

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE A.MIRA-BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE



THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT

Domaine : Science et Technique Filière : Génie électrique
Spécialité : Haute tension et réseaux électriques

Présentée par
Mr ATROUNE SALAH

Thème

**Etude expérimentale d'un séparateur triboélectrique de particules
chargées sur une plaque vibrante. Application pour la récupération
du plastique**

Soutenue le : 15 /12/2015

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr : Zebboudj Youcef	Professeur	Univ. de Bejaia	Président
Mr Tilmatine Amar	Professeur	Univ. de Sidi-Bel-Abbès	Rapporteur
Mr Alkama Rezek	Professeur	Univ. de Bejaia	CO- Rapporteur
Mr Boudissa Rabah	Professeur	Univ. de Bejaia	Examineur
Mr Bendaoud Abdelber	Professeur	Univ. de Sidi-Bel-Abbès	Examineur

Année Universitaire : 2014/2015

REMERCIEMENTS

Le travail que nous présentons a été réalisé aux Laboratoires APLEC de l'université de sidi-bel-abbes et Pprim de l'université de Poitier, France. Dirigé respectivement par le professeur TILMATINE AMAR et le professeur LUCIEN DASCALESCU. Qu'ils veuillent bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude pour l'aide scientifique dont ils m'ont fait constamment bénéficier.

Je remercie particulièrement le professeur REZEK ALKAMA, mon co-encadreur, pour ses précieux conseils.

Je suis très reconnaissant envers les membres de jury de m'avoir fait l'honneur d'accepter de porter leur jugement à ce travail.

Mes sincères remerciements vont aussi aux personnels des deux Laboratoires. Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Pour finir, je remercie mes parents, ma femme et l'ensemble de ma famille pour m'avoir soutenu pendant l'ensemble de mes études, et plus particulièrement sur la fin de cette thèse qui a été particulièrement éprouvante. Ils ont su s'occuper de mes affaires quand je ne pouvais pas le faire.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art	
I.1 Introduction	3
I.2. Séparation électrostatique des matériaux provenant des déchets d'équipements électriques et électronique	3
I.2.1. Caractérisation et technologie de recyclage DEEE	4
a) caractérisation des déchets équipements électriques et électronique	4
b) Technologie de recyclage des DEEE	6
-séparation mécanique	6
-séparation optique	7
-séparation électrostatique	8
I.2.2. Séparateurs électrostatique pour le recyclage des déchets	9
a-séparateur à cylindre tournant	9
b-séparateur électrostatique à électrode à plaque	10
c-séparateur triboélectrique à chute libre	11
I.3. Charge triboélectrique des matériaux granulaires	12
I.3.1 Effet triboélectrique	12
I.3.2. Mécanismes physiques tribo-électrisation des matériaux	13
a) contact métal/métal	14
b) contact isolant/métal	16
c) contact isolant/isolant	16
d) contribution des états de surface	17
I.4. Séparation tribo-électrostatique	19
I.4.1. Dispositifs de charge tribo-électrique	19
a) dispositif tribo-électrique à cylindre rotatif	20
b) dispositif tribo-électrique lit fluidisé	21
c) dispositif tribo-électrique à cyclone	21
I.4.2. Séparateur tribo-électrostatique, applications l'industrielles	22
I.5. Conclusion	24
Chapitre II : Matériel et Méthode	
II.1 Introduction	25
II.2 Installation expérimentale pour l'étude du processus de séparation tribo-électrostatique des matériaux granulaires	25
II.2.1. Dispositif vibratoire pour la charge tribo-électrique	25
II.2.2.Choix du matériau couvrant la plaque vibrante	26
II.2.3. Théorie de la mesure de la charge électrique sur des granules	28
II.2.4. Séparateur électrostatique à chute libre	29
II.3.Méthode des plans des expériences	31
II.3.1. principe de la méthode des plans d'expériences	31
II.3.2.concepts fondamentaux	32
II.4. Conclusion	41

Chapitre III : Modélisation expérimentale des processus de chargement triboélectrique et séparation

III.1. Introduction	42
III.2. Evaluation de la signification des facteurs contrôlables et paramètre non Contrôlable.	42
III.2.1 Influence facteurs contrôlables	42
III.2.1.1 facteur contrôlable vitesse	43
III.2.1.2 facteur contrôlable débit d'alimentation des granules sur la goulotte	45
III.2.1.3 facteur contrôlable longueur de la goulotte vibrante	47
III.2.2 Influence paramètre non contrôlable (taille des particules)	48
III. 2.2. 1 étude expérimentale comparative de l'influence de la taille des particules	48
III.3. Modélisation et optimisation du procédé d'électrisation	56
III.4.Séparation tribo-électrostatique à chute libre	60
III.4.1. influence de la longueur de la plaque vibrante	60
III.4.2.influence de la tension d'alimentation des électrodes	63
III.5 Conclusion	64

Chapitre IV : Evaluation expérimentale de la robustesse du processus de la séparation triboélectrique.

IV.1. Introduction	67
IV.2. Aspects théorique de la robustesse	68
IV.2.1 notion de fonction perte	68
IV.2.2 notion de robustesse	71
IV.2.3. les plans produits	72
IV.2.4. rapport signal/bruit	75
a) rapport signal/bruit type S	76
b) rapport signal/bruit type L	76
IV.3. amélioration de la robustesse du procédé de séparation triboélectrique des granules	77
IV 3.1. Modélisation expérimentale de séparation tribo-électrostatique en fonction de la vitesse, la tension et la distance des palettes	78
IV.3.2.établissement d'un plan produit	83
IV.3.3. maximisation du rapport signal/bruit	89
IV.4. Conclusion	91
Conclusion générale	93
Références bibliographiques	95

Introduction générale

Il y'a une vingtaine d'années, l'industrie de recyclage était à peine intéressée par la valorisation des déchets d'équipement électrique et électronique. De nos jours, cette catégorie de déchets connaît la plus forte croissance en terme de volume à traiter. C'est pour cela que le problème de la récupération et du traitement des équipements électriques et électroniques en fin de vie est devenue une préoccupation majeure pour toutes les entreprises qui travaillent dans ce secteur.

Ces dernières années, confrontés à l'épuisement des ressources énergétiques et des matières premières, ainsi qu'à l'accumulation de quantités importantes de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), les états essaient d'imposer une législation censée stimuler la récupération des matières recyclables. La Directive 2002/96/CE du Conseil Européen, entrée en vigueur en février 2003 dans toute l'Union Européenne, impose le recyclage et la récupération de tous les types de produits électriques et électroniques, à un taux de 4 kg par an et par habitant et oblige les fabricants à utiliser un pourcentage de matériaux récupérés dans la construction de nouveaux équipements. L'objectif est de recycler 85% des déchets en 2016.

Dans ce contexte, l'industrie du recyclage s'est intéressée pour valoriser la gamme complète de matériaux de déchets. Les méthodes actuelles de récupération des déchets sont variées et ont différents degrés de complexité et d'automatisation.

La séparation tribo-électrostatique, est utilisée par de nombreuses entreprises afin de récupérer les matériaux issus des déchets en plastique des DEEE. Cette technique leur donne la possibilité de trier les différents types de plastiques qui rentrent dans la composition de ces déchets. Les avantages de cette méthode de séparation sont les suivants : caractère non polluant, faible consommation d'énergie, grande fiabilité, simplicité de construction et faibles coûts de maintenance. La récupération de matières plastiques de DEEE par procédés tribo-électrostatiques est l'objet d'étude de plusieurs équipes de recherche dans le monde.

Des recherches approfondies sur la charge triboélectrique de grains, sur l'utilisation de différents appareils de tribo-électrisation et sur la séparation à l'aide d'un champ électrique intense ont été effectuées au sein des laboratoires allemands, français, américains, canadiens, japonais, roumains, chinois et algériens.

La thèse a comme objectif principal, l'étude d'un séparateur triboélectrique en utilisant un dispositif d'électrisation par vibration et le développement des solutions techniques viables pour une meilleure application.

Le premier chapitre est consacré à une synthèse de l'état de l'art de la séparation électrostatique des matériaux granulaires provenant des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Une description des différentes technologies de recyclages des DEEE est présentée, comprenant entre autres la séparation mécanique, optique et la séparation électrostatique. Différents dispositifs d'électrisation triboélectrique utilisés dans plusieurs études qui ont abouti à différents brevets ont été exposés.

Dans le chapitre 2, les techniques et les dispositifs expérimentaux (dispositif d'électrisation triboélectrique et le séparateur à chute libre) utilisés dans notre travail expérimental sont décrits. La méthode de mesure de la charge électrique acquise par les granules de plastique après une électrisation triboélectrique sur le dispositif vibratoire, appelé vibro-tribo-chargeur, est décrite. La méthodologie d'analyse des résultats expérimentaux, appelée Méthode des plans d'expérience, est explicitée.

Dans le troisième chapitre, sont présentés et interprétés les résultats obtenus pour la modélisation expérimentale et l'optimisation du processus de chargement triboélectrique des granules de plastique ABS et HIPS. Ceci est effectué par une évaluation de la signification des différents facteurs contrôlables et non contrôlables influençant la charge électrique acquise par les granules en utilisant le dispositif vibro-tribo-chargeur.

En deuxième lieu, sont présentés les résultats obtenus pour la modélisation expérimentale et l'optimisation du processus de séparation des granules ABS et HIPS par le séparateur tribo-électrique à chute libre. Pour chaque modélisation et optimisation, des modèles mathématiques et des points de fonctionnement optimaux sont les résultats importants de ce chapitre.

Le dernier chapitre traite des résultats concernant l'évaluation expérimentale de la robustesse du processus de la séparation triboélectrique à chute libre en utilisant le logiciel MOOD.5.0.

Chapitre I : Etat de l'art

I.1 Introduction

Un flux technologique typique pour la récupération des matériaux provenant des déchets d'équipements électrique et électronique appelés DEEE, comporte essentiellement les étapes suivantes : démontage, réduction dimensionnelle et séparation. Actuellement, l'industrie de recyclage utilise une large gamme de techniques diverses.

Les plastiques sont une composante majeure de ces déchets. Une technologie de récupération des plastiques des DEEE se décompose en trois étapes principales : 1) Réduction du volume, classification, 2) séparation des plastiques, 3) caractérisation qualitative des matériaux séparés.

I.2. Séparation électrostatique des matériaux provenant des déchets d'équipements électrique et électronique

Les déchets plastiques et les métaux d'équipements électriques et électroniques (DEEE), ordinateur, électroménager, etc..., sont en croissance constante, grâce aux progrès technologique rapide qui s'opère dans l'industrie. Les plastiques sont caractérisés par une grande stabilité dans le temps, ces déchets se décomposent très lentement et sont considérées comme pratiquement non dégradables. Dans ce contexte, la gestion des déchets plastiques est considérée comme un problème majeur, la mise en décharge et l'incinération sont devenues plus coûteuses et causent plus de problèmes environnementaux.

La consommation du plastique dans le monde a incroyablement augmenté, en raison de leur faible cout, la durabilité, plus léger que d'autres matériaux comme le métal, aluminium et autre. En 2010, la production mondiale de matière plastique est estimée à environ 265 million tonnes, une croissance estimée à 5% par an au cours des vingt dernières années (Figure I.1) [1]. Chaque année environ 4% de la production mondiale du pétrole est réservé pour la fabrication de la matière plastique [2].

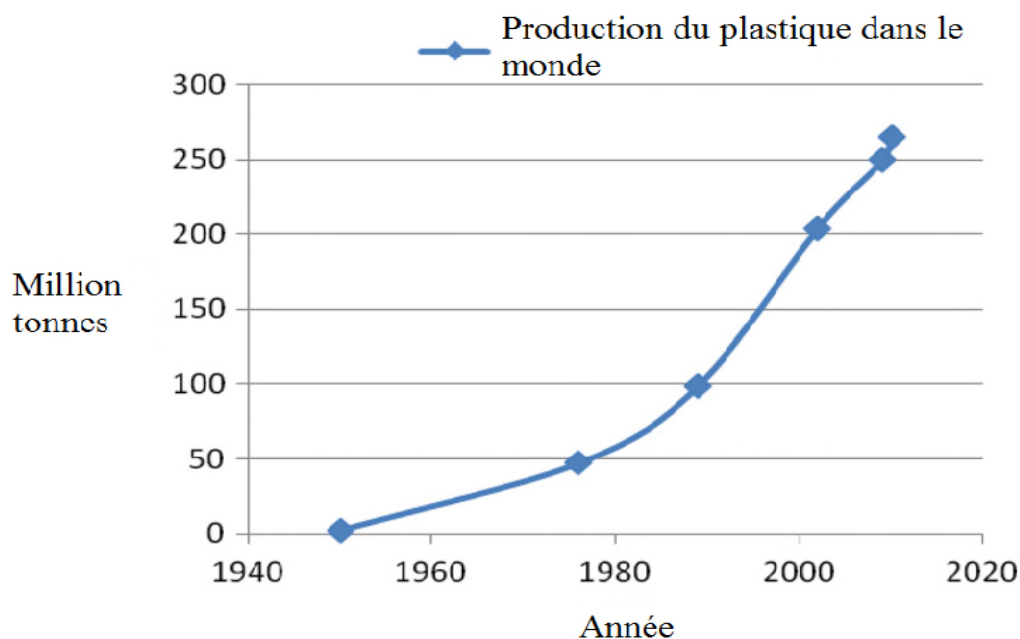


Figure I.1: production mondiale du plastique 1959-2010 [1]

Le recyclage est une solution qui peut aider de manière significative la préservation de l'environnement.

I.2.1.Caractérisation et technologie de recyclage des DEEE

a) Caractérisation des déchets des équipements électriques et électroniques :

Le remplacement des équipements électriques et électroniques s'accélère et les DEEE deviennent une source de déchets de plus en plus importante. Par ailleurs, ces déchets sont constitués de métaux ferreux et non ferreux, métaux rares, verre, plastiques...etc. Ces matériaux présentent un fort potentiel de recyclage.

Les états essayent d'imposer des lois censées à stimuler la récupération des matières recyclables. La directive 2002/96/CE du conseil Européen, entrée en vigueur en février 2003 dans toute l'union Européenne, impose le recyclage et la récupération de tous les types de produits électriques et électroniques, à un taux de 4 kg par an et par habitant. Elle oblige les fabricants à utiliser un pourcentage de matériaux récupérés dans la construction de nouveaux équipements, l'objectif est de recycler 85% des déchets jusqu'en 2016 [1,2].

La famille des déchets électrique et électronique englobe tous les objets destinés à être abandonnés ou éliminés par leurs propriétaires. Ce matériel est classé en 5 catégories [3] :

- 1- Les gros blancs (27% du flux des DEEE) : machine à laver, gazinières, fours, lave-vaisselle, équipement froid...etc.
- 2- Les bruns : téléviseurs, magnétoscopes, chaîne hi-fi.
- 3- Les gris 18% : appareils informatiques et de télécommunications, ordinateurs, imprimantes, scanners.
- 4- Petits blancs 12% : petits appareils électroménagers, et petits équipements électroniques.
- 5- Equipement électrique professionnel, câbles, batteries 43%.

Le tableau I-1, nous montre la composition globale moyenne des déchets DEEE faite par une étude américaine « Plastic Council » en 1999 [1] :

Tableau I-1: Composition globale moyenne des déchets DEEE

Types matériaux	% poids
Métaux	49%
Plastiques	33%
Tubes cathodiques	12%
Bois	5%
Autres	1%

Les principaux types de plastiques constituant les déchets issus d'équipement électriques et électroniques (DEEE) sont représentés sur la Figure I.2 : polystyrène résistant aux chocs (HIPS), l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), le polycarbonate (PC) et de chlorure de polyvinyle (PVC) qui représente environ 70% de toutes les matières plastiques [1,4].

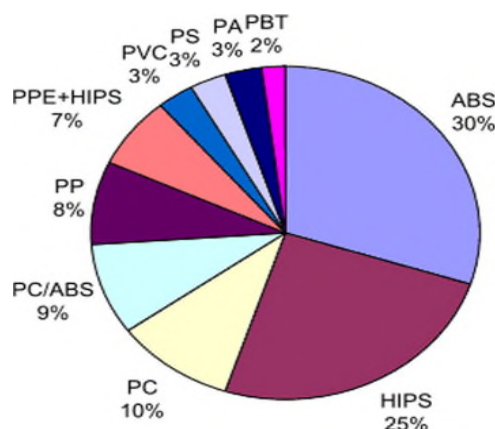


Figure I.2. Les principaux types de plastiques contenus dans les DEEE [2,4]

b) Technologie de recyclage des DEEE :

Parmi les étapes clé du processus de recyclage, on trouve l'opération de tri ou de séparation entre différents matériaux qui composent les DEEE. La séparation entre différents matériaux a pour but de transformer un flux de déchet mélangés et non valorisables en plusieurs fractions de déchets qui peuvent être valorisables [4].

La séparation des déchets a toujours intégré des étapes de tri manuel, mais certaines fonctions, sont depuis longtemps confiées à des machines comme par exemple, l'enlèvement des ferrailles par la séparation magnétique, ou la séparation électrostatique pour les plastiques [3].

Le remplacement du tri manuel quand la machine peut faire la même chose que l'homme, suivant les mêmes critères, a des avantages qui sont très recherchés. Parmi ces avantages, on trouve : l'économie, la vitesse d'exécution de la séparation, la constance d'exécution du tri, la suppression d'un poste pénible. On peut trouver d'autres critères que l'homme ne peut pas faire, et le recours à la machine est le seul moyen. Parmi ces critères, on a la séparation par apport à : la densité des différents matériaux, au spectre de réflexion infrarouge...etc. les avantages recherchés parmi ces critères sont autres que ceux cités ci-dessus. Une meilleure valorisation des flux à séparer est le critère recherché.

- **Séparation mécanique :**

Le tri mécanique est la séparation granulométrique et morphologique des déchets suivant leur aptitude à passer à travers les mailles d'un crible. Cette méthode est couramment utilisée en pré-tri, en tête de ligne. Il peut aussi être inséré à divers stades du processus après un broyage.

Le tamis plan, est utilisé comme outil pour débarrasser le flux des particules fine dès l'entrée au centre de recyclage. Ce procédé est utilisé pour avoir différents classe granulométriques, on distingue deux types de crible :

- Crible plan fixe qui est une plaque perforée en grille inclinée (figure I.3.a).
- Crible vibrant qui est légèrement incliné (figure I.3.b).

Les déchets déversés sont acheminés par deux modes de progression : convoyeur ou par trémie. Les particules plus fines que les perforations ou l'espacement tombent sous le tamis avant d'atteindre l'extrémité, ils sont récupérés dans le conteneur. Les objets plus gros que les mailles du crible avancent jusqu'à la sorti de celui-ci ou ils sont récupérés dans un autre conteneur.

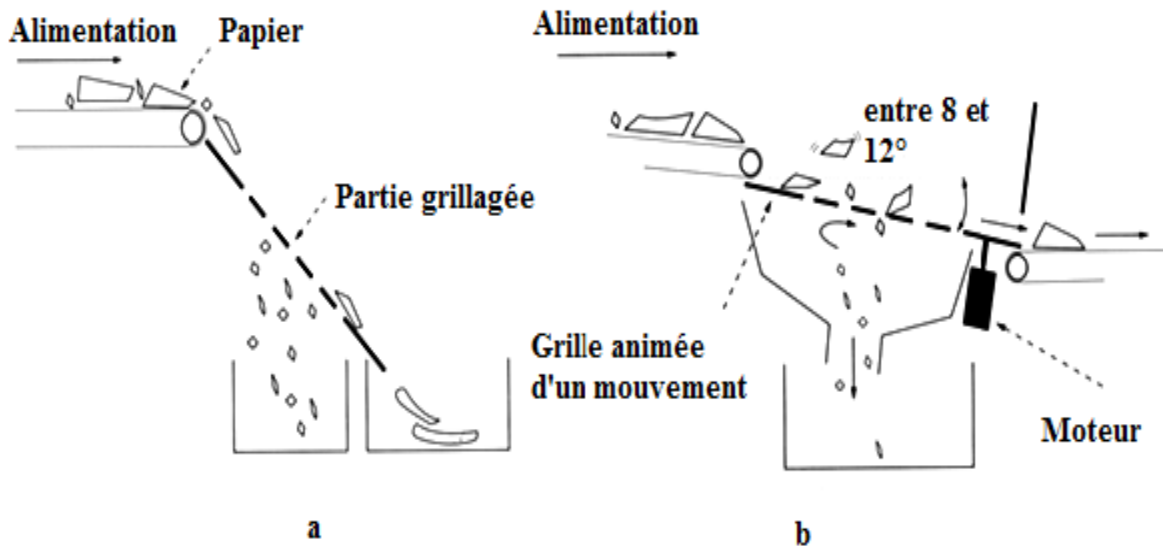


Figure I.3 : Représentation des différents cribles séparation mécanique [3]

- **Séparation optique**

Cette technique, est basée sur l'identification des matériaux par leurs spectres de réflexion dans le proche infrarouge. Le type de déchets traités avec cette méthode est le plastique non broyé. Deux lampes à infrarouge éclairent une zone du convoyeur. Au dessous de cette zone, est placé un détecteur qui capte la lumière réfléchié par les objets.

Le spectre de la lumière proche de l'infrarouge réfléchié est caractéristique de la nature de chaque matériau. Le signal du spectre est traité en temps réel, pour commander une série de buses à air comprimé placées en fin du convoyeur qui dévient les objets sélectionnés (figure I.4).

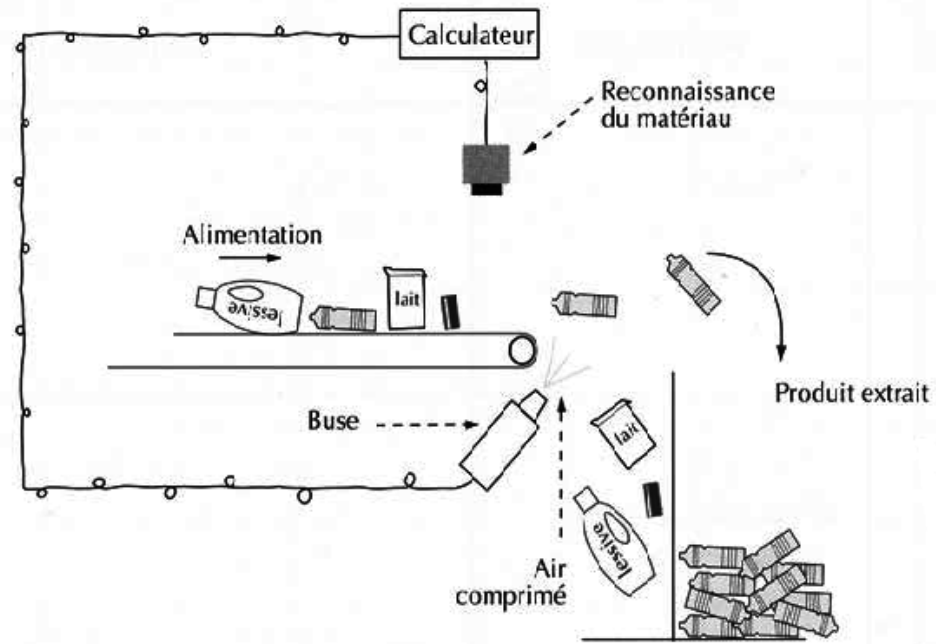


Figure I.4 : représentation du dispositif a séparation optiques des déchets [3]

- **Séparation électrostatique**

Cette technique concerne la séparation d'objets suivant leur comportement différenciée dans un champ de potentiel électrique. La matière est versée en continu après un broyage. Les particules subissent une mise en charge entraînant l'apparition de charge positive ou négative par transfert d'électrons. Les phénomènes d'attraction et de répulsion électrostatique des particules chargées permettent la séparation [3].

Il existe deux types de chargement :

- Chargement par effet couronne
- Chargement triboélectrique.

La nature du flux entrant, est un mélange de deux matériaux :

- Plastique /plastique.
- Matériaux granulaires conducteur et non conducteur.

I.2.2. Séparateur électrostatique pour le recyclage des déchets

La séparation électrostatique est un terme donné à une importante classe de technologie de traitement de matériel, largement utilisé pour le triage des mélanges granulaires grâce à des forces électriques agissant sur des particules [6,7,8].

a) Séparateur à cylindre tournant

Le séparateur à cylindre tournant appelé aussi séparateur à effet couronne figure I.5. Il permet de séparer un mélange isolant-métal. La séparation est basée sur la différence de la résistivité des matériaux [7,8,9].

Dans ce type de séparateur, le champ électrique est créé entre deux électrodes (3) et (4) connectées à une source haute tension continue et l'électrode tournante reliée à la terre (2).

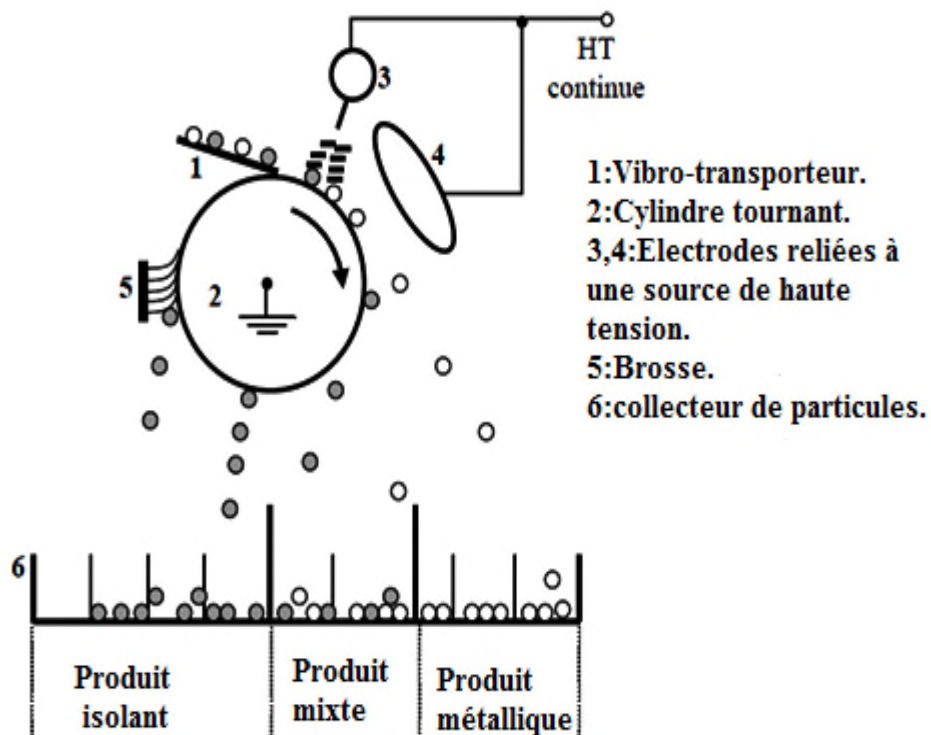


Figure I.5 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour [9]

La goulotte oscillante (1) dépose le produit à séparer sur la surface de l'électrode tournante (2), ce produit est ensuite introduit dans une zone à un fort champ électrique. Deux mécanismes de chargement sont simultanément employés : « bombardement ionique » et

« induction électrostatique ». Le premier est destiné aux particules isolantes, le deuxième implique seulement les particules métalliques (conductrices).

Chargées par « bombardement ionique » dans la zone de décharge couronne, les particules isolantes adhèrent à la surface du tambour grâce à la force d'image électrique. Elles tombent dans la partie du collecteur (6) qui leur est réservée lorsque la résultante des forces de pesanteur et centrifuge l'emporte sur la force d'image électrique.

Les particules qui restent coller sur le tambour sont éliminées de la surface par la brousse (5). Dans la zone de décharge couronne, les particules conductrices perdent rapidement la charge à travers le cylindre relié à la terre. Elles acquièrent ensuite par induction électrostatique une charge de signe opposé au potentiel des électrodes haute tension et seront attirés par celle-ci [8,9].

b) Séparateur électrostatique à électrode à plaque

Le séparateur électrostatique à électrode à plaque, est un procédé qui est principalement utilisé pour le triage des mélanges conducteur/conducteur. Le principe de fonctionnement de l'électro-séparateur à plaque peut être décrit à l'aide de la figure I.6. Selon la conductivité des granules, Les granules plus ou moins bonne conductrices sont transportées par le vibro-transporteur et déposées sur l'électrode à plaque. Les particules glissent à la surface de la plaque et se comportent différemment suivant leur conductivité électrique [6,7].

- a) Les granules conductrices ; en arrivant dans la zone du champ électrique généré par l'électrode statique haute tension, subissent une force d'attraction électrique exercée par cette électrode et se déposent dans la partie droite du collecteur.
- b) Les granules mauvaises conductrices, n'acquièrent pas une charge suffisamment grande. Ils ne sont pas donc attirés par l'électrode et tombent sous l'action de leur poids et de leur vitesse dans la partie gauche du collecteur qui leur est destinée.

Les trajectoires des particules sont déterminées par la combinaison de trois forces. En effet, chaque particule est soumise à trois types de force : la force électrostatique de l'électrode haute tension, la force de pesanteur et la force de frottement.

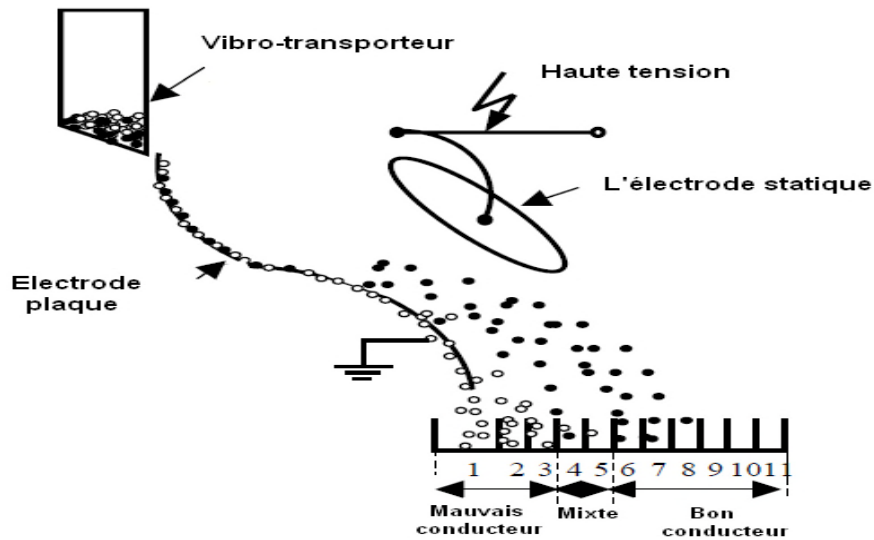


Figure I.6 : Schéma simplifié du principe du séparateur électrostatique à plaque [7]

c) Séparateur triboélectrique à chute libre

Le séparateur électrostatique à chute libre appelé aussi séparateur triboélectrique, sépare les mélanges isolant/isolant dont la caractéristique de leur conductivité est faible ce qui augmente considérablement la tarification c'est-à-dire l'accumulation de charge [6].

La séparation triboélectrique est basée sur la différence entre la fonction de travail des matériaux [10]. Celle ci dépend non seulement du matériau mais aussi des conditions extérieures sur l'état de surface de ces matériaux à séparer [11].

Lorsque deux types de matériaux sont frottés l'un contre l'autre ou même un simple contacte entre eux puis on les sépare, l'un acquiert une charge positivement et l'autre se charge négativement suite à un phénomène de transfert charge encore mal connu appelé « Triboélectricité » [5,6,12,13,14].

Les particules chargées tombent ensuite dans la chambre de séparation où un fort champ électrique horizontal est produit entre deux électrodes reliées à deux sources haute tension à courant continu de polarité opposée [13,15,16,17].

Les charges négatives sont attirées par l'électrode positive et les charges positives sont attirées par l'électrode négative. Les produits sont récupérés dans un collecteur qui comprend trois compartiments.

La Figure I.7 montre un séparateur triboélectrique à chute libre utilisé à l'université de Sidi-Bel-Abbès [6] :

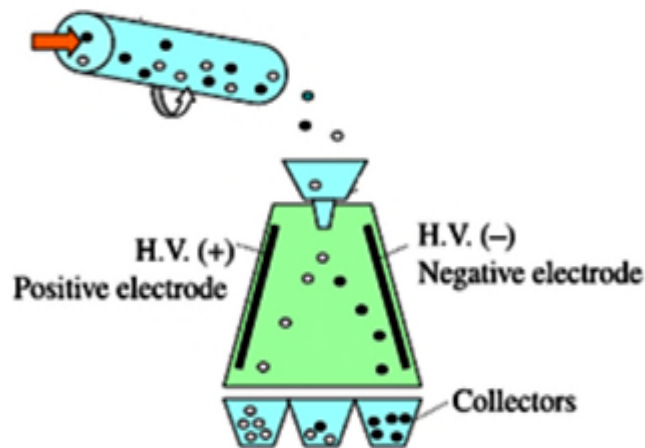


Figure I.7 : Séparateur triboélectrique à chute libre [6]

Les matériaux sont chargés à l'aide d'un tube rotatif qui nous permet d'avoir deux types de collisions : particules-particule et paroi du tube- particules Figure I.8.

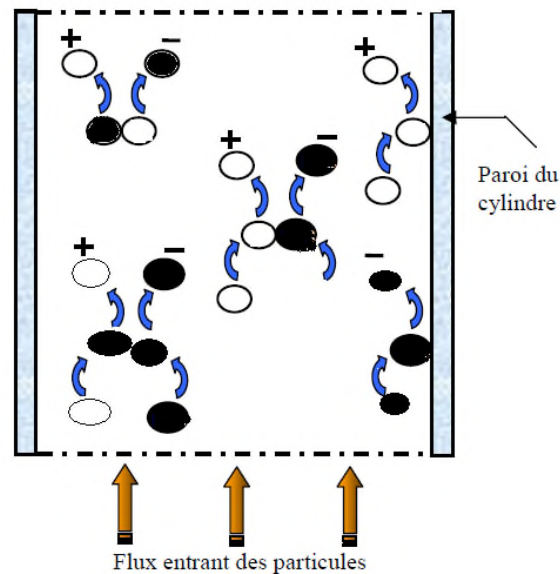


Figure I.8 : Mécanismes de chargement triboélectrique dans le cylindre tournant [6]

I.3 Charge triboélectrique des matériaux granulaires

I.3.1 Effet triboélectrique

L'effet triboélectrique est un phénomène connu depuis plus de deux mille ans, pourtant, la compréhension des mécanismes mis en jeu n'est pas totale. La charge par contact correspond

à un échange d'électron dû à la différence des travaux de sortie des matériaux (fonction de travail), se transfère de charge abouti à l'obtention de deux matériaux chargés l'un positivement et l'autre négativement.

L'effet triboélectrique, est généralement associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux. Le frottement étant l'équivalent de contacts suivis de séparations, mais s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse.

La polarité de la charge dépend de nombreux facteurs, il existe une liste qu'on appelle SERIE TRIBOELECTRIQUE (figure I.9). Plus deux matériaux sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée [18]. En réalité, on ne peut pas se fier complètement à l'ordre des matériaux dans ces listes, car ils diffèrent souvent d'un auteur à l'autre. Aussi des facteurs externes peuvent influencer les signes.

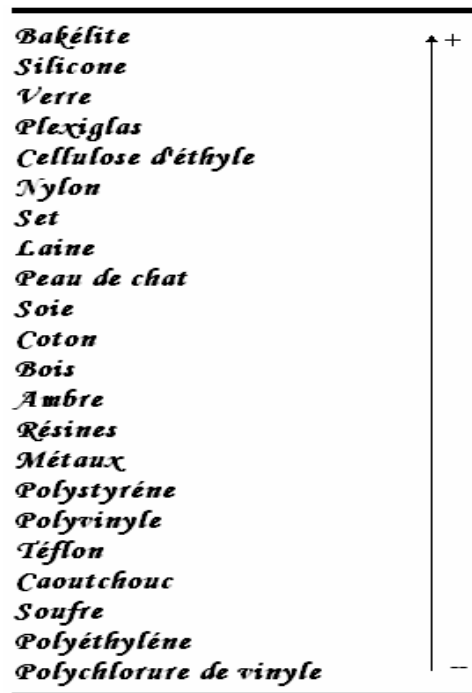


Figure I.9 : Classement des corps triboélectriques [1]

I.3.2 Mécanisme physique de la tribo-électrisation des matériaux

L'effet triboélectrique se définit comme l'échange de charge électrique entre deux matériaux, qu'il soit initialement neutre ou non. Une fois transférées, ces charges restent piégées dans leur nouvelle position.

La polarité des surfaces ainsi chargées après séparation dépend principalement des propriétés électriques des matériaux mis en contact, mais aussi de la présence d'impuretés, du taux d'absorption d'humidité, ou l'état de surfaces [5,6].

Il est particulièrement important que la discussion qui suit sur les phénomènes de contact d'électrification commence par une discussion des contacts entre métal-métal.

a) contact métal/métal :

Un électron de conduction à l'intérieur d'un métal, est soumis de la part de tous les ions constituant le métal à un ensemble de forces dont la résultante est nulle. Il peut donc se déplacer librement.

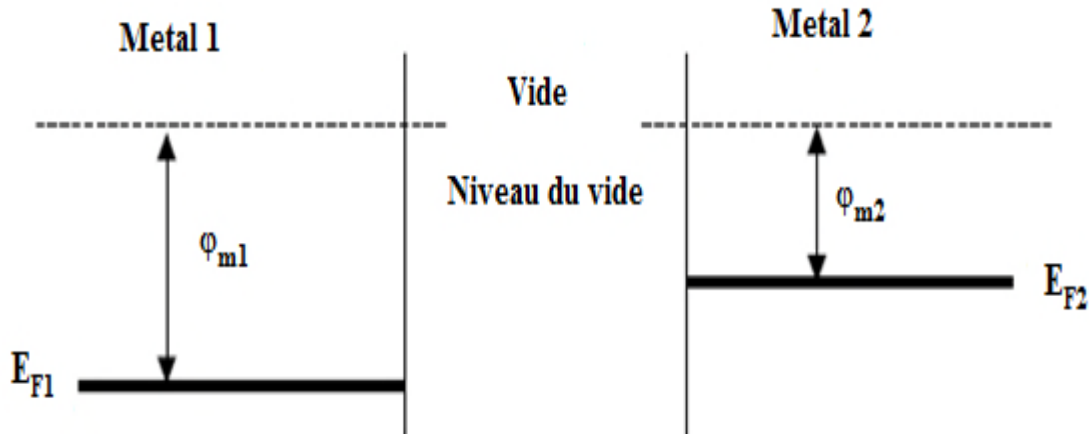


Figure I.10: schéma représentant les niveaux énergétiques de deux métaux avant le contact [18].

Quand le porteur arrive à la surface du métal, la compensation des forces n'est plus totale et l'électron est retenu à l'intérieur. Pour l'extraire, il faut lui fournir de l'énergie. On appelle travail de sortie (fonction de travail) du métal noté ϕ_m l'énergie qu'il faut donner à un électron se trouvant au niveau de Fermi noté E_F pour l'amener au niveau du vide.

Le niveau du vide est l'énergie d'un électron au repos et situé à l'infini. Le travail de sortie est donc la différence d'énergie entre l'électron situé à l'infini et l'électron situé au niveau de Fermi dans le métal [18].

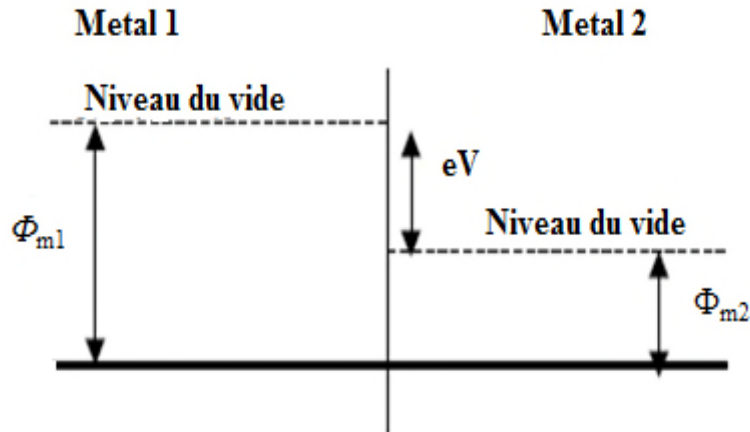


Figure I.11 : Schéma représentant les niveaux énergétiques de deux métaux en contact [18].

Lorsque deux métaux de fonction de travail Φ_{m1} et Φ_{m2} sont mis en contact, la barrière de potentiel (eV) qui existe entre les deux surfaces entraîne un écoulement des électrons du métal dont la fonction de travail est la plus faible vers le métal ou la fonction de travail est la plus élevée (par effet tunnel), ce qui permet l'alignement des niveaux de Fermi (figure I.11). Le métal qui a la fonction de travail la plus faible se charge positivement et celui dont la fonction de travail est la plus élevée se charge négativement [20].

On peut exprimer le potentiel de contact par :

$$V = \frac{\Phi_{m1} - \Phi_{m2}}{e} \quad (I.1)$$

La charge transmise lors du contact est :

$$Q = C.V = C \frac{\Phi_{m1} - \Phi_{m2}}{e} \quad (I.2)$$

La capacité C est donnée par :

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{z} \quad (I.3)$$

Où A représente la surface effective du contact, z la séparation au moment du contact, ϵ_0 étant la permittivité du vide ($8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$), e la charge électronique élémentaire $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Soit :

$$Q = \frac{\epsilon_0 A}{Z} V \quad (I.4)$$

La charge superficielle pendant le contact s'exprime alors par :

$$\sigma = Q/A = \frac{\epsilon_0}{Z} \frac{\Phi_{m1} - \Phi_{m2}}{e} \quad (I.5)$$

Par ailleurs, lors de la séparation des métaux, il apparaît un flux d'électrons dans la direction opposée qui limite l'accumulation des charges de manière cependant très réduite. Ce phénomène est dû à la fois au retour d'électrons par effet tunnel et par ionisation de l'air. L'effet tunnel n'étant effectif que jusqu'à une distance de séparation des métaux de l'ordre du nanomètre, au-delà de cette distance le retour ne se fait plus [18].

b) contact isolant/métal:

L'apparition de charge par contacts entre isolants et conducteurs est également la conséquence d'un transfert d'électrons [18,20].

Notons que le transfert de charge par des ions ou du matériel n'a pas encore été complètement exclue [19].

Le rôle de la fonction de travail (travail de sortie) est important pour les métaux. Pour les isolants on va parler de la fonction de travail effective (travail de sortie effectif) noté Φ_i . Certains défauts ainsi que l'état de surface contribuent à cette dénomination.

Le transfert de charge serait donc similaire à celui qui intervient entre deux métaux en remplaçant le travail de sortie de l'un par le travail de sortie effectif de l'isolant [18].

c) contact isolant/isolant

Harper est le premier à proposer que le mécanisme de transfert de charge se fait par Transfert d'électrons, Transfert d'ions et Transfert de matière. Toutefois, il est difficile d'accepter cette suggestion concernant le mécanisme de transfert de charge qui se produit dans les contacts métal-isolant, bien que certains chercheurs ont été influencés de le croire [20].

Il a suggéré que le transfert de charge lors d'un contact ou d'un frottement d'un isolant avec un autre se fait par un échange d'ion entre les deux surfaces de contact [19,21]. Ou encore deux ou trois mécanismes (électrons, ions et le transfert de la matière) peuvent contribuer simultanément à la cession de charge dans certains cas particuliers.

Lowell de son coté, a conclu par ses travaux, que le mécanisme d'échange de charge entre les deux surfaces de contact des isolants se fait par le transfert d'électrons [21].

De là, il est difficile de savoir quel mécanisme entre dans le transfert de charge entre les isolants, vu les conflits de théories qui existent entre les chercheurs. Ce qui nous ramène à dire que le moyen d'échange de charge reste méconnu entre deux isolants en contact.

d) Contribution des états de surface

Prenons deux isolants, lorsqu'ils sont mis en contact, il se produit des échanges d'électrons entre les différents niveaux d'énergie libres localisés à la surface des deux isolants. En effet, chaque échantillon contient des états d'énergie localisés. Les états sont distribués sur une gamme d'énergie. En général, les états de basse énergie sont occupés, alors que ceux de haute énergie sont vides. Cependant, quelques électrons occupent parfois des états d'énergie élevés, ce sont eux qui entrent en jeu dans le phénomène triboélectrique. Le schéma suivant figure I.12 montre deux isolants en contact:

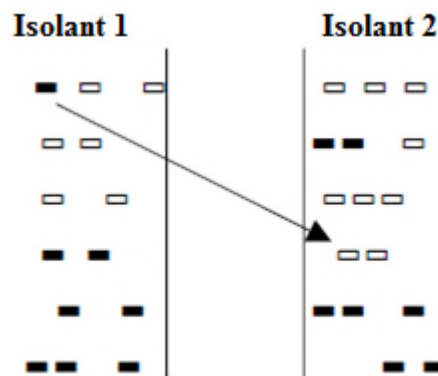


Figure I.12 : Schéma représentant les états de surface de deux isolants en contact [18].

Les rectangles noirs représentent les états d'énergie occupés par des électrons, les rectangles blancs sont des états d'énergie vides. La théorie suppose que les électrons dans un état d'énergie élevée ne sont pas capables de redescendre seuls, par transition, vers des niveaux plus bas en énergie dans le même isolant, même si cela est favorisé

thermodynamiquement. Ceci est dû au fait que ces sites sont très localisés et la différence d'énergie est trop importante.

Ainsi, deux isolants sont mis en contact et sont frottés l'un contre l'autre, certains états occupés de haute énergie près de la surface peuvent rencontrer des états de vide de plus basse énergie au-delà de l'interface, il se produit alors un transfert d'électrons par effet tunnel d'un isolant à l'autre.

Ces charges permettent ainsi aux deux isolants de se rapprocher de l'équilibre thermodynamique. Lowell et Truscott, ont tenté de montrer que si deux matériaux de même nature sont frottés ensemble, il y aura des échanges d'électrons entre eux, mais le transfert de charges reste nul car par symétrie on peut prévoir qu'il y aura statistiquement autant de charges d'électrons dans un sens que dans l'autre.

Par contre si les frottements sont asymétriques, une surface réduite frottant avec une surface plus étendue, on peut imaginer que tout au long du frottement la petite surface va perdre tous les électrons de haute énergie en faveur de la grande surface ; Tandis qu'elle va recevoir beaucoup plus d'électrons de la part de la grande surface, puisque au fur à mesure la petite surface va rencontrer des surfaces qui n'ont pas encore perdu leur électrons. Il y aura donc une charge totale transférée [18].

Les phénomènes triboélectriques ont été étudiés depuis longtemps au sein de l'institut PPRIME Angoulême. L'intérêt porté à ce travail est tout d'abord stimulé par l'industrie du recyclage des matériaux plastiques.

Par le fruit de ces études, sont nés plusieurs concepts de séparation électrostatique initiée par le professeur DASCALESCU. Pour chacun de ces séparateurs, on trouve deux grandes parties : la première partie, est le chargement triboélectrique des matériaux, la deuxième partie est la séparation de ces matériaux dans une chambre composée de deux électrodes reliées à deux sources haute tension de signes opposés.

Le premier séparateur triboélectrique, est le séparateur à chute libre dans l'un des prototypes a été développé par l'institut Pprime (figure I.13). Différents dispositifs de chargement ont fait l'objet de recherche qui sont arrivés à des résultats très concluants et par la suite ont été brevetés.

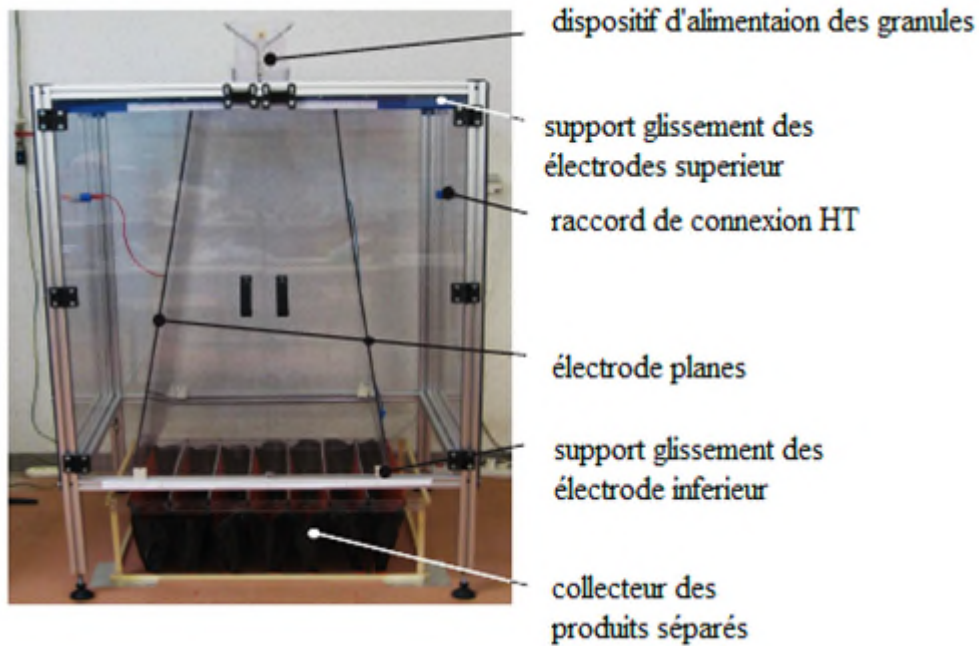


Figure I.13 : séparateur triboélectrique à chute libre développé au sein du laboratoire d'électrostatique d'Angoulême [4]

I.4.Séparation tribo-électrique

I.4.1 Dispositif de chargement tribo-électrique :

La séparation tribo-électrique dépend essentiellement du chargement des particules. La figure I.14, montre les étapes que les particules traversent pour se charger. Le chargement se fait par trois mécanismes : collision « particules/parois » de la chambre de chargement, collision « particules-particules de même nature » et collisions « particules-particule de natures différentes ».

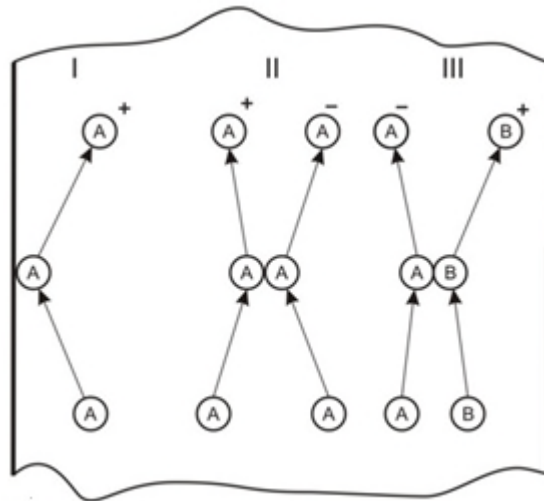
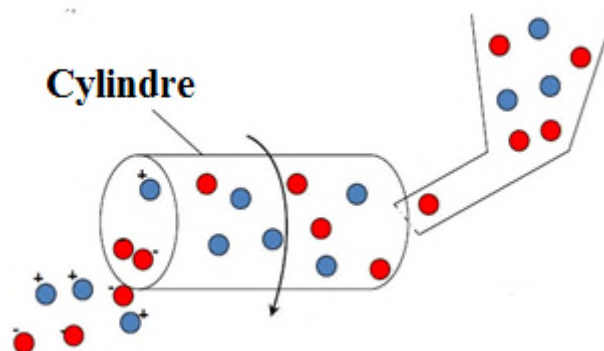


Figure I.14. Mécanismes de chargement électrique des granules dans un dispositif tribo-électrique [5]: collision entre : I- granule et la paroi du dispositif, II - collisions entre deux granules du même, III - collision entre deux granules de natures différentes.

a) Dispositif tribo-électrique à cylindre rotatif

Les granules sont mis à l'intérieur du cylindre figure I.15. La matière granulaire, en raison de la rotation du cylindre à l'intérieur, subit des mouvements et des collisions. Le chargement des granules est dû à des collisions entre les granules de plastique et entre les granules et la paroi interne du cylindre. Les principaux avantages de ce dispositif sont :

- Parvenir à un processus de chargement continu.
- Possibilité de traiter de grandes quantités de matière.



Figures I.15: dispositif tribo-électrique à cylindre rotatif [1].

a) Dispositif tribo-électrique à lit fluidisé:

Les dispositifs à lit fluidisé ont été largement étudiés, les chercheurs proposent différentes méthodes de construction de ceux-ci [2,4]. Dans ce dispositif les deux types de collisions se produisent, mais les collisions entre les granules dominant. Le matériau introduit dans le fond de la colonne est soulevé par le jet d'air, distribué uniformément dans la chambre de tribo-électrisation. Sous l'action de l'air ascendant, les granules sont soulevés et mis en mouvement, ce qui cause de multiples collisions de type « granules – granules » qui sont majoritaires, et de type « granule-paroi » qui sont minoritaires. Après un certain laps de temps nécessaire pour charger, les granules sont évacués par le coté bas du dispositif.

Parmi les avantages de ce dispositif, on trouve la possibilité de contrôler l'humidité et la température de l'air de fluidisation qui sont des paramètres principaux dans la séparation tribo-électrique.

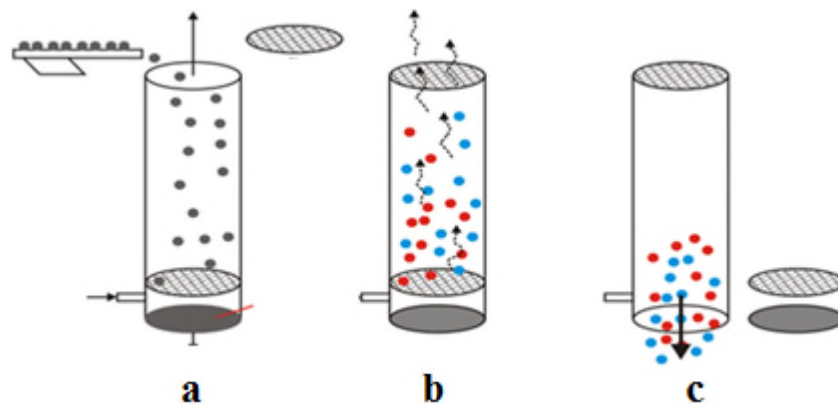


Figure I.16 : Dispositif tribo-électrique à lit fluidisé [1,2]

C) Dispositif tribo-électrique à cyclone

Le déplacement des granules à l'intérieur du dispositif tribo-électrique à cyclone est engendré par la force centrifuge, qui sont créés par un vortex d'air produit par une turbine. Les granules se déplacent sur une trajectoire en spirale à la surface des parois intérieures du dispositif Figure I.17. De multiples collisions se produisent entre les parois du dispositif et les granules en plastique.

Le revêtement intérieur du cyclone, peut être réalisé avec différents matériaux qui sont choisis selon la série tribo-électrique. Un des avantages de ce dispositif est que la tribo-électrisation se fait en contrôlant les paramètres de l'air de fluidification (température, vitesse, humidité), qui assure une bonne maîtrise de l'électrification des matériaux granulaires.

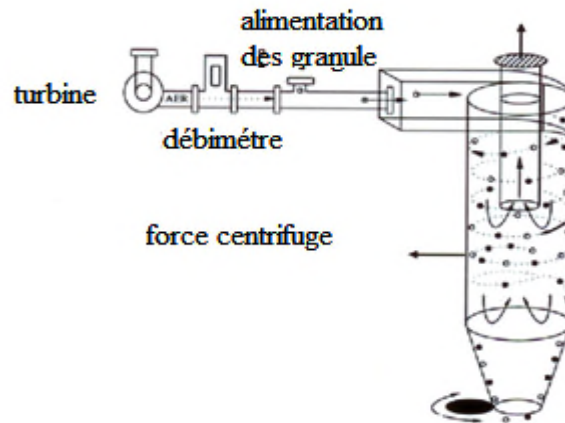


Figure I.17 : Dispositif triboélectrique à cyclone [2]

I.4.2 Applications l'industrielles du séparateur tribo-électrostatique,

Hamos GmbH, est un leader mondial dans le domaine de la séparation électrostatique des matériaux granulaires [4]. Son séparateur EKS (figure I.18) est largement utilisé dans l'industrie du recyclage.

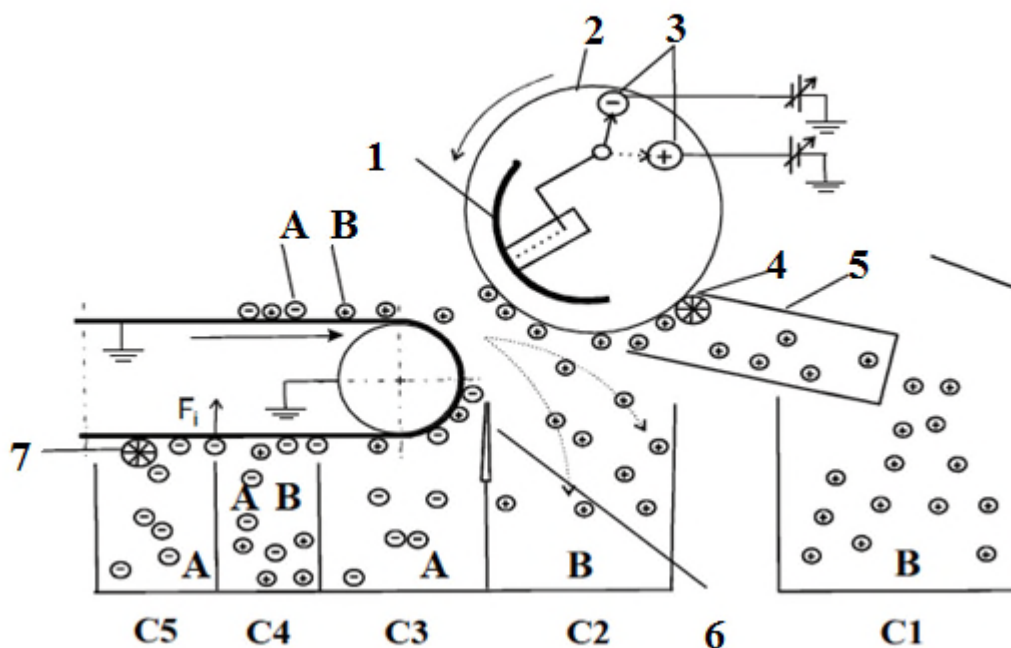


Figure I.18 : Schéma de principe de la zone séparation électrostatique du séparateur EKS-HAMOS [4]

A,B granules en plastique, 1) électrode haute tension ; 2) cylindre métallique rotatif ; 3) Connexions haute tension ; 4 et 7) brosse pour racler la matière; 5) tube collecteur ;6) palette déflecteur. C1 et C2) collecteur granule B ; C3 et C5) collecteur granule A ; C4) collecteur produit mixte A+B.

Le mélange de plastique est introduit par un convoyeur vibrant dans l'unité de charge tribo-électrique. Le mélange de granules de plastique chargés passe par un champ électrique intense ou est réalisée la séparation électrostatique [22],[23]. Les particules positives sont attirées par l'électrode négative, tandis que les particules négatives sont rejetées et vice-versa.

Le séparateur Carpco [24], [25] figure I.19, est un séparateurs tribo électrostatiques à chute libre, de grande capacité, pour la séparation de deux ou plusieurs matériaux. Le nouveau design de cette installation est facilement adaptable aux besoins des applications, notamment à la séparation des minerais et des plastiques dont la taille varie de 1 mm à 1cm. Le séparateur utilise un champ électrostatique de 120 kV, produit par deux sources variables de haute tension, ajustables dans la gamme 0-60 kV.

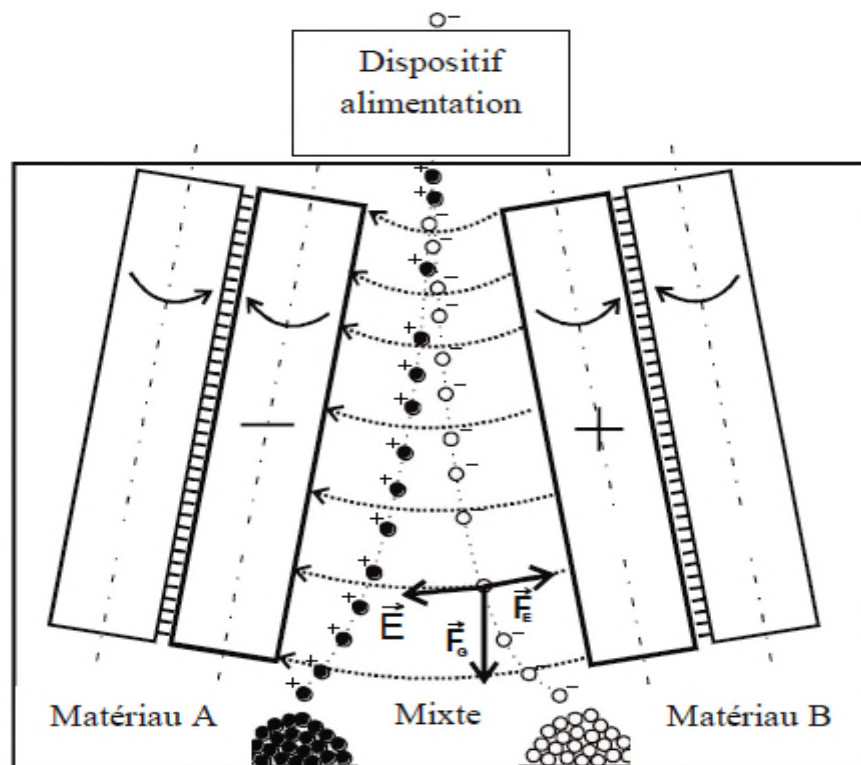


Figure I.19 : Séparateur tribo- électrostatique à chute libre Carpco [4]

Les granules sont chargés électriquement par un dispositif de type cyclone. Elles s'accumulent après dans un dispositif de stockage temporaire pour assurer un flux constant de particules à l'entrée du séparateur, dans les conditions où le matériau est envoyé à débit variable.

Les granulés sont placés dans la chambre de séparation par l'intermédiaire d'un entonnoir dont le rôle est de créer une couche fine de matériau nécessaire pour une bonne séparation. Sous l'action de la gravité et des forces électrostatiques, les granules chargés avec des charges différentes sont déviés vers les deux électrodes connectées à deux sources de haute tension variables. Ceux qui ont une charge positive sont déviés vers l'électrode de polarité négative, et ceux qui ont une charge négative vers l'électrode positive. Les particules qui ne sont pas suffisamment chargées ne seront pas attirées par les électrodes et vont tomber dans la région centrale. Elles feront l'objet d'une nouvelle séparation. Les granules légers ou très fortement chargés qui restent collés sur les électrodes sont retirés de leur surface par des brosses rotatives.

I.5. Conclusion

Le problème du traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques DEEE, auxquels s'ajoutent des quantités de plus en plus importante de matériel informatique en fin de vie est une préoccupation actuelle pour l'industrie de recyclage. Les méthodes de récupération de matériaux isolants provenant de ces déchets sont différentes. Les processus électrostatiques peuvent s'imposer comme solution de choix pour la séparation des mélanges de matériaux isolants obtenus après le broyage des déchets.

Ces processus utilisent une multitude de dispositifs de charge triboélectrique (rotatifs, à vibrations, à lit fluidisé) dont l'efficacité a déjà été prouvé pour des applications particulières. Les études réalisées sur des modèles de laboratoires montrent que les lits fluidisés ou électrisation par vibration pourraient représenter une solution viable pour la charge triboélectrique des matériaux plastiques granulaires, en vue de la séparation électrostatique.

*Chapitre II : Matériel et
Méthode*

II.1. Introduction

La séparation tribo-électrique à chute libre, est un procédé largement utilisé pour la séparation et la purification des produits granulaires en plastique. La charge électrique spécifique des granules, est un paramètre essentiel influençant la pureté, le rendement et l'efficacité de la séparation tribo-électrique. Y. Higashiyama et al estiment que le mouvement des particules en plastiques introduits dans un champ électrique intense, ne dépend pas de la quantité de charge mais de la charge spécifique de la particule [27]. Le but de ce travail est la mise en point d'un séparateur tribo-électrique pour la séparation d'un mélange binaire de granule en plastique issu de déchet d'équipements électrique et électroniques (DEEE). Ce séparateur se compose de deux parties distinctes, la première partie est le dispositif d'électrisation des granules en plastiques, la deuxième partie est la chambre de séparation.

II.2. Installation expérimentale pour l'étude de l'électrification par triboélectricité et la séparation tribo-électrostatique des matériaux granulaires :

Le processus de chargement, dépend des caractéristiques des matériaux, de la forme et des dimensions des granules. La taille et la forme des particules, doivent être aussi uniformes que possible afin de garder la déviation désirée dans le séparateur électrostatique. L'environnement (conditions ambiantes) où se déroule le processus, tel la température et l'humidité, est très important [27, 28].

L'installation expérimentale se compose de deux parties essentielles : le dispositif vibro-tribo-chargeur et la chambre de séparation des mélanges granulaires. Le paragraphe (II.3) explique les principes de base de la méthode des plans d'expériences. L'analyse des résultats expérimentaux a été réalisée avec le programme MODDE 5.0, basé sur la méthode des plans d'expériences [29] (Umetrics, Umea, Suède). Le programme calcule les coefficients a_{ij} du modèle mathématique, dessine les contours de réponse et identifie les meilleurs réglages des paramètres pour l'optimisation du processus. Le programme évalue deux critères statistiques qui doivent se rapprocher de l'unité.

II.2.1 Dispositif vibratoire pour le chargement tribo-électrique

La figure II.1 représente le dispositif de chargement (électrification) triboélectrique appelé le vibro-tribo-chargeur, qui constitue le banc expérimental utilisé pour nos expériences.

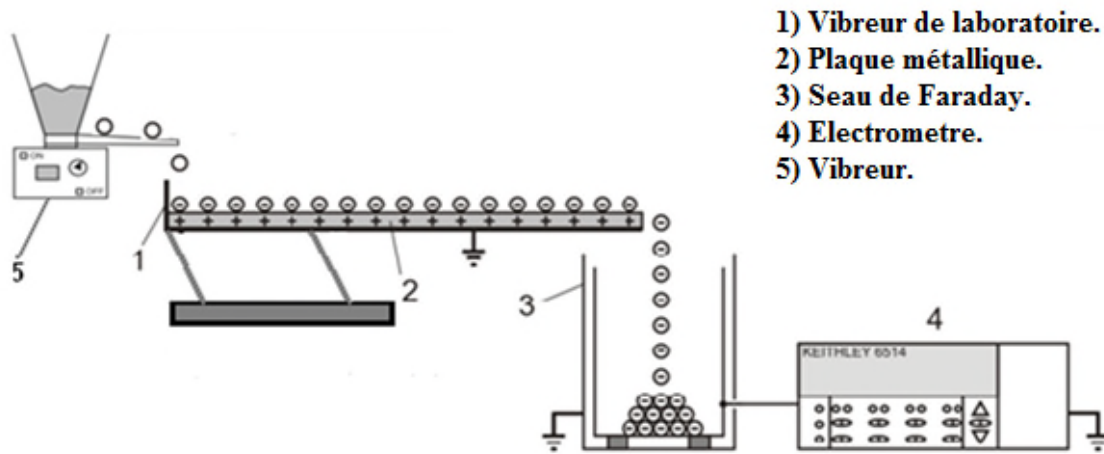


Figure II.1 : Représentation graphique du vibro-tribo-chargeur

Un vibreur de laboratoire (1), associé à une plaque métallique (2) (longueur $l_0 = 230\text{mm}$, largeur $l = 100\text{mm}$ et hauteur $h = 30\text{mm}$) couverte d'une plaque isolante en plastique, forme le dispositif de chargement triboélectrique (vibro-tribo-chargeur). Afin d'éviter l'accumulation de la charge sur la plaque vibrante, elle est mise à la terre. Le vibro-tribo-chargeur est muni d'un boîtier de mise en service et de réglage de l'amplitude vibratoire de la plaque oscillante. Un second vibreur (5) muni d'un entonnoir et d'un potentiomètre intégré, sert à contrôler le débit Φ d'alimentation des granules plastiques sur la goulotte vibrante. Un seau de Faraday (3) connecté à un électromètre électronique (4) (model 6415, kenthely instrument) est placé à la sortie de l'extrémité du vibreur pour la mesure de la charge acquise par les granules plastiques après chargement sur la plaque vibrante par impacts répétés.

Grace à un électroaimant, des vibrations sont produites, nous obtenons des collisions entre les particules en plastique et parois de la plaque oscillante en plastique et des collisions répétées entres particules.

II.2.2 Choix du matériau couvrant la plaque vibrante

La matière de la plaque oscillante, est choisie de manière à être incluse dans la série triboélectrique respectant un ordre qui favorise le processus de chargement triboélectrique [1].

Pour cela, il faut s'assurer que le matériau soit situé entre les deux types de produits du mélange à séparer. Le matériau couvrant la plaque vibrante, peut être modifié en fonction de la nature des matériaux granulaires qui subissent l'électrification par triboélectricité. Dans notre étude, un plateau métallique a été recouvert d'un film de PET (Polyethylene terephthalate) d'une épaisseur de 6 mm.

Une série d'expériences sur l'installation du vibro-tribo-chargeur a été menée sur deux échantillons de 100g de matériaux granulaires en plastique ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) et HIPS (High impact polystyrene), d'une taille moyenne de 2 à 5mm dont l'aspect peut être examiné sur la (figure II.2). Ces deux matériaux proviennent des déchets des équipements électroniques et informatiques fournis par la compagnie APR2 Bonnières-sur-Seine, France.

La charge massique acquise en nano coulomb par gramme (nC/g), dépend de la longueur L de la plaque vibrante (la goulotte oscillante a une longueur $l_0 = 230\text{mm}$; les différentes longueurs de la goulotte sont simulées en faisant passer le même matériau n fois d'où $L = nl_0$). La charge est mesurée par le seau de Faraday connecté à un électromètre électronique (model 6415, kentely instrument), après des passages séparés des deux matériaux (ABS et HIPS) sur la goulotte oscillante.

Notre objectif est de vérifier que le matériau couvrant la plaque vibrante en PET répond bien au besoin de l'étude pour qu'il soit bien situé entre les deux types de particules à séparer. Les résultats obtenus dans les conditions ambiantes [$T=20-22\text{C}^\circ$ et $H=57-64\%$], sont représentés sur la (figure II.3).

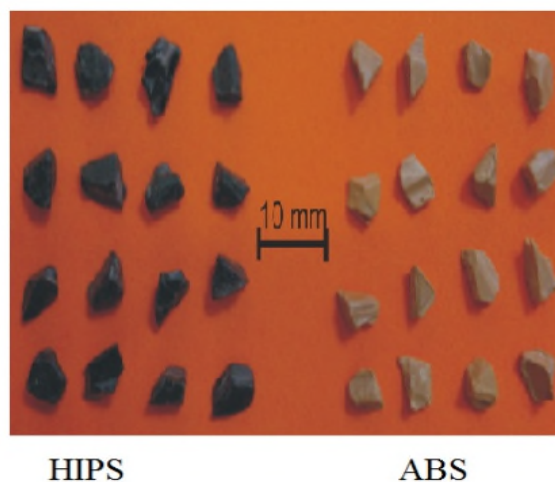


Figure II.2 : Aspect des particules d'échantillons ABS et HIPS

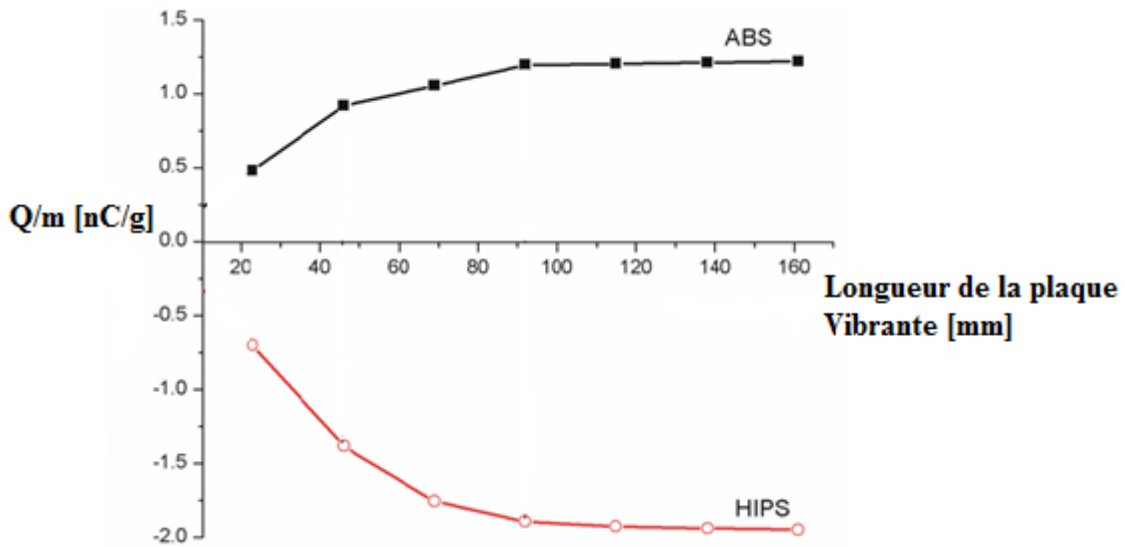


Figure II.3 : Représentation graphique de la charge massique en fonction de la longueur de la plaque vibrante

D'après les résultats obtenus, nous constatons que les granules ABS et HIPS lors des impacts répétitifs séparés avec la plaque vibrante, se chargent positivement et négativement respectivement. Cela explique, que le PET est bien un matériau adéquat se trouvant entre les deux dans la série triboélectrique (Figure II.4).

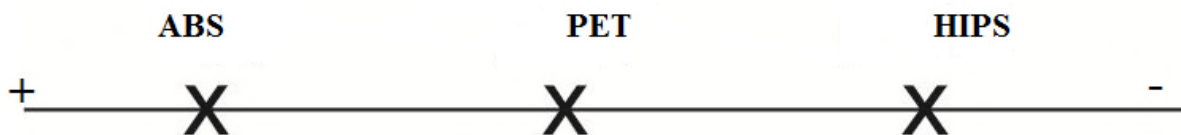


Figure II.4 : Représentation graphique des matériaux selon leurs classements dans la série tribo-électrique

II.2.3 Procédure de mesure de la charge électrique des granules :

Des granules en plastique sont introduits après leur chargement par vibration sur la goulotte oscillante, dans le seau de FARADAY qui est relié par un câble BNC à un électromètre qui indique la charge électrique acquise par les granules en plastique.

La cage de Faraday est un dispositif de mesure bien connu et largement utilisé dans les applications électrostatiques [2,4]. Ce dispositif de mesure (seau de FARADAY) est constitué

de deux électrodes cylindriques coaxiales, séparées par un matériau isolant. L'électrode intérieure (électrode de mesure) est isolée du sol par un support diélectrique. Elle est connectée à un électromètre par un câble coaxial. L'électrode extérieure est mise à la terre et sert d'écran contre les champs électriques parasites.

Le champ électrique à l'intérieur de l'électrode de mesure est nul. Quand on introduit un corps électrisé (figure II.5) avec une charge Q positive, cette dernière induit une charge égale mais de signe opposé à l'électrode de mesure sur sa face intérieure. A son tour, la charge négative induit une charge égale mais de signe opposé sur la face extérieure de l'électrode de mesure, qui est écoulee directement via le câble coaxial BNC vers l'électromètre connecté en série sur la surface extérieure de l'électrode de mesure.

L'instrument Keithly est le plus utilisé pour déterminer la charge électrique. Il permet de mesurer aussi des courants et des tensions électriques.

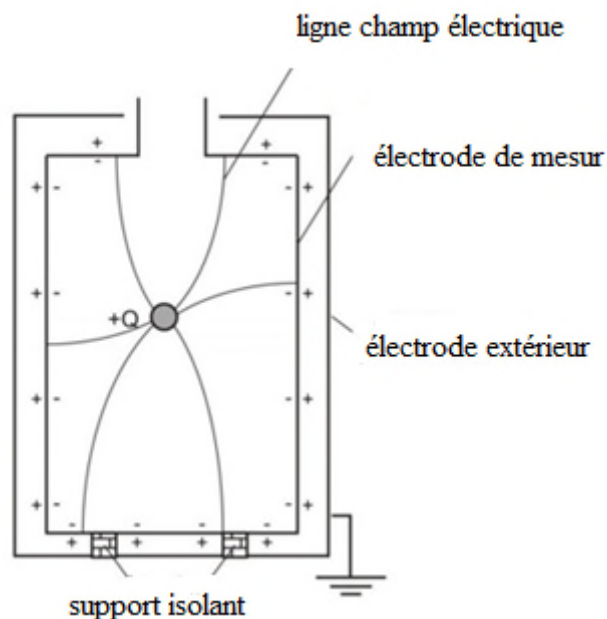


Figure II.5 : Représentation graphique de la cage de FARADAY

II.2.4 Séparateur électrostatique à chute libre :

La (figure II.6), montre l'ensemble du dispositif expérimental. Il y a comme élément central, le séparateur électrostatique à chute libre. Il est constitué de deux plaques rectangulaires d'une longueur 760mm et d'une largeur 100mm, séparées par une distance de 100 mm.

Elles sont alimentées par deux sources haute tension (GAMMA ES60N 20W et GAMMA ES60P 20W) de polarités opposées. Elles génèrent un champ électrique uniforme orienté perpendiculairement à la direction de la chute des particules.

Les granules chargés par le dispositif vibro-triboélectrique (figure II.1), sont déviés vers l'électrode ayant la polarité de signe opposé. Les granules sont soumis à l'action des forces gravitationnelles exprimées par l'équation (II-1) et une force de Coulomb exprimée par l'équation (II-2).

$$\vec{F}_g = m \times \vec{g} \quad (\text{II-1})$$

$$\vec{F}_E = Q \times \vec{E} \quad (\text{II-2})$$

Le collecteur est un accessoire nécessaire destiné à la récupération des produits granulaires après la séparation. Les balances de mesures, servent à mesurer la quantité de produit récupéré afin d'évaluer la pureté et le rendement de la séparation électrostatique (voir chapitre III).

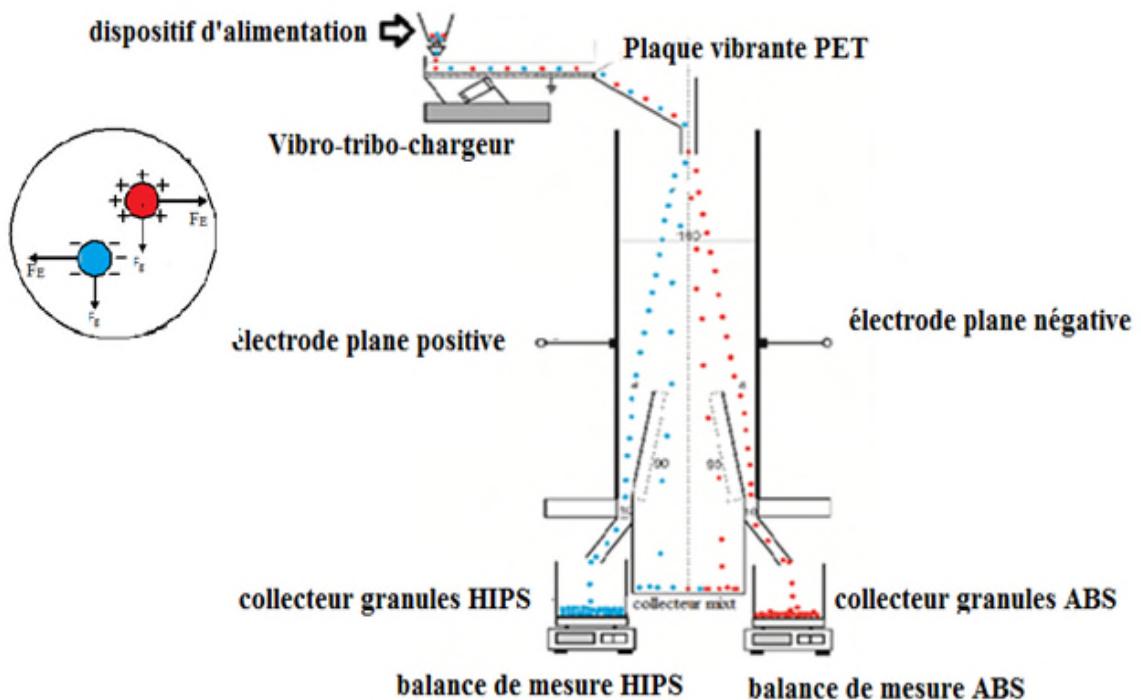


Figure II.6 : Représentation graphique de l'installation expérimentale du séparateur à chute libre

Pour avoir une meilleure séparation, il faut récupérer le maximum de granules dans les compartiments qui leur sont destinés. Dans ce cas, un bon chargement triboélectrique est indispensable pour que la force de Coulomb (équation II-2) soit aussi élevée que la force gravitationnelle (équation II-1) pour obtenir une meilleure déviation des particules. Le cas contraire entraîne une chute des particules dans le collecteur mixte, ce qui donne une mauvaise séparation électrostatique des granules en plastique.

II.3. Méthode des plans d'expériences

L'expérimentateur, quelque soit son domaine d'étude, est toujours confronté au problème difficile de l'organisation optimale de ses essais. Comment peut-on obtenir les bonnes informations dans les meilleurs délais et pour le moindre coût ?

La méthode des plans d'expériences apporte à l'expérimentateur un puissant outil de réflexion et d'analyse qui lui permet de conduire son expérimentation avec sûreté et précision [31].

Les plans d'expériences ont d'abord été utilisés en agronomie [31]. Puis, peu à peu, ils ont été utilisés dans d'autres domaines techniques.

II.3.1.Principe de la méthode des plans d'expériences

L'étude d'un phénomène peut, le plus souvent, être schématisée de la manière suivante : nous nous intéressons à une grandeur Y que nous appellerons par la suite réponse qui dépend d'un grand nombre de variables, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, que nous appellerons facteurs.

La modélisation mathématique consiste à trouver une fonction f telle que $Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. Une méthode classique d'étude consiste en la mesure de la réponse Y pour plusieurs valeurs de la variable x_i tout en laissant fixe la valeur des $(n-1)$ autres variables. Nous itérons alors cette méthode pour chacune des variables. Ainsi, par exemple, si nous avons 4 variables et si nous décidons de donner 5 valeurs expérimentales à chacune d'elles, nous sommes conduits à effectuer $5^4 = 625$ expériences. Ce nombre élevé dépasse les limites de faisabilité tant en temps qu'en coût. Il faut donc réduire le nombre d'expériences à effectuer sans pour autant perdre la qualité des résultats recherchés.

II.3.2. Concepts fondamentaux

A) Plan à deux facteurs 2^2

Les plans factoriels à deux niveaux sont les plus simples, ils sont aussi les plus utilisés car ils forment la base de tous les débuts d'étude. Les premiers résultats obtenus grâce à ces plans peuvent toujours être complétés par de nouvelles expériences permettant d'atteindre le degré de précision et d'information recherché.

Pour décrire le cas simple du plan 2^2 , commençons à expliquer cette notation :

- Le 2 en exposant signifie qu'il ya deux facteurs étudiés ;
- L'autre 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux.

Cette notation se généralise immédiatement pour un plan comportant l'étude de k facteurs prenant chacun deux niveaux, donc il s'agit d'un plan 2^k .

Nous pouvons donner une représentation géométrique du domaine d'étude. Chaque point de ce domaine représente des conditions opératoires possibles, donc une expérience que l'opérateur pourrait réaliser. Le choix des meilleures expériences, est le problème fondamental de l'expérimentateur. En l'absence de toute information sur la fonction f , nous nous donnons, à priori, une loi d'évolution de la réponse en fonction des variables. Comme nous désirons effectuer, dans un premier temps, que deux essais par facteur, soit deux niveaux par facteur, nous adoptons une loi du premier degré par apport à chaque variable. Cette loi est la suivante pour les plans factoriels complets comportant deux facteurs [5,31] :

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 \quad (II-3)$$

Avec ces hypothèses, on démontre que le meilleur emplacement des points expérimentaux se situe aux sommets du carré représentant le domaine d'étude : A , B , C et D . La figure II-7, illustre les expériences à réaliser et le domaine d'étude. Mais cette représentation géométrique est commode pour comprendre le mécanisme des plans d'expériences, elle ne peut plus être employée dès que le nombre de facteurs est supérieur à trois.

Pour les espaces multidimensionnels, nous adoptons une représentation matricielle. Pour montrer la correspondance entre les deux représentations, géométrique et matricielle, nous

allons expliquer la construction de la matrice d'expérience du plan 2^2 associée à la (figure II.7).

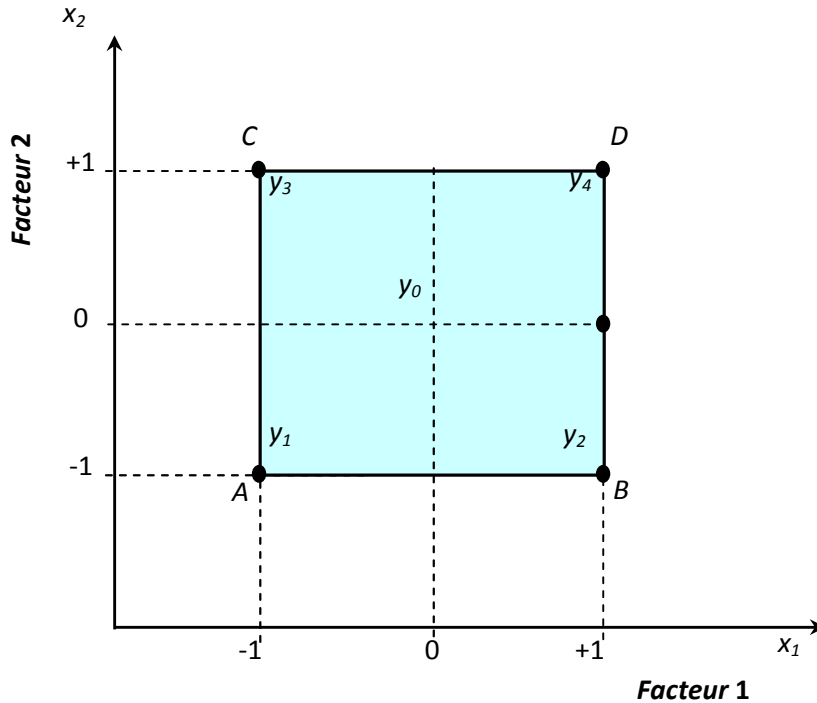


Figure II.7 : Définition du domaine d'étude

La matrice d'expériences est constituée de deux sous-tableaux : le premier définit les essais à réaliser et le second le domaine d'étude (Tableau II-1). Le premier sous tableau comprend trois colonnes ; la première identifie les essais par exemple : 1, 2, 3 et 4 ; la seconde et la troisième indiquent les coordonnées des points représentatifs des expériences prévues. Le deuxième sous tableau indique, en unités courantes, les valeurs des niveaux haut et bas de chacun des facteurs. À titre d'exemple, nous avons indiqué des tensions et des vitesses. Les deux représentations, géométrique et matricielle, sont équivalentes. Il faut savoir passer de l'une à l'autre pour bien interpréter les résultats des plans d'expériences.

Tableau II-1. Matrice d'expériences

Essais à réaliser		
N° Essai	Facteur 1	Facteur 2
1 (A)	-1	-1
2 (B)	+1	-1

3 (C)	-1	+1
4 (D)	+1	+1
Domaine d'étude		
Niveau -	60 tr/min	30 kV
Niveau +	90 tr/min	34 kV

➤ **Effet d'un facteur**

L'expérimentateur ayant réalisé les essais est en possession de quatre valeurs de la réponse : y_1, y_2, y_3 et y_4 ; Il a donc un système de quatre équations à quatre inconnues. Les inconnues étant les coefficients du modèle : a_0, a_1, a_2 et a_{12} . En remplaçant dans la relation (II-1) les x_i par leur valeur du tableau II-1, nous obtenons :

$$y_1 = a_0 - a_1 - a_2 + a_{12} \quad (\text{II-4})$$

$$y_2 = a_0 + a_1 - a_2 - a_{12} \quad (\text{II-5})$$

$$y_3 = a_0 - a_1 + a_2 - a_{12} \quad (\text{II-6})$$

$$y_4 = a_0 + a_1 + a_2 + a_{12} \quad (\text{II-7})$$

La résolution de ce système donne :

$$a_0 = \frac{1}{4} (+y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \quad (\text{II-8})$$

$$a_1 = \frac{1}{4} (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{II-9})$$

$$a_2 = \frac{1}{4} (-y_1 - y_2 + y_3 + y_4) \quad (\text{II-10})$$

$$a_{12} = \frac{1}{4} (+y_1 - y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{II-11})$$

➤ Signification de a_0

Si nous donnons à x_1 et à x_2 la valeur zéro, nous définissons le centre du domaine d'étude. La relation (II-1) devient alors :

$$y_0 = a_0 \quad (\text{II-12})$$

Le coefficient a_0 est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude. La formule (II-6) montre également que a_0 peut être considéré comme *la moyenne des quatre réponses*.

➤ *Signification de a_1*

Donnons la valeur zéro à x_2 , la relation (II-1) devient :

$$y = a_0 + a_1 x_1 \quad (\text{II-13})$$

Donnons maintenant successivement à x_1 les valeurs -1 et $+1$, nous obtenons les deux réponses y_- et y_+ :

$$y_- = +a_0 - a_1 \quad (\text{II-14})$$

$$y_+ = +a_0 + a_1 \quad (\text{II-15})$$

d'où :

$$a_1 = \frac{1}{2}(+y_+ - y_-) \quad (\text{II-16})$$

y_- est la valeur de la réponse pour le point de coordonnées $x_1 = -1$ et $x_2 = 0$, c'est-à-dire celle qui correspond au point milieu du segment AC (Figure II.7). Aucune expérience n'a été réalisée en ce point mais, si nous utilisons les relations (II-6) et (II-7), nous vérifions que y_- est la moyenne des réponses au niveau bas du facteur 1. En effet :

$$y_- = +a_0 - a_1 \quad (\text{II-17})$$

ce qui donne :

$$y_- = \frac{1}{2}(+y_1 + y_3) \quad (\text{II-18})$$

Nous pouvons montrer de même que y_+ est la moyenne des réponses au niveau haut du facteur 1 :

$$y_+ = \frac{1}{2}(+y_2 + y_4) \quad (\text{II-19})$$

a_1 est donc la demi-différence entre ces deux moyennes. Nous pouvons dire aussi que a_1 représente la moitié de la variation de la réponse quand nous passons du niveau bas au niveau haut du facteur 1.

Ce résultat est important car il donne la signification du coefficient a_1 . C'est la variation de la réponse due au facteur 1 seul, quand nous passons du centre du domaine d'étude au niveau haut de ce facteur ; a_1 s'appelle l'effet du facteur 1.

Nous démontrons de même que a_2 est l'effet du facteur 2. Il est commode de représenter l'effet d'un facteur comme l'indique la figure II.8 où nous faisons appel au plan de coupe $yo x_1$ passant par $x_2 = 0$ pour le facteur 1.

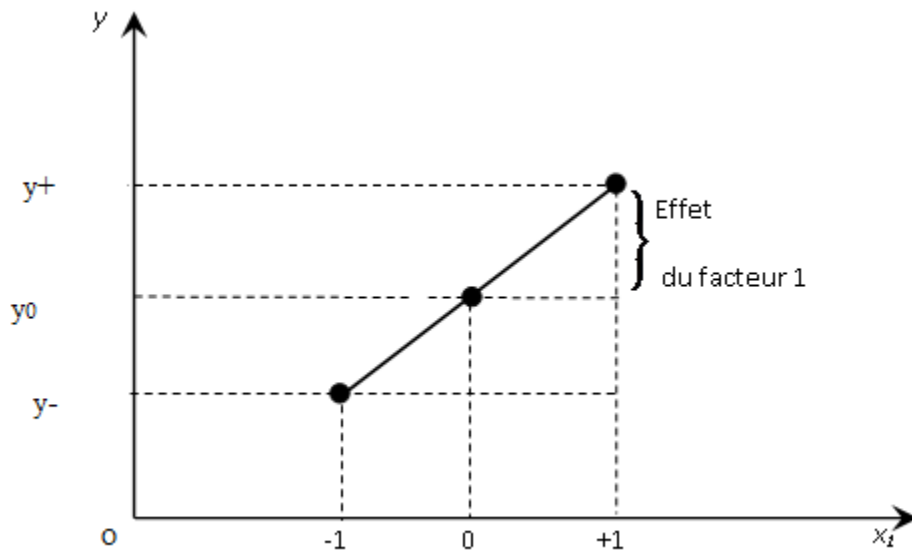


Figure II.8 : Représentation de l'effet d'un facteur dans le plan vertical passant par x_2

➤ **Interaction entre deux facteurs**

L'effet d'un facteur a été défini au niveau zéro de l'autre facteur. Mais pouvons aussi définir l'effet d'un facteur pour un autre niveau de l'autre facteur. En particulier, nous pouvons introduire l'effet d'un facteur soit au niveau -1 , soit au niveau $+1$ de l'autre facteur. L'effet du facteur 1 au niveau -1 du facteur 2 est la demi-différence entre y_2 et y_1 , et l'effet du facteur 1 au niveau $+1$ du facteur 2 est la demi-différence entre y_4 et y_3 . Si ces deux effets sont égaux, on dit qu'il n'y a pas d'interaction entre les facteurs. Si ces deux effets sont différents, on dit qu'il y a interaction entre les deux facteurs.

Il y a donc interaction lorsque l'effet d'un facteur dépend du niveau de l'autre facteur.

Par définition, la valeur de l'interaction, notée E_{12} , est la demi-différence entre l'effet du facteur 1, e_+ , au niveau haut du facteur 2 et l'effet du facteur 1, e_- , au niveau bas du facteur 2.

Nous avons:

$$E_{12} = \frac{1}{2}(e_+ - e_-) \quad (\text{II-20})$$

En développant :

$$E_{12} = \frac{1}{4}(+ y_1 - y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{II-21})$$

Si nous comparons la valeur de E_{12} à celle de a_{12} , relation (II-9), nous constatons qu'elle lui est égale. Si nous faisons le même calcul pour le facteur 2, en prenant les niveaux haut et bas du facteur 1, nous trouverons que l'interaction est la même et qu'elle est égale, elle aussi, à a_{12} .

➤ **Calcul de l'effet d'un facteur**

Reprenons la formule (II-7) qui donne l'effet du facteur 1 :

$$a_1 = \frac{1}{4}(-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{II-22})$$

Nous constatons :

- que toutes les réponses participent au calcul de l'effet ;
- que chaque réponse est précédée d'un signe et que la suite de ces signes est la même que celle de la colonne du facteur 1 dans la matrice d'expériences, soit $- + - +$;
- qu'il y a un coefficient, (ici $\frac{1}{4}$), dont le dénominateur est égal au nombre d'expériences effectuées.

Nous remarquons qu'il en est de même pour le facteur 2, la suite des signes étant cette fois $-- ++$, c'est-à-dire celle de la colonne du facteur 2 dans la matrice d'expériences.

Le calcul pratique d'un effet est le suivant : nous multiplions chaque réponse par le signe correspondant de la colonne du facteur ; nous additionnons les produits et divisons la somme par le nombre d'expériences.

➤ **Matrice de calcul des effets**

Nous venons de voir que les signes de la matrice d'expériences permettent de calculer les effets. Mais il faudrait pouvoir calculer aussi la moyenne et l'interaction.

▪ Calcul de la moyenne

Le processus de calcul adopté pour les effets peut s'appliquer en utilisant une colonne de signes + puisqu'il n'y a que ce signe dans la formule (I-6).

▪ Calcul de l'interaction

La suite des signes de la relation (I-9) est + - - +. Chacun de ces signes provient du produit x_1x_2 figurant dans la relation (I-1). Nous pouvons retrouver cette suite de signes de la manière suivante : nous écrivons, en colonne, les signes correspondant à x_1 et à x_2 , puis nous appliquons la règle des signes :

x_1	x_2	x_1x_2
-	-	+
+	-	-
-	+	-
+	+	+

Cette colonne de signes permet de calculer l'interaction par le même mécanisme que celui déjà décrit pour les effets ou la moyenne.

Ayant la matrice d'expériences, il est facile de construire *la matrice de calcul des effets* (Tableau II-2) en ajoutant une colonne de signes + pour la moyenne et en calculant celle de l'interaction par la règle des signes.

Tableau II-2. Matrice de calcul des effets

N° Essai	Moyenne	Facteur 1	Facteur 2	Interaction 12
1	+1	-1	-1	+1
2	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	+1

B) Plans factoriels complets

Il s'agit de plans pour lesquels on étudie k facteurs prenant chacun deux niveaux. Le modèle mathématique adopté a priori est un polynôme prenant en compte la moyenne, les effets de chaque facteur et toutes les interactions entre les facteurs pris deux à deux, trois à trois, quatre à quatre, ..., k à k .

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum a_{ij\dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (\text{II-23})$$

Un plan 2^k comporte 2^k points expérimentaux qui se situent aux 2^k sommets d'un hypercube de k dimensions. Le modèle mathématique contient 2^k coefficients qui sont les inconnues. L'ensemble des résultats d'un plan 2^k conduit donc à un système de 2^k équations à 2^k inconnues, si l'on ne tient pas compte des erreurs expérimentales. Ce système peut se mettre sous la forme matricielle :

$$Y = Xa \quad (\text{II-24})$$

Avec :

Y : vecteur ayant pour composantes les réponses de chaque essai, et représenté par une matrice colonne ($2^k, 1$),

a : vecteur ayant pour composantes la moyenne, les effets des facteurs et toutes les interactions, et représenté par une matrice colonne ($2^k, 1$) ; ces composantes sont les inconnues que l'on cherche à déterminer,

X : matrice carrée ($2^k, 2^k$) composée de -1 et $+1$ suivant les valeurs des niveaux x_i .

la relation (I-23) prend la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-25})$$

La matrice X comporte une colonne de + 1 et trois colonnes ayant chacune autant de signes positifs que de signes négatifs. Si l'on multiplie signe à signe deux quelconques de ces quatre colonnes et que l'on additionne les produits, on trouve zéro. On dit que la matrice est orthogonale. Cette propriété est très importante car, dans ce cas, l'inverse de X est égale à la transposée de X divisée par le nombre de lignes n .

C) Plans factoriels fractionnaires

Les plans factoriels fractionnaires sont très utiles car ils permettent de diminuer considérablement le nombre des essais. Mais, pour que les résultats de tels plans soient correctement interprétés, il faut avoir la condition d'orthogonalité. Deux actions disjointes, *i.e.* ne comportant pas de facteur en commun, sont orthogonale si, à chaque niveau de l'une, tous les niveaux sont associés le même nombre de fois dans le plan d'expériences (figure II.9).

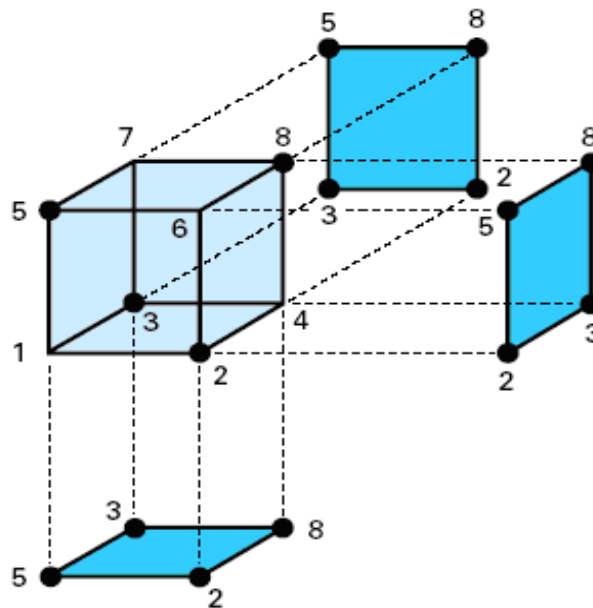


Figure II.9: Projection des points d'expériences d'un plan fractionnaire sur les faces du cube

Un plan d'expériences est orthogonal vis-à-vis du modèle si toutes les actions disjointes du modèle sont orthogonales dans le plan d'expériences.

Pour trois facteurs prenant deux niveaux, le plan complet est noté 2^3 . Il comporte huit essais. Le plan fractionnaire, moitié du plan complet, n'a que quatre essais soit $1/2 2^3$ ou 2^{3-1} essais. Chaque chiffre de cette notation a une signification :

- ❖ le 3 signifie qu'il y a trois facteurs étudiés ;
- ❖ le 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux ;
- ❖ le 1 signifie qu'il y a un facteur supplémentaire par rapport au plan complet sur lequel est construit le plan de base.

Le plan de base 2^3 peut avoir un facteur supplémentaire, on le notera 2^{4-1} : quatre facteurs étudiés, deux niveaux par facteur et un facteur supplémentaire.

Le plan de base 2^3 peut avoir deux facteurs supplémentaires, on le notera 2^{5-2} : cinq facteurs étudiés, deux niveaux par facteur et deux facteurs supplémentaires.

Un plan fractionnaire à deux niveaux avec lequel on étudie k facteurs dont p supplémentaires se note 2^{k-p} .

II.4.CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'installation expérimentale qui sert à mener nos expériences à expliciter dans les prochains chapitres. Un outil informatique, le logiciel MODDE.5.0, est utilisé pour l'analyse des résultats expérimentaux. Cet outil, est basé sur la méthode des plans d'expériences. Bien évidemment, cette méthode est beaucoup plus vaste, mais nous avons choisi de ne donner que la partie essentielle.

*Chapitre III : Modélisation
expérimentale des processus
de chargement triboélectrique
et séparation*

III.1 Introduction

Identifier les conditions d'exploitation optimales pour les multiples dispositifs triboélectriques est une condition essentielle de la séparation tribo-électrostatique dans l'industrie. La charge spécifique des particules est un paramètre essentiel [27,6,8], influençant la pureté, le rendement et l'efficacité du procédé de séparation électrostatique des mélanges granulaires.

La vitesse V de déplacement des particules sur la plaque vibrante, le débit Φ de dépôt des granules sur la plaque vibrante et la longueur L de la plaque vibrante, sont les paramètres dits contrôlables, influençant la charge électrique acquise par les granules sur la plaque vibrante couverte de PET [12,28].

L'irrégularité de la granulométrie des particules est un paramètre physique important dit non contrôlable. Lors de l'étape de broyage, nous ne pouvons pas contrôler l'homogénéité des tailles de ces particules en plastique. Ces granules de tailles différentes du même matériau ne se comportent pas de la même manière sur la plaque vibrante [28].

La première étude dans ce chapitre, est une analyse expérimentale qui détermine la signification et l'évaluation des facteurs dits contrôlables pour démontrer la complémentarité entre ces facteurs qui sont essentiels pour la charge massique acquise par triboélectricité.

Ensuite, il faut déterminer les domaines de variation des paramètres contrôlables qui vont être pris en considération lors des expériences du procédé d'électrisation et de séparation tribo-électrostatique. En dernier lieu, il s'agit de démontrer l'influence de la taille des particules du même matériau, sur la charge masse triboélectrique acquise sur le vibro-tribo-chargeur.

La deuxième étude, se réfère à la modélisation et l'optimisation du procédé de chargement triboélectrique avec le vibro-tribo-électrique. L'analyse des résultats expérimentaux a été réalisée avec le programme MODDE 5.0 [29] (Umetrics, Umea, Suède).

III.2 Evaluation de la signification des facteurs contrôlables et non contrôlables

III 2.1 Influence des facteurs contrôlables

Le processus de tribo-électrisation des particules de plastique ABS et HIPS peut être contrôlé efficacement si nous arrivons à distinguer l'influence de chaque paramètre sur le processus. Des séries d'expériences préliminaires ont été réalisées pour déterminer les

domaines de variation des facteurs suivants qui influent sur la charge triboélectrique: Vitesse V , débit Φ et longueur de la plaque vibrante L . Ces domaines vont être pris en considération dans l'optimisation et l'analyse par le logiciel MODDE 5.0.

L'installation expérimentale utilisée est décrite dans le chapitre II (§II.2.1). Les granulés en plastiques ont été chargés sur le dispositif vibro-tribo-chargeur, avec un plateau métallique vibrant mis à la terre et recouvert d'une feuille de PET.

Le vibro-tribo-chargeur est alimenté par une tension variable au moyen d'un boîtier réglable de 0 à 10 afin de commander la vitesse V de transport des grains sur la plaque oscillante. Le taux d'alimentation Φ est contrôlé par un autre vibreur qui dépose le produit sur le chargeur. La charge acquise est mesurée avec une seau de Faraday connectée à un électromètre électronique (model 6415, Keithley instrument).

L'expérimentation a été menée sur des échantillons de 100g ABS et 100g HIPS d'une taille moyenne de 2 et 5mm. Ils ont été chargés séparément sur le dispositif vibro-tribo-chargeur.

III 2.1.1 facteur contrôlable vitesse V [cm/s]

La vitesse V correspond à la vitesse à laquelle les particules en plastique ABS et HIPS traversent toute la longueur du plateau du vibro-tribo-chargeur $l_0=230\text{mm}$. La vitesse moyenne est déterminée expérimentalement pour différentes positions de réglage de 0 à 10 du boîtier.

La procédure pour déterminer la vitesse de déplacement est comme suit: une quantité de 100g des granules ABS et HIPS est placée sur la plaque vibrante, le vibro-transporteur est mis en marche grâce au boîtier réglable avec une tension U , jusqu'à ce que les particules tombent hors du plateau vibrant dans la boîte du collecteur. Connaissant le temps t moyen mesuré du déplacement de toutes les particules en plastique sur la longueur l_0 du plateau, la vitesse V est calculée par l'équation III-1 :

$$V = l_0 / t \quad [\text{cm/s}] \quad (\text{III-1})$$

Des séries de six expériences sont menées pour chaque point mesuré afin de minimiser au maximum l'erreur expérimentale. Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau III-1 :

Tableau III-1 : Détermination de la vitesse moyenne des granules en fonction des positions de réglage du boîtier de commande du vibro-transporteur.

Position du boîtier	Temps de passage sur la goulotte [s]						Vitesse moyenne V_{med} [cm/s]
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	
0	4.07	3.56	3.97	3.88	4.31	4.56	5.67
1	3.59	3.75	3.94	3.82	4.13	4.56	6.84
2	2.72	2.63	2.75	2.81	2.94	2.79	9.91
3	2.12	2.03	2.12	2.09	1.91	1.94	11.30
4	1.69	1.81	1.93	1.78	1.59	1.87	12.93
5	1.59	1.81	1.43	1.81	1.41	1.88	14.95
6	1.19	1.28	1.21	1.3	1.41	1.78	16.42
7	1.06	1.28	1	1.75	1.53	1.34	17.42
8	1.03	1	1.10	1.5	1.06	1.34	19.65
9	0.96	0.97	0.94	1.10	1.06	1	22.88
10	0.85	1.10	1.03	1.06	1.03	0.91	23.23

- *Détermination du domaine d'étude du facteur vitesse V [cm/s]*

L'amplitude de vibration est un paramètre très important influençant le transfert de la charge triboélectrique par vibration. Elle est en relation directe avec la vitesse V . Les particules en plastique ABS et HIPS parcourent la longueur de la goulotte vibrante du vibro-tribo-chargeur. D'après l'étude réalisée par Peter M. Ireland [17], la nature mécanique de l'interaction entre une particule et une surface solide influence l'échange de charge. La nature du contact, le temps de contact et l'énergie d'interaction sont les paramètres importants influençant le transfert de charge entre les matériaux et la surface plane de la plaque vibrante couverte de PET.

Des expériences préliminaires, sur la variation de la charge en fonction de la vitesse des particules sur la plaque vibrante, ont été réalisées sur 100g ABS et 100g HIPS séparément, à un débit d'alimentation constant $\Phi=2.85g/s$, sous des conditions climatiques constantes ($H=53\% \pm 2\%$, $T=19.7^\circ C \pm 1^\circ C$).

Des séries de trois expériences sont menées pour chaque point mesuré afin de minimiser l'erreur expérimentale. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure III.1.

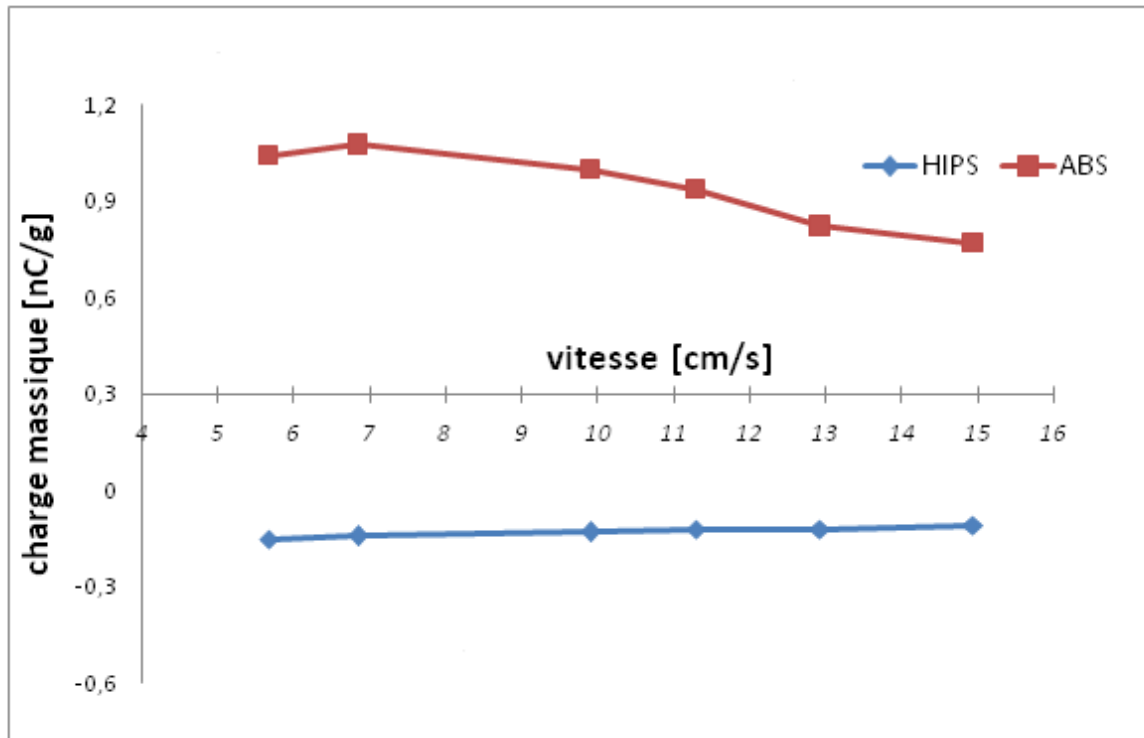


Figure III.1 : Variation de la charge massique en fonction de la vitesse pour $\phi=2.85\text{g/s}$

On constate que la charge massique acquise par les granules en plastique ABS et HIPS diminue avec l'augmentation de la vitesse. Cela peut être expliqué par la diminution du nombre d'impacts entre les particules et la plaque vibrante.

En effet, une vitesse élevée engendre des rebonds au déplacement des granules, ce qui signifie que le temps de contact et le nombre d'impacts entre les granules et la plaque vibrante sont diminués.

Selon ces résultats, l'intervalle d'étude pour le paramètre vitesse qui sera pris en considération par le programme Modde .5.0 pour la modélisation, est compris entre 6.1 cm/s et 9.4 cm/s.

III 2.1.2 facteur contrôlable débit d'alimentation des granules sur la goulotte Φ [g/s]

Le débit Φ correspond au débit avec lequel les particules en plastique d'ABS et HIPS sont déversées sur le plateau du vibro-tribo-chargeur. Le débit est déterminé expérimentalement pour différentes positions de réglage du vibro-transporteur de 40% à 90% du boîtier de contrôle du vibro-transporteur. Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau III-2.

La procédure pour déterminer le débit est comme suit: une quantité de $m=100$ g des granules ABS et HIPS est placée sur le vibro-transporteur qui est alimenté à l'aide d'un boîtier réglable. Connaissant le temps t moyen mesuré du déversement de toutes les particules, le débit Φ est calculé par l'équation III-2 :

$$\Phi = m/ t \text{ [g/s]} \quad \text{(III-2)}$$

Tableau III-2 : Détermination du débit moyen des granules en fonction des positions de réglage du boîtier de commande du vibro-transporteur.

Position du boîtier [%]	40	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Temps moyen [s]	2min18	68s	50s	35s	26s	20s	15s	14s	12s	10s
Débit moyen [g/s]	0,724	1,47	2	2,85	3,84	5	6,66	7,142	8,33	10

Le débit Φ d'alimentation des matériaux granulaires sur la plaque vibrante a un rôle très important sur le transfert de charge par vibration. Des expériences préliminaires ont été réalisées afin d'identifier le domaine de variation du débit Φ en fonction de l'amplitude de vibration de la plaque, sous les conditions atmosphériques constantes ($H=53\%$, $T=19.7^\circ$).

Des photographies sont prises afin de bien montrer la relation entre le débit et la vitesse V des granules en plastique du ABS et HIPS sur la plaque vibrante recouverte du PET (Figure III.2).

Ces deux facteurs doivent être corrélés, car un trop grand taux d'alimentation (débit) et une amplitude de vibration trop petite produisent une multi couche de granulats sur le plateau vibrant, de sorte que les granules en dessus ne peuvent pas entrer en contact avec la plaque vibrante en PET pour être chargés par l'effet tribo-électrique figure III.2a.

A l'inverse, avec une amplitude de vibration de la plaque vibrante trop grande donc une grande vitesse et un débit très faible, le taux de recouvrement du plateau est réduit et le processus tribo-chargeur devient inefficace car le contact entre particules ne se produit pas (figure III.2b).

Un ajustement précis entre les deux variables est primordial pour avoir une homogénéité de la distribution des granules en plastique sur la plaque vibrante afin de garantir des collisions des particules entre elles et la plaque vibrante (figure III.2c).



a) $\Phi = 3.84\text{g/s}$ $V = 6.84\text{cm/s}$ b) $\Phi = 2.85\text{g/s}$ $V = 11.30\text{cm/s}$ c) $\Phi = 6.66\text{g/s}$ $V = 12.93\text{cm/s}$

Figure III.2 : Photographies montrant la relation entre le débit ϕ et la vitesse V des granules en plastique ABS

L'intervalle d'étude pour le paramètre débit qui sera pris en considération par modde.5.0 est entre 2.85 g/s et 5 g/s.

III 2.1.3 facteur contrôlable longueur de la goulotte vibrante [cm]

La longueur L de la goulotte oscillante influe sur la charge électrique acquise par les granules en plastiques. Chaque matériau possède ses propriétés intrinsèques, donc ses limites de chargement par triboélectricité sachant que le niveau de saturation entre les matériaux est différent.

La figure III.3 représente les résultats obtenus de la charge massique en fonction de la longueur oscillante pour les différents matériaux d'ABS et HIPS de granulométrie moyenne 2-5mm dans des conditions atmosphériques constantes ($T=21.8^\circ$ $H= 63\%$).

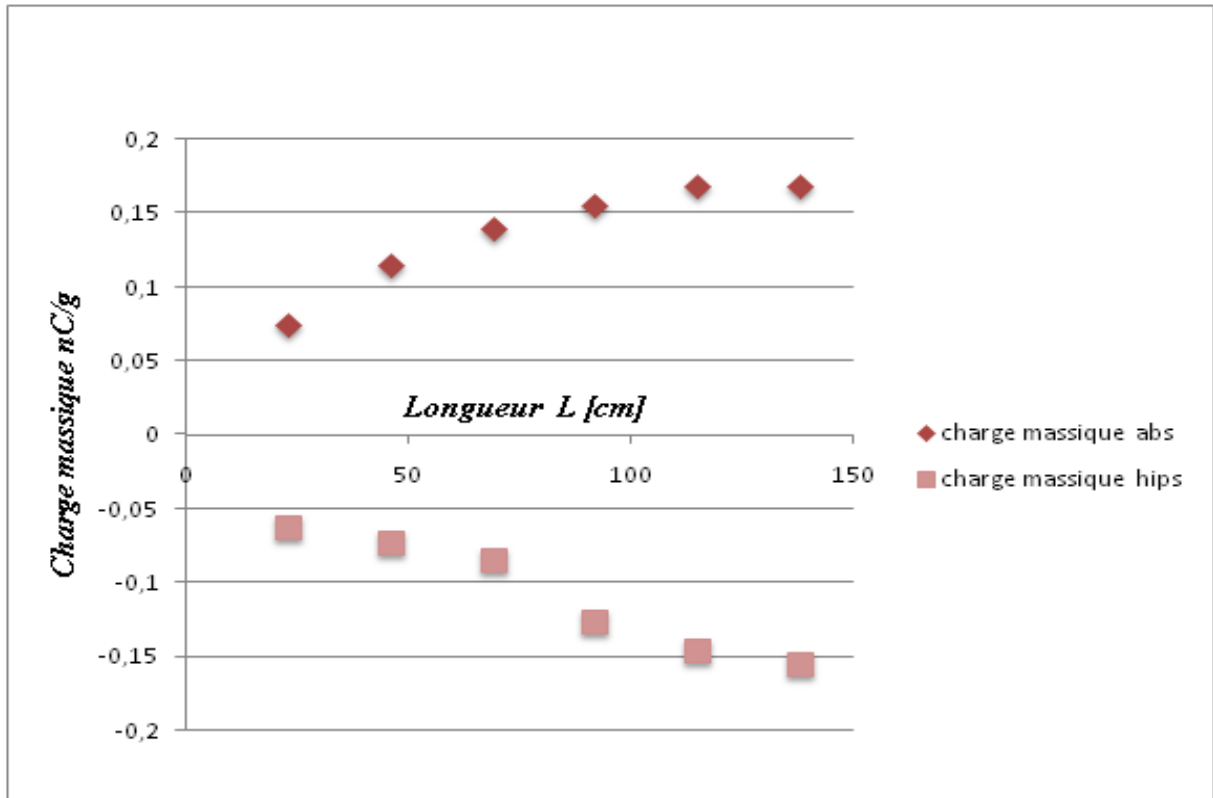


Figure III.3 : Représentation graphique de la charge massique en fonction de la longueur de La goulotte vibrante

Nous constatons qu'au delà de $n=5$ passages qui correspond à la longueur de la plaque $L=115\text{cm}$ ($L=n l_0$ n : nombre de passage du même matériau sur la goulotte oscillante, $l_0=230\text{mm}$), la charge massique mesurée pour ABS et HIPS ne varie pas. Ce résultat peut être expliqué par la saturation de la charge des particules.

III 2.2 Influence du paramètre non contrôlable (taille des particules)

III 2.2.1 Etude expérimentale de l'influence de la taille des particules

La taille des granules est un paramètre significatif, qui peut influencer la charge massique des granules en plastiques [28]. Pour évaluer l'influence de ce facteur, des expériences ont été menées sur des échantillons ABS de granulométries différentes (figure III.4).



Figure III.4 : Représentation photographique des deux classes de l'ABS utilisé (a) ABS 2-5mm, (b) ABS 1-2mm

Un tamisage des matériaux d'ABS a été effectué afin de séparer les différents diamètres de granules en plastique, des quantités de produit de granulométrie de 2mm à 5mm et de 1 à 2mm sont récupérées.

Une série d'expériences ont été réalisées, sur des échantillons de 100g ABS des deux tailles granulométriques. Ces déchets sont issus d'équipements d'ordinateurs et électroniques de la compagnie APR2 Bonnières-sur-Seine, France. Ils ont été chargés séparément sur le dispositif vibro-tribo-chargeur (figure II.1).

La charge acquise est mesurée par le seau de Faraday connecté à un électromètre électronique (model 6415, kenthely instrument).

Des séries d'expériences préliminaires (voir § III.1.1) ont été réalisées, pour déterminer les domaines de variation de la charge triboélectrique en fonction des facteurs contrôlables (entrées) : Vitesse (V), débit (Φ) et longueur de la plaque vibrante (L).

Tableau III-3: Les domaines de variation utilisés pour l'optimisation par MODDE 5.0

<i>Vitesse V</i>	<i>Débit</i>	<i>Longueur de la plaque</i>
$V_{min} = 6.1 \text{ cm/s}$	$\Phi_{min} = 2.8 \text{ g/s}$	$L_{min} = 46 \text{ cm}$
$V_{interm} = 7.75 \text{ cm/s}$	$\Phi_{intrm} = 3.8 \text{ g/s}$	$L_{intrm} = 69 \text{ cm}$
$V_{max} = 9.4 \text{ cm/s}$	$\Phi_{max} = 5 \text{ g/s}$	$L_{max} = 92 \text{ cm}$

Ces domaines vont être pris en considération dans l'optimisation et l'analyse par le programme MODDE 5.0.

Une conception expérimentale et méthodologique [32], [33] est utilisée afin d'évaluer les effets des facteurs influençant la charge accumulée par les granules en plastique de différents diamètres sur le plateau vibrant.

Nous utilisons un plan d'expériences composite à faces centrées avec trois entrées (facteurs contrôlables) prises en compte et une sortie (la réponse) comme le montre la figure III.5. Le logiciel MODDE.5 génère 17 expériences (Tableau III.4).

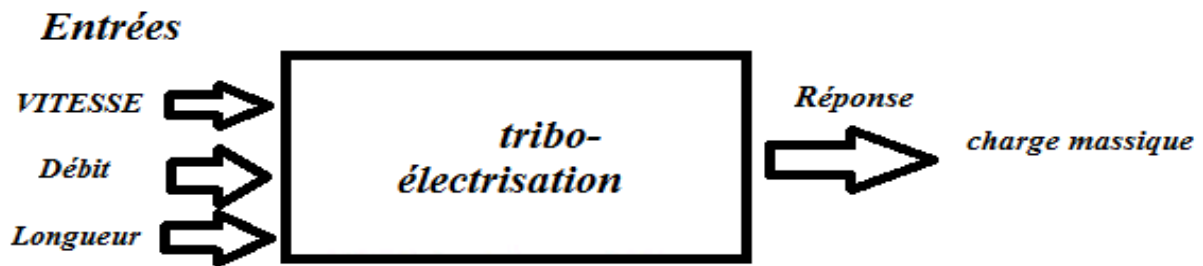


Figure.III.5 : Facteurs et réponse du processus tribo-électrisation

Le modèle quadratique de la réponse a la forme générale suivante :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{11} x_{12} + a_{22} x_{22} + a_{12} x_1 x_2 \quad (III-3)$$

où y est la réponse du processus et a_i est la valeur normalisée centrée pour chaque facteur u_i :

$$x_i = (u_i - u_{ic}) / \Delta u_i = u_i^* \quad (III-4)$$

$$u_{ic} = (u_{imax} + u_{imin}) / 2; \Delta u_i = (u_{imax} - u_{imin}) / 2 \quad (III-5)$$

Le modèle quadratique de la réponse charge massique acquise par l'ABS en fonction des facteurs (vitesse V , débit Φ , longueur l de la plaque vibrante) prend la forme suivante :

$$y = a_0 + a_1 v^* + a_2 \Phi^* + a_3 l^* + a_{11} v^{*2} + a_{22} \Phi^{*2} + a_{33} l^{*2} + a_{12} v^* \Phi^* + a_{13} v^* l^* + a_{23} \Phi^* l^* \quad (III-6)$$

Tableau III- 4: Résultats des expériences du plan comosite à faces centrées.

N°	Vitesse	Débit	Longueur <i>L</i> [cm]	Charge/masse ABS 1 à 2 mm	Charge /masse ABS 2 à 5 mm
	<i>v</i> [cm/s]	Φ [g/s]		<i>Q/m</i> [nC/g]	<i>Q/m</i> [nC/g]
1	6.1	2.6	46	1.154	0.745
2	9.4	2.6	46	0.813	0.738
3	6.1	5	46	1.014	0.547
4	9.4	5	46	0.831	0.523
5	6.1	2.6	92	1.122	0.791
6	9.4	2.6	92	1.232	0.979
7	6.1	5	92	1.337	0.992
8	9.4	5	92	1.147	0.875
9	6.1	3.8	69	1.159	0.897
10	9.4	3.8	69	1.014	0.804
11	7.75	2.6	69	1.240	0.815
12	7.75	5	69	1.103	0.933
13	7.75	3.8	46	1.102	0.712
14	7.75	3.8	92	1.385	1.063
15	7.75	3.8	92	1.233	0.904
16	7.75	3.8	92	1.207	1.02
17	7.75	3.8	92	1.210	0.900

Le traitement des données introduites dans le tableau III-4 a permis la construction d'un polynôme d'ordre 2, représentant les modèles mathématiques pour le procédé de tribo-électrisation des deux classes granulométriques d'ABS (Equations III.7 et III.8).

L'analyse des résultats expérimentaux a été réalisée avec le programme MODDE 5.0 [29] qui calcule les coefficients a_{ij} des modèles mathématiques (III-7) et (III-8), pour les deux tailles granulométriques des granules d'ABS. Le programme évalue deux critères statistiques : la bonté de en forme R^2 et la bonté de prédiction Q^2 . Le premier critère indique, les mesures dans lesquelles les données calculées correspondent aux données expérimentales. Tandis que, le second évalue le modèle par rapport à la capacité du résultat d'une expérience menée dans un autre point du domaine de variation.

Le traitement des données introduites dans le tableau III-4 a permis la construction d'un polynôme d'ordre 2, représentant les modèles mathématiques pour le procédé de tribo-électrisation des deux classes granulométriques d'ABS (Equations III.7 et III.8).

ABS1 (1-2 mm)

$$R^2 = 0.997$$

$$Q^2 = 0.937$$

$$Q/m = 1,2129 - 0.07760v - 0.06033\Phi + 0.13360L - 0.03867\Phi^2 - 0.1236v^2 + 0.03327L^2 - 0.04154v\Phi + 0.05211vL - 0.02779\Phi L \quad (III-7)$$

ABS (2-5 mm)

$$R^2 = 0.963$$

$$Q^2 = 0.883$$

$$Q/m = 0.9513 - 0.0425\Phi - 0.0841v + 0.1807L - 0.1084\Phi^2 + 0.05068v^2 - 0.07144L^2 - 0.03380\Phi L \quad (III-8)$$

Le programme MODDE 5.0 teste le modèle mathématique proposé des deux granulométries d'ABS sous l'action des facteurs d'entrée (vitesse, débit, longueur de la plaque vibrante) et fournit des réponses du système en fonction des facteurs d'entrée (Figure III.6-III.8), appelées courbes de prédiction.

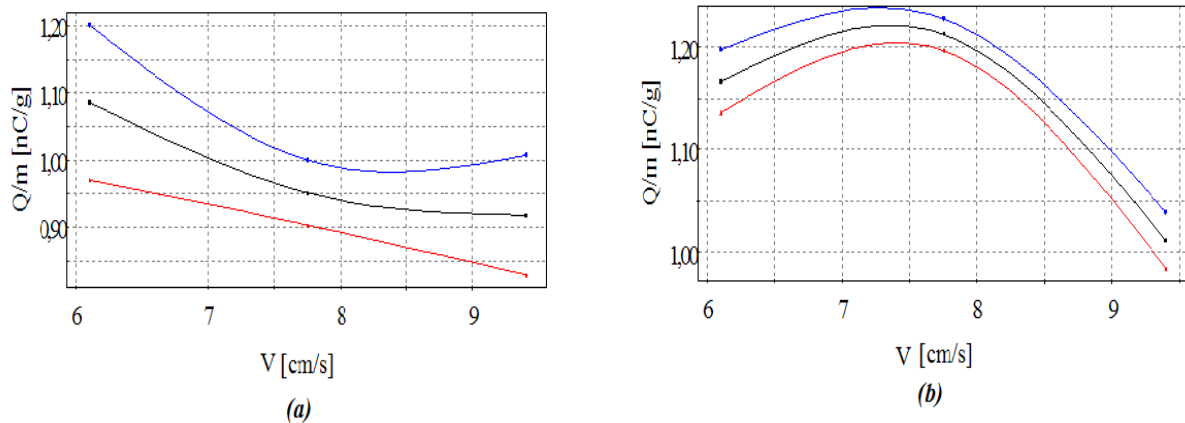


Figure III.6 : Représentation de la prédiction du model par MODDE.5 de la charge massique ABS Q/m en fonction de la vitesse pour les granules a) ABS 2 à 5mm, b) ABS 1à 2mm

Les autres variables sont maintenues à leurs valeurs centrales du domaine de variation ($\Phi = 3.8$ g/s, $L = 69$ cm). Les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de niveau de confiance à 95%.

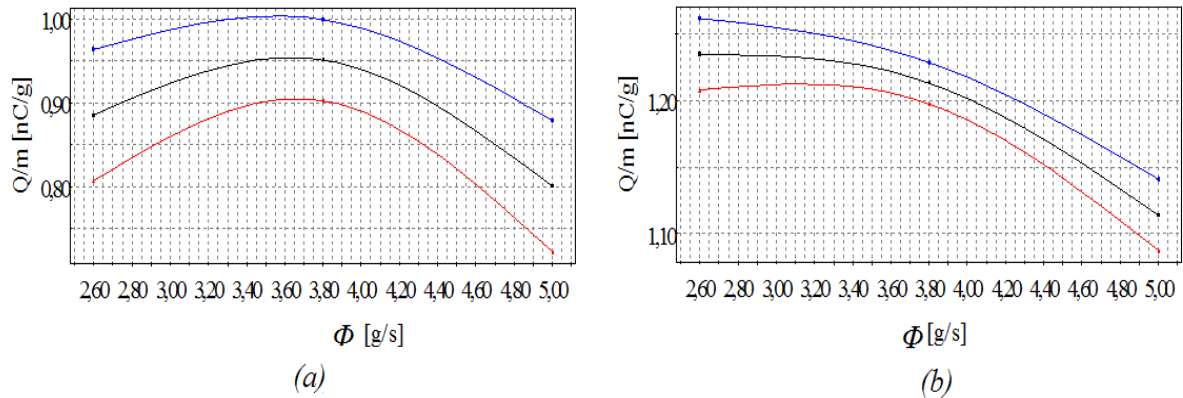


Figure III.7 : Représentation de la prédiction du model par MODDE.5 de la charge massique ABS Q / m en fonction du débit pour le granules a) ABS 2 à 5mm, b) ABS 1à 2mm

Les autres variables sont maintenues au centre du domaine de variation $V= 7.75$ cm/s, $L = 69$ cm. Les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de niveau de confiance à 95%.

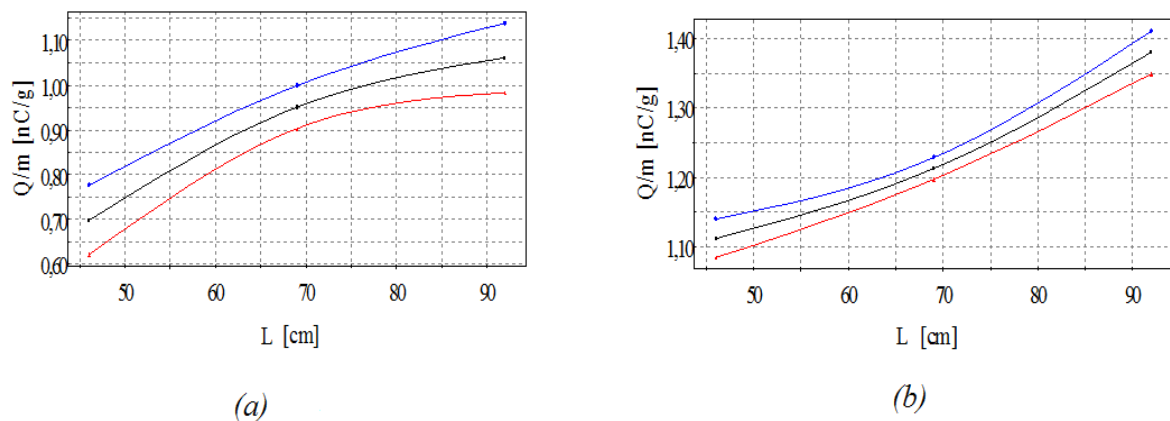


Figure III.8: Représentation de la prédiction du model par MODDE.5 de la charge massique ABS Q / m en fonction de la longueur pour le granules a) ABS 2 à 5mm, b) ABS 1à 2mm

Les autres variables sont maintenues au centre du domaine de variation $V= 7.75$ cm/s, $\Phi = 3.8$ g/s. Les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de niveau de confiance à 95%.

D'après les résultats de prédiction du logiciel MODDE.5, nous constatons que le comportement des granules ABS des deux classes granulométriques n'est pas le même sur la plaque vibrante, preuve que la taille des particules influence clairement la tribo-électrisation.

Nous constatons une variation presque linéaire décroissante de la charge massique des granules ABS 2-5mm (figure III.6a) en fonction de l'augmentation de la vitesse V . Nous obtenons une charge massique importante $Q_m=1,09$ nC/g pour une vitesse optimale selon la prédiction du model à $V= 6$ cm/s. Par contre, nous observons une variation croissante de la charge massique pour les granules ABS 1-2mm dans l'intervalle de vitesse [6cm/s 7,77cm/s], puis une décroissance au delà de $V= 7.77$ cm/s (figure III.6b). Nous obtenons une charge massique maximale $Q_m= 1.38$ nC/g selon le modèle pour $V= 7.77$ cm/s. Ces résultats sont obtenus pour un débit $\Phi=3.8$ g/s et une longueur de la plaque oscillante constante $L= 69$ cm. L'augmentation de la charge massique en fonction de la croissance de la vitesse peut s'expliquer par le fait que les granules en plastique font de plus en plus de collisions avec la plaque vibrante PET. Par contre, la diminution de la charge massique avec l'augmentation de la vitesse est expliquée par le fait que ces particules ont un nombre d'impacts réduit avec la plaque vibrante. Une vitesse plus grande, procure des sauts longs et rapides et ces particules quittent rapidement la surface de chargement [12].

D'un autre côté, nous constatons une croissance de la charge massique entre $\Phi=2.6$ g/s et $\Phi=3.8$ g/s pour les granules ABS 2-5mm (figure.III.7a), puis une décroissance. Le modèle mathématique nous donne une charge massique optimale $Q_m =0.952$ nC/g pour un débit $\Phi= 3.8$ g/s.

Pour les granules ABS 1-2 mm (figure.III.7b), nous constatons une variation décroissante de la charge massique. Nous obtenons une charge massique optimale $Q_m=1,43$ nc/g pour un débit $\Phi=2.6$ g/s. Ces résultats sont obtenus pour une vitesse de 7.7 cm/s et une longueur de la plaque oscillante constante de 69cm.

La décroissance de la charge massique s'explique, par le fait que les impacts des granules avec la plaque vibrante sont faibles ou quasi inexistantes. D'après ces résultats, nous constatons que le comportement des deux granulométries diffère mais l'explication de la décroissance est la même (figure III.2a).

Par ailleurs, nous constatons pour les deux granulométries une variation linéaire croissante. Pour les granules de 2-5mm (figure.III.8a), nous observons une saturation au delà de $L=90$ cm. Cela s'explique par le fait que les granules commencent à se saturer. Selon le modèle, nous obtenons $Q_m=1,38$ nc/g pour ABS 1-2mm et $Q_m=1.06$ nc/g pour ABS 2-5mm avec $L=92$ cm.

- **Étude de l'interaction entre la vitesse et le débit**

MODDE.5.0, nous permet d'avoir les prédictions de l'interaction de deux variables. Le résultat obtenu (figure.III.9) nous renseigne sur l'influence des deux paramètres vitesse et débit sur la charge massique acquise par les granules d'ABS 1-2mm et 2-5mm.

La figure.III.9a représente les surfaces iso-réponses pour les granules d'ABS de 1-2mm. Selon le modèle, nous obtenons une meilleure charge massique pour un intervalle de Vitesse [6,5 cm/s 8,61cm/s] qui correspond à un débit Φ [2,6 g/s 3,38g/s]. Par contre pour ABS de 2-5mm, le modèle prédit une meilleure charge massique pour un intervalle de la vitesse [6,0 cm/s 6,34cm/s] et pour un intervalle du débit Φ [2,7g/s 4.05g/s].

Ces résultats peuvent s'expliquer par un meilleur contact et des impacts importants des granules d'ABS avec la plaque vibrante.

La vitesse V et le débit Φ ont tous les deux une influence sur la charge. L'augmentation du débit entraîne la formation de multicouches de produits qui entraîne un mauvais chargement des granules qui ne sont pas en contact avec le PET. De ce fait, le débit aura une influence significative.

Ces résultats vont nous permettre de bien régler les paramètres vitesse-débit du dispositif vibro-tribo-chargeur pour un mélange d'ABS de 1-2 mm et 2-5mm afin d'approcher une charge massique du mélange la plus optimale possible.

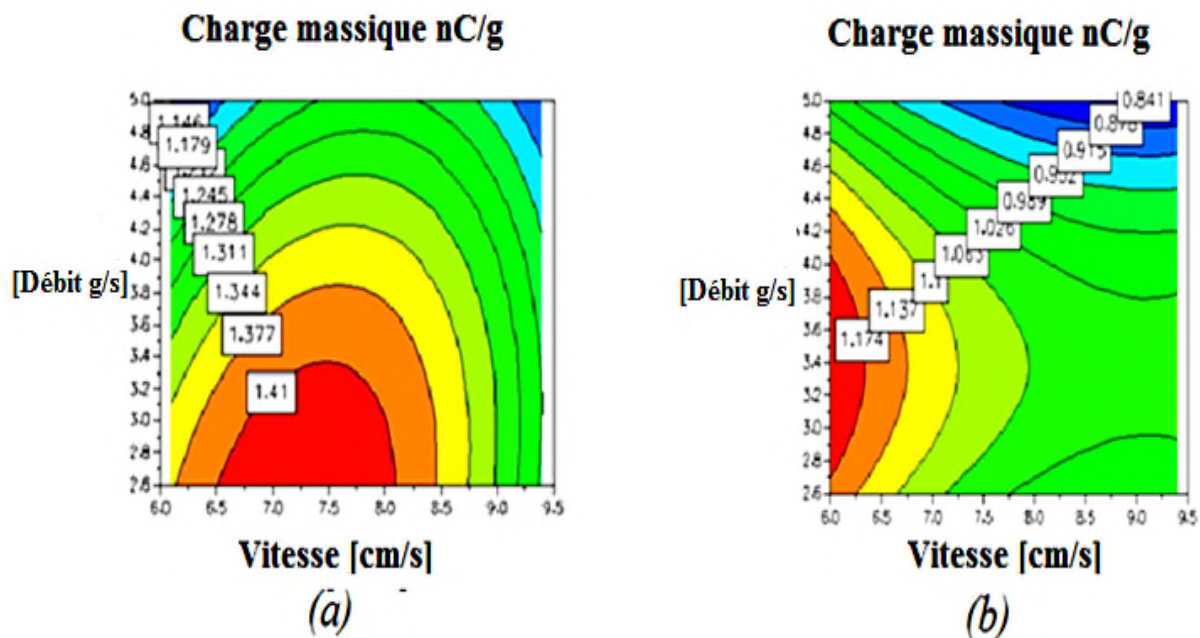


Figure III.9: Surfaces iso-réponses de l'influence débit-vitesse sur la charge massique a) ABS 1- 2mm, b) ABS 2-5mm pour une longueur constante $L=92$ cm

III.3. Modélisation et optimisation du procédé d'électrisation

Nous avons réalisé dans cette section un plan composite à faces centrées des trois facteurs précédents, en prenant comme sortie analysée la charge massique. Dans une première série d'expériences, 100g d'échantillons de l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et de polystyrène choc (HIPS), matériaux granulaires de taille moyenne de 2-5 mm, ont été chargés séparément sur le dispositif du vibro- tribo-chargeur. La charge acquise a été mesurée avec un seau de Faraday, relié à un électromètre.

Les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau III-5 pour l'ABS et le Tableau III-6 pour le HIPS :

Tableau III-5 :Résultats du plan d'expériences composite de l'ABS

N ⁿ .	vitesse v [cm/s]	débit Φ [g/s]	longueur l [cm]	Charge/ masse Q/m [nC/g]
1	6.1	2.6	46	0.944
2	9.4	2.6	46	0.706
3	6.1	5	46	0.913
4	9.4	5	46	0.688
5	6.1	2.6	92	0.9377
6	9.4	2.6	92	1.0918
7	6.1	5	92	1.0999
8	9.4	5	92	1.0928
9	6.1	3.8	69	0.9257
10	9.4	3.8	69	1.041
11	7.7	2.6	69	0.9342
12	7.7	5	69	0.9587
13	7.7	3.8	46	0.9226
14	7.7	3.8	92	1.1941
15	7.7	3.8	69	1.056
16	7.7	3.8	69	1.046
17	7.7	3.8	69	1.0632

Tbleau III-6 : Résultats du plan d'expériences composite dedu HIPS

No.	<i>vitesse</i> v [cm/s]	débit Φ [g/s]	<i>longueur</i> l [cm]	Charge/masse Q/m [nC/g]
1	6.1	2.6	46	-1.518
2	9.4	2.6	46	-1.1665
3	6.1	5	46	-1.536
4	9.4	5	46	-1.1643
5	6.1	2.6	92	-2.1555
6	9.4	2.6	92	-1.836
7	6.1	5	92	-2.1172
8	9.4	5	92	-1.819
9	6.1	3.8	69	-1.882
10	9.4	3.8	69	-1.729
11	7.7	2.6	69	-1.682
12	7.7	5	69	-1.625
13	7.7	3.8	46	-1.382
14	7.7	3.8	92	-1.8935
15	7.7	3.8	69	-1.742
16	7.7	3.8	69	-1.844
17	7.7	3.8	69	-1.6872

L'analyse des résultats expérimentaux a été réalisée avec le programme MODDE 5.0. Le traitement des données introduites dans le tableau III-5 et tableau III-6, a permis la construction d'un polynôme d'ordre 2, représentant les modèles mathématiques pour le procédé de tribo-électrisation des granules d'ABS et HIPS (Tableau III-7) :

Tableau III-7 : Modeles mathématiques du rapport charge/masse Q/m

	Q/m [nC/g]
ABS	$R^2 = 0.997, Q^2 = 0.927$
	$Q/m = 1.05 - 0.02 v^* + 0.12 \Phi^* + 0.13 l^* + 0.006 v^{*2} - 0.10 \Phi^{*2} + 0.09 v^* l^* + 0.04 \Phi^* l^*$ (III.9)
	$R^2 = 0.998 \quad Q^2 = 0.980$
HIPS	
	$Q/m = -1.7 + 0.16 v^* + 0.009 \Phi^* - 0.31 l^* - 0.01 v^{*2} + 0.053 \Phi^{*2} + 0.0036 l^{*2} - 0.00013 v^* \Phi^* - 0.0131 v^* l^* + 0.0088 \Phi^* l^*$ (III-10)

Le programme MODDE 5.0, teste le modèle mathématique de la tribo-électrisation des deux granulométries d'ABS et du HIPS, sous l'action des facteurs d'entrée (vitesse, débit, longueur de la plaque vibrante) et fournit des réponses du système en fonction des facteurs d'entrée (Figure III.10, Figure.III.11).

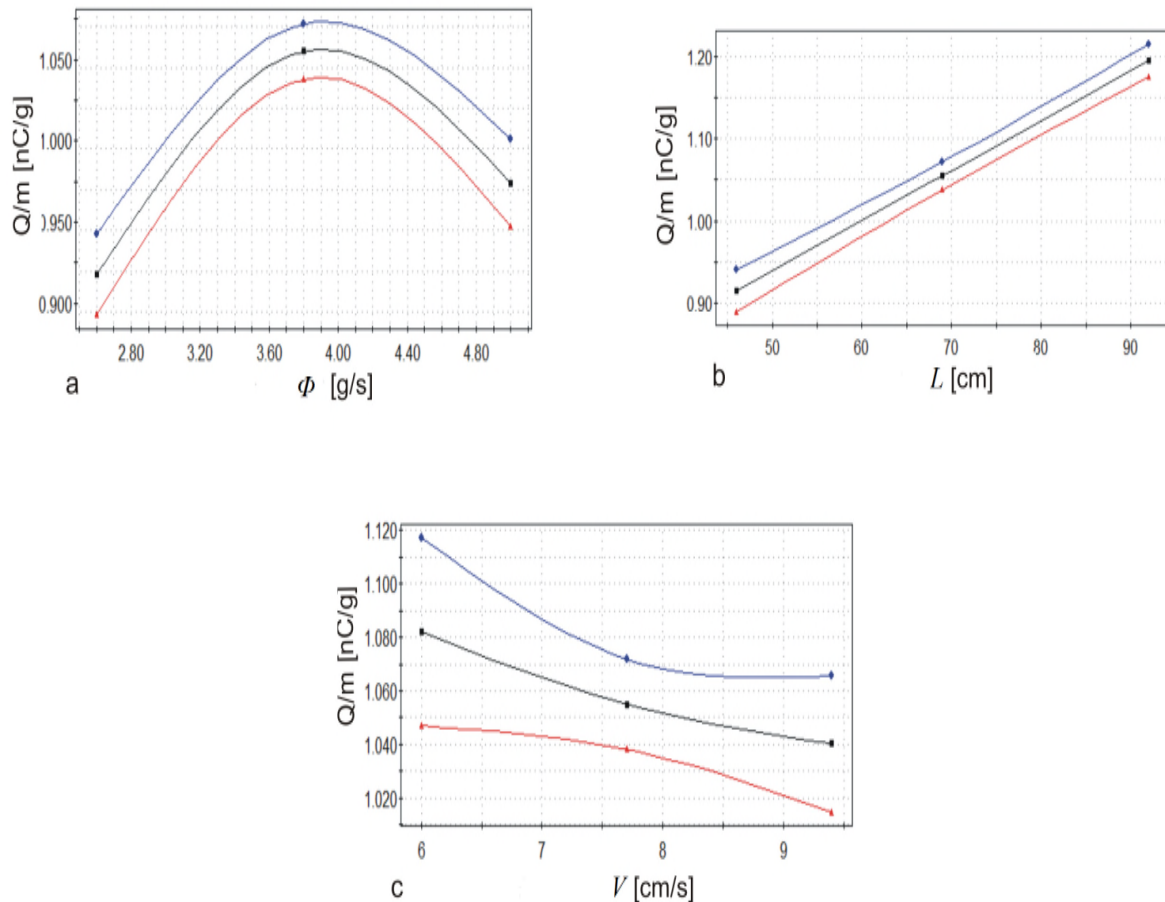


Figure III.10 : Représentation de la prédiction du modèle par MODDE.5 de la charge massique ABS Q/m en fonction : a) débit, b) longueur, c) vitesse. Les autres variables sont maintenues au centre du domaine de variation $v = 7.7$ cm/s, $\Phi = 3.8$ g/s, $L = 69$ cm. Les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de niveau de confiance à 95%.

Selon le modèle de l'équation (III-9), le débit $\Phi = 3,8$ g/s (Fig III.10 a) donne une charge massique optimale $Q/m = 1.050$ nC/g. Le modèle révèle une variation quasi-linéaire du rapport charge/masse d'ABS en fonction de la longueur L de la plaque vibrante du dispositif tribochargeur (figure III.10 b). Le rapport charge/masse des granulés d'ABS présente une légère diminution avec l'augmentation de la vitesse V (Figure 10 c), nous obtenons une charge massique optimale $Q_m = 1.080$ nC/g, pour $V = 6.1$ cm/s .

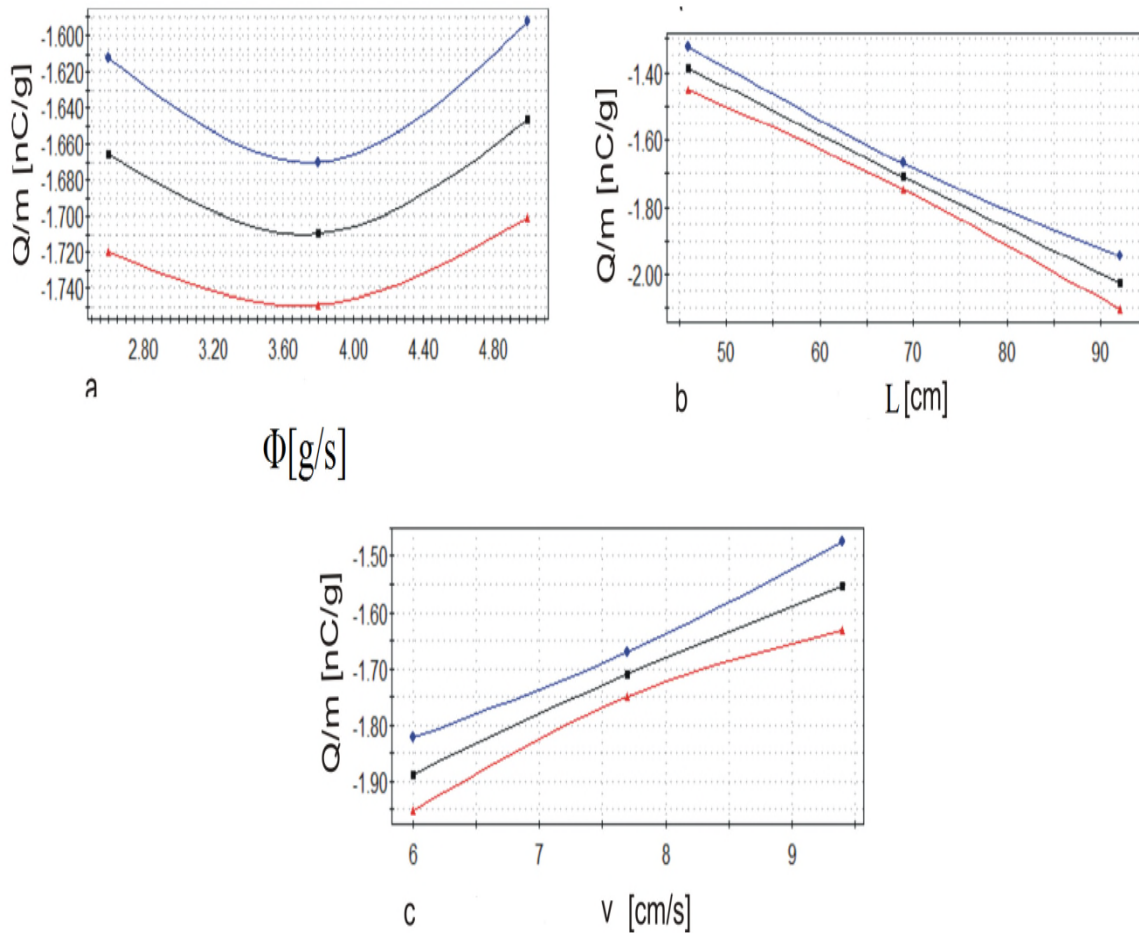


Figure III.11 : Représentation de la prédiction du modèle par MODDE.5 de la charge massique HIPS Q/m en fonction : a) débit, b) longueur, c) vitesse. Pour les granules, les autres variables sont maintenues au centre du domaine de variation $v= 7.7\text{cm/s}$, $\Phi = 3.8 \text{ g/s}$, $L = 69 \text{ cm}$. Les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de niveau de confiance à 95%.

Selon le modèle de l'équation (III.10), le débit $\Phi = 3.8 \text{ g/s}$ (Figure III.11a) donne une charge massique optimale $Q/m = -1.70 \text{ nC/g}$. Le modèle révèle une variation quasi-linéaire du rapport charge / masse d'ABS en fonction de la longueur L de la plaque vibrante du dispositif tribochargeur (figure III.11b). Le rapport charge/masse des granules HIPS présente une diminution avec l'augmentation de la vitesse V (Figure III.11c), nous obtenons une charge massique optimal $Q_m = -1.90 \text{ nC/g}$, pour $V = 6.1 \text{ cm/s}$.

III.4. Séparation tribo-électrostatique à chute libre

III.4.1. Influence de la longueur de la plaque vibrante

Les premières séries d'expériences, ont été effectuées sur des échantillons des mélanges granulaires d'ABS et HIPS de 2-5mm, sur le dispositif expérimental de la Figure III.12. Des échantillons de masse 50 g ont été préparés sous forme de mélange binaire avec des compositions de 50% ABS-50% HIPS. L'objectif de cette première série d'expériences est d'étudier l'efficacité du processus de séparation en fonction la longueur de la plaque vibrante couverte de PET.

Toutes les expériences ont été effectuées dans les mêmes conditions ambiantes qui ont été relativement stables : température $T = 20-22 \text{ }^\circ\text{C}$ et une humidité relative $HR = 53-56\%$.

La procédure expérimentale comprend trois étapes principales :

- 1) préparation des échantillons et leur introduction dans le dispositif vibro-tribo-électrique.
- 2) tribo-électrisation et séparation électrostatique des granulés ;
- 3) analyse des résultats.

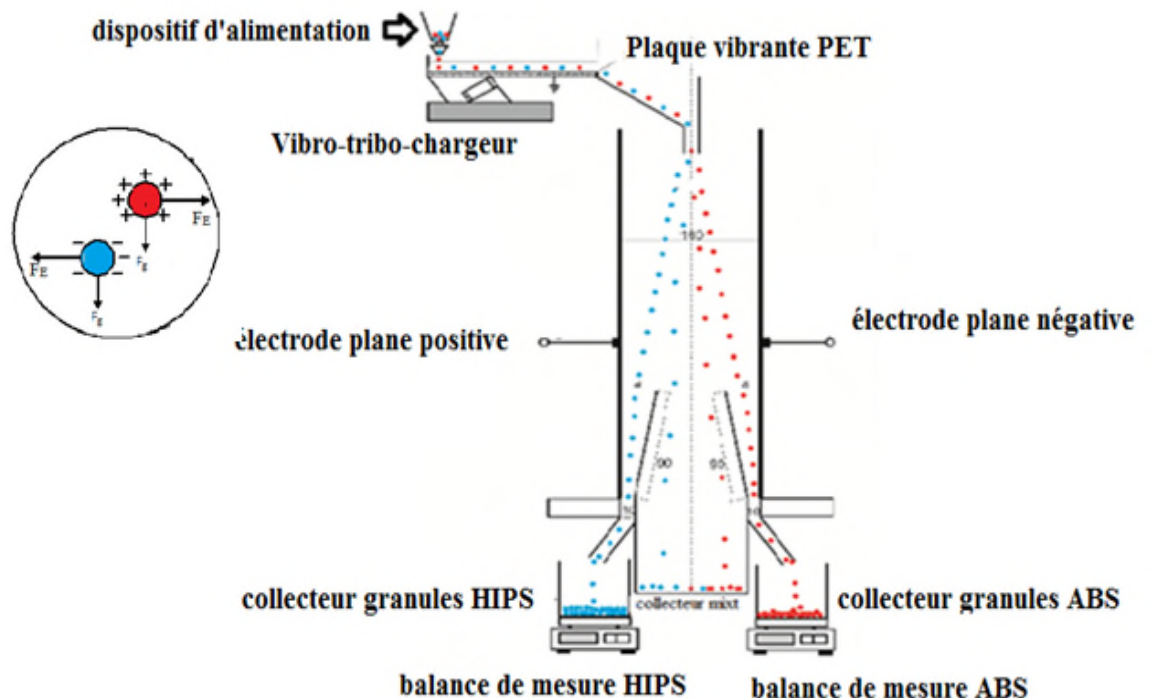


Figure.III.12 : Représentation graphique de l'installation expérimentale du séparateur tribo-électrostatique à chute libre.

La première étape comporte les opérations préliminaires à la réalisation de l'essai de séparation électrostatique :

- faire la tare de la balance électronique et mesurer les quantités prescrites de chaque type de matériau utilisé ;
- mélanger doucement les matériaux dans un récipient, en essayant de limiter la charge triboélectrique due aux manipulations ;
- introduire le mélange dans le dispositif vibro-tribo-électrique.

La deuxième étape, qui constitue l'essai de séparation proprement dite, est composée d'une succession d'opérations :

- allumer les sources à haute tension et les ajuster aux valeurs établies à priori ;
- alimenter le dispositif de tribo-électrisation ;
- régler l'angle des palettes des compartiments de collecte aux valeurs établies ;
- arrêter le dispositif de tribo-électrisation ;
- éteindre les sources de haute tension.

Pour la troisième étape correspondant à l'analyse des résultats, il faut réaliser les opérations suivantes :

- mesurer les quantités des granules collectés dans chaque collecteur qui lui est destiné;
- évaluer la pureté des produits.

L'efficacité du processus de tribo-électrisation sera ensuite jugée en rapport avec la quantité des granules séparés et leur pureté.

Les variables de sortie représentatives et leur mode de calcul sont présentés ci-dessous:

✓ **Pureté du produit collecté**

$$P (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \cdot 100 \quad (\text{III-11})$$

Où m_{ic} : Quantité de matière i recueillies dans le compartiment réservé au produit i

m_{tc} : Quantité totale de matières recueillies dans le compartiment réservé au produit i

✓ **Taux de récupération**

$$n (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \cdot 100 \quad (\text{III-12})$$

Où m_{ic} : quantité de matière i recueillie dans le compartiment réservé au produit i

m_{it} : Quantité totale de matière i introduite dans le séparateur.

Le Tableau III-8 rassemble le taux de pureté (p) et de récupération (n) d'ABS et HIPS, obtenu pour chaque longueur de la plaque vibrante. Les expériences ont été effectuées pour un débit de 3,8 g/s, une vitesse de 7,7 m/s, une tension de 16 kV.

Tableau III-8 : résultats obtenus du taux de pureté et de récupération ABS et HIPS.

a[cm]	nb passage	P_{HIPS} [%]	P_{ABS} [%]	n_{HIPS} [%]	n_{ABS} [%]
3.5	1	86.6	87.7	77.1	46.7
3.5	2	92.6	93.3	83.2	64.3
3.5	3	91.4	92.4	82.3	67.9
3.5	4	93.1	92	82.7	71.1

Les résultats obtenus sur l'évaluation de la pureté et du taux de récupération des granules ABS et HIPS lors de la séparation en fonction de la longueur de la plaque vibrante, sont représentés sur la figure.III.13.

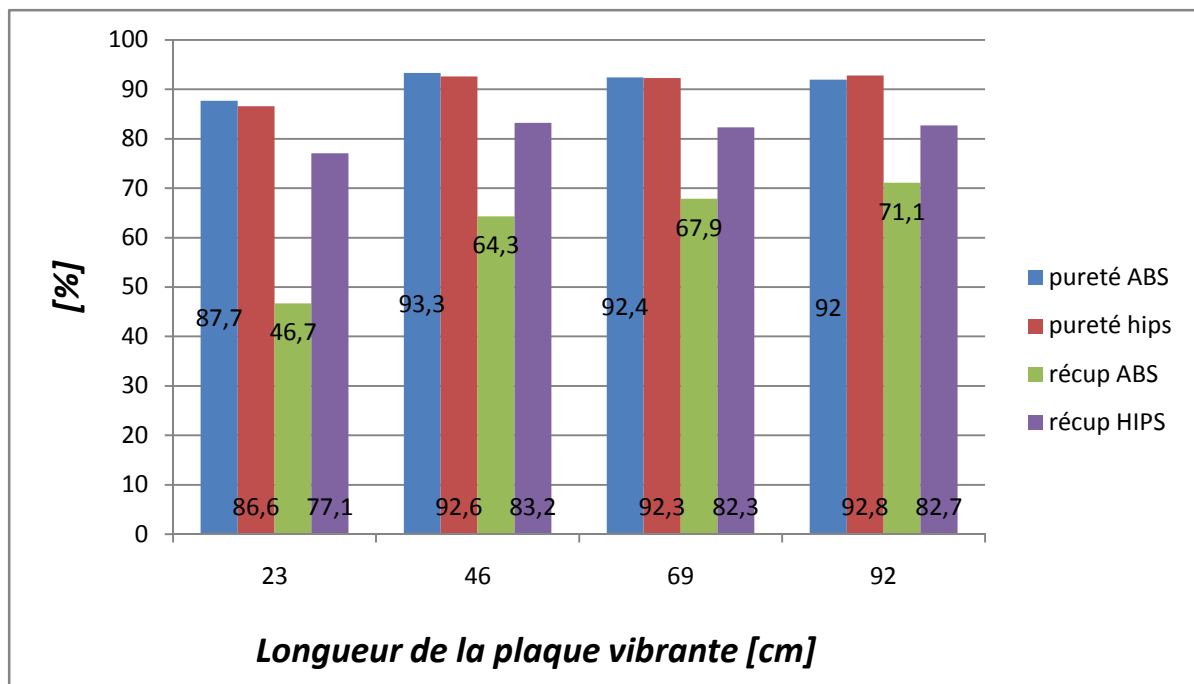


Figure III.13 : Représentation graphique des résultats de séparation en fonction de la longueur

D'après le graphe de la Figure III.13, nous obtenons une meilleure pureté $P_{ABS}= 93.3\%$ $P_{HIPS}= 92.6\%$, pour $L= 46$ cm. Par contre, d'après les résultats obtenus, une meilleure récupération des produits ont été obtenus pour $L= 92$ cm ce qui donne $n_{ABS}=71.1\%$ et $n_{HIPS}=82.7\%$.

L'obtention du meilleur pourcentage de récupération pour les granules de HIPS, peut être expliqué par le fait que le HIPS se charge mieux que l'ABS sur la plaque vibrante couverte de PET. Le résultat de la mesure de la charge en fonction de la longueur de la plaque vibrante est représenté sur la figure III.14.

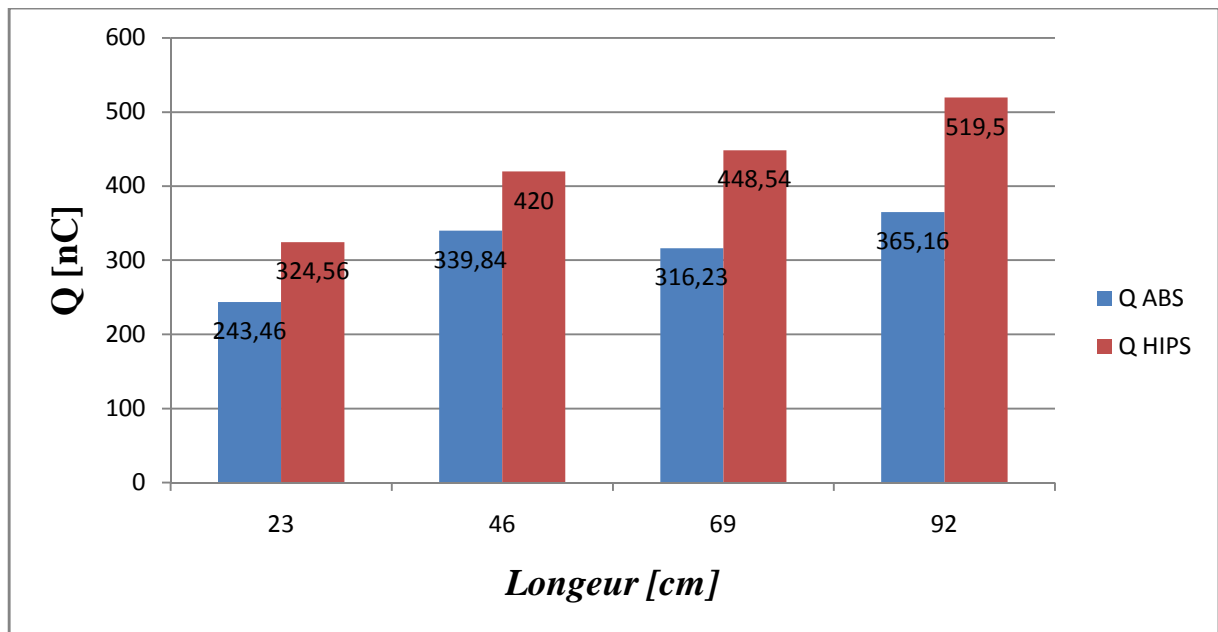


Figure III.14 : Représentation graphique de la charge en fonction de la longueur de la plaque vibrante pour le HIPS et l'ABS

Il est à noter que, même si nous obtenons une grande charge pour $L=92$ cm, ceci n'induit pas forcément une meilleure pureté. Durant la séparation, un phénomène de rebond des granules d'ABS et de HIPS sur les électrodes est observé. Une forte charge procure une grande force électrique $F_E= Q \times E$ (E le champ électrique entre les électrodes) de déviation. Ce qui fait que les particules sont collectées dans l'autre compartiment que celui qui leur est destiné.

III.4.2. Influence de la tension d'alimentation des électrodes

La tension d'alimentation des électrodes produit le champ électrique, c'est l'un des facteurs qui influencent considérablement la séparation triboélectrostatique. Les électrodes sont alimentées par une tension de ± 10 kV, ± 13 kV et ± 16 kV. Au delà de ± 16 kV, nous

constatons des décharges électriques entre les électrodes Afin d'éviter le claquage, nous avons préféré nous limiter à cette valeur.

Pour chaque tension, ont été effectués trois essais séparés, afin de réduire l'erreur expérimentale aléatoire. Le Tableau.III.9, montre les taux de pureté (p) et de récupération (n), obtenus pour chaque tension appliquée pour ABS et HIPS. Les expériences ont été effectuées pour un débit de 3,8 g/s, une vitesse de 7,7 m/s et $d=2,5$ cm.

Tableau III-9 : Taux de pureté (P) et de récupération (n), obtenus pour chaque tension appliquée pour ABS et HIPS

nb passage	HT [kV]	P_{HIPS} [%]	P_{ABS} [%]	n_{HIPS} [%]	n_{ABS} [%]
2	±10	92,8	91,5	52,2	34,8
2	±13	90	91,8	65,3	36
2	±16	86,8	90	72,4	38

Ces résultats sont également illustrés sur la figure III.15 sous les conditions ambiantes qui ont été relativement stables : température $T=21-22$ °C et une humidité relative $HR = 52-55\%$.

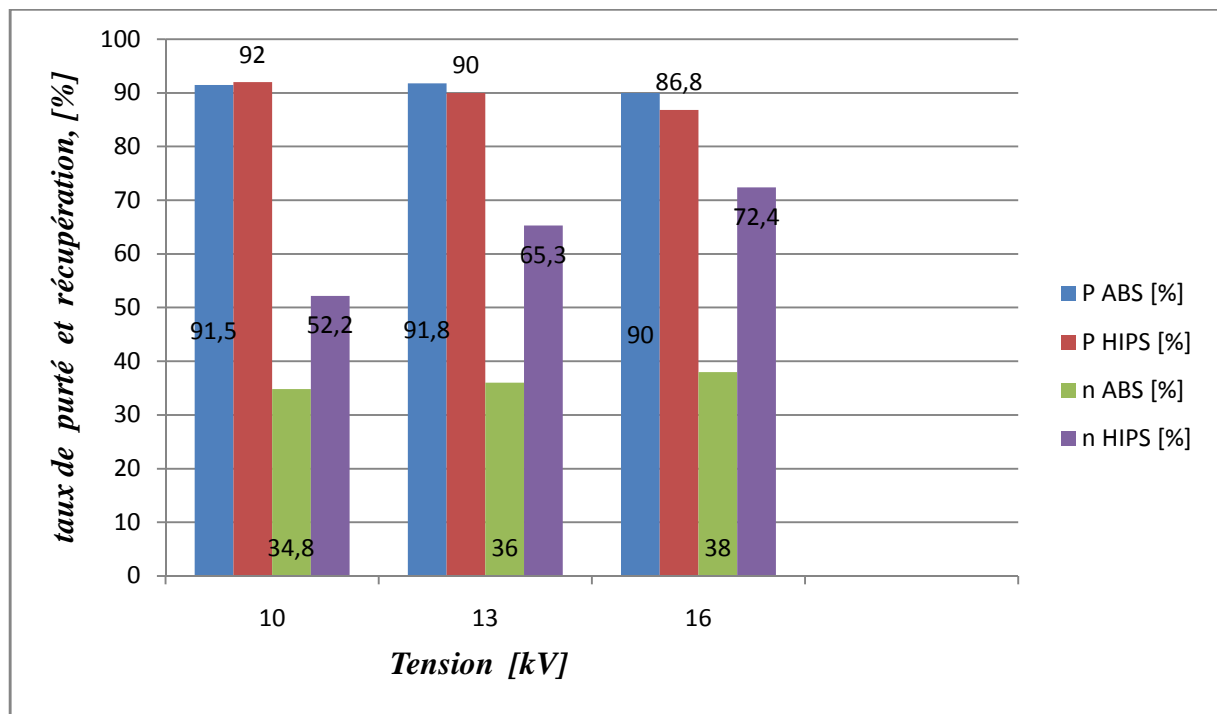


Figure III.15 : Représentation graphique des résultats de séparation en fonction de la tension [$T=21-22$ °C $HR = 52-55\%$]

L'augmentation de la tension d'alimentation des électrodes, augmente considérablement la force d'attraction électrique F_E (équation II-2). D'après ces résultats, nous obtenons un meilleur taux de pureté pour le HIPS avec une tension $U = \pm 10\text{kV}$, tandis que pour ABS le taux est meilleur pour $HT = \pm 13\text{kV}$. Cette différence est expliquée par la différence de la charge acquise des deux matériaux sur la plaque PET. Le HIPS se charge mieux qu'ABS sur la plaque vibrante, ce qui équivaut à une tension moindre que celle d'ABS.

Il faut signaler que si nous avons une grande charge triboélectrique et une forte tension d'alimentation des électrodes, ceci n'entraîne pas forcément une meilleure pureté. Durant la séparation, un phénomène de rebond des granules d'ABS et de HIPS sur les électrodes est observé. Une forte charge acquise et une forte tension procurent une grande force électrique $F_E = Q \times E$ (E le champ électrique entre les électrodes) de déviation et les particules sont collectées dans le compartiment autre que ce lui qui leur est destiné.

III 5.CONCLUSION

Le vibro-tribo-chargeur est une des solutions qui peut être envisagée pour la séparation tribo-électrique. Ce dispositif fournit un transfert efficace de la charge électrique entre les particules et le matériel sur le plateau vibrant.

La vitesse V de déplacement des particules sur la plaque vibrante et le débit ϕ d'alimentation sont deux facteurs qui doivent être en concordance.

La taille des particules qui est caractérisée par le fait, que c'est un paramètre non contrôlable influence clairement la charge électrique acquise par les granules sur la plaque vibrante. Une homogénéisation des granules doit être respectée. Notre étude, a montré que les réglages des paramètres du dispositif de chargement, diffère pour un même matériau de granulométrie différente.

Les essais préliminaires réalisés, nous ont permis de bien choisir les domaines de variation des trois paramètres qui sont contrôlables.

Le vibro-tribo-chargeur, est un processus à plusieurs variables, qui peut être modélisé de manière efficace et optimisé en utilisant la méthodologie des plans d'expériences. La disponibilité de l'outil informatique notamment le logiciel MODDE.5, simplifie la tâche du chercheur, qui n'est plus contraint d'appliquer des méthodes d'analyse statistique complexe des données expérimentales.

La longueur de la plaque et la haute tension d'alimentation des électrodes, sont également deux paramètres influençant la séparation tribo-électrostatique. Le choix de la tension est primordial afin de garantir une meilleure pureté des produits séparés dans leur compartiment réservé.

*Chapitre IV : Evaluation
expérimentale de la robustesse
du processus séparation
triboélectrique.*

IV.1 Introduction

L'essai de robustesse est habituellement la dernière étape avant la commercialisation d'un nouveau produit industriel. Son but est de s'assurer que la réponse n'est pas sensible à de petites variations des facteurs autour du point optimal de fonctionnement.

Dans le cas où cette non robustesse est détectée, le constructeur devrait indiquer comment régler les facteurs (changement de valeurs) pour que les résultats soient acceptables. Comme chaque facteur est examiné dans une marge étroite, un modèle linéaire est susceptible d'être le choix le plus approprié pour l'essai de la robustesse. Ce modèle fournirait la réponse recherchée à la question : quel facteur devrait être mieux commandé pour que le processus puisse être déclaré robuste. Les plans factoriels fractionnaires sont recommandés pour l'évaluation de la robustesse car ils s'adaptent au modèle linéaire dans ce cas actuel [34].

L'objet de la conception robuste, est d'optimiser en même temps les performances du procédé et de minimiser la sensibilité aux perturbations extérieures (dispersions de fabrication, vieillissement, variations d'environnement). Afin de pouvoir intégrer la robustesse au cours de la conception, Dr *Génichi Taguchi* a proposé une approche permettant de mesurer et prévoir la robustesse d'une solution [34].

Il utilise le plan d'expériences comme outil de base pour fabriquer des procédés plus robustes, de faire en sorte que ceux-ci soient moins sensibles aux facteurs de bruit. Dr. Taguchi identifie trois types de facteurs de bruit :

Le bruit externe, qui est la variation dans les conditions environnementales variables (humidité, vibrations, température...);

Le bruit interne ou détérioration telles que l'usure du procédé, l'effet du temps sur le procédé ou d'autres changements dans les composantes ou les matériaux par rapport au temps et à son utilisation;

Le bruit de conception rencontré lors de la conception des pièces en série, qui est du à la différence dans la conception des pièces ayant les mêmes spécifications et qui est causée par la variabilité des matériaux, des équipements d'usinage et des processus d'assemblages [34], [35].

IV.2 Aspects théoriques de la robustesse

Le concept de base de l'ensemble de la philosophie de *Taguchi* est fondé sur le concept suivant : un procédé sera d'une conception d'autant plus « robuste » que la « perte » sera faible même en présence de « bruits » [36].

IV.2.1 Notion de fonction perte

Dans la plupart des entreprises, la qualité d'un procédé est bonne à l'intérieur des tolérances, mauvaise à l'extérieur. En suivant ce raisonnement, un système de tri automatique éliminant systématiquement les pièces hors tolérance permettrait d'obtenir une production considérée parfaite.

Pourtant si l'on considère la figure IV.1, quelle est la différence entre les pièces 1 et 2 en termes de coût de non-qualité ? Surtout si l'intervalle de tolérance a été fixé de façon arbitraire. Quelle est également la différence entre les pièces 2 et 3 ?

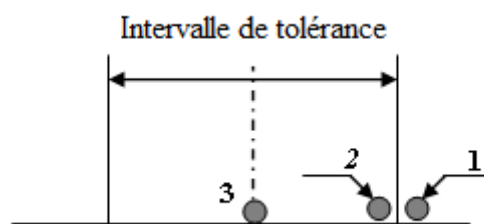


Figure .IV.1: Ecart par apport à la valeur nominale [34]

Il est évident que la pièce n°3 permettra un fonctionnement parfait et n'engendrera pas de coût de non-qualité. Il n'en est pas de même pour la pièce n°2. Nous considérons cependant que la pièce 2 est classée avec la pièce 3 alors qu'à l'évidence elle est beaucoup plus proche de la pièce 1.

En fait, la perte due à l'écart d'une caractéristique par rapport à une valeur nominale, n'est pas nulle à l'intérieur de la tolérance pour se dégrader brutalement dès que l'on franchit la tolérance. Nous pouvons facilement considérer que la perte est nulle lorsque la caractéristique est égale à la cible, et croît lorsque la caractéristique s'éloigne de celle-ci.

Le Dr *Taguchi* définit la fonction perte (figure IV.2) comme étant une fonction du second degré dans le cas où la caractéristique doit suivre une nominale.

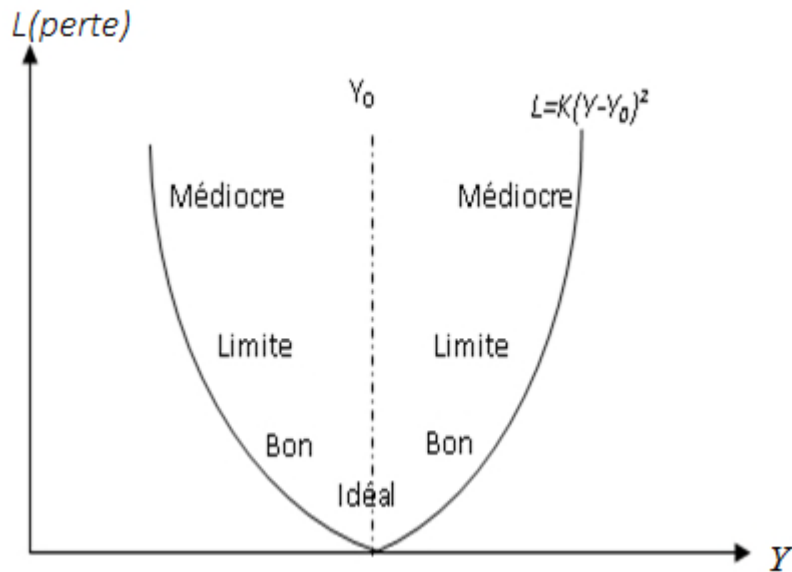


Figure IV.2 : Fonction perte de Taguchi [34]

Elle s'écrit :

$$L = K(Y - Y_0)^2 \quad (\text{IV-1})$$

Avec :

K : une constante qui dépend du problème posé ;

Y_0 : valeur nominale recherchée ;

Y : valeur prise par la caractéristique

Cette fonction perte est très intéressante pour plusieurs raisons :

- connaissant la valeur d'une caractéristique, il est enfin possible, grâce à cette fonction perte, de chiffrer le coût de non-qualité engendré.
- la fonction perte ne possédant qu'une inconnue (K), son calcul est possible dès que l'on connaît un point sur la courbe.

A partir de la définition de la fonction perte pour un échantillon, la fonction de perte est représentée sur la figure IV.3:

$$\bar{L} = K \left(\sigma^2 + (\bar{Y} - Y_0)^2 \right) \quad (\text{IV-2})$$

Avec :

\bar{L} : Perte moyenne par pièce ;

σ : Écart type de l'échantillon ;

\bar{Y} : Moyenne de l'échantillon ;

Y_0 : valeur cible.

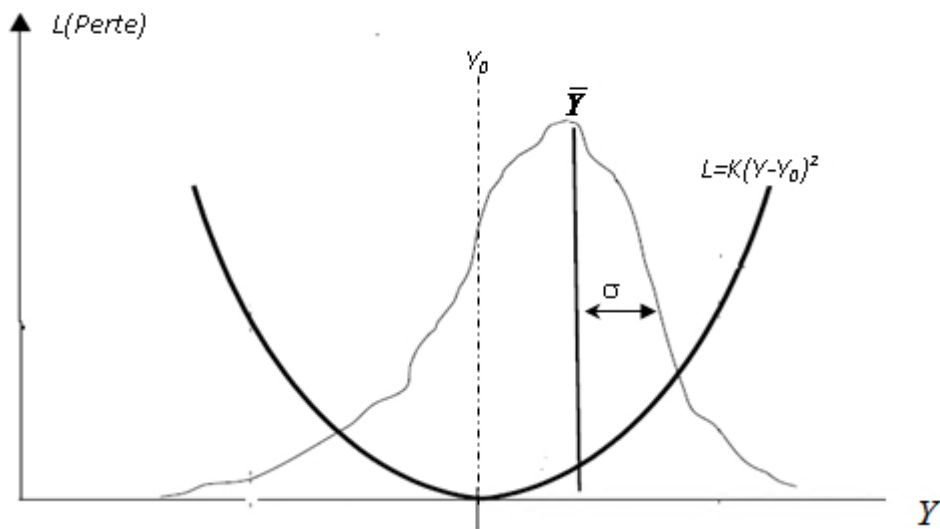


Figure IV.3 : Perte dans le cas d'un échantillon [34]

IV 2.2 Notion de robustesse

Selon *Taguchi*, un point fort dans l'ingénierie de la qualité est la notion de robustesse. Un procédé sera robuste, si sa qualité n'est pas remise en question par des facteurs extérieurs non contrôlés, comme l'humidité ou les vibrations [36]. Il n'est pas suffisant qu'un procédé fonctionne bien en laboratoire, il faut qu'il fonctionne bien dans un environnement bruité qui sera le sien lors de son utilisation quotidienne. La robustesse d'un procédé est donc un élément-clé de sa qualité.

Lorsque le concepteur choisit les valeurs nominales des facteurs d'un procédé ou d'un système, il est important de les fixer selon une double optimisation :

- fonctionnement optimal du système.
- Robustesse des résultats.

Trop souvent, nous négligeons l'optimisation en robustesse. Nous concevons alors des procédés de laboratoire qui ont du mal à fonctionner correctement dans un environnement bruité.

Dans le cas de la figure IV.4, la configuration des facteurs de pilotage la plus robuste sera la configuration qui minimise l'influence des différents bruits agissant sur le système. La variance des paramètres de sortie sera plus faible, le système sera rendu insensible aux bruits.

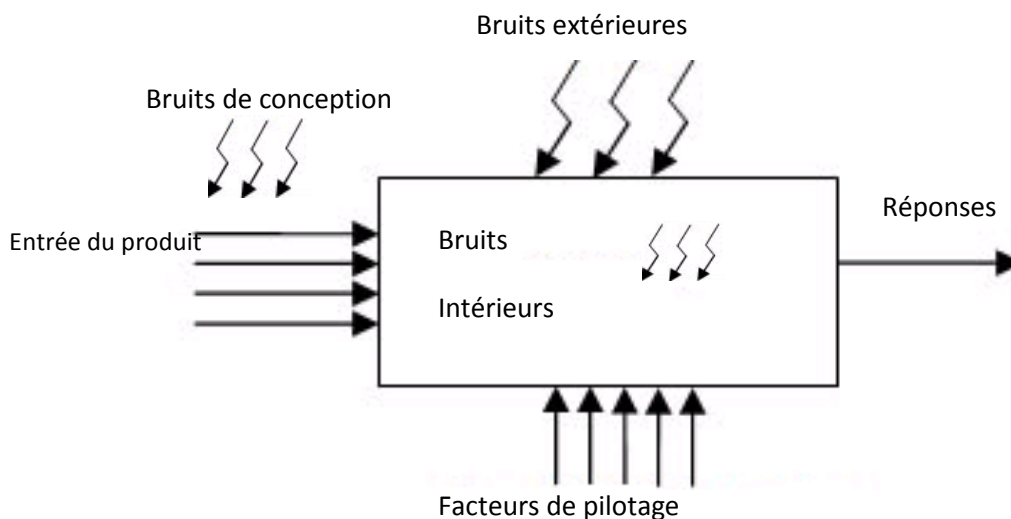


Figure IV.4 : Robustesse d'une Solution [34]

Pour trouver la configuration robuste, *Taguchi* propose de séparer les facteurs en deux catégories :

- Les facteurs pilotables (contrôlables);
- Les facteurs bruits;

IV 2.3 Les plans produits

Pour étudier cette sensibilité des systèmes aux facteurs bruits, *Taguchi* propose d'utiliser des plans produits dans lesquels sont distingués les *facteurs contrôlés* (ceux qui pilotent le système) *des facteurs bruits* (ceux qu'il subit) [34,36].

Nous construisons deux plans d'expériences : un pour les facteurs contrôlés (le plan principal), un second pour les facteurs bruits (le plan bruit).

Le plan produit consiste à répéter les expériences du plan principal pour chaque configuration apparaissant dans le plan bruit. Cette présentation originale permet, grâce à l'utilisation du rapport signal/bruit proposé par *Taguchi*, de réaliser la double optimisation qui permet d'obtenir des systèmes qui fonctionnent de façon optimale même dans un environnement bruité.

Par une combinaison originale de deux plans d'expériences, nous cherchons à étudier de façon globale toutes les interactions entre les facteurs contrôlables et les facteurs bruits.

Soit un système répondant à trois facteurs de pilotage (tension, débit, vitesse de vibro-transporteur) que nous appellerons *A*, *B*, *C*, et trois facteurs bruits (température, humidité, composition du matériau) *R*, *S*, *T*. L'ensemble de ces facteurs sont à 2 niveaux.

Le modèle du plan principal, si nous ne conservons que les facteurs principaux, s'écrit [34] :

$$Y \cong M + A + B + C \quad (\text{IV-3})$$

Pour valider l'hypothèse d'absence d'interaction, nous retiendrons le plan complet P_1 comportant 8 essais :

Tableau V-1 : Plan principal

N°	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Pour étudier l'influence des facteurs bruits, nous allons construire un plan d'expérience P_2 . Les facteurs bruits étant à deux niveaux, le plan bruit sera un plan fractionnaire si le nombre de facteurs est supérieur à 2, sinon nous utilisons le plan factoriel.

Tableau IV-2 : Plan bruit

N°	R	S	T
1	-1	-1	-1
2	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1

Nous pouvons alors définir un plan P qui sera le produit des plans P_1 et P_2 . Ce plan sera obtenu en établissant un tableau croisé entre P_1 et P_2 qui donnera lieu à une expérience pour chaque combinaison P_1 et P_2 .

Le plan produit s'écrit donc :

Tableau IV-3 : Plan Produit

				1	2	3	4			
				R	-1	-1	+1	+1		
				S	-1	+1	-1	+1		
				T	-1	+1	+1	-1		
N°	A	B	C					Moyennes	variances	
1	-1	-1	-1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	MI_1	σ_1^2	
2	+1	-1	-1	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}	MI_2	σ_2^2	
3	-1	+1	-1	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}	MI_3	σ_3^2	
4	+1	+1	-1	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}	MI_4	σ_4^2	
5	-1	-1	+1	Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}	Y_{54}	MI_5	σ_5^2	
6	+1	-1	+1	Y_{61}	Y_{62}	Y_{63}	Y_{64}	MI_6	σ_6^2	
7	-1	+1	+1	Y_{71}	Y_{72}	Y_{73}	Y_{74}	MI_7	σ_7^2	
8	+1	+1	+1	Y_{81}	Y_{82}	Y_{83}	Y_{84}	MI_8	σ_8^2	
Moyennes				Mc_1	Mc_2	Mc_3	Mc_4	M		

Notations utilisées :

Y_{52} réponse du système lorsque $A=+1, B=-1, C=-1, R=-1, S=+1, T=+1$;

Mc_2 : Moyenne de la colonne 2 des Y ;

MI_3 Moyenne de la ligne 3 des Y

σ_3^2 : Variance des résultats de la troisième ligne des Y .

On remarque que ce plan consiste à répéter le plan d'expérience P_1 sous différentes configurations de facteurs bruits.

L'objectif étant de minimiser l'influence des facteurs bruits, nous nous apercevons qu'un plan produit revient à étudier toutes les interactions entre les facteurs principaux et les facteurs bruits.

Si une configuration de facteurs principaux est sensible aux bruits, les réponses de la ligne correspondante auront une variance très forte. Par contre, si une configuration est très robuste aux bruits, les réponses de la ligne auront une variance très faible.

Nous prenons comme configuration optimale, celle qui donne le meilleur résultat en n'étant pas trop influencée par les facteurs bruits. Cependant, cette optimisation n'est pas simple, car il faut à la fois optimiser le système en position et en dispersion.

Pour simplifier cette optimisation, *Taguchi* propose de calculer un rapport Signal/Bruit qui donne la solution optimale.

IV 2.4 Rapport Signal/Bruit

La conception d'un système robuste est tel qu'il soit le plus possible insensible aux bruits. La traduction de ces bruits en termes de fonctionnement, se fera sous la forme de dispersions plus ou moins grandes dans le fonctionnement du système. Il sera d'autant plus « *robuste* » que cette dispersion de fonctionnement sera faible [34,35,36].

La double optimisation consiste à positionner la réponse à la valeur souhaitée, en faisant en sorte que la dispersion autour de cette valeur soit la plus faible possible. Certains facteurs sont efficaces sur le niveau pris par la réponse, d'autres agissent plus sur la dispersion de celle-ci notamment par le biais d'interactions entre les facteurs principaux et facteurs bruits.

Le rapport Signal/Bruit établit un rapport entre le signal (la moyenne de la réponse) et le bruit (la dispersion de la fonction de la réponse en fonction du bruit).

Ce rapport est optimal lorsque la perte engendrée est minimale. En faite, le rapport Signal/Bruit mesure la manière dont sont affectées les performances d'un procédé par les facteurs bruits.

Le rapport Signal/Bruit permet de déterminer les paramètres de pilotage de telle sorte qu'ils minimisent la perte engendrée par les bruits extérieurs. Il permet donc une conception robuste dans les termes où *Taguchi* entend cette notion.

Dans tous les cas énoncés précédemment, la règle d'utilisation du ratio Signal/Bruit est identique. *La perte sera d'autant plus faible que le ratio S/N sera grand.* L'optimisation économique d'un système revient à configurer les facteurs principaux de telle sorte qu'ils maximalisent le ratio *S/N* [29], [30].

a- Rapport Signal/Bruit dans le cas où l'optimum est un minimum (Type S)

Dans le cas d'une recherche de minima, la fonction perte s'écrit :

$$L=K.Y^2 \quad (IV-4)$$

Pour minimiser la perte, il faut donc minimiser la perte moyenne observée dans une ligne du plan produit. On cherche donc à minimiser la fonction :

$$F=\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} Y_{ij}^2 \quad (IV-5)$$

Avec :

n le nombre des colonnes dans le plan produit.

Plutôt que de calculer directement cette fonction, *Taguchi* propose de calculer la fonction suivante :

$$v_i = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} Y_{ij}^2 \right] = -10 \log \left[\sigma^2 + \bar{Y}^2 \right] \quad (IV-6)$$

avec :

v_i : rapport Signal/Bruit pour la ligne i ;

n : nombre de colonnes ;

Y_{ij} : réponse pour la ligne i et la colonne j .

- Le logarithme permet de linéariser la réponse, afin d'être plus additive.
- Le 10 permet de se ramener à des décibels dont l'amplitude est directement liée à la perte engendrée.
- Le signe permet de simplifier l'interprétation, on cherche toujours à **maximiser le ratio Signal/Bruit (S/N)**.

b- Rapport Signal/Bruit dans le cas où l'optimum est un maximum (Type L)

Dans ce cas, la fonction perte s'écrit :

$$L=\frac{K}{Y^2} \quad (IV-7)$$

C'est le cas où nous souhaitons que la réponse soit maximale, comme, un rendement ou une puissance. Dans ce cas également, nous pouvons définir un ratio Signal/Bruit en décibels qui minimise la fonction perte :

$$v_i = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} \frac{1}{Y_{ij}^2} \right] = -10 \log \left[\frac{1}{\bar{Y}^2} \left(1 + 3 \frac{\sigma^2}{\bar{Y}^2} \right) \right] \quad (IV-8)$$

Avec :

v_i : rapport Signal/Bruit pour la ligne i ;

n : nombre de colonnes ;

Y_{ij} : réponse pour la ligne i et la colonne j .

IV.3 Amélioration de la robustesse du procédé de séparation triboélectrique des granules

Le principe fondamental de la conception robuste d'un processus consiste à trouver les valeurs des facteurs pour lesquels les réponses sont moins sensibles à diverses causes de variations [37,38].

La méthodologie de Taguchi qui a été adoptée dans ce chapitre distingue, les facteurs contrôlables et les facteurs de bruit qui sont difficiles à contrôler [37]. Ce dernier groupe de facteurs peuvent dévier la réponse de la cible spécifiée pour le processus et entraîner une perte de la qualité de celui-ci.

Afin d'étudier un grand nombre de facteurs avec un petit nombre d'expériences et pour identifier la robustesse du processus, la méthode de conception robuste utilise la conception des facteurs de bruits agencés en interne et externe, comme le montre la figure IV.5.

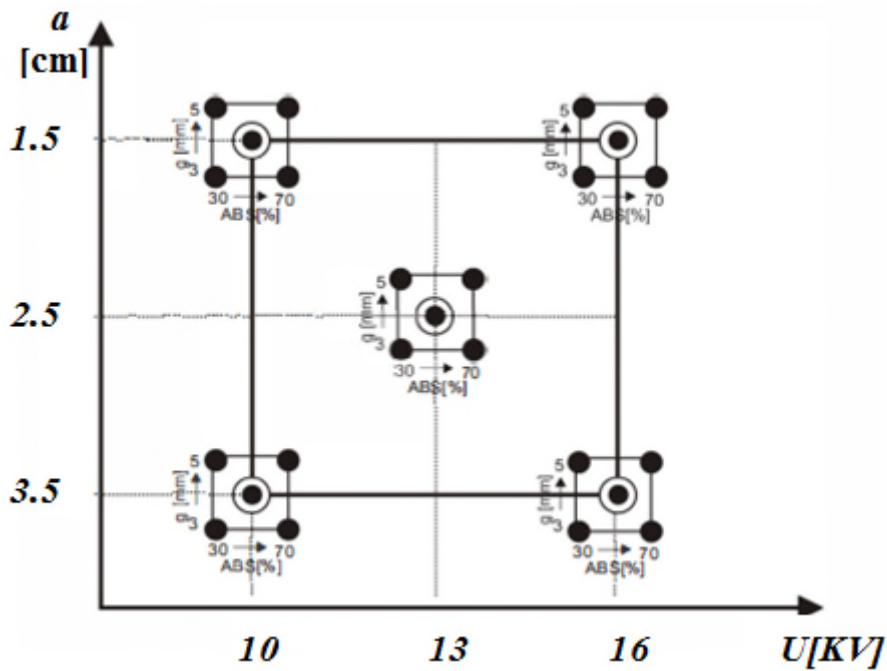


Figure IV.5 Diagramme d'un plan produit des essais réalisés [37]

IV 3.1. Modélisation expérimentale de séparation tribo-électrostatique en fonction de la vitesse, la tension et la distance des palettes :

Nous présentons dans cette section une procédure visant à modéliser l'efficacité de la séparation tribo-électrostatique, en proposant des modèles mathématiques de la pureté et de la récupération pour les deux produits séparés.

Un mélange binaire de 50% ABS et 50% HIPS a été introduit dans le dispositif vibro-tribo-chargeur et ensuite séparé dans le dispositif à chute libre (Figure IV.6). Toutes les expériences ont été effectuées dans les mêmes conditions ambiantes qui ont été relativement stables : température $T = 20-22 \text{ }^\circ\text{C}$ et une humidité relative $HR = 53-56\%$.

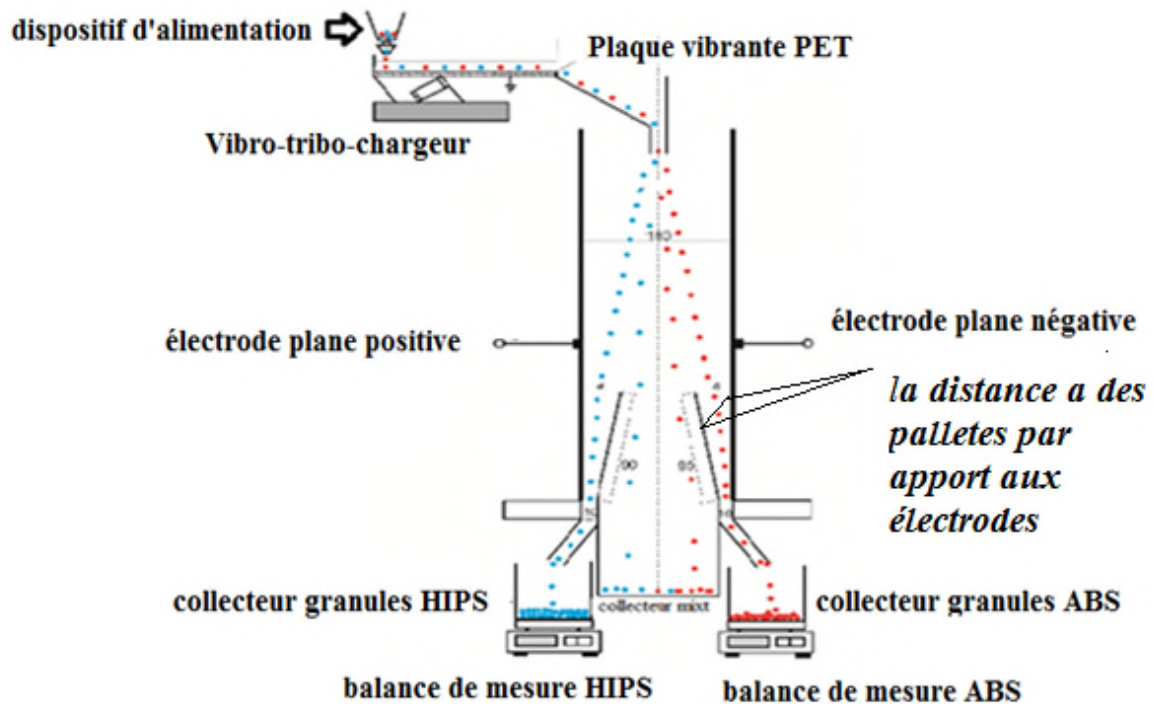


Figure IV.6 : l'installation expérimentale du séparateur tribo-électrostatique à chute libre.

L'étude précédente (§ III.3.1) du processus de la séparation triboélectrique a montré que le taux de pureté le plus élevé, est obtenue pour une longueur de la plaque vibrante couverte de PET $L = 46\text{cm}$. La meilleure valeur du rapport charge/masse a été obtenue d'après l'étude précédente (§ III.2.1.1) avec des granules de 2-5mm pour le débit ϕ [2.7g/s 4.05g/s] et la vitesse V [6 cm/s 6.34cm/s].

Les expériences de séparation de mélange ABS et HIPS ont été réalisées en fonction des paramètres suivants : tension appliquée aux électrodes, distance des palettes et vitesse V , qui sont les trois variables du plan expérimental composite.

Les valeurs $\phi = 3.84\text{g/s}$, $L=46\text{cm}$ sont maintenues constantes.

Le graphe de la figure III.1 (voir chapitre III), montre que pour l'intervalle V [6 cm/s 8cm/s], la charge massique varie peu, c'est pour cela que dans cette étude on a opté pour cet intervalle.

La distance a entre les répartiteurs et les électrodes est choisie après des essais préliminaires. Pour une distance inférieure à 15 mm, il est difficile d'évacuer la matière séparée à partir de la chambre de séparation, tandis que pour une distance supérieure $a \geq 35$ mm, la pureté des fractions recueillies n'est plus satisfaisante.

Le domaine de la haute tension U a été choisi entre ± 10 kV (pour assurer un minimum d'effet de déviation des granulés) et ± 16 kV (pour éviter des décharges d'étincelles entre les électrodes).

L'optimisation des facteurs de la séparation tribo-électrostatique prend en considération la maximisation de la pureté de la matière collectée P et la maximisation du taux de récupération n .

Les résultats obtenus du plan d'expériences composite sont représentés dans le Tableau IV.4 :

Tableau IV-4 : Résultats obtenus du plan d'expériences pour la pureté et la récupération des deux matériaux ABS et HIPS.

N°	vitesse V [cm/s]	Tension U [kV]	Distance des palettes a [mm]	n_{ABS} [%]	n_{HIPS} [%]	P_{ABS} [%]	P_{HIPS} [%]
1	6	10	15	13,2	36,1	92,25	95,2
2	8	10	15	18,4	34,7	92,96	94,86
3	6	16	15	23,9	49,1	91,95	94,17
4	8	16	15	22,6	48,2	91,35	94,02
5	6	10	35	43,6	73,5	88,65	88,74
6	8	10	35	43,3	70,4	88,96	88,42
7	6	16	35	66,3	74,3	92,3	92,65
8	8	16	35	63,9	82,3	91,7	91,65
9	6	13	25	51,2	55,3	93,1	94,85
10	8	13	25	41,2	56,5	91,66	92,09
11	7	10	25	33,5	49,7	91,58	92,26
12	7	16	25	39,4	68,5	92,05	94,4
13	7	13	15	16,5	44,3	91,52	94,75
14	7	13	35	55,3	74,9	90,1	90,54
15	7	13	25	36,3	66,1	90,84	90,07
16	7	13	25	34,5	65,8	90,18	91,8
17	7	13	25	35,2	64,9	90,6	91,52

L'analyse des résultats expérimentaux a été réalisée avec le programme MODDE 5.0. Le traitement des données introduites dans le (tableau IV-4), a permis la construction d'un polynôme d'ordre 2, représentant les modèles mathématiques pour le procédé de séparation tribo-électrique des granules d'ABS et HIPS :

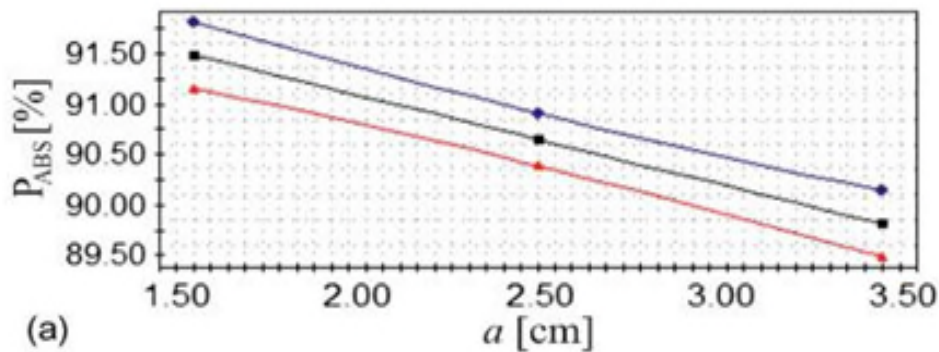
	Q/m [nC/g]	
P_{ABS}	$R^2 = 0.986$	(IV-11)
	$Q^2 = 0.938$	
$Q/m = 90.64 - 0.02V + 0.58U + 0.83a + 0.63U^2 - 0.27VU + 1.03Ua$		

P_{HIPS}	$R^2 = 0.972$	(IV-12)
	$Q^2 = 0.925$	
$Q/m = -91.3 + 0.22V + 0.65U - 2.1a - 0.279V^2 + 2.61U^2 + 1.5a^2 + 1.12Ua$		

	Q/m [nC /g]	
n_{ABS}	$R^2 = 0.997$	(IV-13)
	$Q^2 = 0.949$	
$Q/m = 35.58 + 0.14V + 6.79U + 17.78a + 0.84U^2 - 1.08V + 3.53Ua$		

n_{HIPS}	$R^2 = 0.987$	(IV-14)
	$Q^2 = 0.919$	
$Q/m = -65.63 + 0.33V + 4.90U + 16.29a + 0.96V^2 - 2.0U^2 - 1.71Ua$		

Sous l'action des facteurs d'entrée (vitesse, tension et distance des palettes par rapport aux électrodes) MODDE 5.0 nous donne des réponses prédites du système en fonction des facteurs d'entrée (Figure IV.7 a et b).



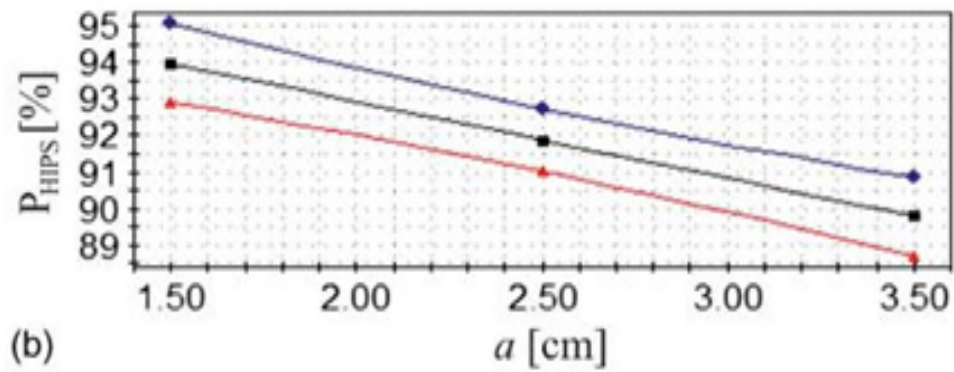
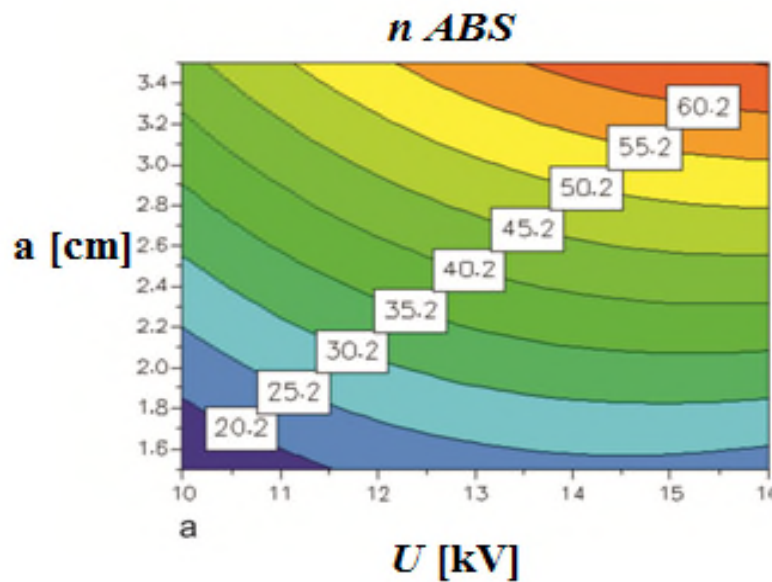


Figure IV.7 : Représentation de la prédiction du modèle par MODDE.5 de la pureté a) ABS et b) HIPS, en fonction de la distance des palettes par rapport aux électrodes ($v=7\text{cm/s}$, $U=13\text{kV}$). Les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de niveau de confiance à 95%.

Selon le modèle des équations (IV-11) et (IV-12), on obtient un meilleur taux de pureté, pour une distance $a=1.50\text{cm}$ (figures IV.7). par ailleurs, on observe une diminution linéaire du taux de la pureté en fonction de l'augmentation de la l'espace entre les électrode et les palettes.



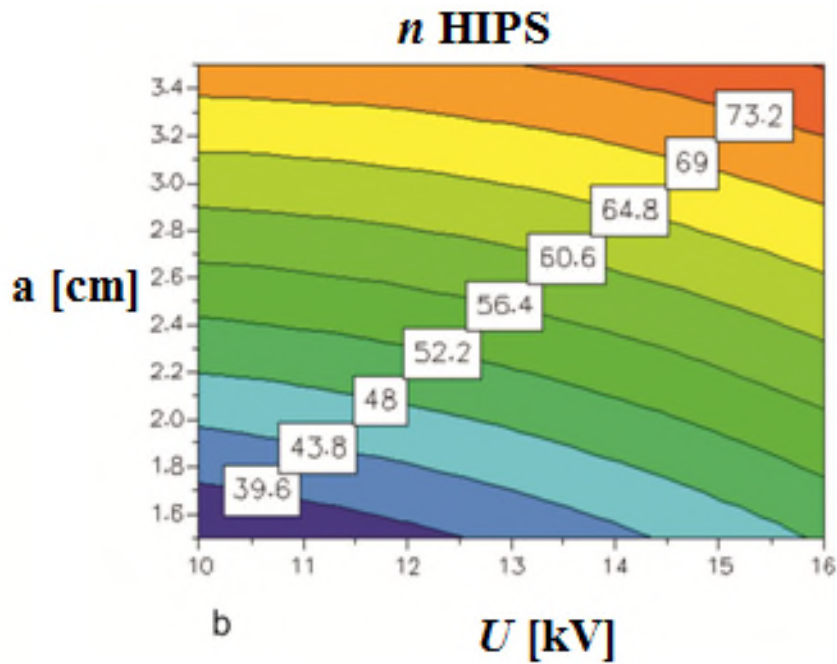


Figure IV.8: Surfaces iso-réponse de l'influence de la tension sur le taux de récupération.

Selon les modèles mathématiques obtenus par les équations (IV-13 et IV-14), on obtient un meilleur pourcentage de récupération des matériaux ABS et HIPS pour une tension $V=16$ kV et $a=3.4$ cm (Figure IV.8). Cela est expliqué par le fait que à cette tension, on obtient une force de déviation des particules plus importante qui garantie une chute des produits dans leur compartiment. D'un autre côté, une large ouverture des palettes évite le rebond des particules vers l'extérieur.

Le logiciel MODDE.5 par sa fonction optimisé nous permet d'avoir les trois valeurs (tension, vitesse, et distance des palettes) ou on obtient des meilleurs taux de pureté et de récupération simultanément ($v=8$ cm / s, $U=\pm 16$ kV, $a=35$ mm).

IV 3.2 Établissement d'un plan produit

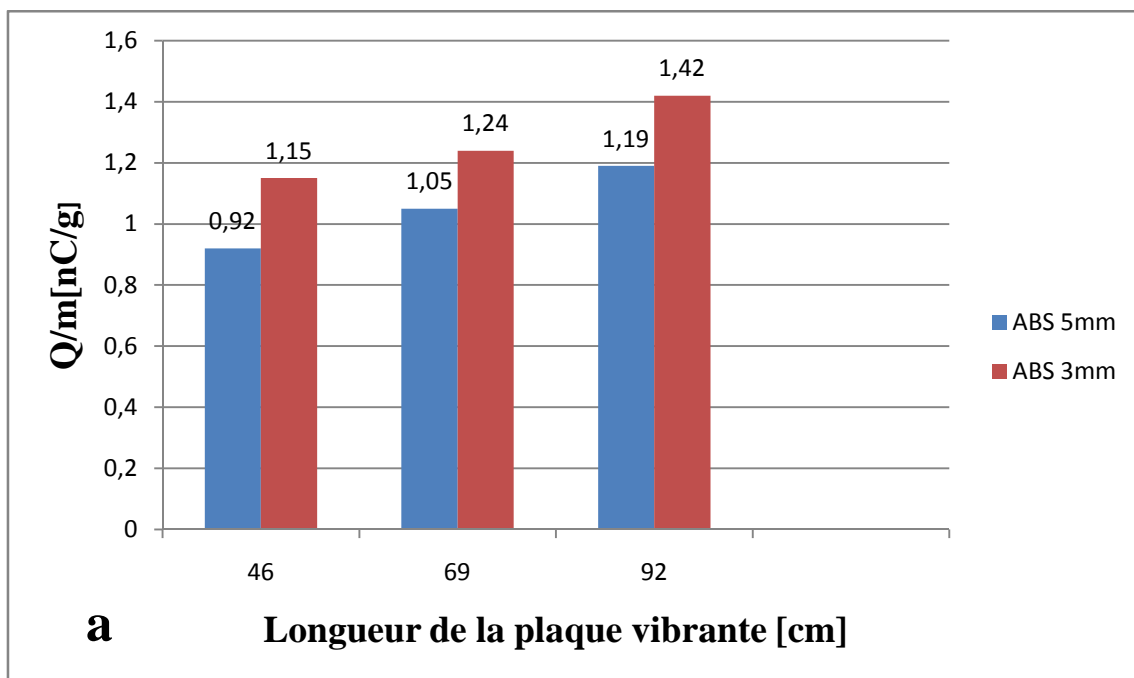
La première étape dans la détermination des paramètres est de dissocier les facteurs contrôlés des facteurs bruits.

Les facteurs contrôlés sont ceux que le concepteur peut maîtriser. Dans notre cas, les facteurs sont la tension U et la distance a des palettes des collecteurs par rapport aux électrodes.

Les facteurs bruits sont ceux que le système subit. Dans notre étude, nous avons : la taille des granules g , la proportion de la composition des mélanges granulaires à séparer %ABS/HIPS.

La taille moyenne (g) des granules et la teneur en ABS et HIPS (ABS/HIPS%) sont deux facteurs interférents qui peuvent affecter la séparation triboélectrique. Dans un processus industriel, ces deux facteurs sont difficiles à contrôler, mais dans la présente étude les deux facteurs bruits ont été rigoureusement contrôlés par des mélanges synthétiques constituant les échantillons expérimentaux.

La taille moyenne des granules « g » affecte la le procédé de la séparation triboélectrique (voir chapitre III). Par conséquent, elle peut être considérée comme un facteur limitatif au procédé. Une série d'expérience d'électrisation des granules ABS et HIPS d'une taille moyenne de 3 mm et 5 mm on été réalisées sur le dispositif vibro-tribo-chargeur. Les résultats obtenus sont représentés sur le graphique de la (figure IV.9). Chaque valeur est la moyenne de trois mesures, l'écart type de 0,008 et 0,019 nC/g. Les conditions climatiques étaient maintenues constantes: HR = 58-64% et T = 20 - 22°C.



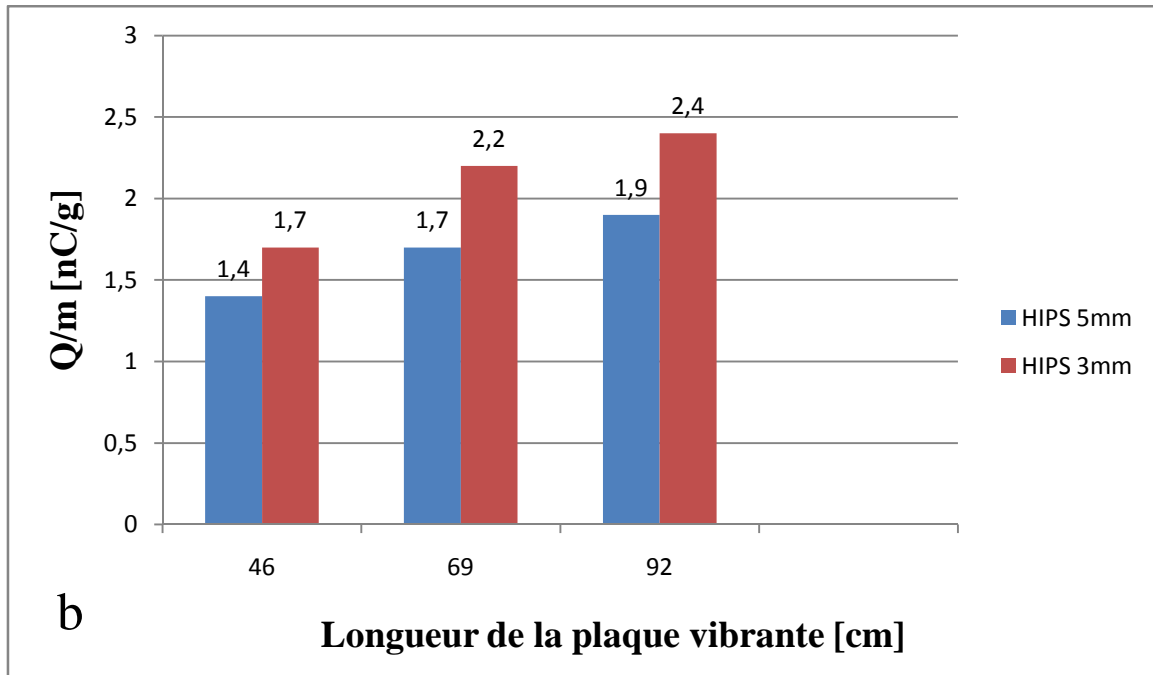


Figure IV.9 : Représentation graphique la charge massique en fonction de la longueur de la plaque vibrante a) ABS b) HIPS

Les résultats de cette expérience ont confirmés que la taille des grains a un effet significatif sur le processus de tribo-électrisation. On constate qu'on obtient une grande charge massique pour les granules ABS ou HIPS de 3mm. Après ce résultat, il a été déterminé que la taille moyenne des grains pour l'étude de la robustesse du séparateur tribo-électrostatique a été choisie entre 3 et 5 mm.

Les valeurs des deux fractions de paramètres du plan produit sont répertoriées dans les (tableaux IV-6 et IV-7) :

Tableau IV-6 : Facteurs contrôlables

Tension [kv]	Distance des palettes [mm]
$U_{\min}=10$ kv	$a_{\min}= 15$ mm
$U_{\text{interm}}=13$ kv	$a_{\text{interm}}= 25$ mm
$U_{\max}= 16$ kv	$a_{\max}= 35$ mm

Tableau IV-7: Facteurs bruits

Taille des particules ABS et HIPS g [mm]	Composition des mélanges ABS +HIPS à séparer [%]ABS/HIPS
$g_{\min}=3$ mm	70%ABS+30%HIPS
$g_{\text{interm}}=4$ mm	50%ABS+50HIPS
$g_{\max}=5$ mm	30%ABS+70%HIPS

En utilisant le plan d'expériences de la (figure IV.5) avec les facteurs contrôlables qui sont la tension U , la distance des palettes a et les facteurs bruits g et %ABS, le logiciel MODDE.5 génère les 27 expériences du plan composite.

La longueur du plateau, le débit d'alimentation du matériau et la vitesse ont été maintenus constants selon les résultats précédents: $L= 46$ cm; $\Phi = 3.8$ g / s et $V = 7.77$ cm/s. Les conditions ambiantes sont les suivantes: $T = 22$ ° C; $RH = 55\%$

L'objectif de la modélisation expérimentale est l'optimisation du procédé en maximisant la pureté des matériaux collectés (P) et le taux de récupération (n) à la fois pour l'ABS et el HIPS. Pour cela, une fonction f a été créée :

$$f = P_{abs} + P_{hips} + n_{abs} + n_{hips} \quad (IV-15)$$

Les résultats de séparation des granules ABS et HIPS (plan produit) sont représentés dans le (tableau IV-8) :

Test	U kV	a mm	%ABS / HIPS	g mm	P_{ABS} [%]	P_{HIPS} [%]	n_{ABS} [%]	n_{HIPS} [%]	f
1111	10	15	30	3	56.17	98.68	30.89	37.43	223.17
2111	16	15	30	3	62.15	98.32	41.74	41.43	243.65
1211	10	35	30	3	65.86	97.1	62.57	67.76	293.29
2211	16	35	30	3	66.16	98.94	72.89	74.28	312.26
1121	10	15	70	3	84.9	86.13	18.98	49.52	239.54
2121	16	15	70	3	89.06	81.98	32.44	43.18	246.66
1221	10	35	70	3	87.5	72.82	43.44	71.36	275.12
2221	16	35	70	3	88.19	73.42	54.24	77.34	293.18
1112	10	15	30	5	92.1	97.63	29.93	23.29	242.95
2112	16	15	30	5	93.15	97.43	47.51	35.42	273.51

1212	10	35	30	5	88.12	98.89	69.32	63.08	319.41
2212	16	35	30	5	91.15	97.9	81.73	73.91	344.70
1122	10	15	70	5	96.15	94.15	17.44	48.49	256.23
2122	16	15	70	5	96.77	94.36	28.20	58.19	277.52
1222	10	35	70	5	97.7	90.3	36.22	88.95	313.16
2222	16	35	70	5	98.02	90.4	59.79	82.87	331.08
1100	10	15	50	4	84.14	96.65	11.78	43.01	235.58
2100	16	15	50	4	89.89	97.72	25.35	44.56	257.52
1200	10	35	50	4	89.06	94.38	58.78	78.24	320.46
2200	16	35	50	4	89.4	95.22	75.19	82.75	342.55
0011	13	25	30	3	74.64	98.06	58.34	67.45	298.49
0021	13	25	70	3	95.45	86.6	34.63	66.25	282.93
0012	13	25	30	5	84.66	98.1	68.43	51.85	303.05
0022	13	25	70	5	95.65	92.94	39.83	79.77	308.19
0000	13	25	50	4	86.83	96.43	38.21	60.27	281.73
0000	13	25	50	4	86.05	95.51	37.78	60.08	279.41
0000	13	25	50	4	86.34	95.79	38.85	59.29	280.28

L'analyse des résultats expérimentaux avec l'interaction des facteurs contrôlables et des facteurs bruits a été réalisée avec le programme MODDE 5.0 (Umetrics, Umea, Suède), qui calcule les coefficients a_{ij} du modèle mathématique de la réponse f , dessine les contours de réponse, identifie les meilleurs réglages des paramètres pour l'optimisation du processus.

Avec $Q^2 = 0.953$; $R^2 = 0.991$

$$f = 280.647 + 12.1483U + 28.2111a - 0.433332 (\% \text{ABS/HIPS}) + 11.4811g + 11.0856 a^2 - 8.70494 (\% \text{ABS/HIPS})^2 - 5.822563a (\% \text{ABS/HIPS}) + 4.38439ag. \quad (\text{IV-16})$$

La (figure IV.10) représente les surfaces de réponse de l'interaction des facteurs contrôlables et du bruit :



Figure IV.10 : Prédiction du contour de la réponse

a) $U=13\text{kV}, a=25\text{mm}$, b) $\% \text{ABS}/\text{HIPS}=50\%, a=25\text{mm}$, c) $U=13\text{kV}, \% \text{ABS}=50\%$

D'après les résultats obtenus, il semble que la réponse considérée (f) est très peu influencée par la teneur en ABS (Figure IV.10a). C'est avantageux parce que dans le cas d'une séparation tribo-électrostatique en industrie, il serait difficile de contrôler le pourcentage des matières dans le mélange binaire à séparer.

Par contre, la taille des granules a a une grande influence sur la fonction réponse f . Il semble que les meilleurs résultats ont été obtenus pour les granulés avec la taille moyenne comprise entre 4,5 et 5 mm (Figure IV.10 a, b, c). Ce résultat s'explique par la trajectoire des granules lors de leur chute libre dans le séparateur tribo-électrostatique. Cette trajectoire est déterminée par le rapport de la force électrique et la force de gravité. La force gravitationnelle est donnée pour une particule selon cette équation :

$$F_g = mg = (\rho \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^3 / 3) \cdot g \quad [\text{N}] \quad (\text{IV-17})$$

r : rayon de la particule.

ρ : densité du matériau.

Si l'on considère la densité de charge de surface des granules constante, l'équation de la force électrique est donnée par cette équation :

$$F_e = Q.E = E. (q_s.4.\pi.r^2) \quad [N] \quad (IV-18)$$

r : rayon des la particules.

q_s : la charge surfacique.

Comparant les deux équations, on trouve que F_g diminue dans un rapport de r^3 tandis que la force électrique diminue avec un rapport de r^2 . D'où plus petite est la taille moyenne de grain, plus élevé est le rapport entre la force électrique et la force de gravitation.

Des collisions peuvent se produire entre les particules et l'électrode plane ou les palettes de séparation, ce qui a pour conséquence de charger les granules avec des signes opposés. Ceci est un inconvénient non remédiable. Ces particules tombent alors dans le compartiment soit mixte ou autre que celui qui lui est destiné.

IV.3.3 Maximisation du rapport signal/bruit

La robustesse du processus, peut être identifiée en utilisant le rapport signal/bruit (§.IV.1.4). Ce rapport aide à trouver les valeurs des facteurs contrôlables, pour lesquelles la réaction est moins sensible aux effets des différents facteurs de bruit [16]. Taguchi a démontré que lorsque la cible est un maximum, cet objectif est atteint lorsque le rapport de sortie / bruit (O /N) est maximisé (équation type L):

$$O /N = -10 \log \left[\frac{1}{\varphi^2} \left(1 + 3 \frac{\sigma^2}{\varphi^2} \right) \right]$$

O /N: rapport Signal/Bruit;

φ_i : la moyenne de réponse pour la ligne i .

σ^2 : la variance de la réponse pour la ligne i .

$$\sigma^2 = 1/n \sum (x_i - \varphi)^2 \quad (IV-19)$$

Dans notre cas, nous cherchons à maximiser la fonction f qui est directement liée à la pureté et à la récupération des différents produits après séparation en fonction des facteurs bruits qui sont la taille et les proportions des mélanges granulaires.

Les résultats du plan produit rapport signal/bruit sont présentés dans le tableau IV-9

Tableau IV-9 : Résultats du plan produit rapport O/N

U[kV]	a [cm]	S11	S12	S21	S22	S00	φ	$\bar{\sigma}^2$	O/N
10	1.5	223,1	242,9	239,5	256,2	235,6	239,5	114,8	-11,2
10	3.5	293,2	319,4	275,1	313,2	320,5	304,3	308,1	-4,7
16	1.5	26,3	273,5	246,6	277,5	257,5	263,1	125,1	-11,2
16	3.5	312,2	344,7	295,6	331,1	342,6	325,2	351,5	-4,1
13	2.5	298,5	310,1	282,9	308,2	280,1	295,9	155,4	-10,4

L'analyse des résultats expérimentaux du rapport O/N a été réalisée avec le programme MODDE 5.0 (Umetrics, Umea, Suède), qui calcule les coefficients a_{ij} du modèle mathématique :

$$O/N = -8.308 + 0.1225 U + 3.4075 a + 0.1625 Ua \quad (IV-20)$$

Le programme MODDE.5.0 teste le modèle mathématique du rapport (O/N) et fournit des réponses du système en fonction des facteurs d'entrée comme le montre la figure IV.11.

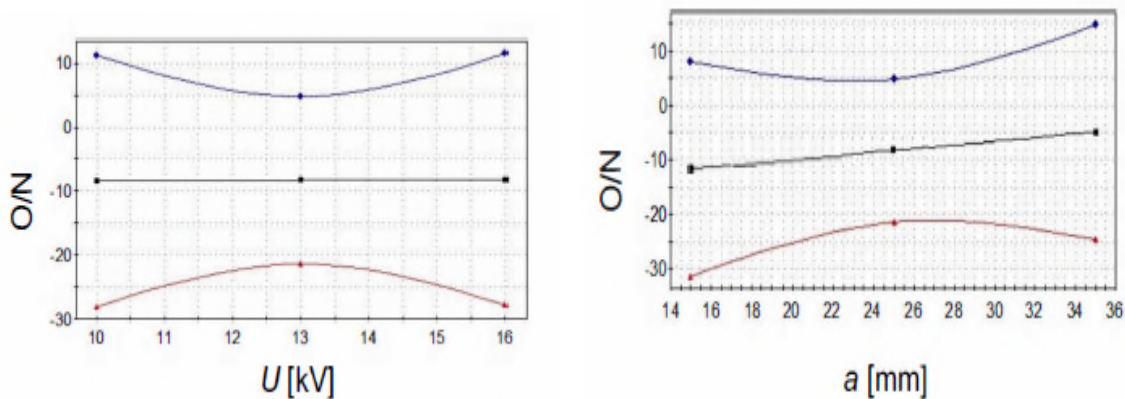


Figure IV.11 : Représentation de la prédiction du modèle par MODDE.5 du rapport réponse/bruit en fonction de tension et de la position des palettes.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la tension influence peu, le rapport signal/bruit.

La conception la plus robuste est obtenue pour une distance des palettes a allant de 30mm à 35mm, dans cette intervalle le rapport O/N est en augmentation linéaire.

Dans ce deuxième cas, nous cherchons à maximiser la fonction f_i représentée par l'équation (IV-21) :

$$f_i = 2p_{ABS} + 2p_{HIPS} + n_{ABS} + n_{HIPS}. \quad (IV-21)$$

Tableau IV-10: Résultats du plan produit rapport O/N

U [kV]	a [mm]	f_i [%]					\bar{X}	σ^2	O/N
		S11	S12	S21	S22	S00			
10	15	378.02	432.68	410.57	446.53	416.37	416.83	535.82	-2.59
10	35	456.25	506.42	435.44	501.16	503.90	480.63	852.94	0.21
16	15	430.84	464.09	417.70	468.65	445.13	445.28	373.86	-6.29
16	35	477.36	533.75	457.24	519.50	527.17	503.00	910.61	0.38
13	25	471.19	492.86	464.98	496.78	462.37	477.64	206.63	-12.05
13	25					460.97			
13	25					462.41			

La fonction de réponse f peut être choisie de telle façon à obtenir une meilleure réponse dans les meilleures conditions d'application possibles. Par exemple, si la pureté des deux fractions du mélange granulaire séparé est considéré comme la plus importante des réponses, nous associons un coefficient dans notre cas 2 pour la pureté, par contre le taux de récupération nous le considérons moins important et on lui associé un coefficient égal à 1

D'après les résultats obtenus (tableau IV-10), il est évident que la tension a moins d'influence sur le rapport signal/bruit. Par contre la distance des palettes par rapport aux électrodes influence le rapport signal/bruit, on a la plus grande valeur du rapport signal/bruit pour $a = 35$ mm, indépendamment de la tension appliquée entre 10 et 16 kV. Cela confirme le résultat précédent pour la fonction f (IV-15).

IV.4 Conclusion

Le logiciel MODDE5.0 facilite l'analyse de la robustesse du processus de la séparation tribo-électrostatique ;

En utilisant la méthodologie de Taguchi, il est possible d'identifier les conditions de fonctionnement pour lesquelles, le processus est moins sensible aux facteurs bruits, de sorte que la séparation puisse être plus efficace.

La méthodologie de Taguchi s'est avérée être un outil puissant pour la conception robuste des procédés de séparation électrostatique, dans lequel il y a une variabilité inhérente en raison de la fluctuation des caractéristiques du matériau d'alimentation.

Conclusion générale

Les déchets matériels plastiques électriques et électroniques constituent une menace pour l'environnement. La récupération de ces déchets et leur transformation en une source précieuse de matières premières pour la création de nouveaux produits, devient plus que nécessaire. Pour cette raison, il ya un intérêt majeur pour la recherche scientifique des processus pour une meilleure séparation des matières plastiques.

La séparation tribo-électrostatique est utilisée en industrie, mais les mécanismes de la charge triboélectrique sont difficilement contrôlables.

Ce travail, est axé sur la tribo-électrisation des granules en plastique sur un dispositif vibratoire couvert d'une matière appelé PET. Ce type de dispositif tribo-électriques est avéré être une solution efficace, pour l'électrification par triboélectricité des granules en plastique et leur séparation par un champ électrique intense. Ce dispositif fournit un transfert efficace de la charge entre les particules et le matériel du plateau oscillant. Le processus de chargement ne doit pas être trop long.

Ce type de dispositif triboélectrique est sensible à des facteurs de contrôle tels que la vitesse, le débit d'alimentation des granules sur la plaque vibrante et la longueur de la plaque vibrante. La taille des particules est aussi un facteur non contrôlé qui influence la charge électrique acquise par les granules sur le vibro-tribo-electrique.

La méthode des plans d'expériences et le programme MODDE 5.0, sont utilisés pour la modélisation des processus de tribo-électrisation et la séparation électrostatique.

L'étude expérimentale a révélé que les granules d'ABS se chargent moins sur la plaque vibrante couverte de PET par apport aux granules du HIPS.

La charge des granules augmente en fonction de la longueur du plateau jusqu' à une certaine longueur, car au-delà, la charge de ces granules se saturent. Le débit d'alimentation et la vitesse des granulés sont également deux paramètres qui doivent être en concordance absolue afin de garantir une meilleure charge triboélectrique sur le plateau vibrant. La longueur de la plaque et la haute tension appliquée aux électrodes, sont deux paramètres influençant la séparation tribo-électrostatique. Le choix de la tension est primordial afin de garantir une meilleure pureté des produits séparés dans leur compartiment réservé.

La séparation triboélectrique est un processus complexe et sensible à la variation des paramètres contrôlés et non contrôlés, à l'état de surface des matériaux granulaires et aux conditions environnementales.

La méthode Taguchi est l'un des outils utiles pour la détermination de la robustesse du processus. En utilisant la méthodologie Taguchi. Il a été possible d'identifier les valeurs des paramètres contrôlables pour lesquels le processus est moins sensible aux variations non contrôlées (bruits).

Perspectives

- Construire un dispositif en forme de cage de Faraday pour mesurer la densité de charge de surface du film de PET couvrant le plateau vibrant.
- Faire une étude expérimentale de modélisation et d'optimisation sur le dispositif vibro-tribo-chargeur, en fonction de plusieurs matériaux couvrant la plaque vibrante.
- Faire une étude d'évaluation et d'identification de la séparation tribo-électrostatique en fonction de la composition du mélange granulaire
- Modéliser et optimiser le phénomène triboélectrique sur la plaque vibrante par d'autres méthodes intelligentes telle que les réseaux de neurones.
- Modéliser le processus de séparation tribo-électrostatique d'un mélange constitué de plus de deux matériaux.

Références bibliographiques

- [1] Gabriela Buda, « Optimisation des procédés de charge triboélectrique de matériaux granulaires ». Thèse de doctorat Université Technique de Cluj-Napoca, (2013).
- [2] Mihai Alexandru Bilici, « séparateur électrostatique des mélanges de matériaux granulaires dans des dispositifs à lit fluidisé"., Thèse de doctorat Université de potiers, (2013).
- [3] « Enquête sur l'état de l'art et les perspectives des techniques de tri automatique des déchets ». Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, (Aout 2013).
- [4] Ciprian Dragan, , « Modélisation du processus de charge et séparation tribo-électrostatique de matériaux plastiques granulaires"., Thèse de doctorat Université de potiers, (2010)
- [5] Wu. G, J. Li , Z. Xu. Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling » A review. Elsevier, Waste Management, (2013) : 33 : 585–597
- [6] A. Tilmatine et al «Experimental analysis and optimisation of a free-fall triboelectric separator of granular plastic particles», International Journal of Sustainable Engineering, (September 2009), Vol. 2, No.3, pp 184–191.
- [7] S. Bendimerad et al « Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator », International Journal of Environmental Studies, 2009, pp 1-10.
- [8] A. Tilmatine et al « Séparation électrostatique: complément des procédés mécaniques de recyclage des déchets industriels », Journal of Electrostatics (2004), 61 pp 21–30.
- [9] A. Tilmatine et al « Etude de la séparation électrostatique a effet couronne d'un mélange de particules isolantes et métalliques », 4^{ème} conférence nationale de la haute tension, Ghardaïa 16-17 janvier 2002, pp 111-114.
- [10] K B Tennal et al « Triboelectric Separation of Granular Materials », IEEE Industry Applications Society Annual Meeting New Orleans, Louisiana,(1997), pp 1724-1729.
- [11] T.X. Li et al « Dry triboelectrostatic separation of mineral particles: a potential application in space exploration », Journal of Electrostatics, (1999), 47 pp 133-142.
- [12] Buda.G, A.Samuila, S.Atroune, M.Bilici, and L. Dascalescu..Set point identification of a tribocharging process for mixed granular solids. Journal of Electrostatics, (2013), 71:407-412.
- [13] Albrecht. V, A. Janke ,A. Drechsler, G. Schubert, E. Németh, F. Simon. ” Visualization of Charge Domains on Polymer Surfaces”. Springer-Verlag Berlin Heidelberg Progr Colloid Polym Sci, (2006) 132: 48–53.

- [14] Saeki. M. “Triboelectric separation of binary plastic mixture”. World Academy of Science, Engineering and Technology, (2010), 4 : 10-22.
- [15] Saini. d, s. trigwell, p. k.Ssrirama, r. a. sims, r. Sharma, a. s. biris, and m. k. Mazumder. « Portable Free-Fall Electrostatic Separator for Beneficiation of Charged Particulate Materials ». Particulate Science and Technology,(2008),26: 349–360.
- [16] Masuda, S., M. Toragushi, T. Takahashi, and K. Haga. « Electrostatic beneficiation of coal, using a cyclone-tribocharger». IEEE Transactions on Industry Applications,(1983) 19:789–793.
- [17] Ireland, P. M. “Triboelectrification of particulate flows on surfaces: Part I experiments. Powder Technology, (2010) 198:189–198.
- [18] Tarik HAMMI, « Etude de méthodes de mesures et réalisation d’un banc de test pour l’évaluation des propriétés électrostatiques des textiles », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, (2005).
- [19] R.-H. Yoon, G. H. Luttrell, E. S. Yan and A. D. Walters « poc-scale testing of a dry triboelectrostatic separator for fine coal cleaning ». Final technical report, Center for Coal and Minerals Processing Virginia Polytechnic Institute & State University Blacksburg. (September 27 1995 to April 30, 2001).
- [20] Mihai Lungu « Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect », Mineral Engineering, Elsevier (2004), pp 69-75.
- [21] KEITH MITCHELL FORWARD « TRIBOELECTRIFICATION OF GRANULAR MATERIALS », degree of Doctor of Philosophy, Department of Chemical Engineering May 2009.
- [22] Kwetkus, B.A.” particule triboelectrification and its use in electrostatic separation process”.in: particulate science and technology, (1998)16 (1),55-67.
- [23] lawver,J,E.,drenforth, W.P.”electrostatic separation ” Electrostatics and its applications. A.D. moore (editor) new York, john wiley et sons,(1973),pp.221-249.
- [24] Carpco Inc., Jacksonville, USA. “Carpco application sheet. Rejection of PVC from PET flake using the Carpco V-STAT separator”. In: *Bulletin No. 97713*.
- [25] Carpco Inc., Jacksonville, USA. “The Solution to Separation”. Tehnical Information Bulletin, (1997).
- [27] Higashiyama.Y., Y.Ujiie, and K.Asano.. “Triboelectrification of plastic particles on a vibrating feeder laminated with a plastic film. *Journal of Electrostatics* (1997), 42: 63-68.
- [28] Atroune.s et al ”Comparative Experimental Study of Tribo-Electric Charging of Two Size-Classes of Granular Plastics ». Particulate science en technology, (2015),

- [29] Umetrics AB, MODDE 5.0. User Guide and Tutorial, Umetrics, Umea, Sweden, (1999).
- [30] Thèse de doctorat, Jean-charles Laurentie « contribution à la modélisation numérique d'écoulements électro-fluido-dynamiques diphasiques tridimensionnels ». 2011, Université de potiers.
- [31] Fatima Zohra RAHOU, « modélisation du fonctionnement d'un séparateur tribo-aero-électrostatique pour matériaux », These de doctorat université de sidi -bel- abbès. (2015)
- [32] M. Mihailescu, A. Samuila, A. Urs, R. Morar, A. Iuga, L. Dascalescu, Computerassisted experimental design for optimization of electrostatic separation processes, IEEE Trans. Ind. (2002), Appl. 38 (5) 1174 -1181.
- [33] L. Dascalescu, A. Tilmatine, F. Aman, M. Mihailescu, Optimization of electrostatic separation processes using response surface modeling, IEEE Trans. Ind. (2004) Appl. 40 53-59.
- [34] Medles Karim, « Modélisation expérimentale des installations de séparation électrostatique de particules », These de doctorat université de sidi -bel- abbès, (2008).
- [35] Bernard Clément, « Les concepts et la méthodologie de Taguchi dans le design de produits », École Polytechnique de Montréal et Génistat Conseils, (Novembre 2000).
- [36] livre, « pratique industrielle des plans d'expériences », Jacques et Philippe ALEXIS, paru chez AFNOR en 1999.
- [37] Gabriela Buda, Adrian Samuila, Mihai Bilici, Salah Atroune, Lucien Dascalescu, « Set Point Identification and Robustness Testing of a Triboelectrostatic Separation Process for Mixed Granular Plastics », Industry Applications, IEEE Transactions on (Volume:51, Issue:2)
- [38] Lucian Dascalescu, *Senior Member, IEEE*, Adrian Samuila, Adrian Mihalcioiu, Silviu Bente, and Amar Tilmatine « Robust Design of Electrostatic Separation Processes » IEEE transactions on industry applications, (may/june 2005), vol. 41, no. 3,

La séparation triboélectrique, est utilisée à des fins de récupération des matériaux issus des déchets en plastique des DEEE (déchets d'équipement électriques et électroniques). La récupération de matières plastiques de DEEE par procédés triboélectrique est l'objet de cette étude. Chargés préalablement par effet triboélectrique dans un dispositif à vibration et séparés par un champ électrique intense créé par deux sources haute tension reliées à deux électrodes rectangulaires dans le séparateur triboélectrique à chute libre. L'efficacité du dispositif vibratoire étant parfois limitée par la charge électrique accumulée pendant le passage des granules sur la plaque vibrante, répercute le rendement de la séparation des mélanges granulaires binaires. Une étude est réalisée en faisant appel à la méthode des plans expérience qui est utilisée par le programme MODDE.5 à fin de modéliser et d'optimiser les processus d'électrification par vibration et ensuite la séparation des granules, en fonction des paramètres contrôlables et non contrôlables. Cette étude a permis de bien comprendre leurs influences.

Triboelectric separation is used for recovery material from plastic waste WEEE (waste electrical and electronic equipment). The recovery of plastics from WEEE by triboelectric processes is the subject of this study. Charged by triboelectric effect in a vibration device and separated by a high electric field created by two rectangular electrodes in the triboelectric separator freefall. The efficiency of the vibratory device sometime limited by the electric charge accumulated during the passage of the granules to the vibrating plate, affects the efficiency of the separation of binary granular mixtures. A study is carried out by using the design of experiments methodology that is used by the MODDE.5 program to model and optimize the electrification process by vibration and follows the separation of the granules according to the controllable parameters and not controllable. This study allowed to understand their influences.

الفصل بالتريبوإلكتريك، يستخدم لاستعادة المواد من النفايات البلاستيكية WEEE (نفايات المعدات الكهربائية والإلكترونية). انتعاش البلاستيك من خلال عمليات التريبوإلكتريك هو موضوع هذه الدراسة. محملة مسبقا في جهاز الاهتزاز ومفصلة في حقل كهربائي ذات التوتر العالي. في بعض الأحيان عند مرورها في جهاز الإهتزازي لإ تحمل الشحنة اللازمة، يعكس أداء فصل الخلطات الحبيبية الثنائية. وأجريت الدراسة باستخدام تجربة أسلوب التخطيط الذي يتم استخدامه من قبل برنامج MODDE.5 لنمذجة وتحسين العمليات كهربية الاهتزاز و ثم فصل حبيبات، اعتمادا على عوامل السيطرة عليها وغير السيطرة عليها. سمحت هذه الدراسة إلى فهم تأثيراتها.