



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

République **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA
Faculté De Technologie
Département de Génie Électrique
Spécialité : Électrotechnique

En vue de l'obtention du diplôme master en électrotechnique
Options : Réseau Electrique

Thème

Etude d'un séparateur tribo-électrostatique à chute libre, utilisé pour le tri des déchets en plastique

Réalisé par :

- ❖ Madi Yasmine
- ❖ Takka Djamel

Encadré par :

Mr : S. Atroune

Promotion 2022/2023

Remerciement

Nous tenons remercier et rendre grâce à DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la volonté de mené a réalisé ce modeste travail.

Nous remercions Mr. Atroune d'avoir accepté de nous encadrer ainsi que son aide et son suivi pendant la réalisation de notre travail.

Nos remerciements vont aussi aux membres de jury qui nous ont honorés en acceptant d'examiner ce travail.

Nous tenons également à remercier tous nos enseignants, désignés par leur dévouement, à qui nous exprimons notre profonde reconnaissance, et notre infinie gratitude.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

A la mémoire de mes grands parents qui sont toujours dans mon cœur et mon esprit, je dédie ce travail et que dieu vous accueille dans son vaste paradis.

Je dédie ce travail à ma famille qui ont toujours été les étoiles de mon ciel et ont illuminé mon chemin depuis ma naissance. Aucun mot, ni signe ne pourras témoigner mon amour profond et ma reconnaissance pour tous le soutiens que j'ai reçus.

A ma chère mère qui m'a entouré d'amour et d'affection, pour son sacrifice qu'elle a consenti pour mon instruction, mon bien être et ma réussite. Pour cela je te dis merci maman et je prie dieu pour qu'il t'accorde une longue vie pleine de joie.

A mon cher père qui ne cesse jamais de m'encourager et qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui. Merci beaucoup papa.

A ma sœur Siham et mon frère Faiz pour leurs soutiens et leurs amours.

Et à mes amis qui ont toujours été présent pour moi.

Madi Yasmine

Dédicace

*Aux êtres qui me sont les plus chères dans ma vie :
Mon père et ma mère, merci pour votre sacrifice et
votre patience durant mes années d'étude. Que dieux
vous protège.*

*A mes chers frères et sœurs et à ma chère femme qui
m'ont toujours soutenu et encouragé durant mon
parcours.*

A toute ma famille et mes amis.

*Et enfin, à tous ce qui m'ont encouragé, soutenu
durant l'élaboration de ce travail.*

TAKKA DJAMEL

Sommaire

Liste des symboles.....	1
Liste des figures	3
Liste des tableaux.....	5
Introduction Générale.....	7
Chapitre I : Types de séparateurs et les dispositifs de tribo-électricité.....	8
I.1 Introduction.....	9
I.2 La séparation électrostatique.....	9
I.3 Dispositifs de séparation tribo-électrostatiques de matériaux granulaires isolants.....	9
I.3.1 Séparateur triboélectrique à chute libre	9
I.3.2 Séparateur triboélectrique à tapis roulant.....	12
I.3.3 Séparateur tribo-électrostatique à tambour	13
I.4 Dispositifs de chargement triboélectrique	15
I.4.1 Dispositif de charge par ventilateur	15
I.4.2 Dispositif de charge par cyclone	16
I.4.3 Dispositif de chargement statique	16
I.4.4 Dispositif de charge par vibrations	17
I.4.5 Dispositif de chargement à lit fluidisé	18
I.4.6 Dispositif de charge à cylindre rotatif	19
I.5 Conclusion	20
Chapitre II : La méthode des plans d'expériences	21
II.1 Introduction.....	22

II.2	Définition d'un plan d'expérience	22
II.3	Types des plans d'expériences.....	22
II.4	Intérêt des plans d'expériences	23
II.5	Principe des plans d'expériences	23
II.6	L'avantage du plan d'expériences	23
II.7	Démarche méthodologique d'un plan d'expériences	24
II.8	Terminologie.....	25
II.8.1	Le facteur	26
II.8.1.1	Les différents types de facteurs.....	26
II.8.1.2	Domaine d'un facteur.....	26
II.8.2	La Réponse.....	27
II.8.2.1	Surface de réponse	27
II.8.3	Matrice d'expérience	28
II.8.3.1	Formules de codage.....	29
II.9	Modélisation par les plans d'expériences	30
II.10	Conclusion.....	31
Chapitre III : Etude expérimental d'un séparateur électrostatique à chute libre.....		32
III.1	Introduction.....	33
III.2	Le chargement des matériaux par vibration	34
III.3	Détermination du domaine expérimental	34
III.4	Etude expérimentale.....	36
III.5	Résultat et discussion.....	39
III.5.1	Influence de la haute tension	39
III.5.2	Influence de la vitesse	41
III.5.2.1	Taux de récupération	41
III.5.2.2	Taux de pureté.....	42

III.5.2.3 Taux de rendement.....	43
III.5.3 Interaction vitesse et tension.....	44
III.5.3.1 Le taux de récupération	44
III.5.3.2 Taux de pureté.....	45
III.5.3.3 Taux de rendement.....	46
III.6 Conclusion	47
Conclusion Générale.....	49
Références Bibliographique.....	50

Liste des symboles**Notation**

X_1, X_2, \dots, X_k : Variables centrées réduites ou variables codées.

Z_1, Z_2, \dots, Z_k : Facteurs contrôlables (variables réelles).

$Z_1^0, Z_2^0, \dots, Z_k^0$: Variables réelles correspondantes au centre du plan ou parfois niveau fondamental.

b_0 : terme constant de l'équation de régression.

b_j : effets linéaires.

b_{uj} : effets d'interactions.

b_{jj} : effets quadratiques.

ΔZ_j : Unité ou intervalle de variation suivant l'axe des Z_j .

Z_{min} : Valeur minimale de la variable réelle.

Z_{max} : Valeur maximale de la variable réelle.

\vec{F}_r : La force de l'air supposée négligeable ;

m : La masse de la particule [kg] ;

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

\vec{Q} : La charge de la particule [C] ;

\vec{E} : Le champ électrique [kv/m] ;

ΔU : La différence de potentiel [kv] ;

d : La distance entre les électrodes [m].

V : La vitesse de transport (cm/s).

U : La tension d'alimentation (KV).

P (%) : La pureté des granules.

W (%) : Le rendement des granules.

m_{ic} : masse du produit i collecté dans le compartiment qui lui est réservé.

m_{tc} : masse totale collectée dans ce compartiment.

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

Abbreviation

PVC: polyvinyl chlorure.

HIPS: High Impact Polystyrene.

PC : polycarbonates.

PET : Polyéthylène téréphthalate.

Liste des figures

Chapitre I : Types de séparateurs et les dispositifs de tribo-électricité

Figure I.1 : (a) Principe du séparateur tribo-électrostatique à chute libre ; (b) Cas concret.....	10
Figure I.2 : Ajout d'un média dans un mélange traité par un séparateur électrostatique à chute libre.....	10
Figure I.3 : Représentation schématique de l'installation proposée par Lee.	11
Figure I.4 : Représentation schématique de dispositifs de charge pouvant être utilisés dans l'installation brevetée par Lee.....	12
Figure I.5 : Représentation schématique d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant.....	13
Figure I.6 : Séparateur tribo-électrostatique à tambour.....	14
Figure I.7 : Séparateur tribo-électrostatique à convoyeur	14
Figure I.8 : Représentation schématique du dispositif d'un chargement par ventilateur	15
Figure I.9 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone.....	16
Figure I.10 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique.	17
Figure I.11 : Dispositif à vibrations	18
Figure I.12 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement à lit fluidisé.....	19
Figure I.13 : Dispositif de tribo-chargement à cylindre rotatif.....	19

Chapitre II : La méthode des plans d'expériences

Figure II.1 : Les étapes à suivre pour l'établissement d'un plan d'expériences.	25
Figure II.2 : Le domaine du facteur, le niveau bas du facteur est noté -1 et le niveau haut $+1$	27
Figure II.3 : Surface de réponse.....	28
Figure II.4 : passage des variables réelles aux variables codées (Variables centrées réduites).	29

Chapitre III : Etude expérimental d'un séparateur électrostatique à chute libre

Figure III.1 : Représentation graphique du séparateur à chute libre.....	33
Figure III.2 : Représentation schématique du dispositif expérimental	34

Figure III.3 : Représentation schématique des forces agissant sur une particule chargée en chute libre dans un champ électrique.....	35
Figure III.4 : représentation graphique de la masse de HIPS (a) et PC (b) prédits par MODDE 5.0 en fonction de la tension.	39
Figure III.5 : représentation graphique de la pureté HIPS (a) et PC (b) prédits par le MODDE5.0 en fonction de tension.	40
Figure III.6 : représentation graphique de la pureté HIPS (a) et PC (b) rendement par le MODDE 5.0 en fonction de tension.	41
Figure III.7 : représentation graphique de la masse HIPS (a) et PC (b) prédits par le MODDE5.0 en fonction de vitesse.....	42
Figure III.8 : représentation graphique de la pureté HIPS (a) et PC (b) prédits par le MODDE 5.0 en fonction de vitesse.	43
Figure III.9 : représentation graphique de la rendement HIPS (a) et PC (b) prédits par le MODDE 5.0 en fonction de vitesse.....	44
Figure III.10 : surfaces de réponse pour masse de HIPS (a) et de PC (b).....	45
Figure III.11 : surfaces de réponse pour pureté de HIPS (a) et de Pc (b).	46
Figure III.12 : surfaces de réponse pour rendement de HIPS (a) et de PC (b).....	47

Liste des tableaux

Chapitre II : La méthode des plans d'expériences

Tableau II.1 : Matrice d'expériences28

Chapitre III : Etude expérimentale d'un séparateur électrostatique à chute libre

Tableau III. 1 : Variation de la vitesse et de la tension.....35

Tableau III.2 : rapport de masse de PC et HIPS.....37

Tableau III.3: influence des facteurs sur la masse[g] et la pureté P [%], et le rendement W [%].38

Introduction Générale

Le plastique fait partie intégrante de notre quotidien et de nos habitudes de consommation et continuent d'être produits en grande quantité, générant de plus en plus de déchets. Une situation complexe suscite diverses mesures réglementaires à travers le monde. En France et en Europe, la réglementation soutient les principes d'une économie circulaire, dans laquelle le recyclage joue un rôle important.

La technologie électrostatique est devenue l'option préférée pour recycler les matériaux en plastique. D'autant plus que la séparation électrostatique est une technologie non polluante, caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que des coûts d'exploitation et de maintenance réduits. Ce type de séparateur fonctionne en utilisant un dispositif de charge pour charger les particules du mélange par effet triboélectrique, qui est ensuite soumis à un fort champ électrique.

Les techniques de séparation électrostatique exploitent les différences de conductivité électrique des particules après leur mise en charge et l'apparition de charges positives ou négatives sur leur surface. Le mode de mise en charge varie selon l'équipement et l'application. Un système d'attraction ou de répulsion proportionnel à cette charge permet leur séparation. Les matières doivent être impérativement sèches.

L'objectif principal de ce travail consiste à étudier la faisabilité du processus de séparation électrostatique d'un mélange granulaire isolant (HIPS/PC) en utilisant un séparateur électrostatique à chute libre. Le mémoire comporte trois chapitres qui se présentent comme suit:

Dans le premier chapitre nous avons présenté les différents dispositifs de séparation tribo-électrostatiques et les différents dispositifs utilisés pour le chargement triboélectrique y compris une brève description sur leur principe de fonctionnement.

Le deuxième chapitre traite la théorie sur les plans d'expériences, après avoir montré l'intérêt des plans d'expériences par rapport à la méthode classique des essais et des erreurs, nous décrivons les outils nécessaires à la formalisation d'un problème. Puis nous présentons le type de stratégies expérimentales que nous avons choisies d'utiliser, à savoir, les plans à surface de réponses.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude d'un séparateur tribo-électrostatique à chute libre.

Chapitre I : Types de séparateurs et les dispositifs de tribo- électricité

I.1 Introduction

La séparation électrostatique des matériaux a été largement étudiée pour répondre aux besoins de l'industrie du recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques. Dans ce chapitre, nous passons en revue divers dispositifs utilisés pour la séparation électrostatique de matériaux granulaires isolants chargés par effet triboélectrique.

I.2 La séparation électrostatique

La séparation électrostatique des métaux et des matériaux isolants contenus dans un mélange granulaire est une technique de plus en plus utilisée dans l'industrie du recyclage des déchets [1]. C'est un processus qui utilise des charges électrostatiques pour séparer les particules broyées du matériau. Généralement, les charges électrostatiques sont utilisées pour attirer ou repousser des matériaux chargés différemment. Lorsque la séparation électrostatique utilise la force d'attraction pour trier les particules, les particules conductrices adhèrent à un objet chargé de manière opposée, ce qui les sépare du mélange de particules [2].

I.3 Dispositifs de séparation tribo-électrostatiques de matériaux granulaires isolants

Les séparateurs tribo-électrostatiques permettent le tri automatique de matériaux granulaires, y compris le plastique. Tous ces dispositifs qui ont été réalisés pour la séparation électrostatique ont une partie triboélectrique et une zone de séparation à l'intérieur d'un fort champ électrique [7].

I.3.1 Séparateur triboélectrique à chute libre

Le séparateur électrostatique à chute libre présenté sur la Figure I.1 a été conçu pour la recherche fondamentale et appliquée dans le domaine de la tribo-électrisation, de la séparation des matériaux granulaires plastiques et de la purification des minerais. Dans un séparateur électrostatique à chute libre, les deux produits composant le mélange granulaire sont préalablement chargés par un dispositif de chargement triboélectrique, l'un avec une charge négative et l'autre avec une charge positive. Le mélange tombe ensuite dans une zone inter-électrodes où un champ électrique intense est créé par les électrodes reliées à des sources de haute tension de polarités opposées. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode de signe opposé à leur charge acquise [3].

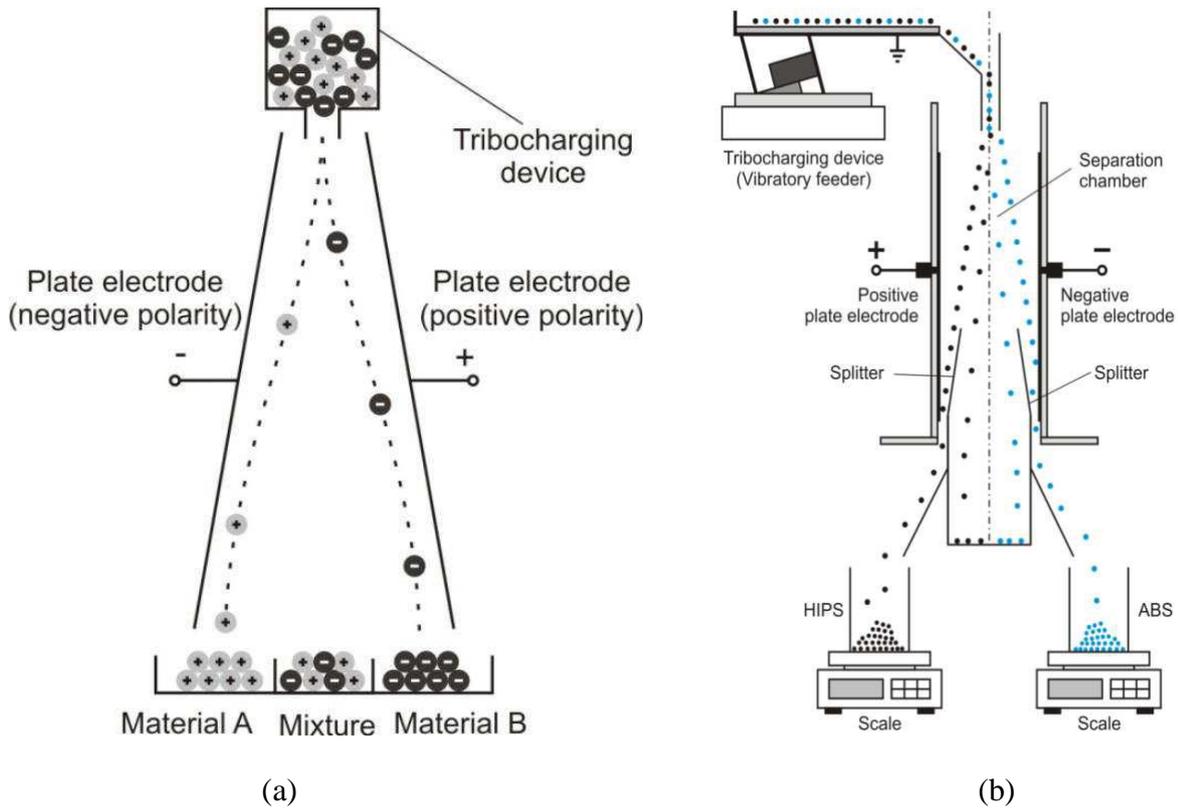


Figure I.1: (a) Principe du séparateur tribo-électrostatique à chute libre ; (b) Cas concret [4].

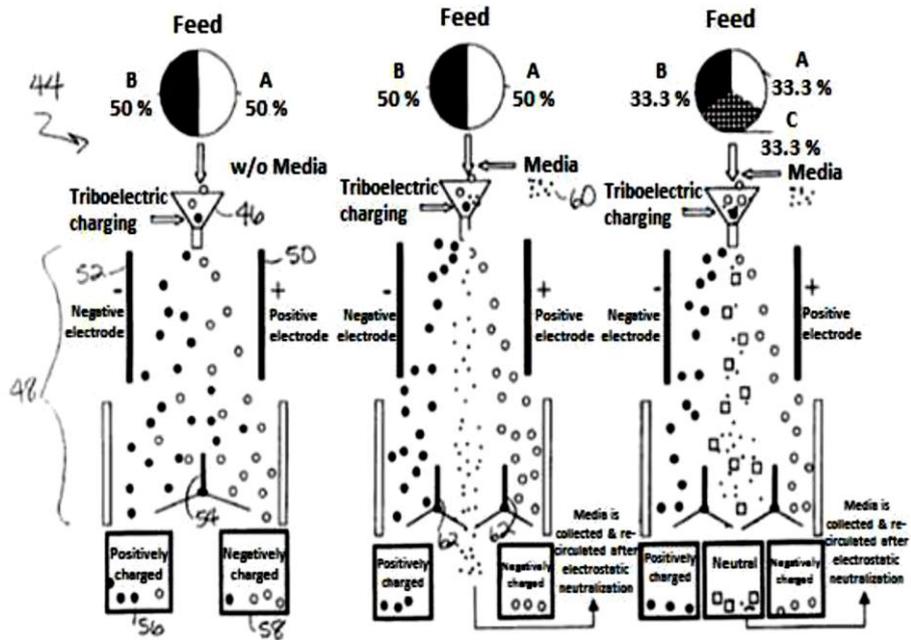


Figure I.2: Ajout d'un média dans un mélange traité par un séparateur électrostatique à chute libre [8]. (a) Séparation d'un mélange binaire, sans média ; (b) Séparation d'un mélange binaire avec média ; (c) Séparation idéal d'un mélange ternaire avec média.

Beaucoup de brevets ont été déposés sur des installations de séparation à chute libre. L'un d'entre eux ne concerne pas l'installation en elle-même, mais le mélange à traiter. Xiao et al indique que l'ajout d'un média dans le mélange augmente la quantité de charge acquise par les particules et facilite donc la séparation, lors de son passage dans un dispositif de charge Figure I.2. Un autre type de brevet déposé sur un séparateur à chute libre est proposé par Lee.

Cette installation Figure I.3 comprend un système de cyclone qui aspire les produits à séparer et les transporte à travers un dispositif de chargement Figure I.4, puis jusqu'à un séparateur à chute libre. Ce séparateur permet de séparer les composants du mélange binaire qui y est introduit [9].

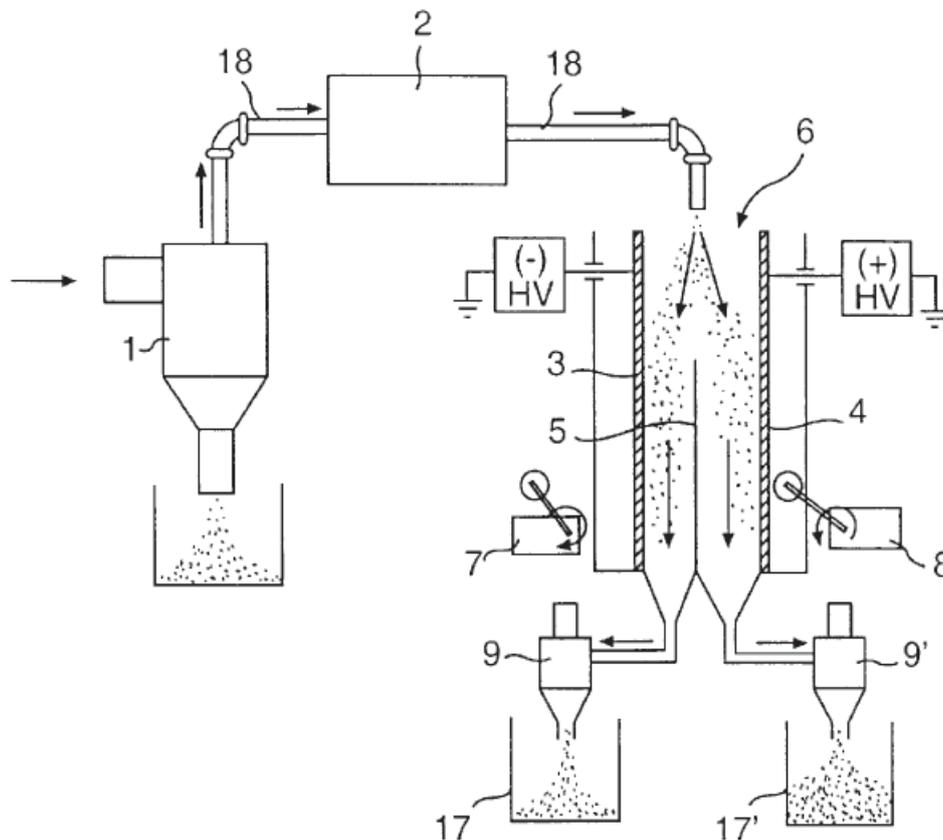


Figure I.3: Représentation schématique de l'installation proposée par Lee [9]. (1) Cyclone retirant les plus grandes particules ($> 125 \mu\text{m}$) ; (2) Dispositif de charge triboélectrique ; (6) Séparateur électrostatique contenant deux plaques de cuivre parallèles (3) et (4) et un déflecteur (5) ; (7) et (8) Marteaux frappant les plaques pour faire tomber les particules collées aux plaques ; (9) et (9') Cyclones ; (17) et (17') Boîtes collectrices.

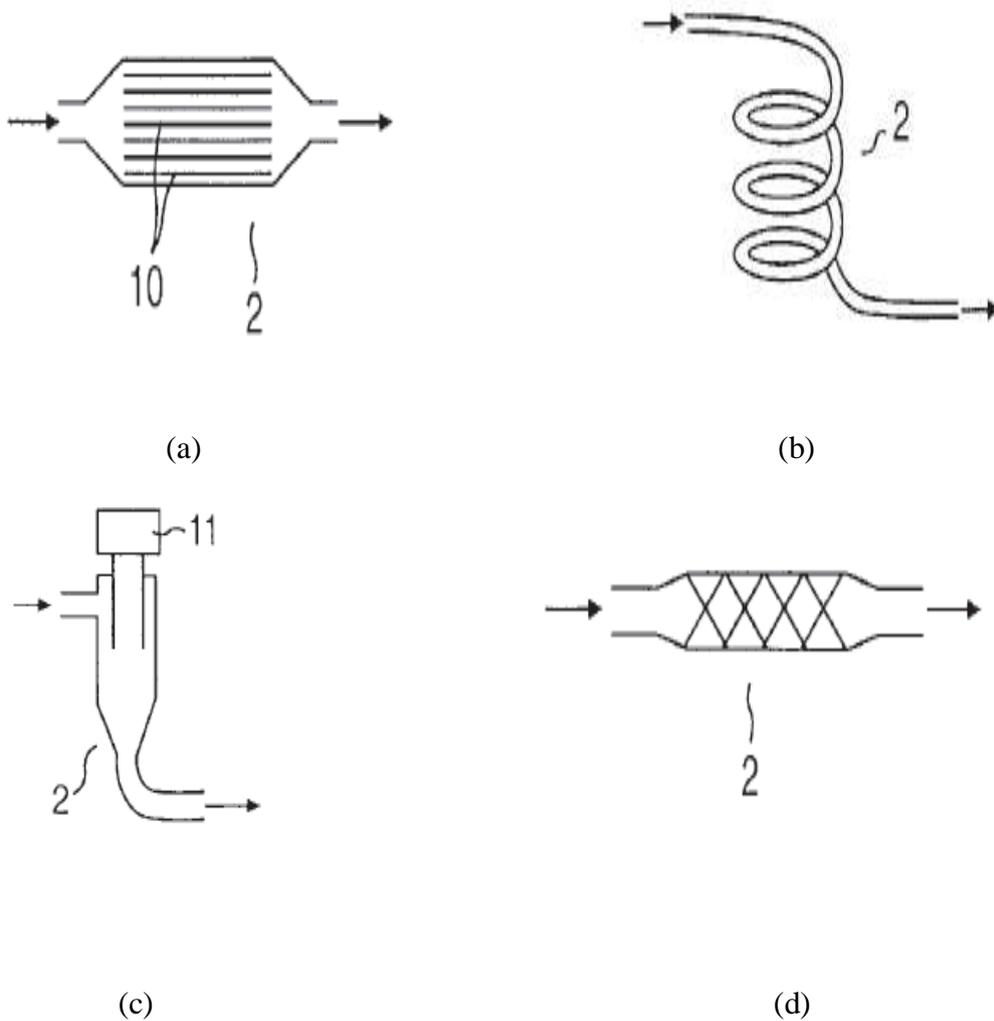


Figure I.4: Représentation schématique de dispositifs de charge pouvant être utilisés dans l'installation brevetée par Lee [9]. (a) *Dispositif en nid d'abeille* ; (b) *Tube en forme de spirale* ; (c) *Cyclone* ; (d) *Plaque en zigzag*.

I.3.2 Séparateur triboélectrique à tapis roulant

Le schéma de la Figure I.5 explique le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant. Les particules sont chargées par un dispositif de chargement statique, puis elles tombent sur un tapis roulant qui les transporte vers la zone de séparation. La séparation est réalisée par une électrode haute tension qui attire les particules d'une polarité et repousse les particules de polarité opposée, grâce aux forces électriques de Coulomb [5].

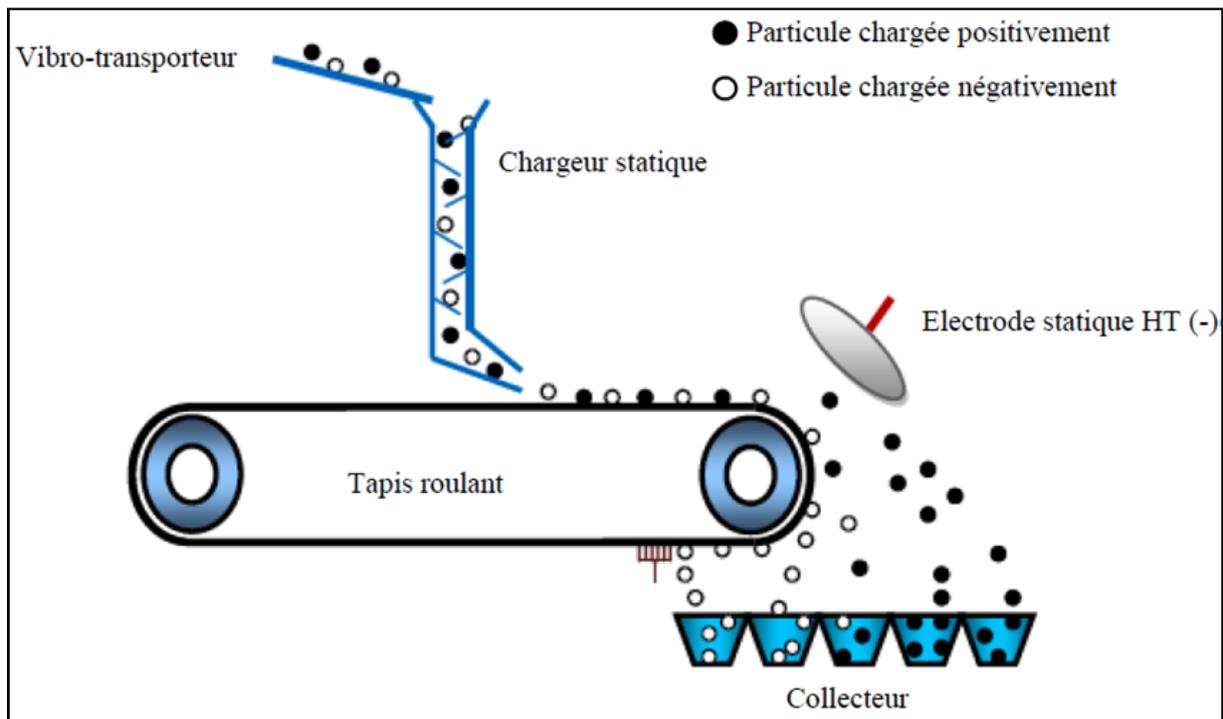


Figure I.5: Représentation schématique d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant [5].

I.3.3 Séparateur tribo-électrostatique à tambour

Un autre type de séparateur, plus utilisé dans l'industrie, est le séparateur à tambour. Dans ces installations (Figure I.6 et Figure I.7), typiquement utilisées pour la séparation des mélanges de matériaux conducteurs et non-conducteurs, les mélanges de matériaux isolants, sont également traités comme dans le dispositif (51) de l'installation représentée sur la Figure I.6. Les particules chargées de signe opposé à l'électrode haute tension (53) sont attirées vers celle-ci et sont collectées dans le compartiment (54 A) du collecteur de produits. Les autres particules restent collées par la force d'image électrique à l'électrode cylindrique tournante liée à la terre (52) ; la brosse (72) les détache et elles tombent dans le compartiment 54 B du collecteur. Le fonctionnement du séparateur à convoyeur métallique est similaire (Figure I.7). C'est la bande métallique liée à la terre (3) qui entraîne les particules préalablement chargées par le dispositif (11) dans la zone de champ électrique créée par le système d'électrodes (4). En fonction du signe de leur charge, les particules sont collectées dans l'un des deux compartiments (9) ou (10) [6].

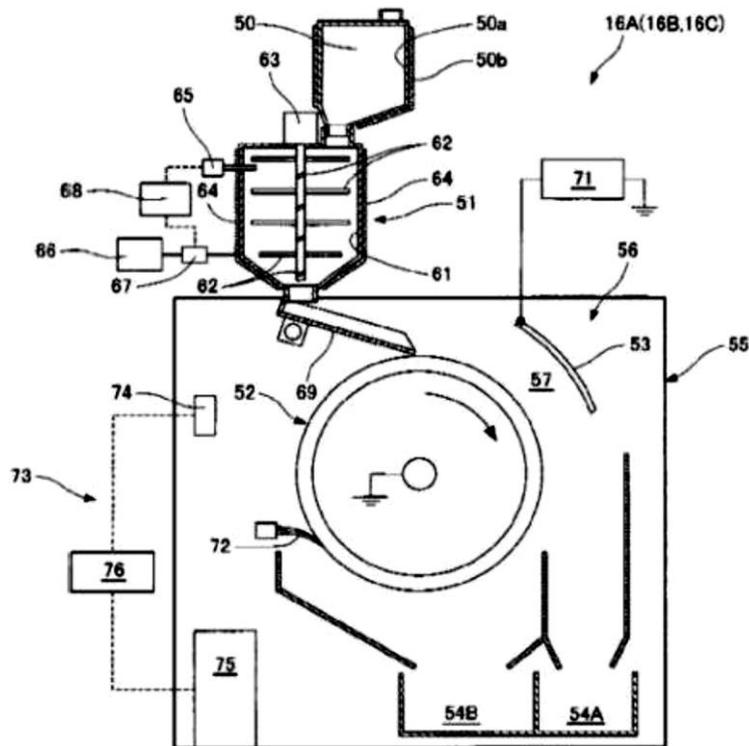


Figure I.6: Séparateur tribo-électrostatique à tambour [6] ; 50 : Entonnoir ; 51 : Dispositif de charge tribo-électrique ; 52 : Electrode cylindrique tournante liée à la terre ; 53 : Electrode haute tension ; 54 A et B : Collecteurs de produits ; 72 : Brosse.

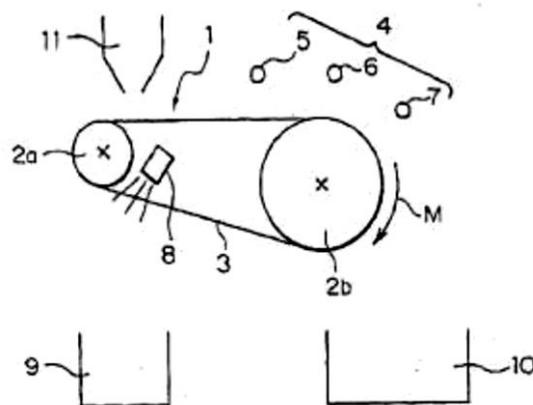


Figure I.7: Séparateur tribo-électrostatique à convoyeur [6] ; 1 : Convoyeur métallique ; 2 a et b : Cylindres d'entraînement de la bande du convoyeur ; 3 : Bande métallique du convoyeur, liée à la terre ; 4 : Système d'électrodes haute tension (5, 6, et 7) ; 8 : Système de nettoyage de la bande ; 9 et 10 : Collecteurs de produits ; 11 : Alimentation (dispositif décharge).

I.4 Dispositifs de chargement triboélectrique

La charge statique obtenue par l'effet triboélectrique se produit dans des systèmes où la conductivité du matériau est généralement faible, ce qui permet de générer des niveaux de charge élevés. Cette charge importante est nécessaire pour trier les particules dans de forts champs électriques. Certaines recherches ont été menées sur les systèmes de charge triboélectriques utilisant des ventilateurs, des tubes rotatifs, des lits fluidisés (générés par des soufflantes et des compresseurs), des micro-cyclones et des chargeurs statiques [3].

I.4.1 Dispositif de charge par ventilateur

Le dispositif consiste en une chambre cylindrique en polyvinyle chlorure (PVC). A son extrémité inférieure, la chambre est munie d'une hélice coaxiale, entraînée par un moteur électrique à courant continu à vitesse variable. Ce dispositif entraîne les matériaux granulaires en un mouvement hélicoïdal qui est censé favoriser leur charge triboélectrique par collision entre granulés, entre les granulés et l'hélice ainsi que par la collision des granules avec la paroi. Le signe et l'ampleur de la charge de chaque granule sont déterminés par l'action combinée de ces trois mécanismes physiques comme l'explique si bien la Figure I.8 qui résume le fonctionnement du dispositif a chargement par hélice [10].

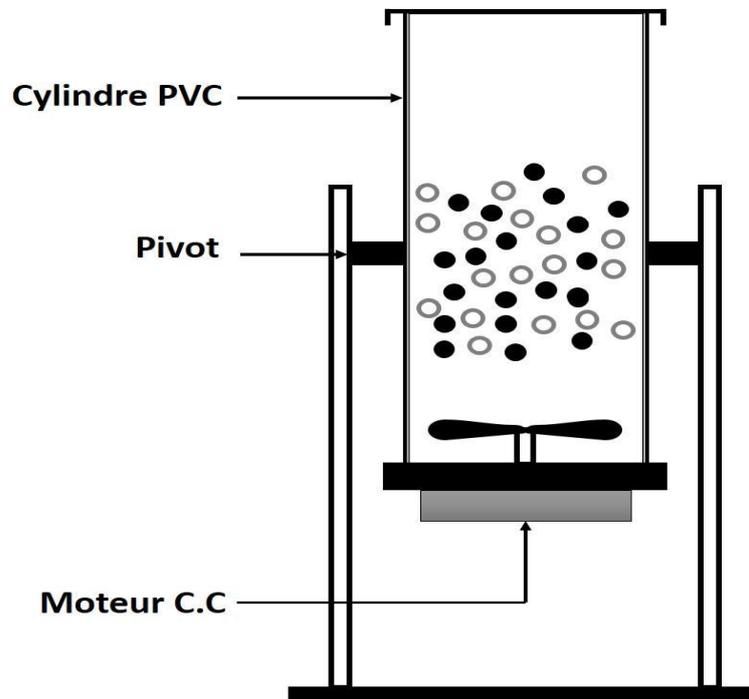


Figure I.8: Représentation schématique du dispositif d'un chargement par ventilateur [10].

I.4.2 Dispositif de charge par cyclone

Le dispositif est constitué d'un cylindre isolant et d'un ventilateur dont la vitesse de rotation peut être modifiée (Figure I.9). Le dispositif permet de souffler les particules à charger par frottement avec les parois internes du cylindre, où elles subissent un frottement continu contre la paroi interne. La majorité de charge acquise s'effectue lors du contact des particules avec cette paroi [3]. Le principe de fonctionnement de ce dispositif permet aussi une alimentation continue du séparateur tribo-aéro-électrostatique, mais son efficacité dans le cas des particules fines reste à tester [11].

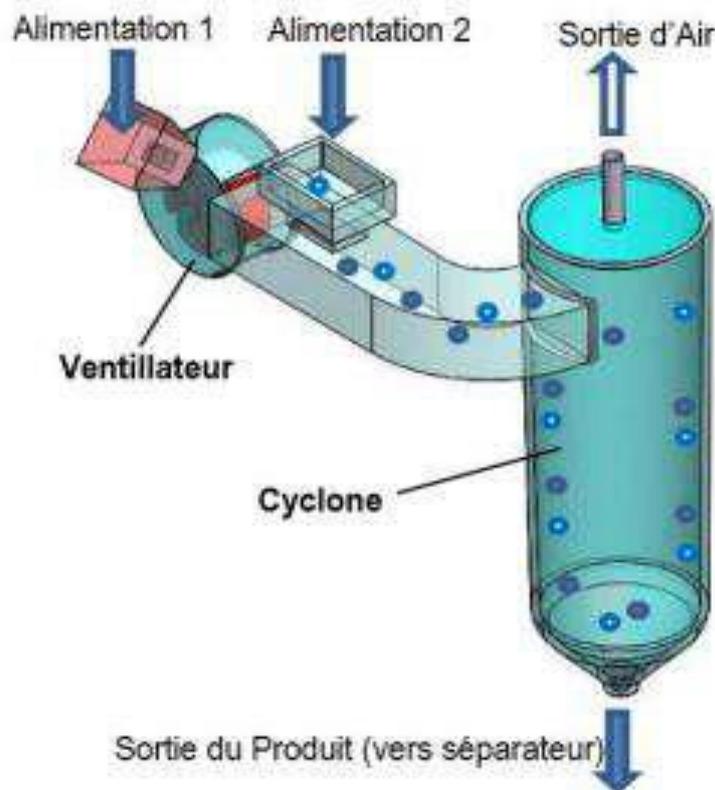


Figure I.9: Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [11].

I.4.3 Dispositif de chargement statique

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique en matériau isolant (Figure I.10) dans laquelle sont installées plusieurs plaques amovibles inclinées. Les particules glissent le long de ces plaques sous l'effet de la gravité et se chargent par frottement avec elles [12].

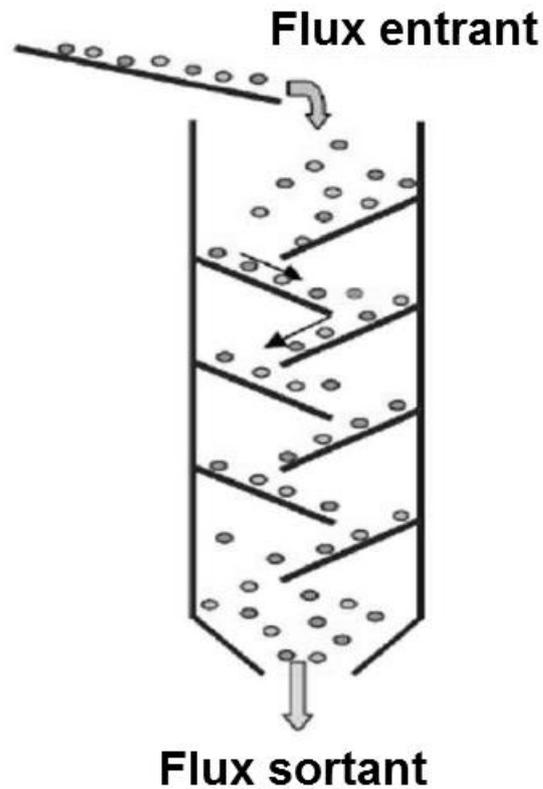


Figure I.10: Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [13].

I.4.4 Dispositif de charge par vibrations

Ce dispositif a été développé par Blajan et al (Figure I.11). Le matériau à charger glisse dans un canal Zig-Zag, mis en mouvement vibratoire sur les axes X et Y. L'oscillation de l'unité de charge est commandée par un moteur électrique associé à un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent d'abord avec les parois du dispositif. En changeant la vitesse du moteur, le mouvement de rotation de l'équipement de charge peut être modifié [13].

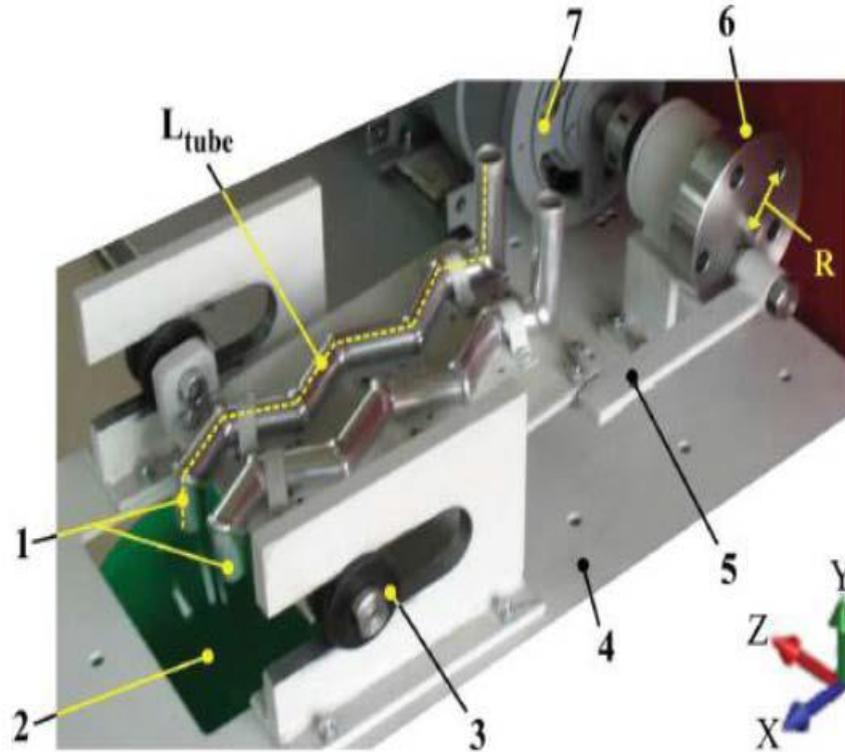


Figure I.11: Dispositif à vibrations (1 : tubes de charge ; 2 : sortie des particules chargées ; 3 : glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ; R : rayon ; X, Y, Z : direction du mouvement ; L_{tube} : longueur du tube) [13].

I.4.5 Dispositif de chargement à lit fluidisé

C'est le dispositif le plus largement utilisé pour le chargement triboélectrique de matériaux granulaires ou pulvérulents. Dans un tel équipement (Figure I.12), le matériau granulaire à charger est placé sur une plaque perforée au fond de la chambre rectangulaire. Le lit fluidisé est généré par une soufflante d'air à vitesse variable. L'air ascendant assure la tribo-électrification des particules. Lors de la fluidisation, les particules transportées vers le haut et dispersées dans le volume de la chambre de fluidisation, Les particules acquièrent des charges de signe opposé par de multiples collisions entre les particules et entre les particules et la paroi interne du chargeur [14].

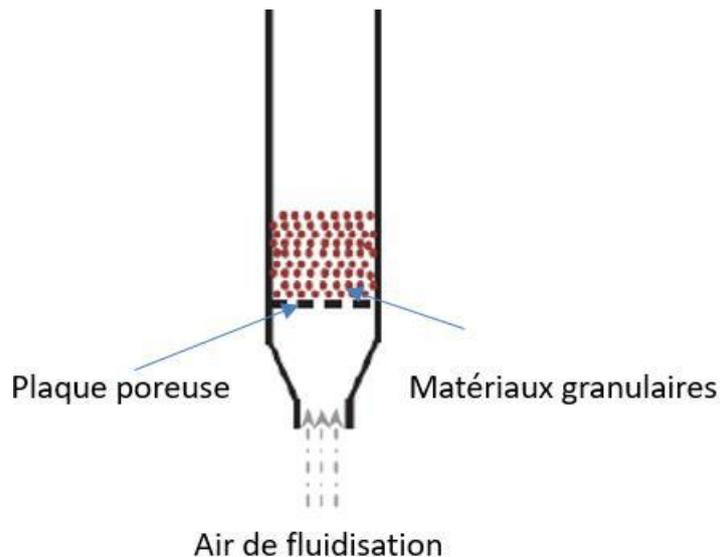


Figure I.12: Représentation schématique d'un dispositif de chargement à lit fluidisé [14].

I.4.6 Dispositif de charge à cylindre rotatif

Le dispositif de chargement à cylindre rotatif est un tube isolant utilisé comme installation de chargement triboélectrique. Le mélange granulaire est mis en mouvement à l'intérieur du cylindre, tournant autour d'un axe horizontal ou légèrement incliné (Figure I.13), et les particules peuvent traverser le tube sous l'effet de la gravité. Pour créer l'agitation du mélange granulaire, des nervures faites du même matériau que le tube lui-même sont présentes. Elles s'étendent radialement vers l'intérieur à partir de la paroi du tube. L'accumulation de charge des particules est attribuée à deux mécanismes :

Les collisions entre particules (mécanisme primaire) et entre les particules et la paroi du cylindre (mécanisme école intermédiaire) [15].

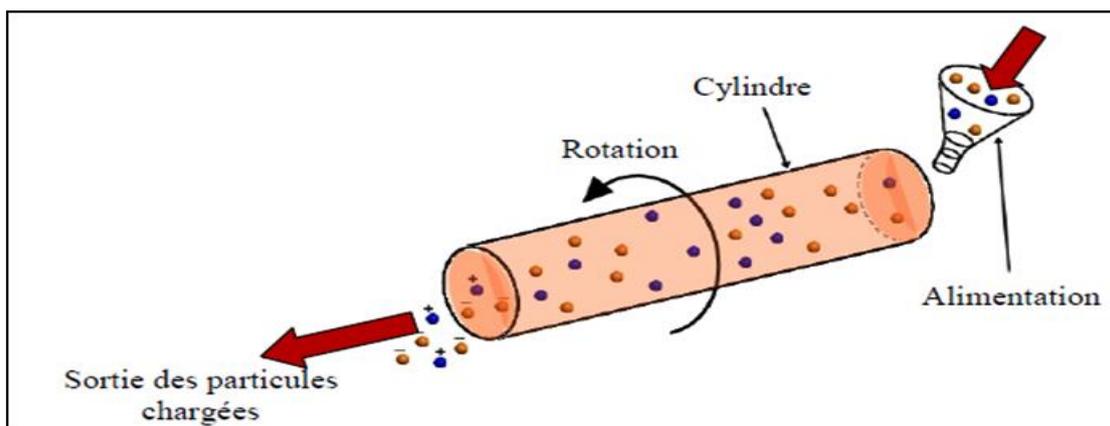


Figure I.13: Dispositif de tribo-charge à cylindre rotatif [15].

I.5 Conclusion

Les phénomènes triboélectriques sont extrêmement complexes et mal expliqués et ils sont influencés par de multiples facteurs externes et internes. Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur les dispositifs triboélectriques et les séparateurs triboélectriques des déchets d'équipements électriques et électroniques et leur efficacité a déjà été prouvée pour certaines applications.

Chapitre II : La méthode des plans d'expériences

II.1 Introduction

Les plans d'expériences permettent une meilleure organisation des tests accompagnant une recherche scientifique ou une recherche industrielle. Ils s'appliquent à beaucoup à partir du moment où nous recherchons les connexions qui existent, à travers les disciplines et à travers toutes les industries entre la quantité d'intérêt y et la variable x_i . Il faut penser au plan expérimental si l'on s'intéresse aux fonctions du type suivant : $y = f(x_i)$.

Grâce à la planification expérimentale, on peut obtenir un maximum d'informations avec le minimum d'expérience. Pour cela, il faut suivre les règles mathématiques et adopter une méthode rigoureuse. Il existe de nombreux modèles expérimentaux pour convenir à toutes les conditions rencontrées par l'expérimentateur. Les principes de base de cette science seront indiqués et passez en revue les principaux plans.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences repose sur deux concepts essentiellement, l'espace expérimental et la modélisation mathématique du nombre d'études [16].

II.2 Définition d'un plan d'expérience

Le plan d'expériences est une technique qui quantifie l'influence de différents facteurs sur les réponses dans un domaine expérimental défini afin de les optimiser. L'élaboration du plan d'expérience commence par extraire du domaine d'étude un nombre suffisant de combinaisons pour estimer avec incertitude que les coefficients les plus petits mais aussi homogènes du modèle polynomial peuvent être pertinents pour l'étude en termes de respect des contraintes, qu'elles soient techniques ou économiques [17].

II.3 Types des plans d'expériences

Il existe plusieurs types de plans d'expériences. Les plus utilisés sont :

- Plans de criblage : pour trouver les facteurs les plus influents sur une réponse.
- Plans de modélisation ou plans pour surfaces de réponse : modèles du 1er ou 2nd degré.
- Plans de mélange : adaptés aux facteurs dépendants.
- Plans factoriels complets : toutes les combinaisons des niveaux de facteurs sont présentes.

- Plans factoriels fractionnaires : tous les niveaux de chaque facteur sont présents, mais pas toutes les combinaisons possibles de facteurs.

Le choix du plan dépend essentiellement de la nature du problème à résoudre, du degré de généralité des conclusions recherchées et des ressources disponibles (matériel expérimental, personnel, contraintes de temps, etc.) [17].

II.4 Intérêt des plans d'expériences

- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- Détection des interactions éventuelles.
- Détermination des résultats avec une bonne précision.
- Identifier rapidement les facteurs d'influence avec un minimum d'expérience.
- Optimisation de l'organisation des essais de façon à obtenir le maximum d'informations avec un minimum d'essais.
- Minimiser le coût d'obtention d'informations fiables [18].

II.5 Principe des plans d'expériences

Les techniques de plan d'expériences permettent de répondre aux exigences de l'expérimentateur. En effet, leur principe est de modifier simultanément les niveaux d'un ou plusieurs facteurs (variable discrète ou continue) dans chaque expérience, il permet d'autre part, une forte diminution du nombre d'expériences (tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés), et d'autre part, l'identification des interactions entre facteurs et déterminer la configuration (optimale de ces facteurs en fonction de la réponse).

Actuellement, il existe différents types de plans. Selon leurs caractéristiques, Il résout certains problèmes particuliers. Cependant, ils peuvent être divisés en deux grandes catégories [16] :

- Les plans qui permettent d'étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres.
- Les plans qui permettent de régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

II.6 L'avantage du plan d'expériences

Les plans d'expériences sont à la base des protocoles industriels modernes. Les expérimentateurs ont découvert que la conception d'expériences est plus efficace que l'approche habituelle pour mener des expériences. De plus, les expérimentateurs ont accès à de puissants outils de réflexion et d'analyse qui leur permettent de réaliser leurs expériences en toute sécurité et avec précision [19]. Les principaux avantages de cette méthode sont [20] :

- Une diminution du nombre d'essais.
- Possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs.
- Détection des éventuelles interactions entre facteurs.
- Modélisation très aisée des résultats.
- Détermination des résultats avec une bonne précision.

II.7 Démarche méthodologique d'un plan d'expériences

Le plan d'expériences, dans son processus d'acquisition de connaissance, vise à identifier un modèle liant les réponses aux facteurs. Les étapes à suivre sont de l'ordre de cinq :

- **Formalisation du problème** : Cela nous permet de décrire le but du plan d'expérience, d'autre part les entrées et les sorties de la boîte noire symbolisant le phénomène.
- **Construction du plan (planification)** : Le but de cette étape est de créer une liste des essais expérimentaux et de définir leur ordre d'exécution.
- **Expérimentation** : Elle sert à mesurer la réponse pour toutes les combinaisons des facteurs apparaissant dans la matrice d'essai.
- **Analyse des résultats** : Cette étape consiste à extraire le maximum d'informations des résultats expérimentaux et répondre à la question posée. Cela vous permet d'ajuster un modèle de régression qui décrit l'effet de chaque facteur sur les réponses sélectionnées.
- **Optimisation de la réponse** : Cette étape est une synthèse des connaissances acquises. Elle permet de valider les conclusions et de décider des actions à entreprendre. Elle consiste à trouver des conditions expérimentales qui correspondent à l'optimum de la réaction étudiée [19].

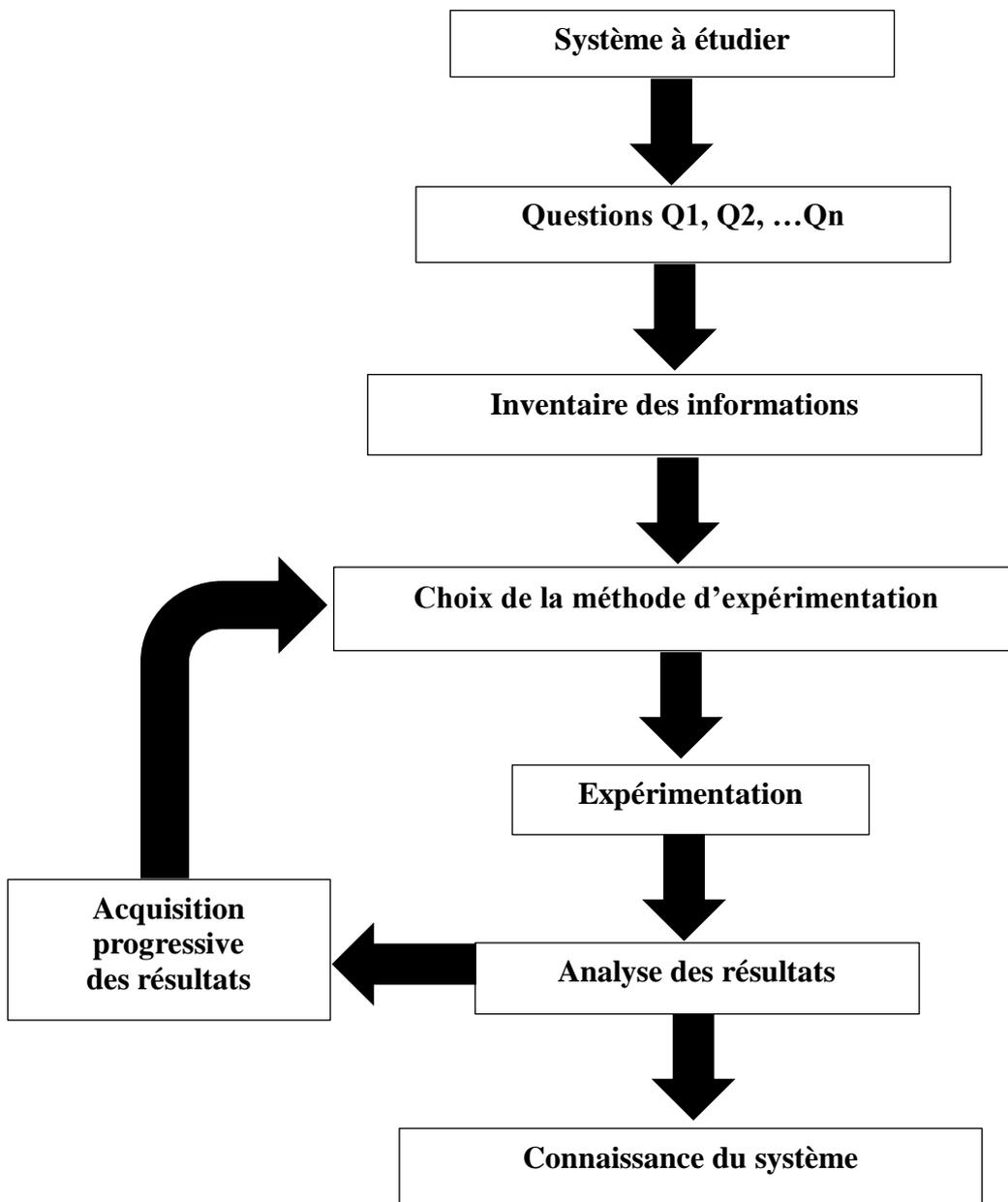


Figure II.1: Les étapes à suivre pour l'établissement d'un plan d'expériences [19].

II.8 Terminologie

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée y , porte le nom de réponse. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées facteurs. On parle donc des facteurs qui influent sur une réponse. Les termes facteur et réponse sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.

II.8.1 Le facteur

Est un paramètre qualitatif ou quantitatif dont sa variation est susceptible de modifier le fonctionnement de ce dernier

II.8.1.1 Les différents types de facteurs

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. Il existe de nombreux types de facteurs : facteurs continus, facteurs discrets, facteurs ordonnables et facteurs booléens.

- **Facteurs continus** : La pression est un exemple de facteur continu. Toutes les valeurs possibles peuvent être sélectionnées dans un intervalle de pression donné. Il en est de même pour la longueur, la concentration et la température. Par conséquent, les valeurs obtenues par des facteurs continus sont représentées par des nombres continus.
- **Facteurs discrets** : Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que certaines valeurs. Ces valeurs ne doivent pas nécessairement être des nombres. Ces valeurs ne doivent pas nécessairement être des nombres. Les facteurs discrets peuvent également être représentés par des noms, des lettres, des propriétés ou des nombres, mais ils n'ont pas de valeur numérique en soi et n'ont qu'une signification de référence. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.
- **Facteurs ordonnables** : Ce sont des éléments séparés qui peuvent être disposés dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit ou 1er, 2eme, 3eme, 4eme, etc.
- **Facteurs booléens** : Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc. [21].

II.8.1.2 Domaine d'un facteur

La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée niveau.

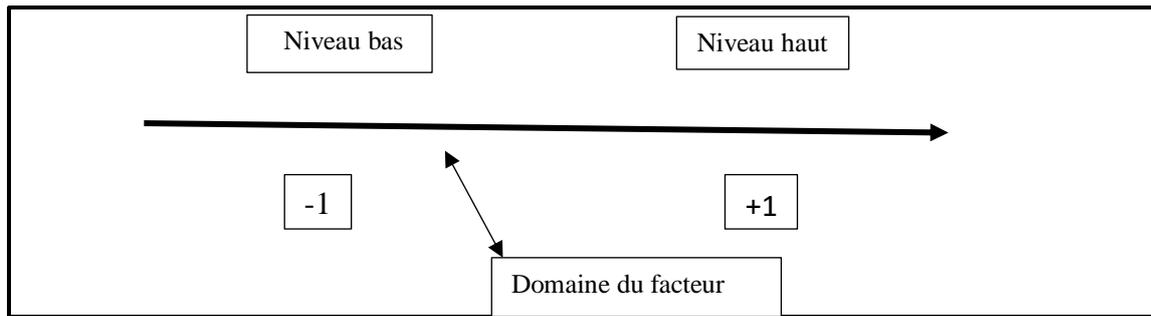


Figure II.2: Le domaine du facteur, le niveau bas du facteur est noté -1 et le niveau haut $+1$.

Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas (-1). La borne supérieure est le niveau haut ($+1$).

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. À l'intérieur du domaine d'un facteur continu toutes les valeurs sont théoriquement possibles [21].

II.8.2 La Réponse

C'est la grandeur d'intérêt mesuré, afin d'évaluer l'effet du facteur étudié.

II.8.2.1 Surface de réponse

L'ensemble de tous les points de la zone d'étude correspond à l'ensemble des réponses situées sur une surface appelée surface de réponse (Figure II.3). Cette surface de réponse est très importante car elle décrit le comportement de la réponse à différents niveaux de facteurs.

Nous pouvons déduire le meilleur ajustement des facteurs pour répondre à la question donnée. Les plans d'expérience permettent de trouver cette surface de réponse tout en effectuant des essais et en obtenant une bonne précision de localisation. Connaître cette surface nous permettra de résoudre la plupart des problèmes rencontrés par les expérimentateurs [18].

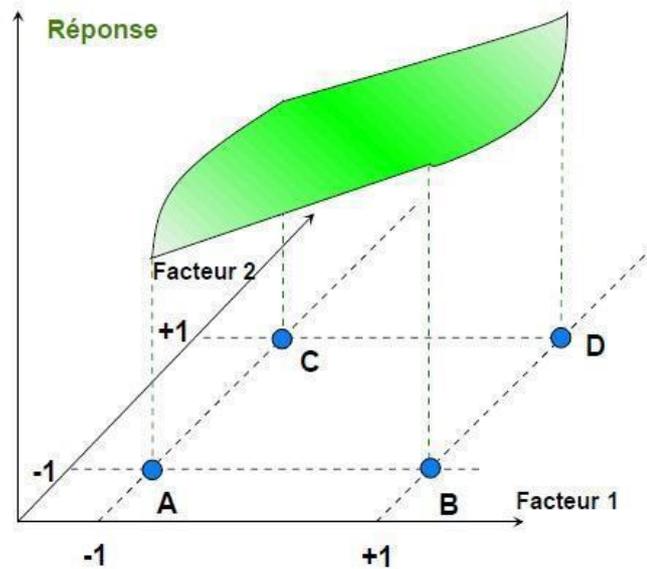


Figure II.3: Surface de réponse [18].

II.8.3 Matrice d'expérience

Une matrice d'expériences est un objet mathématique qui représente l'ensemble des expériences à réaliser sous forme codée [0, 1] ou non codée (variables). Il s'agit d'un tableau composé de n lignes correspondant aux n expériences réalisées et de k colonnes correspondant aux k variables étudiées. Les éléments X_{ij} de la matrice ainsi formée correspondent aux valeurs de niveau occupées par la j ième variable dans la i ème expérience [18].

	Facteur A	Facteur B	Facteur C	Réponses
N° Essais	X1	X2	X3	y
1	-1	-1	-1	y1
2	1	-1	-1	y2
3	-1	1	-1	y3
4	1	1	-1	y4
5	-1	-1	1	y5
6	1	-1	1	y6
7	-1	1	1	y7
8	1	1	1	y8

Tableau II.1 : Matrice d'expériences [22].

II.8.3.1 Formules de codage

$$X_j = \frac{Z_j - Z_j^0}{\Delta Z_j}, \quad j=1, 2, \dots, K \quad (\text{II.1})$$

$$Z_j^0 = \frac{Z_{jmax} + Z_{jmin}}{2} \quad (\text{II.2})$$

Et

$$\Delta Z_j = \frac{Z_{jmax} - Z_{jmin}}{2} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

X_1, X_2, \dots, X_k : Variables centrées réduites ou variables codées ;

Z_1, Z_2, \dots, Z_k : Facteurs contrôlables (variables réelles) ;

$Z_1^0, Z_2^0, \dots, Z_k^0$: Variables réelles correspondantes au centre du plan ou parfois niveau fondamental ;

ΔZ_j : Unité ou intervalle de variation suivant l'axe des Z_j ;

Z_{min} : Valeur minimale de la variable réelle ;

Z_{max} : Valeur maximale de la variable réelle.

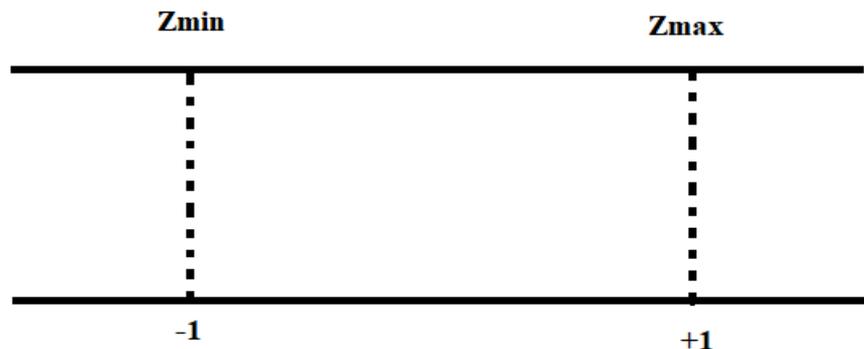


Figure II.4: passage des variables réelles aux variables codées (Variables centrées réduites)

[22].

II.9 Modélisation par les plans d'expériences

La modélisation est le véritable objectif de la planification expérimentale. Une fois les facteurs d'influence identifiés, il peut alors trouver l'équation ou la fonction qui décrit le mieux la variation du phénomène étudié en fonction de ces facteurs.

Toute réponse expérimentale peut être écrite sous la forme suivante :

$$y = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_k) + \varepsilon \quad (\text{II.4})$$

$$\begin{array}{ccccc} \text{Réponse} & = & \text{Facteurs} & + & \text{Erreur} \\ \text{expérimentale} & & \text{contrôlés} & & \text{expérimentale} \end{array}$$

Où f est une fonction inconnue (modèle théorique) des facteurs influents contrôlés

(Z_1, Z_2, \dots, Z_k) .

Cette fonction n'est pas accessible expérimentalement et ne peut être estimée que par lissage avec un polynôme. L'idée de base régissant ce choix est que, près d'un point, toute fonction peut être développée en une série de Taylor et peut donc être remplacée par un polynôme. Selon l'équation de régression obtenue empiriquement, s'écrit sous la forme suivante :

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^k b_{uj} x_u x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 \quad (\text{II.5})$$

Où x_j sont les coordonnées des facteurs Z_j exprimées en variables centrées réduites, ($j = 1, \dots, k$). \hat{y} est l'estimée (valeur prédite par le modèle) de y (valeur expérimentale). Chaque valeur expérimentale y_i est sujette aux erreurs aléatoires ε_i à distribution normale telle que [22] :

$$y_i = \hat{y}_i + \varepsilon_i \quad (\text{II.6})$$

Avec :

b_0 : terme constant de l'équation de régression ;

b_j : effets linéaires ;

b_{uj} : effets d'interactions ;

b_{jj} : effets quadratiques.

II.10 Conclusion

La conception des plans d'expériences comprend l'organisation des plans d'expériences et l'analyse décisionnelle en utilisant plusieurs outils et tests statistiques. L'utilisation des plans d'expériences conduit à l'établissement d'un plan qui comprend les résultats les plus précis avec le moins d'expériences [23].

Chapitre III : Etude expérimentale d'un séparateur électrostatique à chute libre

III.1 Introduction

Il y a plusieurs configurations de séparateurs électrostatiques qui ont été réalisées jusqu'à nos jours. Dans ce chapitre, nous présenterons le processus de séparation d'un mélange de particules composé de déchets PC et HIPS. La séparation des mélanges isolants granulaires PC et HIPS se fait sur un séparateur tribo- électrostatique à chute libre représenté sur la Figure III.1.

Il se compose de deux parties, la première partie est utilisée pour charger la matière à travers un dispositif vibrant recouvert de matières PET. La deuxième partie, est une chambre de séparation composée de deux électrodes parallèles disposées verticalement, dont le principe comprend l'action combinée de la force de gravité et de la force électrique, sur le mélange des particules isolantes à séparer et à collecter dans leur compartiment respectif.

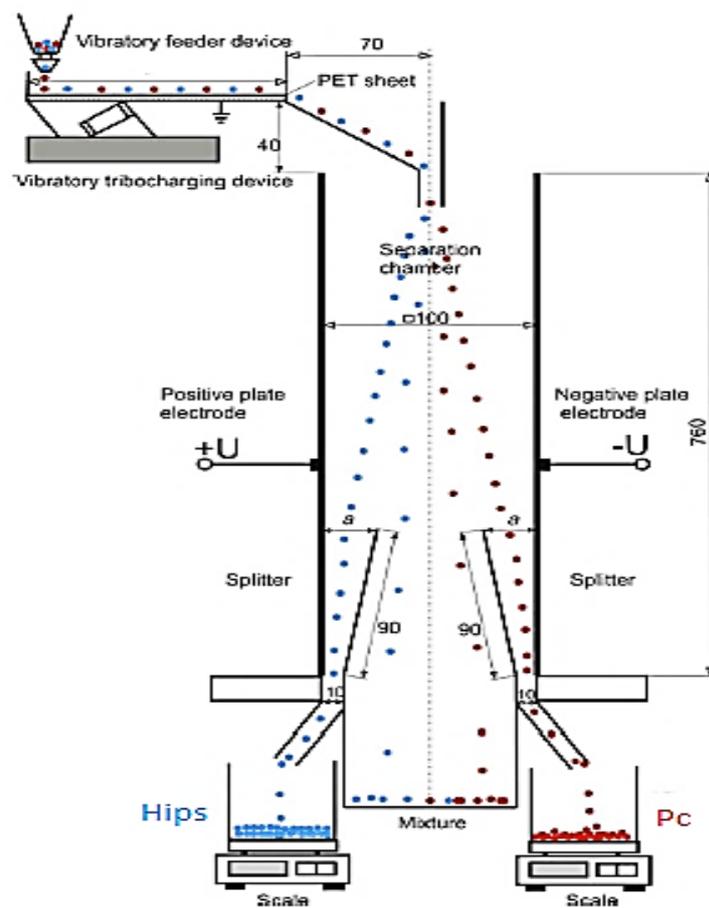


Figure III.1: Représentation graphique du séparateur à chute libre.

III.2 Le chargement des matériaux par vibration

Le chargement par vibration est une classe d'équipements qui a fait l'objet de recherches rigoureuses en relation avec le développement de nouveaux procédés de séparation électrostatique. Le dispositif de chargement vibratoire représenté sur la Figure III.2 est constitué d'un vibreur Vibra France de type APB4/30 monté avec plaque métallique en acier inoxydable recouverte d'un matériau isolant de type polyéthylène téréphtalate (PET). Les dimensions de la plaque sont : la longueur $l_0=230$ mm, la largeur $l=100$ mm et la hauteur $h=30$ mm.

Pour éviter l'accumulation de charge, la plaque métallique vibrante est mise à la terre. L'amplitude de vibration qui représente la vitesse de transport des particules granulaire sur la plaque vibrante est réglable par potentiomètre. La matière plastique est chargée du fait des collisions entre les particules et la feuille de PET. La charge acquise sur la plaque vibrante est mesurée en collectant les particules avec un seau de Faraday, relié à un électromètre électronique (Keithley Instruments, Modèle 6415), en fonction des paramètres de configuration du dispositif de chargement qui est la vitesse de déplacement V (cm/s).

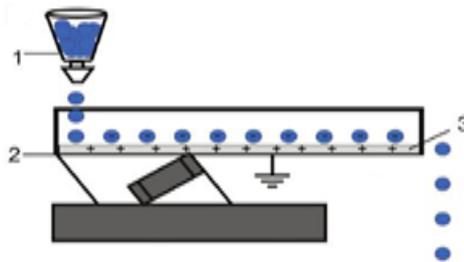


Figure III.2 : Représentation schématique du dispositif expérimental 1 - Dispositif d'alimentation vibrant, 2- Dispositif de chargement par vibrant tribo-chargeur, 3- feuille de PET couvrant le plateau vibrant.

III.3 Détermination du domaine expérimental

Des expériences préliminaires ont été réalisées afin de déterminer le domaine de variation de la vitesse de transport V [cm/s] et de la tension d'alimentation U [kV].

Un intervalle de vitesse de transport est donné entre une vitesse minimale de 6 cm/s et une vitesse maximale de 9 cm/s pour garantir la présence d'une seule couche de granules sur le plateau du tribo-chargeur, assurant ainsi un taux de couverture de 100%.

La tension d'alimentation maximale et minimale est égale à $V=14$ kV et $V= 16$ kV elles ont été choisies de manière à éviter tout risque de claquage lors de l'alimentation des électrodes.

Le résultat obtenu pour les domaines de variation des variables est résumé dans le tableau III.1 :

Vitesse de transport $V(\text{cm/s})$	6 cm/s – 9.91 cm/s
Tension d'alimentation $U(\text{kv})$	14 kv – 16 kv

Tableau III. 1 : Variation de la vitesse et de la tension.

Lors de la séparation dans un séparateur à chute libre, des forces électrostatiques et mécaniques agissent sur les particules, comme la montre la Figure III.. Une particule de masse m , chargée Q , évolue dans un champ électrique uniforme d'intensité E .

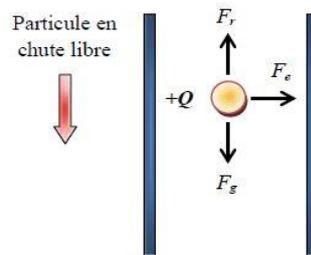


Figure III.3 : Représentation schématique des forces agissant sur une particule chargée en chute libre dans un champ électrique.

Selon l'équation de la deuxième loi de Newton, le mouvement des particules chargées dans le champ électrique fort généré entre les deux électrodes du séparateur à chute libre est influencé par la force du champ électrique F_e et la force gravitationnelle F_g .

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} = \vec{F}_e + \vec{F}_g \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$$\vec{F}_e = Q * \vec{E} \quad (\text{III.2})$$

$$\vec{F}_g = m * \vec{g} \quad (\text{III.3})$$

$$\vec{E} = \frac{\Delta U}{d} \quad (\text{III.4})$$

\vec{F}_r : La force de l'air supposée négligeable ;

m : La masse de la particule [kg] ;

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

\vec{Q} : La charge de la particule [C] ;

\vec{E} : Le champ électrique [kv/m] ;

ΔU : La différence de potentiel [kv] ;

d : La distance entre les électrodes [m].

III.4 Etude expérimentale

I) Des expériences ont été réalisées sur un mélange de 100g de granules en plastique, dont 25% de PC et 75% de HIPS, les granules présentaient une taille millimétrique variable, allant de 2 mm à 5 mm.

Ces granules ont été chargés sur un dispositif de tribo-chargeur par vibration. Il a été constaté que les granules de pc se chargent positivement et les granules de HIPS se chargent négativement en contact avec la plaque vibrante couverte de PET. Cette observation conduit à la conclusion que les deux matériaux granulaires peuvent être séparés en utilisant le PET pour leur chargement triboélectrique.

En variant la vitesse de déplacement des granules sur le dispositif par vibration entre 6 cm/s à 9,91 cm/s, une variation de la charge des granules a été observée. De plus, la haute tension d'alimentation appliquée aux électrodes a été modifiée dans un intervalle allant de 14 kv à 16 kv. Ces ajustements ont entraîné la séparation des deux matériaux, chacun se retrouvant dans son compartiment respectif.

Le matériau chargé a été introduit dans un séparateur électrostatique à chute libre, où un champ électrique de haute intensité a été généré entre deux électrodes plates alimentées avec une tension U entre [14 kV 16 kV].

La pureté est un indicateur qui détermine l'efficacité du processus. Ce paramètre permet d'évaluer les essais (en pourcentage) du produit collecté, il est calculé selon la formule

$$\text{suivante : } P(\%) = \left(\frac{m_{ic}}{m_{tc}} \right) \cdot 100 \quad (\text{III.5})$$

Avec :

m_{ic} : masse du produit i collecté dans le compartiment qui lui est réservé ;

m_{tc} : masse totale collectée dans ce compartiment ;

Les résultats obtenus dans chaque compartiment sont illustrés dans le Tableau III.2.

Tableau III.2 : rapport de masse de PC et HIPS.

N	Tension (kv)	Vitesse (cm/s)	Masse HIPS (g)	Masse PC (g)	Compartiment HIPS		Compartiment PC	
					Masse HIPS(g)	Masse PC(g)	Masse PC(g)	Masse HIPS(g)
1	14	6	23.48	25.94	22.71	0.68	21.6	4.09
2	16	6	37.38	25.74	35.61	1.08	21.75	3.99
3	14	9.91	28.17	25.46	26.97	0.68	21.49	3.87
4	16	9.91	33.01	26.35	31.8	0.58	22.73	3.6
5	14	7.955	29.87	26.03	28.7	0.56	23.7	3.4
6	16	7.955	35.38	25.87	34.27	0.78	22.56	3.35
7	15	6	42.44	25.58	40.34	0.74	22.41	2.74
8	15	9.91	38.88	24.93	37.5	0.64	21.18	3.46
9	15	7.955	42.37	25.13	40.48	0.63	22.09	2.56
10	15	7.955	42.88	25.57	40.6	0.58	22.25	2.23
11	15	7.955	41.96	24.98	40.8	0.64	22.34	2.19

Le processus de séparation des produits collectés dans chaque compartiment permet de calculer le rendement de chaque matériau. Cet indicateur détermine l'efficacité du processus et

permet d'évaluer le séparateur. Le produit récupéré en rapport avec le produit total introduit pour calculer le rendement selon la formule suivante :

$$W(\%) = \left(\frac{m_{ic}}{m_{it}}\right).100 \quad (\text{III.6})$$

m_{ic} : masse du produit i collecté dans le compartiment qui lui est réservé ;

m_{it} : masse totale du produit i introduit dans le séparateur ;

Les résultats de l'expérience réalisée sur les mélanges PC + HIPS sont résumés et calculés dans le Tableau III.3 suivants :

Tableau III.3: influence des facteurs sur la masse[g] et la pureté P [%], et le rendement W [%].

Tension (kv)	Vitesse (cm/s)	Masse HIPS (g)	Masse PC (g)	Pureté HIPS (%)	Pureté PC (%)	Rendement HIPS (%)	Rendement PC (%)
14	6	23.48	25.94	96.72	83.26	30.28	86.4
16	6	37.38	25.74	95.26	84.49	47.48	87
14	9.91	28.17	25.46	95.74	84.4	35.96	85.96
16	9.91	33.01	26.35	96.33	86.26	42.4	90.92
14	7.955	29.87	26.03	96.08	91.04	38.26	94.8
16	7.955	35.38	25.87	96.86	87.2	45.69	90.24
15	6	42.44	25.58	95.05	87.6	53.9	89.64
15	9.91	38.88	24.93	96.45	84.95	50	84.72
15	7.955	42.37	25.13	95.53	87.9	53.97	88.36
15	7.955	42.88	25.57	94.68	87.01	54.13	89
15	7.955	41.96	24.98	97.23	89.43	54.4	89.36

III.5 Résultat et discussion

III.5.1 Influence de la haute tension

III.5.1.1 Taux de récupération

La Figure III. représente les résultats des expériences de séparation en termes de taux de récupération des deux produits en fonction de la haute tension appliquée aux électrodes du séparateur.

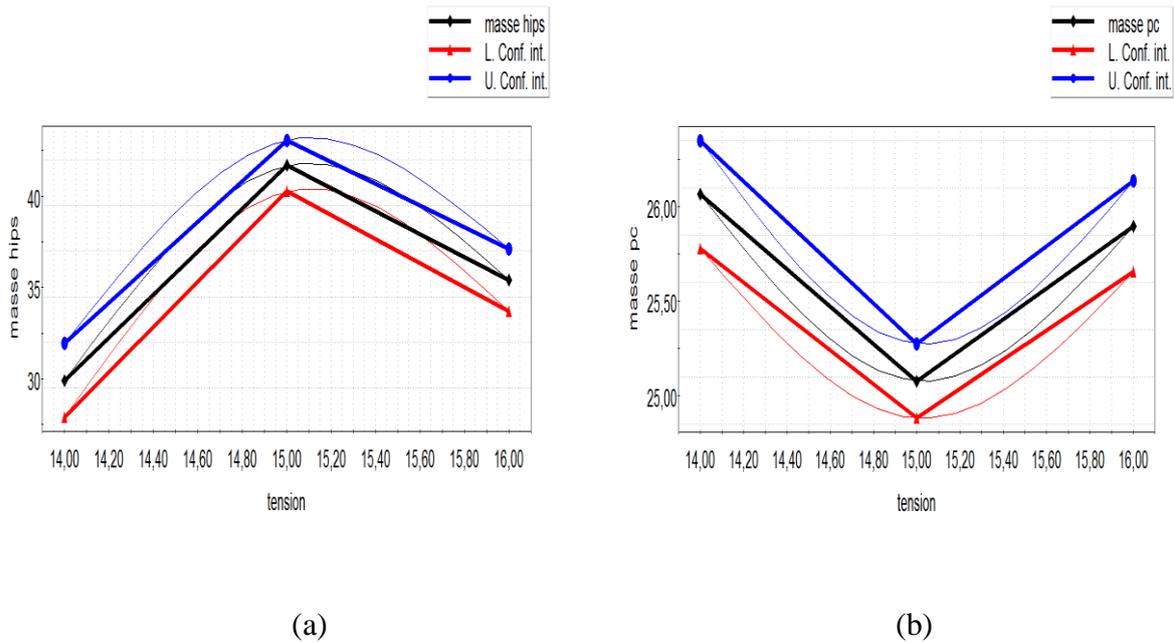


Figure III.4 : représentation graphique de la masse de HIPS (a) et PC (b) prédits par MODDE 5.0 en fonction de la tension.

D'après la Figure III., on peut observer que la récupération de HIPS augmente progressivement jusqu'à atteindre un maximum de 41.7 g lorsque la tension atteint 15 KV. Cependant, une fois que la tension dépasse ce seuil, la récupération de HIPS commence à diminuer. Cela suggère qu'il existe une tension optimale qui favorise la séparation efficace du HIPS. En revanche, pour le PC, la figure montre une tendance inverse. La récupération du PC diminue progressivement jusqu'à atteindre un minimum de 25.1 g une fois que la tension atteint 15 KV. Cependant, au-delà de ce seuil, la récupération du PC commence à augmenter. Cela suggère que la séparation efficace du PC nécessite une tension différente de celle requise pour le HIPS. En résumé, la figure indique qu'il y a une relation complexe entre la haute tension appliquée et la récupération des deux produits. D'après les résultats obtenus on déduit qu'il

existe des conditions optimales spécifiques pour la séparation efficace du HIPS et du PC, avec des tensions différentes pour chaque matériau.

III.5.1.2 Taux de pureté

La pureté des deux produits récupérés en fonction de la haute tension appliquée aux électrodes du séparateur est illustrée sur la Figure III..

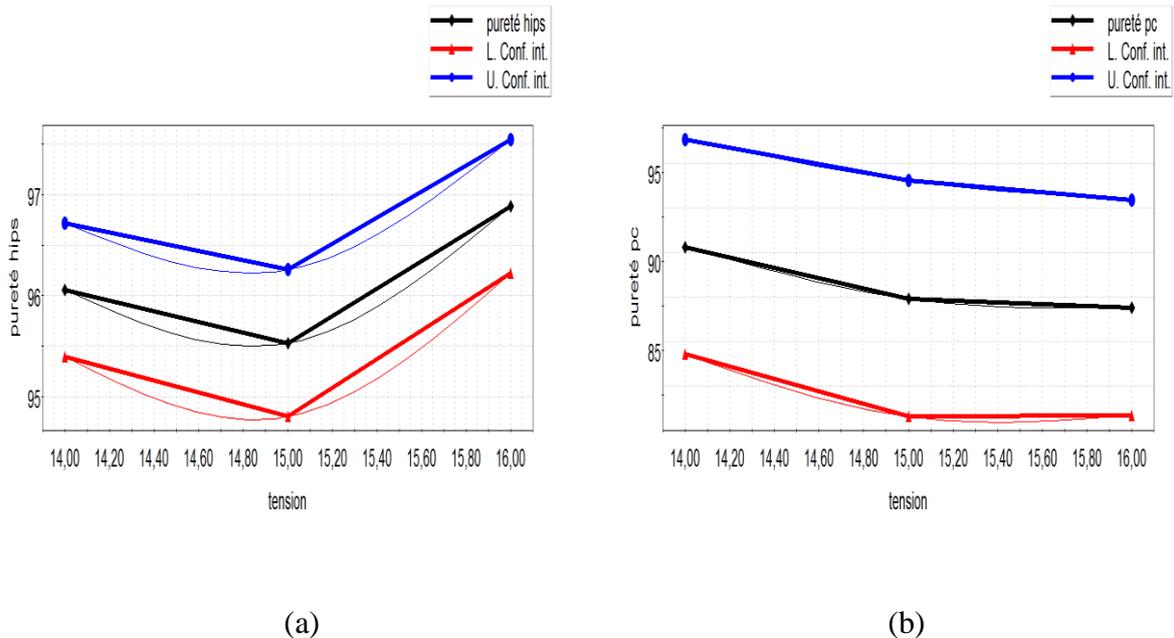


Figure III.5: représentation graphique de la pureté HIPS (a) et PC (b) prédits par le MODDE 5.0 en fonction de tension.

La Figure III., montre que pour le HIPS, la pureté initiale est de 96.1% puis elle augmente jusqu'à 96.9% à une tension de 16KV. En revanche, pour le PC, la pureté diminue continuellement de 90.9% à 87.5% dans l'intervalle de tension de 14 kV à 16 kV. Ainsi, la tension appliquée joue un rôle crucial dans la pureté des produits récupérés. Il existe une tension optimale qui permet d'obtenir une pureté maximale pour le HIPS, tandis que la pureté du PC diminue avec l'augmentation de la tension. Ces résultats soulignent l'importance de choisir la bonne tension pour chaque matériau afin d'optimiser la séparation et d'obtenir les niveaux de pureté souhaités.

III.5.1.3 Taux de rendement

Le rendement des deux produits récupérés en fonction de la haute tension appliquée aux électrodes du séparateur est illustré sur la Figure III..

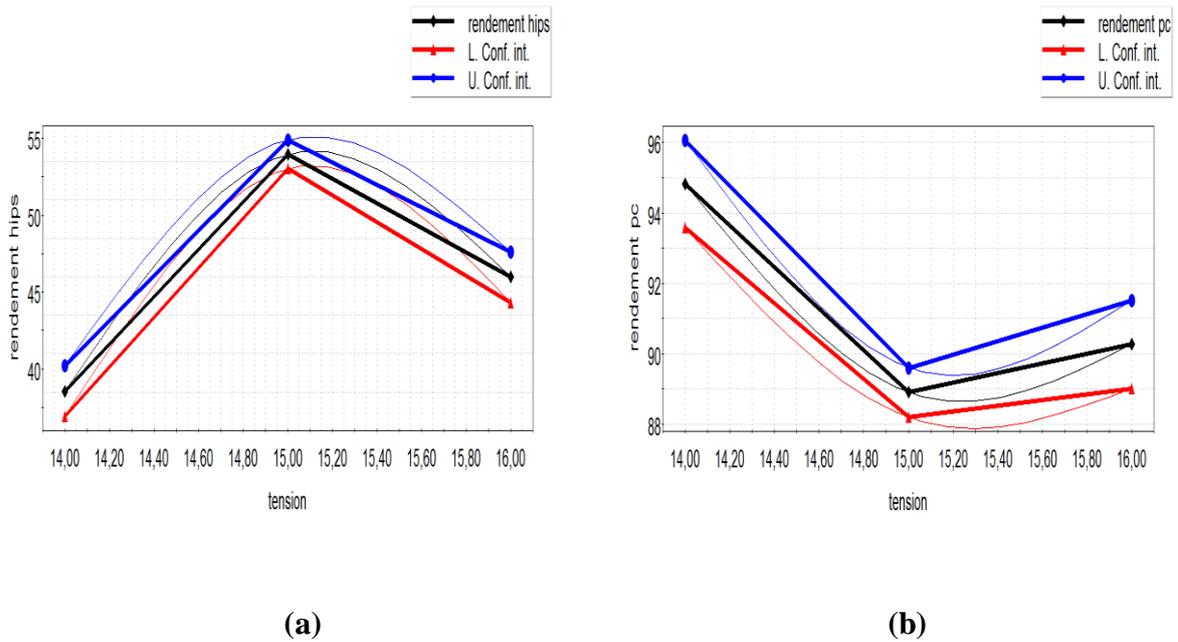


Figure III.6 : représentation graphique du rendement HIPS (a) et PC (b) par le MODDE 5.0 en fonction de tension.

La Figure III., montre que le rendement du HIPS augmente initialement à mesure que la tension est augmentée jusqu'à 15 kV, passant de 38,6% à 54%. D'autre part, le rendement du PC diminue progressivement à mesure que la tension est augmentée. On observe une baisse significative, passant de 94,8% à 88,9% à une tension de 15 kV. La tension appliquée aux électrodes du séparateur a des effets différents sur le rendement de récupération du HIPS et du PC. Le HIPS atteint un maximum à 15 kV puis diminue, tandis que le rendement du PC diminue d'abord puis augmente. Il est crucial de trouver un équilibre entre la tension et les caractéristiques des matériaux à récupérer. L'optimisation des conditions de récupération en tenant compte de ces variations de rendement peut améliorer l'efficacité globale du processus de séparation et de récupération.

III.5.2 Influence de la vitesse

III.5.2.1 Taux de récupération

La Figure III. représente les résultats des expériences de séparation en termes de taux de récupération des deux produits en fonction de la vitesse de déplacement sur la plaque vibrante.

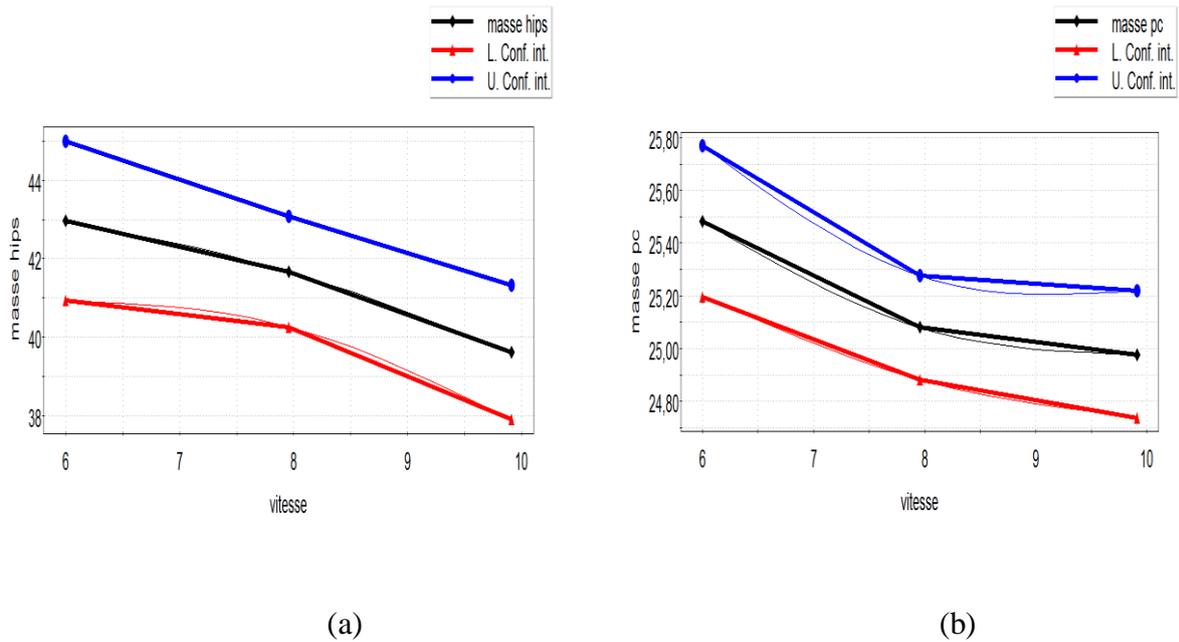


Figure III.7 : représentation graphique de la masse HIPS (a) et PC (b) prédits par le MODDE 5.0 en fonction de vitesse.

La Figure III., montre que L'augmentation de la vitesse de déplacement sur la plaque vibrante entraîne une diminution du taux de récupération du HIPS passant de 43 g à 39.6 g et du PC de 25.5 g à 25 g. Ces résultats soulignent l'impact négatif de la vitesse de déplacement sur la récupération des matériaux. Il est crucial de trouver un équilibre entre la vitesse de déplacement et le taux de récupération souhaité pour chaque matériau afin d'optimiser le processus de séparation.

III.5.2.2 Taux de pureté

La pureté des deux produits récupérés en fonction de la vitesse de déplacement des particules sur la plaque vibrante est illustré sur la Figure III..

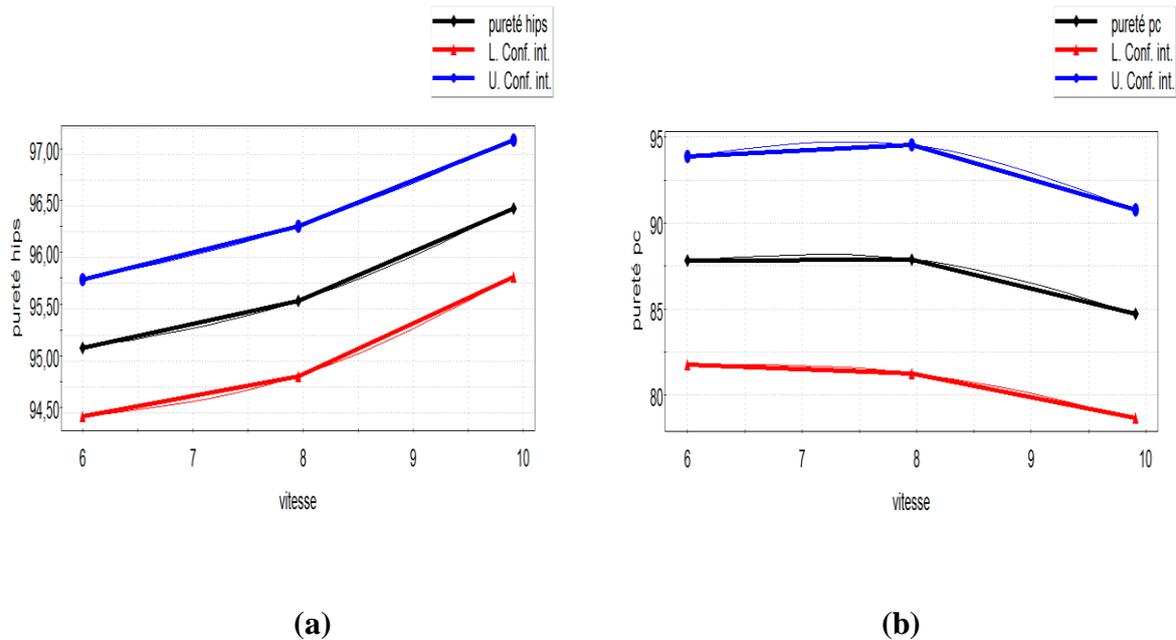


Figure III.8: représentation graphique de la pureté HIPS (a) et PC (b) prédits par le MODDE 5.0 en fonction de vitesse.

Dans la Figure III. on observe que, pour le HIPS, une augmentation de la vitesse améliore la séparation et augmente sa pureté. En revanche, pour le PC, une augmentation de la vitesse diminue sa pureté, suggérant une moins bonne séparation et une contamination accrue. Cette relation inverse est influencée par les propriétés spécifiques de chaque matériau. Ajuster la vitesse de déplacement est essentielle pour optimiser la pureté de chaque produit lors du recyclage des déchets plastiques contenant du HIPS et du PC.

III.5.2.3 Taux de rendement

Le rendement des deux produits récupérés en fonction de la vitesse de déplacement des particules sur la plaque vibrante est illustré sur la Figure III..

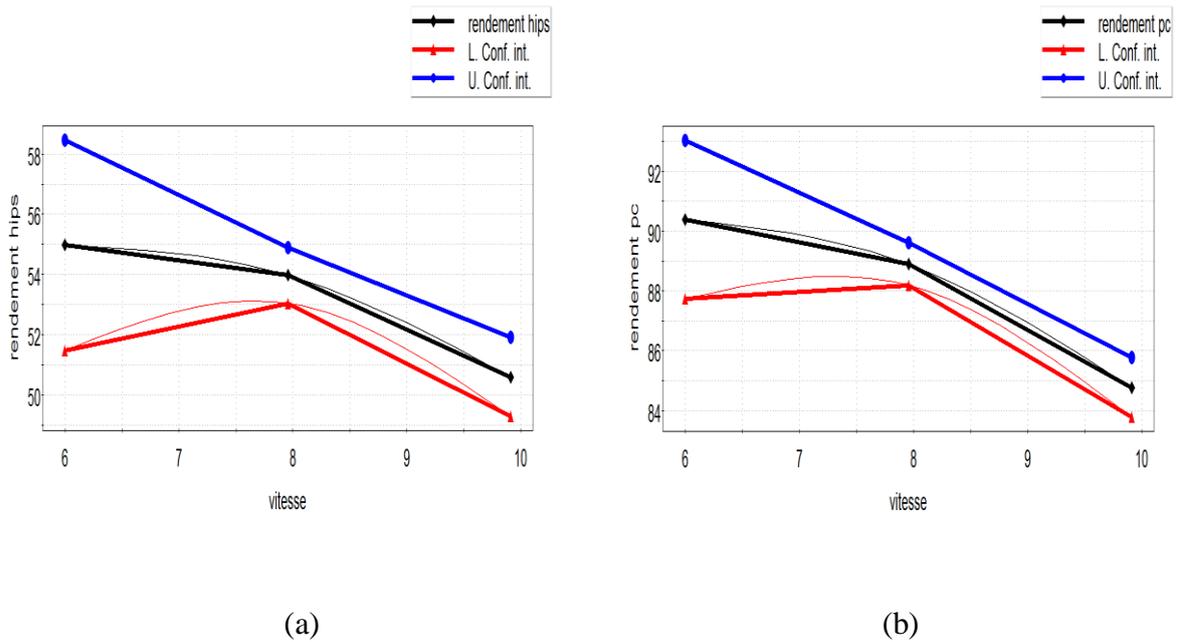


Figure III.9: représentation graphique de la rendement HIPS (a) et PC (b) prédits par le MODDE 5.0 en fonction de vitesse.

Dans la Figure III. on observe qu'à une vitesse de 6 cm/s, la séparation électrostatique est très efficace, ce qui entraîne un rendement élevé pour les deux produits récupérés. Cependant, au-delà de cette vitesse, le rendement diminue pour les deux matériaux. Il semble que le mouvement plus rapide des particules réduise l'efficacité de la séparation électrostatique, entraînant une baisse du rendement global. Cette tendance est spécifique aux caractéristiques des matériaux et au processus de séparation électrostatique utilisé. D'autres paramètres peuvent également influencer le rendement des produits.

L'optimisation de la vitesse de déplacement des particules sur la plaque vibrante est essentielle pour obtenir un rendement optimal lors de la récupération des produits à partir des déchets.

III.5.3 Interaction vitesse et tension

III.5.3.1 Le taux de récupération

La Figure III. représente les résultats de l'interaction vitesse et tension sur la masse des deux produits.

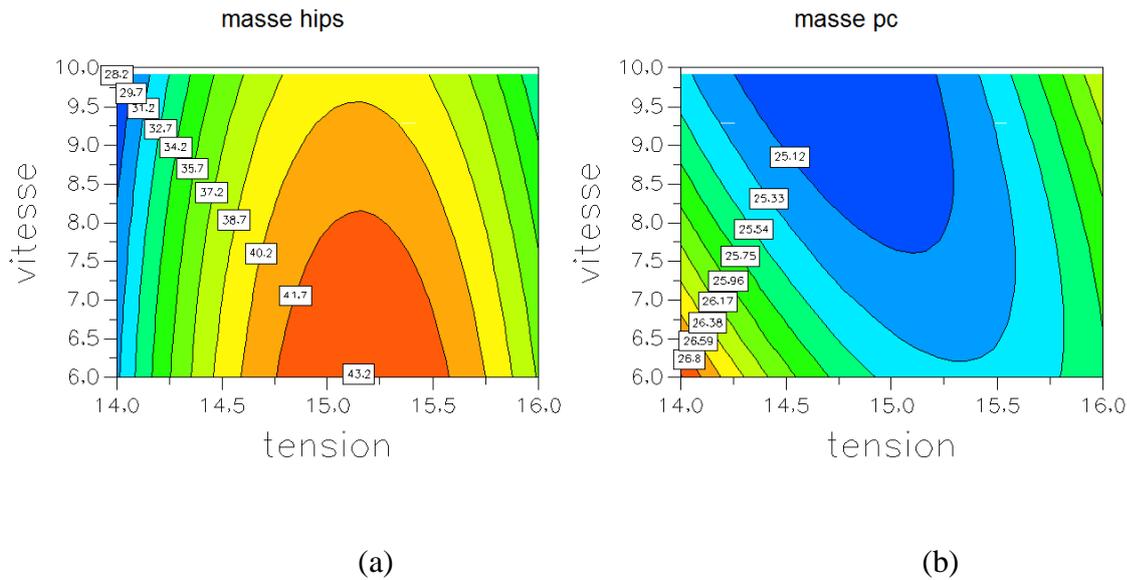


Figure III.10: surfaces de réponse pour masse de HIPS (a) et de PC (b).

La Figure III. montre qu'une grande quantité de masse HIPS (43.2 g) est récupérée dans l'intervalle de surface de haute tension (14.75 kV ; 15.60 kV) et de la vitesse (6 cm/s à 8.15 cm/s) figure (a). Cela suggère qu'il existe une relation entre la charge des particules de HIPS à une vitesse diminuée avec une haute tension d'alimentation appliqué sur les électrodes.

Quant au pc sur la figure (b) on observe qu'une grande quantité est remarquable à l'intervalle d'une haute tension de (14 kV ; 14.10 kV), et à une faible vitesse de (6 cm/s à 6.4 cm/s) qui est de 26.8 g, cela signifie que la charge des particules de PC est suffisamment chargée à une vitesse réduite et une faible haute tension.

III.5.3.2 Taux de pureté

La Figure III. représente les résultats de l'interaction vitesse et tension sur la pureté des deux produits.

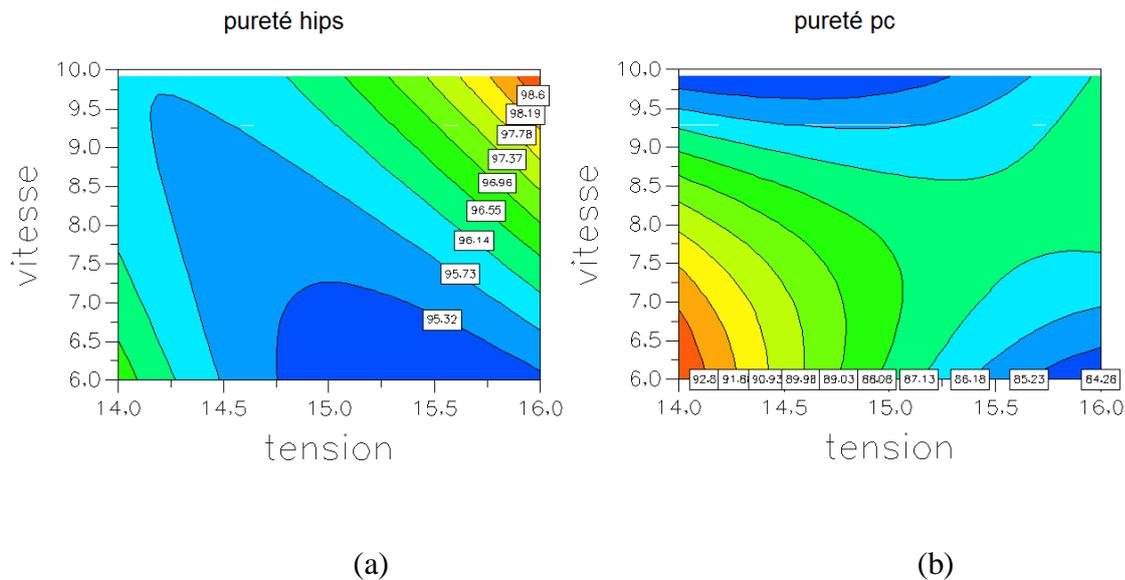


Figure III.11 : surfaces de réponse pour pureté de HIPS (a) et de Pc (b).

La Figure III. montre que dans l'intervalle de tension spécifié, de 15.8 kV à 16 kV, et de vitesse, de 9.6 cm/s à 9.91 cm/s, une grande pureté de HIPS de 98.6% est observée. De plus, pour le PC, dans l'intervalle de tension spécifié de 14 kV à 14.12 kV et de vitesse de 6 cm/s à 6.85 cm/s, une grande pureté de PC de 92.83% est observée. Cela suggère que ces valeurs spécifiques de tension et de vitesse sont optimales pour obtenir une pureté élevée pour les deux matériaux. Pour obtenir une grande pureté, il est nécessaire de maintenir une vitesse élevée au niveau de la plaque vibrante et d'avoir une haute tension élevée afin de créer un champ électrique suffisant au niveau des électrodes pour séparer les granules de HIPS. En revanche pour le PC, il est préférable de réduire la vitesse et d'utiliser une haute tension plus basse afin d'obtenir une pureté élevée.

III.5.3.3 Taux de rendement

La Figure III. représente les résultats de l'interaction vitesse et tension sur le rendement des deux produits.

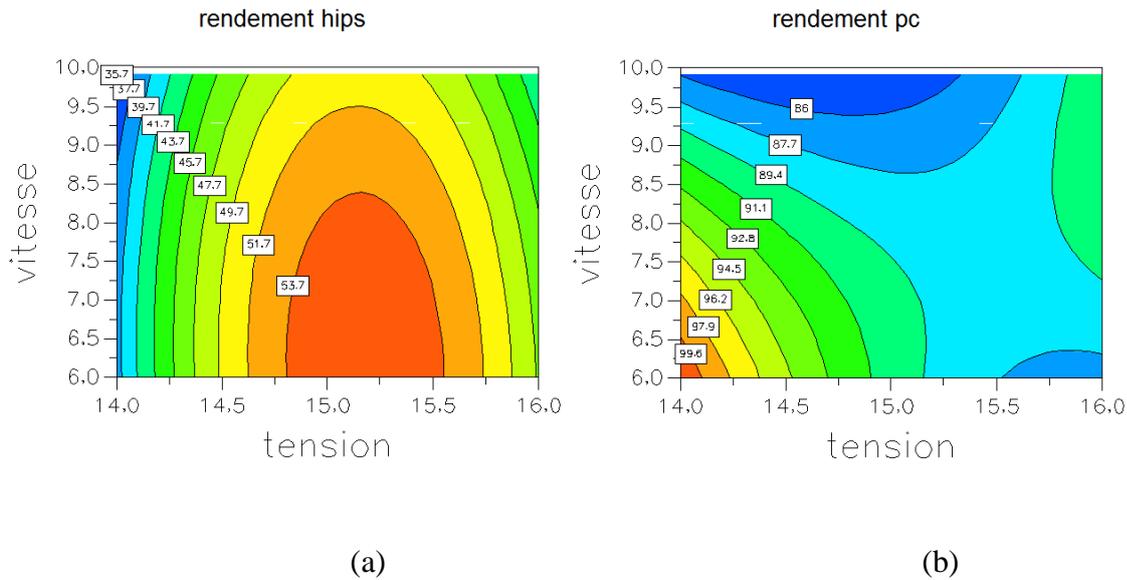


Figure III.12: surfaces de réponse pour rendement de HIPS (a) et de PC (b).

Dans la Figure III. on observe que dans l'intervalle de tension de 14.8 kV à 15.55 kV et de vitesse de 6 cm/s à 8.42 cm/s, un rendement élevé de 53.7% est atteint pour la récupération de HIPS. Ces résultats indiquent que lorsque la tension et la vitesse se situent dans cette surface, le séparateur permet d'obtenir un rendement élevé pour le HIPS. De plus, pour le PC, dans l'intervalle de tension 14 KV à 14.12 KV et de vitesse de 6cm/s à 6.5 cm/s, un rendement élevé de 99.6% est également observé. Cela suggère que ces valeurs spécifiques de tension et de vitesse sont optimales pour obtenir un rendement élevé dans la récupération de PC.

III.6 Conclusion

L'étude expérimentale, nous a permis de démontrer que la vitesse de la plaque vibrante influe considérablement la charge acquise par les particules de HIPS et PC. La tension d'alimentation appliquée aux électrodes et la composition du mélange influent considérablement à la fois sur la récupération et la pureté des produits séparés. Le programme MODDE 5.0 facilite l'optimisation de la séparation par tribo-chargement, en permettant la sélection de différentes fonctions de réponse adaptées aux objectifs de l'utilisateur. Pour la séparation de mélanges granulaires avec 25% de PC et 75% de HIPS, les valeurs optimales des variables de contrôle du processus sont pratiquement les mêmes lorsque l'objectif est la maximisation de la pureté et du taux de récupération.

Conclusion Générale

Le séparateur tribo-électrostatique est une technologie prometteuse pour le tri des déchets en plastique. Il offre une méthode efficace et écologique pour séparer différents types de plastiques en fonction de leurs propriétés électrostatiques. En utilisant les forces électrostatiques générées lors de la friction entre les particules plastiques, le séparateur tribo-électrostatique permet de séparer les matériaux en fonction de leur charge électrique et de leur conductivité. Cette approche offre de nombreux avantages, tels qu'une meilleure récupération des matériaux recyclables, une réduction des déchets et une optimisation des processus de tri.

En utilisant cette technologie, il devient possible d'augmenter l'efficacité et la précision du tri des déchets en plastique, ce qui contribue à la réduction de la pollution et à la préservation des ressources naturelles. De plus, le séparateur tribo-électrostatique peut être utilisé pour traiter une grande variété de déchets plastiques, y compris ceux qui sont difficiles à séparer par d'autres méthodes conventionnelles. Cela ouvre de nouvelles perspectives pour améliorer la recyclabilité des plastiques et réduire leur impact environnemental global.

Le séparateur tribo-électrostatique représente une solution prometteuse pour répondre aux défis actuels liés à la gestion des déchets en plastique. Son utilisation peut contribuer de manière significative à la promotion d'une économie circulaire, à la réduction de la dépendance aux ressources vierges et à la préservation de l'environnement. Cependant, il convient de continuer à investir dans la recherche et le développement de cette technologie afin d'en améliorer l'efficacité, la rentabilité et l'applicabilité à grande échelle.

Dans ce travail, nous avons effectué une modélisation par la méthode des plans d'expériences en utilisant le logiciel MODDE 5.0, et une étude expérimentale d'un séparateur électrostatique à chute libre associé à un dispositif de chargement par vibration des deux mélanges (HIPS et PC), à de diverses concentrations des constituants : 75% HIPS et 25% PC. Les résultats obtenus par l'étude des facteurs (vitesse, tension) influent considérablement sur les résultats de séparation d'un mélange granulaire (taux de récupération, la pureté et le rendement des particules récupéré).

Références Bibliographique

- [1] Tilmatine A., Flazi S., Medles K., Ramdania Y., Dascalescu L., “Séparation électrostatique : complément des procédés mécaniques de recyclage des déchets industriels”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 61, no. 1, 2004.
- [2] Hamida R., “Séparation électrostatique d’un mélange granulaire isolant : Application à la récupération des bouteilles en plastiques”, *Mémoire de Master Réseaux Electriques, Université 8 Mai 1945_Guelma 2022*.
- [3] Seddiki Y., Mihoub A., “Etude expérimentale d’un séparateur électrostatique à chute libre”, *Mémoire de Master Réseaux Electriques, Université 8 Mai 1945 _Guelma 2021*.
- [4] G. Buda, M. Bilici, A. Samuila and L. Dascalescu., “Experimental study of the tribocharging process of plastic granular materials on a vibratory feeder device”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, pp. 1489-1496, 2013.
- [5] Benhafssa A., “Etude d’un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges des matériaux poudreux”, *Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Sidi Bel Abbas 2017*.
- [6] Messal S., “Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l’industrie agro-alimentaire”, *Thèse Génie électrique. Poitiers : Université de Poitiers, 2016*.
- [7] Achouri I., “Modélisation du fonctionnement optimale des filtres et séparateurs électrostatiques des matériaux poudreux ”, *Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1 2019*.
- [8] C. Xiao and L. Allen., “Electrostatic separation enhanced by media addition”, *US Patent 6452126, September 17, 2002*.
- [9] Gontran R., “Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires”, *Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2018*.
- [10] Fekir D., “Chargement triboélectrique et séparation électrostatique pour deux types de mélange granulaire binaire isolants de taille fine et ceux de grosse taille ”, *Thèse de Doctorat, université de Djillali Liabes de SBA ,2017*.

- [11] Belghitar S., Salmi B., “Amélioration du fonctionnement du séparateur électrostatique à plan incliné”, Mémoire de Master en Maintenance Industrielle, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.
- [12] Bensouileh Z., “Etude expérimental d’un séparateur à plan incliné ”, Mémoire de Master Réseaux électriques, Université 8 Mai 1945 _Guelma 2017.
- [13] Khirouni Y., “Etude expérimentale d’un séparateur électrostatique à plan incliné”, Mémoire de Master Réseaux électriques, Université 8 Mai 1945 _Guelma, 2020.
- [14] Benabderrahmane A., “Contribution à l’analyse des facteurs influentes du processus de charge triboélectrique des matériaux granulaires” Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbes 2021.
- [15] Nadjem A., “Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques”, Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945 _Guelma, 2018.
- [16] Djabour K., Bensalem G., “Optimisation d’une préparation industrielle laitière « RAIB » à base de poudre de lait en appliquant le plan d’expérience Box-Behnken au niveau de l’industrie « HAMMADITE »”, Mémoire de Master Génie alimentaire, Université A-MIRA de BEJAIA, 2021.
- [17] Younsioui M., Zemouri D., “Etude de l’adsorption du nickel divalent sur le chitosane, optimisation par plan d’expérience”, Mémoire de Master Génie chimique, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2019.
- [18] Izountar Z., Djouder S., “Optimisation de la production du biodiesel par le plan d’expérience Box-Behnken”, Mémoire de Master Génie Chimique., Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2022.
- [19] Tensaout S., Zatout S., “Modélisation par la méthode des plans d’expériences de l’élimination du vert de malachite par un adsorbant argileux”, Mémoire de Master Chimie analytique., Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2019.
- [20] Maurice Pillet., “Les plans d’expériences par la méthode TAGUCHI ”, P : 21 (2011).
- [21] Goupy J., Creithon L., “Introduction aux plans d’expériences ” 3eme édition **P** : 4 ,6.
- [22] Dr. Yahiaoui I., “Les plans d’expériences Initiation à la construction et l’analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centré” Cour., Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2015.

[23] Dali A., Allout A., “Modélisation numérique et optimisation par la méthode des surfaces de réponses des murs en terre armée”, Mémoire de Master Travaux Publics, Université 8 Mai 1945 _Guelma, 2022.