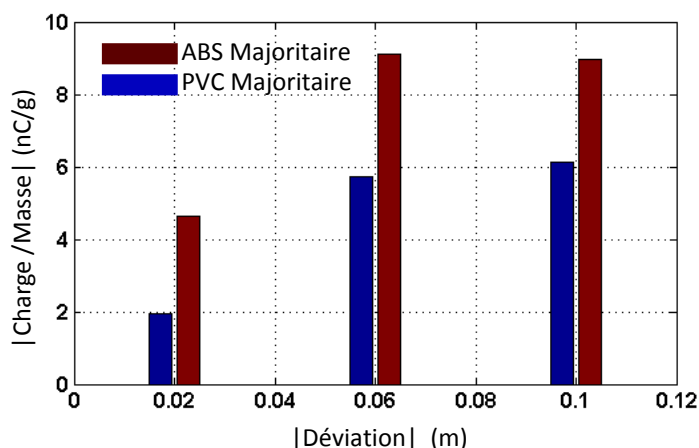


**Figure 4.18** : Distribution du rapport charge /Masse du produit récupéré dans le collecteur (cellule 4-9)( $\Delta U = 30 \text{ kV}$ ,  $\alpha = 4^\circ$ )

Dans cette figure les particules caractérisées par un rapport Charge/masse de signe opposé sont récupérées dans les deux côtés de l'axe de symétrie de l'installation. Le rapport Charge/masse dans les cellules du côté gauche est plus élevé par rapport aux cellules du côté droit du collecteur (figure 4.20).



**Figure 4.19** : Moyenne du rapport Charge/Masse du produit récupéré dans les cellules (4-9) ( $\Delta U = 30$  kV,  $\alpha = 4^\circ$ )



**Figure 4.20** : Moyenne du rapport Charge/Masse du produit récupéré dans les cellules (4-9) ( $\Delta U = 30$  kV,  $\alpha = 4^\circ$ )

Dans cette expérience pour que les particules gardent la même valeur de la déviation (c'est-à-dire la même valeur de l'intensité de la force électrostatique suivant l'axe  $Ox$ ) elles doivent composer la diminution de l'intensité du champ électrostatique par une augmentation de leurs charges massiques. La même remarque a été notée au cours de la comparaison des résultats obtenus dans l'expérience 1 et 2.

### 4.1.5 Validation expérimentale des résultats de simulations

Pour valider le modèle théorique de la trajectoire nous avons simulé le comportement de plusieurs particules. Dans chaque simulation les paramètres d'une particule sont choisis d'une façon aléatoire à partir des intervalles définie dans le tableau 1

**Tableau 4.7** : Plage de variation des paramètres de la particule utilisée dans la simulation

| Paramètre de la particule               | Min  | Max |
|---|------|-----|
| Position initial de la particule (cm)   | -1   | 1   |
| Vitesse initial de la particule (m/s)   | 0.5  | 1.5 |
| Direction de la vitesse initiale (°)    | -2   | 2   |
| Facteur de forme (-)                    | 0.3  | 1   |
| Rayon de la particule (mm)              | 1    | 3   |
| Masse de la particule (mg)              | 0.1  | 4   |
| Charge massique de la particule (uC/kg) | -5.5 | 5.5 |

Après la simulation nous avons groupé les particules en fonction de leurs positions dans les cellules du collecteur. Ensuite nous avons calculé la charge massique du produit récupéré dans chaque cellule les résultats de simulation sont présenté dans le tableau 2.

Pour quantifier l'erreur de simulation nous avons comparé l'écart entre les valeurs mesurées et simulées par rapport à l'écart maximal mesuré.

$$Erreur = 100 \frac{|Qm_{exp} - Qm_{sim}|}{\max[\Delta Qm_{exp}]} \quad (4.3.1)$$

$$\max[\Delta Qm_{exp}] = 5.13 + 3.36 = 8.49 \mu C / kg \quad (4.3.2)$$

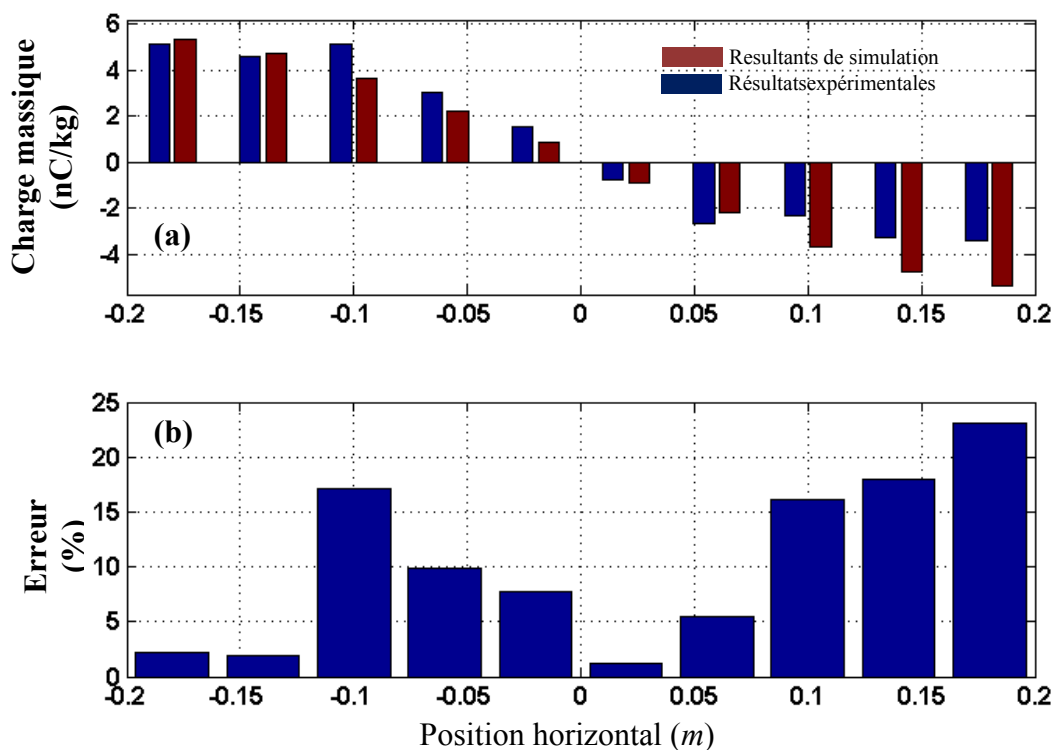
Le tableau 2 et la figure 4.25 nous montrent que l'erreur du modèle est inférieure à 10% dans les quatre cellules situées au centre du collecteur c'est-à-dire de -8 cm à +8 cm autour de l'axe de symétrie. Le même modèle donne une approximation de la charge massique avec une erreur inférieur à 20% dans une plage



de  $x = -20\text{cm}$  jusqu'à  $x = 18\text{cm}$ . En calculons la moyenne d'erreur sur tous les cellules c'est-à-dire de  $x = -20\text{cm}$  jusqu'à  $x = 20\text{cm}$  on obtient une erreur de 10.3%.

**Tableau 4.8:** Comparaison entre résultats de simulation et résultats expérimentales

| Centre des cellules (m) | $(Q/m)_{exp}$ (nC/g) | $(Q/m)_{sim}$ (nC/g) | Erreur (%) |
|-------------------------|----------------------|----------------------|------------|
| -0,18                   | 5,13                 | 5,32                 | 2,24       |
| -0,14                   | 4,59                 | 4,75                 | 1,90       |
| -0,10                   | 5,10                 | 3,65                 | 17,14      |
| -0,06                   | 3,03                 | 2,19                 | 9,88       |
| -0,02                   | 1,55                 | 0,89                 | 7,81       |
| 0,02                    | -0,78                | -0,89                | 1,26       |
| 0,06                    | -2,66                | -2,19                | 5,52       |
| 0,10                    | -2,28                | -3,65                | 16,08      |
| 0,14                    | -3,22                | -4,75                | 18,03      |
| 0,18                    | -3,36                | -5,32                | 23,09      |
| Moyenne                 |                      |                      | 10.3%      |



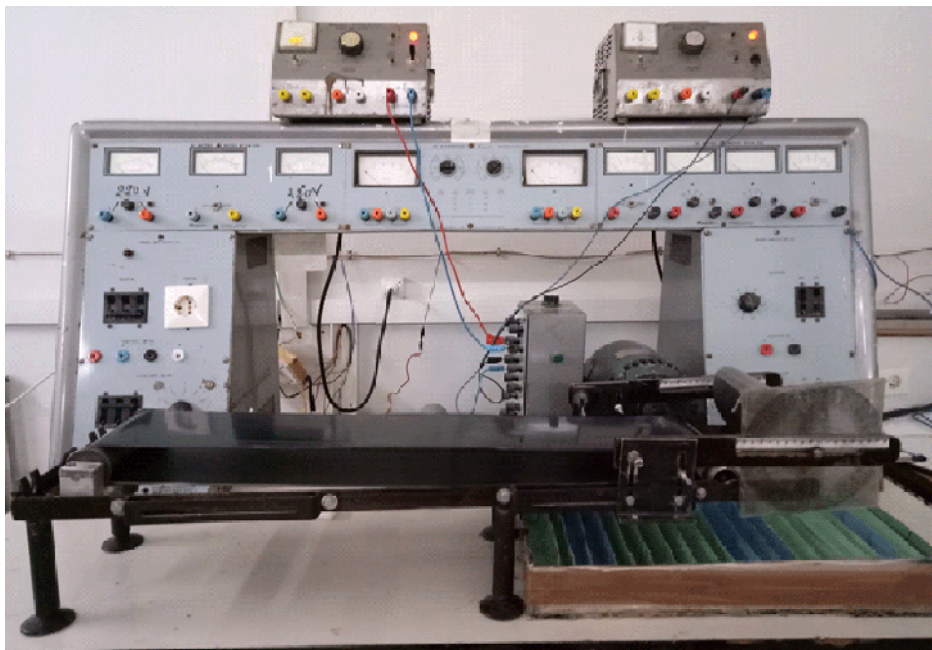
**Figure 4.21 :** (a) : La distribution de la charge massique expérimentale et simulé ; (b) : Erreur du modèle de simulation.

## 4.2 Etude expérimentale de la trajectoire des particules dans un séparateur à tapis convoyeur

Cette étude vise l'analyse expérimentale de la liaison qui existe entre la position des particules en plastique dans le collecteur et l'intensité et la direction des forces agissent sur les particules au cours de leurs mouvements du point de départ (le point d'alimentation en produit granulaire) jusqu'au point final (c'est-à-dire la position finale de la particule dans le collecteur).

### 4.2.1 Séparateur électrostatique

Le processus de séparation électrostatique utilisé dans cette étude (figure 4.22) nous donne la possibilité de contrôler l'intensité et la direction du champ électrostatique appliqué aux particules ainsi que leurs vitesses tangentielles au point de détachement. La direction de la vitesse des particules dans ce cas est liée à la position du point de détachement.



*Figure 4.22: Photographie du séparateur a tapis convoyeur*

Dans l'ensemble des expériences les particules du mélange sont chargées par triboélectrification dans un convoyeur à vis sans fin (figure 4.2). Les particules pré chargé par triboélectrification sont déposées d'une façon continue sur la surface du tapis convoyeur. Au cours de leurs mouvements dans la zone de séparation électrostatique les particules chargées négativement sont attirées vers l'électrode statique alimentée par une source de polarité positive. Les particules chargées

positivement adhérent à la surface du tapis pour être évacué ensuite vers la partie gauche du collecteur. La (figure 4.23) nous montre un résultat type de la séparation du mélange PVC/ABS.



**Figure 4.23:** Résultats de séparation ABS/PVC obtenue par un séparateur à tapis convoyeur

Cette partie du travail vise l'étude expérimentale de la position des particules dans le collecteur en fonction de la différence de potentiel appliquée entre les électrodes de l'installation  $\Delta U(V)$  et l'inclinaison de ces électrodes par rapport à l'axe vertical  $\alpha(^{\circ})$  et la vitesse tangentielle du tapis convoyeur  $n(m/s)$ . Après quelques essais préliminaires nous avons défini un espace d'étude caractérisé par les niveaux des facteurs groupés dans le tableau 4.9

**Tableau 4.9 :** Niveaux des facteurs utilisés dans l'étude expérimentale de la trajectoire des particules dans un séparateur à tapis convoyeur

|                        | <i>Min</i> | <i>Moy</i> | <i>Max</i> |
|------------------------|------------|------------|------------|
| <b><i>n (cm/s)</i></b> | 23,22      | 46,44      | 69,66      |
| <b><i>α (°)</i></b>    | 30         | 40         | 50         |
| <b><i>U (kV)</i></b>   | 15         | 20         | 25         |

#### 4.2.2 Discussion des résultats expérimentaux

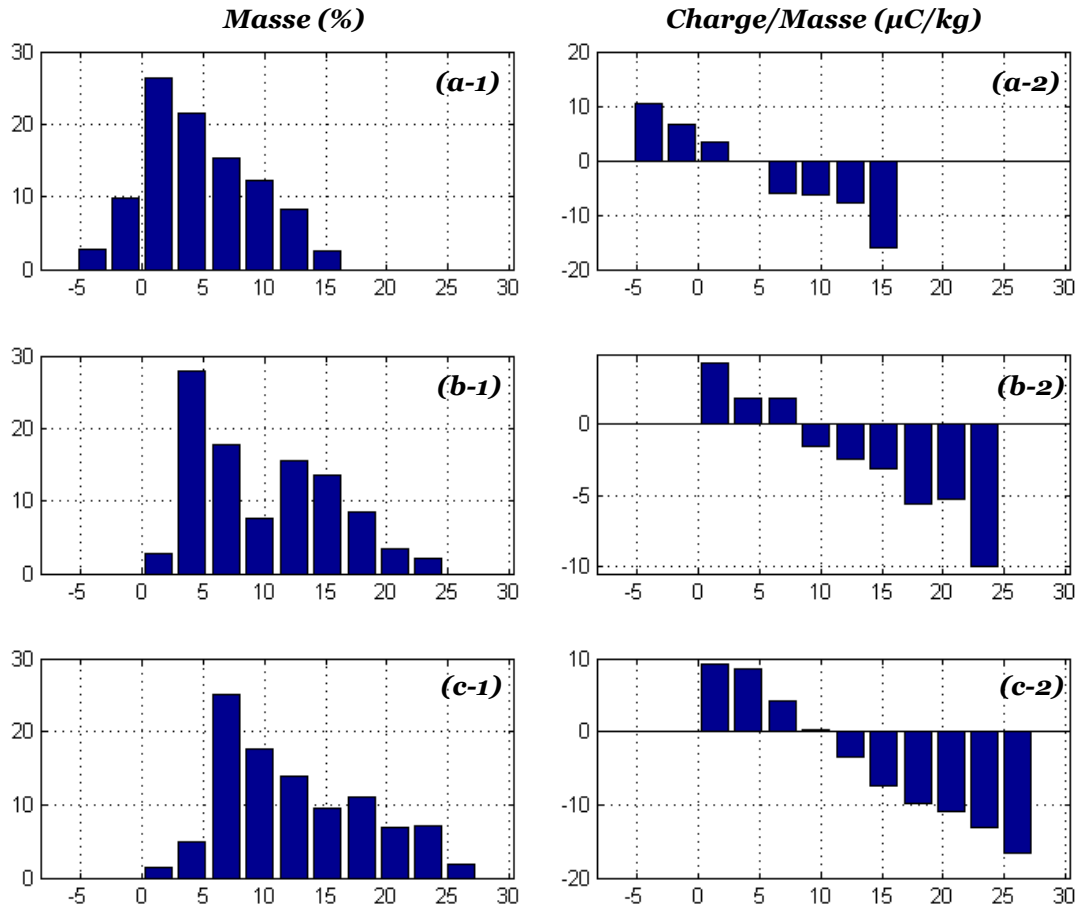
Dans chaque expérience un mélange granulaire de 50% de PVC et 50% d'ABS est introduit dans le convoyeur à vis afin de subir un chargement triboélectrique. Le produit récupéré à la sortie est déposé d'une façon continue sur la surface du tapis convoyeur. Après la séparation la masse et la charge total du produit récupéré dans chaque cellule est mesuré à l'aide d'une balance électronique et un seau de Faraday.



Tableau 4.11: Rapport Charge/masse (nC/g)du produit récupéré au niveau du collecteur

| Exp | v     | $\alpha$ | U  | Distance suivant l'axe Ox (cm) |      |      |     |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |   |   |
|-----|-------|----------|----|--------------------------------|------|------|-----|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|---|
|     |       |          |    | -6,9                           | -4,1 | -1,4 | 1,4 | 4,1  | 6,9  | 9,6  | 12,4 | 15,1  | 17,9  | 20,6  | 23,4  | 26,1  | 28,9  |   |   |
| 1   | 23.22 | 30       | 15 | -                              | 10,4 | 6,5  | 3,4 | -0,1 | -5,9 | -6,2 | -7,9 | -16,1 | -     | -     | -     | -     | -     | - | - |
| 2   | 23.22 | 30       | 20 | 11,2                           | 7,4  | 4,7  | 2,7 | 0,5  | -3,5 | -4,4 | -4,7 | -4,9  | -7,9  | -6,4  | -8,1  | -16   | -     | - | - |
| 3   | 23.22 | 30       | 25 | 11,7                           | 6    | 4,2  | 2,8 | 0,3  | -4,4 | -5,7 | -6,3 | -7,8  | -7,4  | -7,7  | -11,7 | -16   | -25,5 | - | - |
| 4   | 23.22 | 40       | 15 | 12,4                           | 9,4  | 5,9  | 3,5 | -1   | -5,2 | -5,6 | -8   | -15,6 | -     | -     | -     | -     | -     | - | - |
| 5   | 23.22 | 40       | 20 | 11,9                           | 10,3 | 6,4  | 3,9 | 3,4  | -1   | -5   | -6   | -7,5  | -9,3  | -8,8  | -16,2 | -17,8 | -     | - | - |
| 6   | 23.22 | 40       | 25 | 11,6                           | 7,5  | 6,8  | 4,1 | 1,3  | -2,2 | -6,3 | -9,6 | -10,5 | -9,5  | -11,5 | -13,6 | -12,1 | -15,7 | - | - |
| 7   | 23.22 | 50       | 15 | 10                             | 9    | 5,6  | 3,1 | -1,8 | -8,2 | -8   | -8,9 | -16,9 | -     | -     | -     | -     | -     | - | - |
| 8   | 23.22 | 50       | 20 | 12,5                           | 6,9  | 5    | 3,6 | -0,6 | -7,8 | -7,7 | -7   | -7,9  | -11   | -8,7  | -18,8 | -24,4 | -     | - | - |
| 9   | 23.22 | 50       | 25 | -                              | 9    | 4,6  | 3,2 | 0,4  | -4   | -6,1 | -7,1 | -7,4  | -9,1  | -8,7  | -12   | -     | -     | - | - |
| 10  | 46.44 | 30       | 15 | -                              | -    | 6,8  | 2,5 | 2,1  | -1,8 | -2,7 | -4   | -6,4  | -     | -     | -     | -     | -     | - | - |
| 11  | 46.44 | 30       | 20 | -                              | -    | -    | 3   | 2    | 0,1  | -2,7 | -2,2 | -4    | -6,6  | -7,2  | -8    | -     | -     | - | - |
| 12  | 46.44 | 30       | 25 | -                              | -    | 4,6  | 2,1 | 2    | -0,8 | -2,7 | -2,4 | -3,1  | -5,3  | -3,9  | -7,4  | -     | -     | - | - |
| 13  | 46.44 | 40       | 15 | -                              | -    | -    | 3,3 | 2,3  | -1,2 | -2,6 | -3,8 | -8,4  | -15   | -     | -     | -     | -     | - | - |
| 14  | 46.44 | 40       | 20 | -                              | -    | -    | 4,3 | 1,8  | 1,9  | -1,5 | -2,4 | -3,1  | -5,6  | -5,3  | -10   | -     | -     | - | - |
| 15  | 46.44 | 40       | 25 | -                              | -    | 6    | 3   | 2,1  | -0,8 | -3,3 | -3,6 | -4,9  | -6,2  | -5,7  | -9,3  | -7,5  | -     | - | - |
| 16  | 46.44 | 50       | 15 | -                              | -    | 6,1  | 4,1 | 2,8  | -0,6 | -4   | -5,1 | -10,7 | -     | -     | -     | -     | -     | - | - |
| 17  | 46.44 | 50       | 20 | -                              | -    | 8,3  | 4,5 | 3,6  | 1    | -4,3 | -4,1 | -5,8  | -10,3 | -13,5 | -17,7 | -     | -     | - | - |
| 18  | 46.44 | 50       | 25 | -                              | -    | 6,4  | 4,4 | 3,5  | 0,8  | -2,7 | -4   | -5,2  | -7,1  | -7,4  | -11,6 | -     | -     | - | - |
| 19  | 69.66 | 30       | 15 | -                              | -    | -    | 4,1 | 9    | 4,8  | 1,6  | -3,3 | -5,1  | -9    | -10,2 | -     | -     | -     | - | - |
| 20  | 69.66 | 30       | 20 | -                              | -    | -    | 5,8 | 5,8  | 2,7  | -0,9 | -4,1 | -6,2  | -8,1  | -9,3  | -13,3 | -15,8 | -     | - | - |
| 21  | 69.66 | 30       | 25 | -                              | -    | -    | 7,5 | 6,7  | 3,1  | 0    | -2,8 | -5,8  | -8,5  | -8,2  | -11   | -10,8 | -     | - | - |
| 22  | 69.66 | 40       | 15 | -                              | -    | -    | -   | 15   | 5,6  | 1,7  | -3,6 | -7,1  | -12,2 | -14,8 | -     | -     | -     | - | - |
| 23  | 69.66 | 40       | 20 | -                              | -    | -    | -   | 7,5  | 3,8  | 0,3  | -3,8 | -7,5  | -10,5 | -10,8 | -16,2 | -17,2 | -     | - | - |
| 24  | 69.66 | 40       | 25 | -                              | -    | -    | 8,9 | 8,3  | 4,6  | 0,9  | -2,9 | -6,8  | -9,9  | -10,4 | -12,7 | -14,8 | -     | - | - |
| 25  | 69.66 | 50       | 15 | -                              | -    | -    | -   | 9,2  | 6,6  | 3,5  | -1,9 | -6,5  | -12   | -13,1 | -     | -     | -     | - | - |
| 26  | 69.66 | 50       | 20 | -                              | -    | -    | -   | -    | 6,1  | 2,8  | -1   | -5,6  | -9,1  | -10,4 | -14,8 | -20,1 | -     | - | - |
| 27  | 69.66 | 50       | 25 | -                              | -    | -    | 9,3 | 8,6  | 4,1  | 0,3  | -3,5 | -7,5  | -9,9  | -10,9 | -13   | -16,6 | -     | - | - |

Les résultats groupés dans le tableau 4.10 et 4.11 nous montrent que la distribution de la masse et le rapport charge/masse des particules au niveau du collecteur varie d'une configuration à une autre. La figure 4.24 nous montre une comparaison entre les résultats obtenus dans les expériences N° 1, 14 et 27 réalisées au niveau bas moyen et haut de chaque facteur.



**Figure 4.24:** distribution spatiale de la masse et le rapport Charge/masse du produit récupéré au niveau du collecteur.

Cette figure nous montre un déplacement horizontal de la position des particules neutre en fonction des trois paramètres. Théoriquement l'intensité et la direction du champ électrostatique liées au facteur tension  $U(\text{kV})$  et inclinaison de l'électrode statique n'ont aucune influence sur la position finale des particules neutres dans le collecteur. Par contre cette position peut être influencée par la vitesse tangentielle des particules au point de détachement liée au facteur vitesse tangentielle du tapis convoyeur.

Pour s'assurer que les expériences sont en concordance avec les notions théoriques nous avons fait une étude des effets des facteurs : Tension  $U$  ; Angle de l'électrode statique  $A$  et la vitesse du tapis  $N$  sur la position des particules neutres.

Pour effectuer cette étude nous avons calculé la position des particules neutres associées à chaque expérience. Cette valeur est obtenue à partir de la distribution du rapport charge/masse des particules. La méthode de calcul utilisée dans cette étape consiste à :

- 1- Identifier les deux cellules adjacentes qui comportent des matériaux de charge opposée. (Par exemple dans l'expérience 1 nous avons les cellules 10 et 11.)
- 2- Modaliser la variation du rapport charge/masse en fonction de la position horizontale on utilise un modèle linéaire de la forme  $Q_m(x) = ax + b$ .
- 3- Calculer la position des particules neutres en calculant la solution du problème  $Q_m(x) = 0$ .

En répétant ces étapes pour chaque expérience nous avons obtenu les résultats regroupés dans le tableau 4.12.

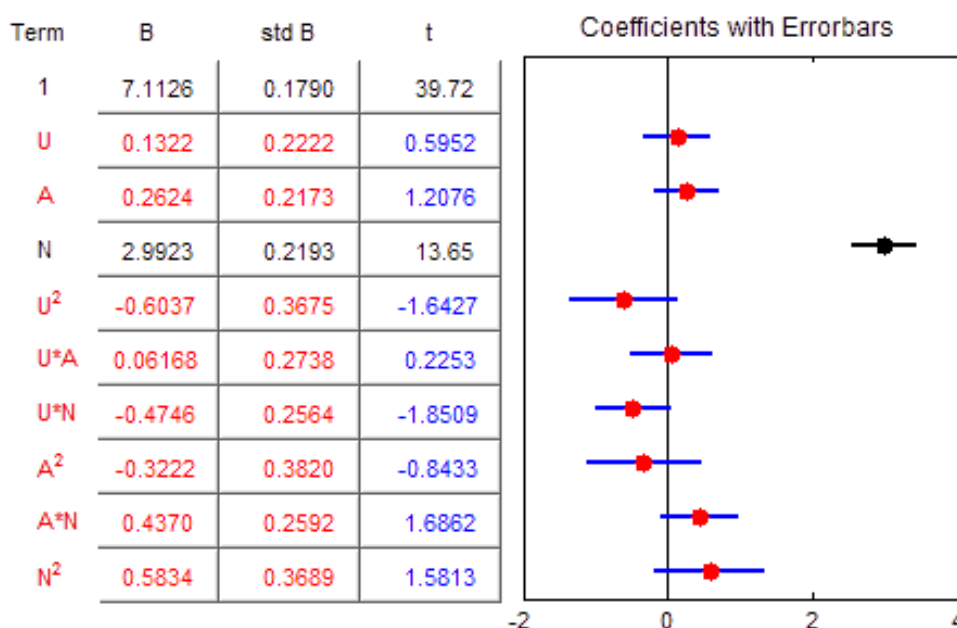
**Tableau 4.12** : Position des particules neutres PPN en fonction des facteurs tension  $U$  et inclinaison de l'électrode statique  $A$  et la vitesse du tapis convoyeur  $N$

| <b>N°<br/>Exp</b> | <b><math>U</math><br/>(kV)</b> | <b><math>A</math><br/>(°)</b> | <b><math>N</math><br/>(cm/s)</b> | <b>PPN<br/>(cm)</b> |
|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 1                 | 15                             | 30                            | 23.22                            | 4,0                 |
| 2                 | 20                             | 30                            | 23.22                            | 4,5                 |
| 3                 | 25                             | 30                            | 23.22                            | 4,3                 |
| 4                 | 15                             | 40                            | 23.22                            | 3,5                 |
| 5                 | 20                             | 40                            | 23.22                            | 6,3                 |
| 6                 | 25                             | 40                            | 23.22                            | 5,1                 |
| 7                 | 15                             | 50                            | 23.22                            | 3,1                 |
| 8                 | 20                             | 50                            | 23.22                            | 3,7                 |
| 9                 | 25                             | 50                            | 23.22                            | 4,4                 |
| 10                | 15                             | 30                            | 46.44                            | 5,6                 |
| 11                | 20                             | 30                            | 46.44                            | 7,0                 |
| 12                | 25                             | 30                            | 46.44                            | 6,1                 |
| 13                | 15                             | 40                            | 46.44                            | 5,9                 |
| 14                | 20                             | 40                            | 46.44                            | 8,4                 |
| 15                | 25                             | 40                            | 46.44                            | 6,1                 |
| 16                | 15                             | 50                            | 46.44                            | 6,4                 |

|    |    |    |       |      |
|----|----|----|-------|------|
| 17 | 20 | 50 | 46.44 | 7,4  |
| 18 | 25 | 50 | 46.44 | 7,5  |
| 19 | 15 | 30 | 69.66 | 10,5 |
| 20 | 20 | 30 | 69.66 | 8,9  |
| 21 | 25 | 30 | 69.66 | 9,8  |
| 22 | 15 | 40 | 69.66 | 10,5 |
| 23 | 20 | 40 | 69.66 | 9,8  |
| 24 | 25 | 40 | 69.66 | 10,3 |
| 25 | 15 | 50 | 69.66 | 11,4 |
| 26 | 20 | 50 | 69.66 | 11,7 |
| 27 | 25 | 50 | 69.66 | 9,8  |

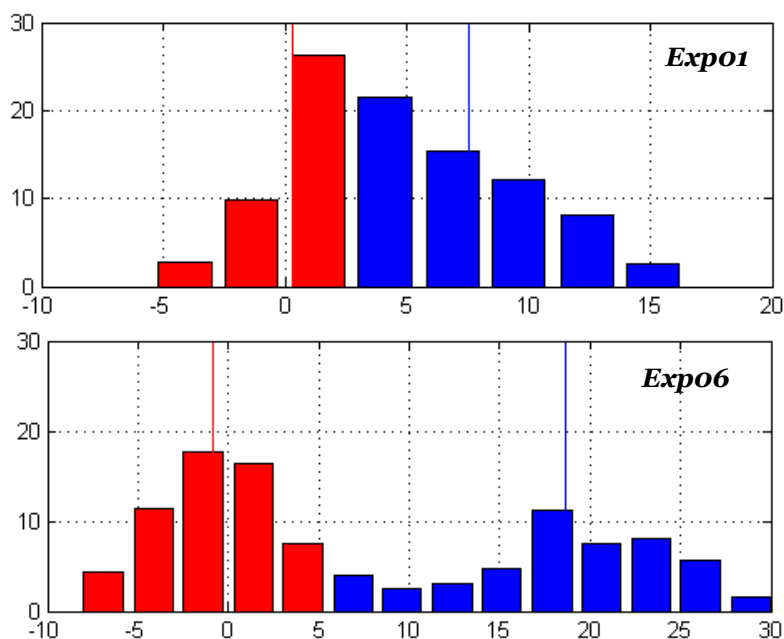
La modélisation de la position des particules neutre en fonction des facteur et l'étude des effets des facteur (figure4.25) nous montre que la valeur de la haute tension et l'inclinaison de l'électrode statique n'exerce aucune influence significatif sur la position des particules neutres (*Pour plus d'information sur l'étude des effet des facteurs par la méthodologie des plans d'expériences le lecteur est invité à consulter les références [92-93].*)

Cette étude nous montre que seul la vitesse du tapis qui a une influence significatif sur la position des particules neutres. Dans ce cas on peut dire que l'ensemble des expériences sont en concordance avec les notions théorique de la trajectoire des particules neutre.



**Figure 4.25:** Effet des facteur U, N et A sur la position horizontale des particules neutres récupéré au niveau du collecteur (Capture d'écran du toolbox MBCMODEL du MATLAB)





**Figure 4.26:** distribution de la masse du produit récupéré au niveau du collecteur et centre de gravité des produits de charges positif et négatif obtenu dans les expériences 1 et 3

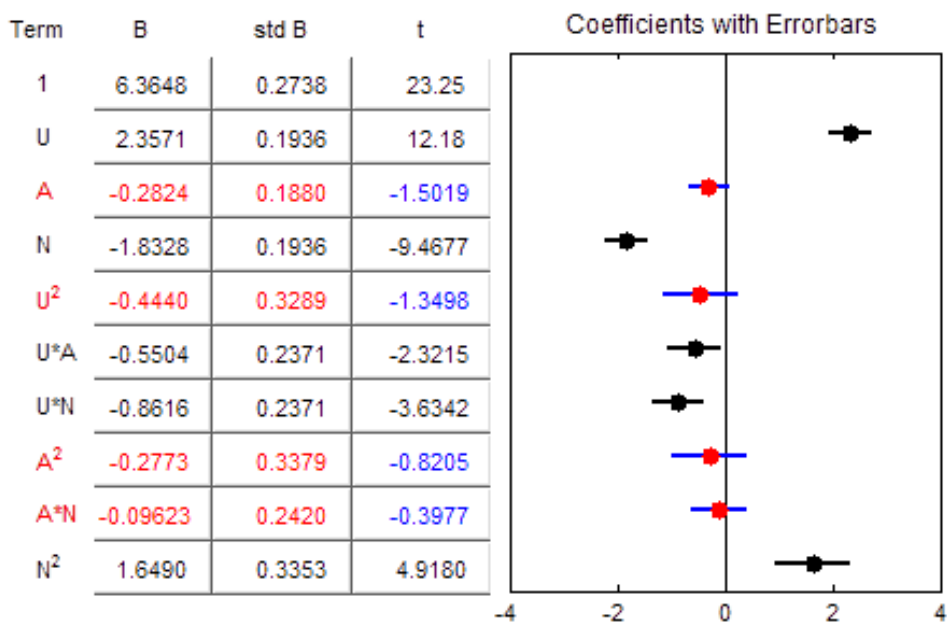
Nous avons utilisé la même méthode pour analyser l'influence des facteurs tension  $U$  ; vitesse du tapis  $n$  et l'inclinaison de l'électrode sur le centre de masse du produit de charge positif et négatif. Le centre de masse du produit associé à chaque expérience est représenté dans le tableau 4.13

**Tableau 4.13 :** Centre de gravité du produit positif CGP et négatif CGN et la distance entre les deux centres de gravité DX en fonction des facteurs de l'installation

| N° Exp | U (kV) | A (°) | v (cm/s) | CGP (cm) | CGN (cm) | DX (cm) |
|--------|--------|-------|----------|----------|----------|---------|
| 1      | 15     | 30    | 23,22    | 5,21     | 10,5     | 5,27    |
| 2      | 20     | 30    | 23,22    | 5,40     | 16,0     | 10,56   |
| 3      | 25     | 30    | 23,22    | 4,53     | 18,1     | 13,61   |
| 4      | 15     | 40    | 23,22    | 4,29     | 10,3     | 6,03    |
| 5      | 20     | 40    | 23,22    | 5,87     | 16,2     | 10,33   |
| 6      | 25     | 40    | 23,22    | 4,39     | 18,5     | 14,15   |
| 7      | 15     | 50    | 23,22    | 4,53     | 10,8     | 6,27    |
| 8      | 20     | 50    | 23,22    | 3,85     | 15,0     | 11,17   |
| 9      | 25     | 50    | 23,22    | 5,01     | 16,2     | 11,22   |
| 10     | 15     | 30    | 46,44    | 7,40     | 12,1     | 4,68    |
| 11     | 20     | 30    | 46,44    | 7,98     | 14,6     | 6,65    |

|    |    |    |       |       |      |      |
|----|----|----|-------|-------|------|------|
| 12 | 25 | 30 | 46.44 | 6,77  | 15,6 | 8,81 |
| 13 | 15 | 40 | 46.44 | 7,63  | 12,4 | 4,78 |
| 14 | 20 | 40 | 46.44 | 8,62  | 15,6 | 7,00 |
| 15 | 25 | 40 | 46.44 | 6,98  | 14,5 | 7,56 |
| 16 | 15 | 50 | 46.44 | 7,55  | 11,8 | 4,23 |
| 17 | 20 | 50 | 46.44 | 8,77  | 15,1 | 6,30 |
| 18 | 25 | 50 | 46.44 | 8,58  | 15,9 | 7,28 |
| 19 | 15 | 30 | 69.66 | 11,35 | 15,7 | 4,33 |
| 20 | 20 | 30 | 69.66 | 9,39  | 15,4 | 5,99 |
| 21 | 25 | 30 | 69.66 | 9,38  | 18,3 | 8,97 |
| 22 | 15 | 40 | 69.66 | 11,13 | 15,5 | 4,36 |
| 23 | 20 | 40 | 69.66 | 10,67 | 17,0 | 6,37 |
| 24 | 25 | 40 | 69.66 | 10,09 | 18,4 | 8,27 |
| 25 | 15 | 50 | 69.66 | 11,40 | 16,1 | 4,68 |
| 26 | 20 | 50 | 69.66 | 11,37 | 16,8 | 5,47 |
| 27 | 25 | 50 | 69.66 | 10,40 | 17,6 | 7,20 |

L'analyse de l'effet des facteurs nous montre que la haute tension ; la vitesse du tapis et l'angle de l'électrode statique exerce une influence significative sur la distance qui sépare le centre de gravité du produit de charge positif et négatif.



**Figure 4.27:** Effet des facteur U, N et A sur la distance qui sépare les centre de gravité du produit négatif et positif  
(Capture d'écran du toolbox MBCMODEL du MATLAB)

La distance maximale entre le centre de gravité de deux produits de charge opposé est obtenue par l'application du niveau haute de la tension (25kV) ; niveau moyen de l'inclinaison (40°) et le niveau bas de la vitesse du tapis (23.22cm/s) cette configuration est représentée par l'expérience 6 du tableau 4.13.

### 4.2.3 Validation expérimentale des résultats de simulations

Pour valider le modèle théorique de la trajectoire des particule dans un séparateur a tapis convoyeur nous avons appliqué la même procédure utilisé dans la validation du modèle de la trajectoire des particule dans un séparateur a chute libre. Cette procédure consiste à simuler le comportement de plusieurs particules. Dans chaque simulation les paramètres d'une particule sont choisis d'une façon aléatoire à partir des valeurs appartenant aux intervalles définie dans le tableau 4.14

**Tableau 4.14** : *Plage de variation des paramètres de la particule utilisée dans la simulation*

| <b>Paramètre de la particule</b>        | <b>Min</b> | <b>Max</b> |
|---|------------|------------|
| Facteur de forme (-)                    | 0.3        | 1          |
| Rayon de la particule (mm)              | 1          | 3          |
| Masse de la particule (mg)              | 0.1        | 4          |
| Charge massique de la particule (uC/kg) | -15.5      | 15.5       |

Après la simulation nous avons groupé les particules en fonction de leurs positions dans les cellules du collecteur. Ensuite nous avons calculé la charge massique du produit récupéré dans chaque cellule les résultats de simulation sont présenté dans le tableau 4.15. Pour quantifier l'erreur de simulation nous avons appliqué la même procédure utilisé dans le cas d'un séparateur a chute libre. (*voir section validation expérimentale §4.1.5*)

Le tableau 4.15 nous montre un aperçu de la qualité du modèle de simulation utilisé dans la prédiction des données de l'expérience 6 qui représente la meilleur configuration expérimentale. Les données groupées dans le tableau 4.15 nous montre que l'erreur du modèle est inférieure à 10% dans l'ensemble des cellules qui se trouvent entre 0cm et 16.5 cm.

Le même modèle donne une approximation de la charge massique avec une erreur inférieur à 20% dans une plage de  $x = -20\text{cm}$  jusqu'à  $x = 18\text{cm}$ . En calculons la

moyenne d'erreur sur tous les cellules c'est-à-dire de  $x = -20\text{cm}$  jusqu'à  $x=20\text{cm}$  on obtient une erreur de 10.3%.

**Tableau 4.15:** Comparaison entre résultats de simulation et résultats expérimentales obtenu dans l'expériences 6

| <b>Centre des cellules (cm)</b> | <b><math>(Q/m)_{exp}</math> (nC/g)</b> | <b><math>(Q/m)_{sim}</math> (nC/g)</b> | <b>Erreur (%)</b> |
|---------------------------------|--|--|-------------------|
| -6,9                            | 11,6                                   | 17,5                                   | 21,61             |
| -4,1                            | 7,5                                    | 13,9                                   | 23,44             |
| -1,4                            | 6,8                                    | 10,3                                   | 12,82             |
| 1,4                             | 4,1                                    | 6,6                                    | 9,16              |
| 4,1                             | 1,3                                    | 3,0                                    | 6,23              |
| 6,9                             | -2,2                                   | -0,7                                   | 5,49              |
| 9,6                             | -6,3                                   | -4,2                                   | 7,69              |
| 12,4                            | -9,6                                   | -7,9                                   | 6,23              |
| 15,1                            | -10,5                                  | -11,5                                  | 3,66              |
| 17,9                            | -9,5                                   | -15,2                                  | 20,88             |
| 20,6                            | -11,5                                  | -18,7                                  | 26,37             |
| 23,4                            | -13,6                                  | -22,4                                  | 32,23             |
| 26,1                            | -12,1                                  | -26,0                                  | 50,92             |
| 28,9                            | -15,7                                  | -29,7                                  | 51,28             |
| <i>Moyenne</i>                  |  |  | 19. 86%           |

### 4.3. Conclusion

L'étude théorique et expérimentale montrent que la position des particules récupérées au niveau du collecteur d'un séparateur électrostatique est fortement liée au rapport charge/masse des particules et l'intensité du champ électrostatique.

L'étude du comportement des particules dans un séparateur à chute libre montre que l'utilisation des tensions de l'ordre de 60kV engendre une dispersion des particules dans une plage qui varie de -20 cm à 20cm au niveau du collecteur de l'installation. Le rapporte charge/masse des particules récupérées aux extrémités du collecteur dans ce cas est de l'ordre de  $\pm 5$  à  $\pm 10$   $\mu\text{C}/\text{kg}$ . L'étude réalisée montre aussi que l'utilisation des niveaux inférieurs de tension exige une augmentation des performances du processus de chargement triboélectrique pour atteindre des rapports Charges/masse plus élevé. Le même comportement est remarqué au niveau

du séparateur à tapis convoyeur avec une différence au niveau de la plage du rapport charge/masse et la distance de dispersion des particules.

La comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux montre que le modèle théorique élaboré dans cette étude est capable de fournir des résultats qui sont en concordance avec les résultats expérimentaux. L'analyse de la qualité des résultats théoriques montre d'autre part que l'erreur du modèle est inférieure à 10% autour du point associé à la récupération des produits de charge nulle. La valeur de cette erreur devient plus importante aux extrémités du collecteur de l'installation. Une diminution de l'erreur peut être obtenue par une prise en considération de d'autres phénomènes tels que l'interaction entre particules au cours de la séparation.

## CONCLUSION GENERALE

Dans une perspective de développement durable, les DEEE doivent être réduits à la source par les fabricants, la durée de vie des matériels doit être augmentée au maximum et le recyclage du matériel en fin de vie être systématique. Atteindre les objectifs de recyclage nécessite aujourd'hui de combiner une pluralité de procédés, en particulier pour les matières plastiques collectées qui doivent d'abord être triées avant d'être recyclés. La pureté du matériau obtenu est primordiale pour que le recyclage soit rentable. De ce fait, des procédés de tri efficaces qui garantissent en permanence une excellente qualité des plastiques recyclés doivent être mis au point.

- Dans cette étude nous avons procédé à la simulation de la trajectoire des particules dans un séparateur électrostatique, en se basant sur 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.
- Le travail expérimental est suivi par une quantification de la qualité des modèles physiques de la trajectoire des particules. La qualité des modèles est obtenue par une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulation fournis par les modèles physiques.
- Parallèlement, nous avons utilisé un logiciel spécialisé dans la résolution des équations aux dérivées partielles, basé sur la méthode des éléments finis, connue sous le nom de COMSOL. Ce logiciel, dispose d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, tel que l'électrostatique.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués en utilisant deux modèles de séparateurs tribo-électrostatiques les plus utilisés en laboratoire et dans l'industrie, à savoir le séparateur vertical à chute libre et le séparateur à tapis roulant.

Pour conclure, et devant ces multiples avantages, il est certain que ces procédés auront un avenir promoteur dans le proche futur et ce dans les différents domaines de l'industrie de recyclage, pour la préservation de l'environnement et un développement durable. Le but final étant, en premier lieu, de satisfaire au mieux les attentes des industriels désirant des performances techniques avec un rapport qualité/prix intéressant.

Plusieurs perspectives intéressantes sont envisageables à savoir :

- L'amélioration en continu des performances des séparateurs électrostatiques pour préserver les ressources naturelles en épuisant au maximum dans les produits en fin de cycle de vie.
- Réduction de l'énergie lors des processus de séparation et de recyclage pour préserver au maximum la nature et en faire bon usage.
- L'optimisation des processus de séparation par électrodes cylindriques tournantes en prenant en considération de nouveaux paramètres et facteurs influents tel que le signal bruit

---

## REFERENCES

- [1] C. Chevallier, (2012) 'Valorisation des polymères styréniques issus des déchets d'équipements électroniques et électriques'. Université Jean Monnet - Saint-Etienne. France.
- [2] S. 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] M.F. Boukhoulda, (2014) 'Séparation Electrostatique Des Matériaux Plastiques Provenant Des Equipements Informatiques en Utilisant La Triboélectrisation', Thèse Doctorat .Univ.SBA
- [4] H.M. Veit, A.M. Bernardes, (2015) 'Electronic Waste: Generation and Management ', (H.M. Veit, and A.M . Bernardes, Eds), pp 3-12, Springer, NY.
- [5] 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] A.C. Kasper, N. Cristina, F. Juchneski, H.M. Veit, (2015)'Electronic Waste: Mechanical Processing', (H.M. Veit, and A.M. Bernardes, Eds), pp 19-38, Springer, NY.
- [8] K. Freegard, G. Tan, S. Frisch, (2007) 'Final Report : WEEE Plastics Separation Technologies', Axion recycling Ltd.
- [9] J.E. Lawver, W.P. Dyrenforth, (1973) 'Electrostatics and Its Applications' A.D. Moore, Ed., pp. 221-249, Wiley, New York.
- [10] I.I. Inculet, G.S.P. Castle, J.D. Brown, (1998) 'Electrostatic separation of plastics for recycling'. *Part. Sci. Technol.* 16, 91-100.
- [11] L. Dascalescu, R. Morar, Al. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, (1998) 'Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes', *Part. Sci. Technol.* 16, 25-42.
- [12] A. Tilmatine, K. Medles, S.E. Bendimerad, F. Boukhoulda, L. Dascalescu, (2009) 'Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures', *Waste Management* 29, 228–232.
- [13] F. Fraas, (1962) 'Electrostatic separation of granular materials', Washington, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of mines.
- [14] Carpco Res & Engineering Inc, (1964) 'High tension separator', Carpenter James H, United States Patent Office, US3370703 A.
- [15] Electrostatic Solutions Ltd. *Electrostatics.net*. **[en ligne]**.(modifié le 10 Mars 2008) Disponible sur : <<http://www.electrostatics.net/recycling.htm>> (Consulté le 08/06/2017)
- [16] L. Calin, L. Dascalescu (2010) 'Procédé de séparation électrostatique d'un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en œuvre.', Brevet FR2943561.
- [17] ?????????? brevet A. Tilmatine (séparateur électrostatique a cylindre tournant)
- [18] M. Goosey, (2012) 'Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook: The materials of WEEE ', (V. Goodship and L. N. Stevels, Eds), pp 123-144, Woodhead,UK.
-



- 
- [19] M. Miloudi, (2012) '*Application de la Charge par Effet Triboélectrique des Matériaux Granulaires dans la Séparation Electrostatique*', Thèse Doctorat, Univ.SBA, Algérie.
- [20] C. Dragan, (2010) '*Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aero-electrostatique de matériaux plastiques granulaires*', Thèse Doctorat, Univ. Poitiers, France.
- [21] 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.
- [22] J. Li, L. Dascalescu, (2012) '*Newly-patented technical solutions for improving the tribo-electrostatic separation of mixed granular solids*', *Recent Patents on Engineering*, vol. 6, pp. 104-115.
- [23] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, M.F. Boukhoulda, M. Bilici, L. Dascalescu,(2013) '*Two stage electrostatic separator for the recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment*', *J. Electrostat*, vol. 71, pp. 681-688.
- [24] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, S. El-Mossouess, K. Medles, (2013) '*Tribo-aero-electrostatic separator for coarse granular insulating materials*', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 20, pp. 1510-1515.
- [25] M.F. Boukhoulda, M. Miloudi, K. Medles, M. Rezoug, A. Tilmatine, L. Dascalescu, (2013) '*Experimental Modeling of a New Triboelectrostatic Separation Process for Mixed Granular Polymers*', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, No. 6, pp. 2375-2381.
- [26] M.EM. Zelmat, R. Ouiddir, A. Tilmatine, A. Benabboun, A. Bendaoud, K. Medles, L. Dascalescu, (2015) '*Experimental investigation of a new-electrostatic separation process for micronized plastics*', *Ind. App. Society. Ann. Meet.*, pp. 1-5.
- [27] D.E. Fekir, M. Miloudi, F. Miloua, K. Medles, L. Dascalescu, (2015) '*New aero-dynamic tribo-charging device with application to the electrostatic separation of granular mixtures of insulating materials*', *Ind. App. Society. Ann. Meet.*, pp. 1-5.
- [28] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, K. Medles, A. Tilmatine, (2015) '*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.
- [29] M. Miloudi, K. Medles, A. Bendaoud, A. Tilmatine, L. Dascalescu, (2015) '*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.
- [30] M.EM. Zelmat, A. Tilmatine, S. Touhami, A. Bendaoud, K. Medles, R. Ouiddir, L. Dascalescu, (2017) '*Experimental Investigation of a New Tribo-aeroelectrostatic Separation Process for Micronized Plastics from WEEE*', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. ??, pp. ???-???
- [31] S.E. Bendimerad. (2013) '*Etude et réalisation d'un procédé de séparation triboélectrique des particules isolantes*', Thèse Doctorat. Univ. SBA., Algérie.
- [32] 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.
- [33] G. Buda, M. Bilici, L. Dascalescu, A. Samuila (2013) '*Influence of material moisture on the tribocharging process of plastic granules*', *Part. Sci. & Technol.*, vol. 31, p. 162-167.
-

- 
- [34] S. Trigwell, N. Grable, C.U. Yurteri, R. Sharma, M.K. Mazumder, (2001) 'Effects of surface properties on the tribocharging characteristics of polymer powder as applied to industrial processes'. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 3, pp.1941 – 1945.
- [35] S. Trigwell, M.K. Mazumder, R. Pellissier, (2001) 'Tribocharging in electrostatic beneficiation of coal: Effects of surface composition on work function as measured by X-ray photoelectron spectroscopy and ultraviolet photoelectron spectroscopy in air'. *J. Vac. Sci. Tech.*, vol.19, pp. 1454-1459.
- [36] W.D. Greason, I.I. Inculet, (1975) 'Insulator work function determination from contact charging with metals'. *Conf. Rec. 1975 IEEE-IAS Ann. Meet.*, pp. 428-435.
- [37] 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.
- [38] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, L. Dascalescu, (2005) 'Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device'. *J. Electrostat.* 63, 937-942.
- [39] L. Dascalescu, A. Urs, S. Bente, M. Huzau, A. Samuila, (2005) 'Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices', *J. Electrostat.*, vol. 63, pp. 705-710.
- [40] L. Calin, A. Mihalcioiu, Al. Iuga, L. Dascalescu, (2007) 'Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification', *Part.Sci.& Technol.*, vol.25, p. 205-211.
- [41] L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, L. Dascalescu, (2008) 'Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, No. 4, pp. 1045-1051.
- [42] M. Blajan, R. Beleca, A. Iuga, L. Dascalescu, (2010) '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.
- [43] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, L. Dascalescu, (2011) 'Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials', *J. Electrostat.*, vol. 69, pp. 631-637.
- [44] ME. Zelmat, M. Rizouga, A. Tilmatine, K. Medles, M. Miloudi, L. Dascalescu, (2013) 'Experimental comparative study of different tribocharging devices for triboelectric separation of insulating particles', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 49, pp. 1113-1118.
- [45] ME. Zelmat, A. Tilmatine, M. Rizouga, R. Gouri, K. Medles, L. Dascalescu, (2013) 'Experimental analysis of a cyclone tribocharging device for free-fall triboelectric separation of plastic particles', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 20, pp. 1584-1589.
- [46] 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.
- [47] M.E. Zelmat, (2013) 'Etude expérimentale sur l'acquisition de charge triboélectrique des particules de plastique en vue de la séparation électrostatique', Thèse Doctorat, Univ. SBA., Algérie.
- [48] W. Aksa, (2014) 'Réalisation et étude d'un séparateur aérodynamique semi-industriel pour la récupération de particules isolantes', Thèse Doctorat, Univ.SBA, Algérie
-

- 
- [49] L. Dascalescu, O. Fati, M. Bilici, F. Rahou, C. Dragan, A. Samuila, A. Iuga, (2011) ‘*Factors that influence the efficiency of a fluidized-bed-type tribo-electrostatic separator for mixed granular plastics*’, *Journal of Physics : Conference Series* , vol. 301, pp.012066.
- [50] C. Dragan, O. Fati, M. Radu, L. Calin, A. Samuila, L. Dascalescu, (2011) ‘*Tribocharging of mixed granular plastics in a fluidized-bed device*’, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.47, pp. 1922-1928.
- [51] M. Bilici, L. Dascalescu, V. Barna, T. György, F. Rahou, A. Samuila, (2011) ‘*Experimental modeling of the tribo-aero-electrostatic separation of mixed granular plastics*’, *Ind. App. Society. Ann. Meet.*, pp. 1-6.
- [52] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu, (2011) ‘*Experimental study of the effect of ambient air humidity on the efficiency of tribo-aero-electrostatic separation of mixed granular solids*’, *Ind. App. Society. Ann. Meet.*, pp. 1-7.
- [53] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles A. Tilmatine, L. Dascalescu. (2013) ‘*Experimental study of the optimum operating conditions of a pilote-scale tribo-aero-electrostatic separator of mixed granular solids*’. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 49, 699-706.
- [54] **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.
- [55] A.B. Mekhalef, T. Zeghloul, S. Messal, L. Dascalescu, K. Medles (2017) ‘*Factors That Influence the Efficiency of a Propeller-Type Tribocharging Device for Granular Plastics*’ , *IEEE Trans. Ind. Appl.* 53, 1446-1451.
- [56] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, R. Ouiddir, A. Bendaoud, L. Dascalescu, () ‘*Modeling and optimization of a separator for granular mixtures composed of multiple insulating materials*’, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 51, 4743-4751.
- [57] M. Rezoug, (2015) ‘*Contribution à l'étude de la neutralisation des charges électriques dans les particules isolantes*’, Thèse Doctorat, Univ. SBA, Algérie.
- [58] M. Rezoug, R. Ouiddir, W. Aksa, K. Medles, M. Bilici, L. Dascalescu, (2015) ‘*Tribo-aero-electrostatic separator for ternary mixtures of granular plastics*’. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 51, 1161-1167.
- [59] E. Gate (1900) ‘*Electrostatic separation*’, United States Patent Office, *US653343*.
- [60] R.K. Dwari, K.H. Rao, (2009) ‘*Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator*’, *Min. Eng.*, vol. 22, pp.119–127.
- [61] 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.
- [62] A. Tilmatine, L. Dascalescu, (2010) ‘*Set point identification of a free fall triboelectrostatic separation process for plastic particles.*’ *International Journal of Environmental Studies*, vol. 67, no. 1,pp. 27–40.
- [63] R. Ouiddir, A. Tilmatine, A. Bendaoud, M.EM. Zelmat, K. Medles, L. Dascalescu, (2015) ‘*Recovery of water bottles plastic using tribo-electrostatic separation process.*’ *Ind. App. Society. Ann. Meet.*, pp. 1-5.
-

- 
- [64] K. Younes, M. Younes, R. Meziane, A. Samuila, L. Dascalescu, (2017) 'Modified tribo-charging device for the electrostatic separation of plastics from granular industrial wastes', *Separation. Sci. Technol.*, vol. 52, pp. 1246-1256.
- [65] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, A. Bendaoud, L. Dascalescu, (2013) 'Optimization of Belt-Type Electrostatic Separation of Triboaerodynamically Charged Granular Plastic Mixtures', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, No. 4, pp. 1781-1786.
- [66] R. Toth, A. Oprean, V. Saplontai, A. Samuila, L. Dascalescu, M. Gheorghe, I. Cojocaru, (2014) 'Electrostatic Separation of Plastic Materials Recycled from End of Life Vehicles', *Material plastic, Vol. 51*, pp. 81-85.
- [67] S. Messal, T. Zeghloul, A.B. Mekhalef, L. Dascalescu, (2017) 'Belt-Type Corona-Electrostatic Separator for the Recovery of Conductive and Nonconductive Products From Micronized Wastes', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, No. 2, pp. 1424-1430.
- [68] S. Messal, T. Zeghloul, A. Mekhalef, L. Dascalescu, (2015) 'Sorting of finely-grinded granular mixtures using a belt-type corona-electrostatic separator', *Ind. App. Society. Ann. Meet.*, pp. 1-5.
- [69] S. Messal, (2016) 'Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire.', Thèse Doctorat, Univ. Poitiers, France.
- [70] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu (2013) 'Experimental study of the optimum operating conditions of a pilot-scale tribo-aero-electrostatic separator for mixed granular solids', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, No. 2, pp. 699-706.
- [71] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, K. Medles, A. Tilmatine, (2014) 'Performance improvement of a separator tribo-electrostatic aero for granular materials plastics recycling of waste electrical and electronic equipment', *Ind. App. Society. Ann. Meet.*, pp. 1-6.
- [72] A.M. Benhafssa, K. Medles, M.F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, L. Dascalescu (2015) 'Study of a Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Mixtures of Micronized Insulating Materials', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, No. 5, pp. 4166-4172.
- [73] A. Tilmatine, A. Benabboun, Y. Brahmi, A. Bendaoud, M. Miloudi, L. Dascalescu, (2014) 'Experimental Investigation of a New Triboelectrostatic Separation Process for Mixed Fine Granular Plastics.', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, No. 6, pp. 4245-4250.
- [74] T. Zeghloul, A.M. Benhafssa, G. Richard, K. Medles, L. Dascalescu, (2017) 'Effect of particle size on the tribo-aero-electrostatic separation of plastics.', *J. Electrostat.*, vol. 88, pp. 24-28.
- [75] J. Li, L. Dascalescu, M. Bilici, Z. Xu, (2013) 'Numerical modeling of the trajectories of plastic granules in a tribo-aero-electrostatic separator', *J. Electrostat.*, vol. 71, pp. 281-286.
- [76] S. Touhami, W. Aksa, K. Medles, A. Tilmatine, 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.
- [77] L. Dascalescu, (1994) 'Mouvements des particules conductrices dans un séparateur à haute tension pour matériaux granulaires', *J. Electrostat.*, vol. 32, pp. 305-316.
-

- 
- [78] M. Younes, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, L. Dascalescu, (2005) ‘*Numerical modelling of conductive particle trajectories in roll-type electrostatic separators*’, *Ind. App. Conf. 2005. Fourtieth. IAS. Ann. Meet.*, Vol. 4, pp. 2601-2606.
- [79] M. Younes, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, L. Dascalescu, (2007) ‘*Numerical modeling of conductive particle trajectories in roll-type corona-electrostatic separators*’, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, No. 5, pp. 1130-1136.
- [80] M. Younes, A. Tilmatine, K. Medles, A. Bendaoud, A. Samuila, L. Dascalescu (2009) ‘*Numerical Modeling of Insulating Particles Trajectories in Roll-type Corona-Electrostatic Separators*’, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 16, No. 3, pp. 629-634.
- [81] Z. Xu, J. Li, H. Lu, J. Wu, (2009) ‘*Dynamics of conductive and nonconductive particles under high-voltage electrostatic coupling fields*’, *Sci. China. Ser. E-Tech Sci.*, Vol.52, pp.2359-2366.
- [82] M. Younes, A. Younes, H. Sayah, A. Tilmatine, A. Samuila, L. Dascalescu, (2013) ‘*Numerical and experimental study of insulating particles behavior in roll-type corona-electrostatic separators*’, *J.Part. Sci. Technol.*, Vol. 31, pp. 71-80.
- [83] A. Haider and O. Levenspiel, (1989) ‘*Drag coefficient and terminal velocity of spherical and non-spherical particles*’, *Powder Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 63–70.
- [84] J. Gabitto and C. Tsouris, (2008) ‘*Drag coefficient and settling velocity for particles of cylindrical shape*’, *Powder Technol.*, vol. 183, no. 29, pp. 314–322.
- [85] A. D. Salman and A. Verba, (1988) ‘*New approximate equations to estimate the drag coefficient of different particles of regular shape*’, *Chem. Eng.*, vol. 33, pp. 261–268.
- [86] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, (2000) ‘*High Voltage Engineering*’. Oxford, U.K.: Newnes.
- [87] C. L. Wadhwa, (2007) ‘*High Voltage Engineering*’. New Delhi, India: New Age International.
- [88] N.D, Lawrence (2014) ‘*Introduction to numerical electrostatics using MATLAB*’, New Jersey, CA, USA: John Wiley & Sons
- [89] H. Gould, J. Tobochnik, and W. Christian, (2007) ‘*An Introduction to Computer Simulation Methods*’. San Francisco, CA, USA: Addison-Wesley.
- [90] R. Sedgewick, (1983) ‘*Algorithms*’, USA: Addison-Wesley.
- [91] A.D. Salman, A. Verba, Zs. Lukenics, M. Szabo (1991) ‘*Effects of impact velocity and angle on collision*’, *Periodica Polytechnica. Chemical Engineering.*, Vol. 35, pp.43-51
- [92] K. Medles, (2006) ‘*Modélisation expérimentale et optimisation des procédés de la séparation électrostatique des matériaux granulaires*’, Thèse Doctorat, Univ. SBA., Algérie.
- [93] J. Faucher, (2006) ‘*Les plans d’expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue*’, Thèse Doctorat, institue nationale polytechnique de Toulouse. France.