

Université Abderrahmane Mira de Bejaia



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

PROJET DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

Académique Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Electrotechnique industriel

Thème

**Etat de l'art sur le séparateur tribo-électrostatique à chute libre,
Application au tri des déchets de plastique**

Réaliser par :

- HAMACHE Anis
- BOURBAA Abderrahim

Encadrer par :

- Dr. ATROUNE Salah

Année Universitaire: 2021/2022

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience durant ces années d'étude.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadrant **Mr. ATROUNE Salah**, pour sa patience, son soutien, ses précieux conseils, son aide, sa disponibilité tout au long de nos études et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nous tenons tout particulièrement à remercier les enseignants du département de **Génie Électrique** pour leur disponibilité et encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nos reconnaissances vont aussi à messieurs les membres de jury, pour l'honneur qu'ils auront fait en acceptant de juger ce travail.

Nous remercions enfin tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre, à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE I – GENERALITES SUR LE PLASTIQUE	
I.1. Introduction	2
I.2. Les matériaux plastiques	2
I.2.1. Définition du plastique	2
I.2.2. Différents types de plastique (polymère)	2
I.2.3. L'impact du plastique sur l'environnement	3
I.3. déchets plastique	4
I.3.1. Source des déchets plastiques	4
I.3.1.1. Les déchets plastiques industriels	4
I.3.1.2. Les déchets plastiques de post-consommation	5
I.4. Recyclage du plastique	5
I.4.1. Recyclage mono-matière	6
I.4.2. Recyclage des mélanges de matières plastiques	6
I.5. Conclusion	6
CHAPITRE II – TECHNIQUES DE CHARGEMENT ET SEPARATION ELECTROSTATIQUE DES MATERIAUX ISOLANTS EN PLASTIQUE	
II.1. Introduction	7
II.2. Grandeurs fondamentales de l'électrostatique	7
II.2.1. Principe de l'électrostatique	7
II.2.2. Charge électrique	7
II.2.3. Champ électrique	8
II.2.4. Potentiel électrique	9
II.3. Le chargement tribo-électrique	10
II.3.1. Matériaux conducteur ou isolant	10
II.3.2. Série tribo-électrostatique	11
II.4. Dispositifs de chargement triboélectrique	12
II.4.1. Dispositif de charge par ventilateur	13
II.4.2. Dispositif de charge par cyclone	13
II.4.3. Dispositif de chargement statique	14
II.4.4. Dispositif de charge à cylindre rotatif	15
II.4.5. Dispositif de charge par vibrations	15
II.4.6. Dispositif de charge à lit fluidisé	16
II.5. Forces exercées sur les matériaux granulaires	17
II.5.1. Forces de la pesanteur	17
II.5.2. Forces de London-Van der Waals	18
II.5.3. Forces de Coulomb	19
II.5.4. Forces aérodynamiques	20
II.5.5. Cohésion due aux forces électrostatiques	20
II.5.6. Adhésion due aux forces électrostatiques	21
II.6. Installations de séparation tribo-électrostatique des mélanges granulaires isolants	21

II.6.1. Principe de la séparation tribo-électrostatiques	21
II.6.2. Séparateurs tribo-électrostatique des mélanges granulaires	23
II.6.2.1. Séparateur tribo-électrique à chute libre	23
II.6.2.2. Séparateur tribo-électrostatique à tapis roulant	23
II.6.3. Séparateurs tribo-aéro-électrostatique pour les mélanges granulaires	24
II.6.3.1. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bande transporteuses	24
II.6.3.2. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à cylindres Tourants	25
II.6.3.3. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes Verticales	26
II.7. Conclusion	27

CHAPITRE III – LES PLANS D'EXPERIENCES

III.1. Aperçu historique	28
III.2. Introduction	28
III.3. Définition du plan d'expérience	29
III.4. Principe du plan d'expérience	29
III.5. Plans factoriels complets à deux 2^k (modèle du premier degré)	30
III.5.1. Plans complets à deux facteurs	30
III.5.1.1. Effet d'un facteur	32
III.5.1.2. Interaction entre deux facteurs	35
III.5.1.3. Calcul de l'effet d'un facteur	35
III.5.1.4. Matrice de calcul des effets	36
III.5.2. Plan factoriel 2^k	37
III.5.3. Validation du modèle du premier degré	38
III.6. Conclusion	39

CHAPITRE IV – ETUDE D'UN SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE A CHUTE LIBRE

IV.1. Introduction	40
IV.2. Etude du processus de chargement par vibration	40
IV.3. Dispositif expérimental	41
IV.4. Détermination du domaine expérimental	43
IV.5. Résultat et discussion	46
IV.5.1. Influence du paramètre débit du dépôt des granules sur la plaque vibrante ϕ	46
IV.5.2. Influence du paramètre L de la longueur de la plaque vibrante	47
IV.5.3. Influence du paramètre ν vitesse de déplacement des granules sur la plaque vibrante	48
IV.5.4 séparation électrostatique d'un mélange 50% ABS + 50% HIPS en fonction de la longueur de la plaque vibrante	48
IV.6. séparation ABS/HIPS	50
IV.6.1. Description expérimental	50
IV.6.2. Résultats et discussion	51
IV.7. Conclusion	53
Conclusion générale	55

Liste des figures

Figure I.1	: Production cumulative de déchets de plastiques et leur élimination	4
Figure II.1	: Force d'attraction entre deux particules	8
Figure II.2	: champ électrique entre les armateurs d'un condensateur plan	9
Figure II.3	: Schéma représentatif des densités d'états d'énergie électroniques pour des matériaux de différentes natures électriques : conducteur, semi-conducteur et isolant	11
Figure II.4	: Représentation schématique du dispositif d'un chargement par ventilateur	13
Figure II.5	: Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone	14
Figure II.6	: Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique	14
Figure II.7	: Dispositif de tribo-chargement à cylindre rotatif	15
Figure II.8	: Dispositif à vibrations	16
Figure II.9	: Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation	16
Figure II.10	: Le phénomène physique responsable de la force Van der Waals: polarisation électrique des atomes ou molécules neutres	18
Figure II.11	: Force de coulomb entre deux sphères chargées	19
Figure II.12	: Eléments de base d'une ligne de tri des déchets d'équipement électriques et Électronique DEEE	22
Figure II.13	: Séparateur tribo-électrostatique à chute libre	23
Figure II.14	: Séparateur électrostatique à tapis roulant	24
Figure II.15	: Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses	25
Figure II.16	: Séparateur électrostatique à cylindres tournant	25
Figure II.17	: Séparateur tribo-aéro-électrostatique à Disques tournants	26
Figure II.18	: Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales	26
Figure III.1	: Processus de plan d'expérience	29

Figure III.2	: . Définition du domaine d'étude	31
Figure III.3	: Représentation géométrique tridimensionnelle d'un plan 2^2 et de la surface de réponse correspondante	34
Figure III.4	: Représentation de l'effet d'un facteur dans le plan vertical (Fig. III.2) passant par x_2	34
Figure IV.1	: Représentation graphique du séparateur à chute libre	40
Figure IV.2	: . Représentation schématique du dispositif expérimental : 1 - Dispositif d'alimentation vibrant, 2- Dispositif de chargement par vibrant tribo-chargeur, 3- feuille de PET couvrant le plateau vibrant, 4- seau de Faraday, 5- électromètre	41
Figure IV.3	: Photographie du montage de mesure de la charge électrique: (1) Seau de Faraday, (2) Electromètre numérique (Keithley - modèle: 6514)	42
Figure IV.4	: Photographie des produits utilisés	42
Figure IV.5	: Rapport charge/masse des granulés d'ABS et de HIPS en fonction de la longueur du plateau vibrant ($v = 7.7 \text{ cm/s}$, $F = 3.8 \text{ g/s}$). Chaque valeur est la moyenne de trois mesures résultats obtenu par Gabériala	43
Figure IV.6	: Représentation graphiques Q/m de l'ABS (a) et HIPS (b) prédits par MODDE 5.0 en fonction du débit de dépôt des granules ϕ , Les autres variables sont maintenues égales aux valeurs centrales : $v = 7.7 \text{ cm/s}$, $L = 69 \text{ cm}$. Les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de confiance à 95%	47
Figure IV.7	: Représentation graphiques Q/m de l'ABS (a) et HIPS (b) prédits par MODDE 5.0 en fonction de la longueur de la plaque vibrante, Les autres variables sont maintenues égales aux valeurs centrales : $v = 7.7 \text{ cm/s}$, $\phi = 3.8 \text{ g/s cm}$. Les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de confiance à 95%	47
Figure IV.8	: Représentation graphiques Q/m de l'ABS (a) et HIPS (b) prédits par MODDE 5.0 en fonction de la longueur de la plaque vibrante, Les autres variables sont maintenues égales aux valeurs centrales : $L = 69 \text{ cm/s}$, $\phi = 3.8 \text{ g/s cm}$. Les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de confiance à 95%.	48
Figure IV.9	: Représentation schématique des forces agissant sur une particule chargée en chute libre dans un champ électrique	49

Figure IV.10	: Résultats de la séparation du mélange ABS HIPS en fonction de la longueur du plateau (P [%] : pureté ; W [%] : récupération)	50
Figure IV.11	: Représentation des résultats obtenus sur la récupération w [%] des granules ABS et HIPS en fonction des deux paramètres U [kV] et a [cm]	53
Figure IV.12	: Représentation des résultats obtenus sur la Pureté P [%] des granules ABS et HIPS en fonction du paramètre tension U [kV].	53

Liste des tableaux

Tableau II.1	: Série triboélectrique	12
Tableau II.2	: Valeurs du travail d'extraction de quelques polymères	22
Tableau III.1	: Matrice d'expérience	31
Tableau III.2	: Matrice de calcul des effets	37
Tableau IV.1	: Résultats obtenu pour les domaines de variation des variables	44
Tableau IV.2	: Rapport charge/masse [Q/m] de l'ABS et HIPS, pour les 17 cycles du plan expérimental composite	45
Tableau IV.3	: Modèles mathématiques de Q/m et h obtenus avec MODDE 5.0	46
Tableau IV.4	: Résultat séparation tribo-électrostatique	52
Tableau IV.5	: Modèles mathématiques P ABS [%], W ABS [%], P HIPS [%], W HIPS [%] obtenus par MODDE 5.0.	52

Introduction générale

L'exploitation massive du plastique, non biodégradable, est un problème environnemental majeur. Une grande partie des plastiques utilisés ou stockés dans le monde sont détruits ou sont actuellement inutiles.

Ces déchets plastiques constituent une source très importante, distribuée du secteur industriel au niveau des consommateurs, en passant par les différents réseaux de distribution et de commercialisation. Cette masse mondiale de plastique usagé ne cesse de croître et le nombre de ses déchets augmente.

Le recyclage est un mode de gestion des déchets et une source d'économie non négligeable de ressources naturelles, dont la préservation est aujourd'hui un enjeu majeur.

La séparation électrostatique des divers constituants des mélanges de matériaux plastiques est une technique de plus en plus utilisée dans l'industrie du recyclage des déchets. Le principe de fonctionnement de ce type de séparateurs consiste à charger les particules du mélange par effet triboélectrique à l'aide d'un dispositif de chargement qui seront par la suite soumises à un champ électrique intense.

Afin de répondre aux besoins de l'industrie du recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques, le principal objectif de cette expérience est de mettre au point un dispositif en utilisant l'effet triboélectrique pour assurer la charge sélective des particules fines de plastique et les forces du champ électrique pour les séparer en fonction de leur nature, améliorer les techniques de séparation électrostatique actuelles et de proposer des solutions fiables aux entreprises industrielles.

Le mémoire comporte quatre chapitres qui se présentent comme suit :

Le premier chapitre renferme des généralités sur le plastique, les sources de déchet plastique et le recyclage de la matière plastique.

Dans **le deuxième chapitre** nous avons présenté quelques notions sur l'électrostatique, les techniques de chargement tribo-électrique des matériaux granulaires isolants et les différents dispositifs utilisés pour le chargement triboélectrique et les dispositifs de chargement triboélectrique.

Le troisième chapitre est consacré la présentation des méthodes des plans d'expériences.

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

Chapitre I

Généralités sur le plastique

Introduction

Le plastique ou le polymère s'inscrivent dans une progression de Consommation flatteuse par rapport aux autres matériaux. Le champ couvert par Les polymères est prospère, que ce soit pour les plastiques grand public ou Produits plus techniques. Cependant, avec la prolifération des déchets plastiques. Une solution consiste à recycler ces déchets. Ce chapitre fait un point Bibliographie et définitions sur les plastiques pour comprendre ce travail.

Les matériaux plastiques

Les matériaux plastiques jouent un rôle très important dans notre vie quotidienne, leurs applications se généralisent et la demande mondiale pour ces matériaux augmente d'une année à l'autre.

Définition du plastique

Le plastique est une matière synthétique composée de polymères, qui a la propriété d'être moulée ou modelée facilement après chauffage et qui peut être souple ou rigide. On appelle polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes. La majorité des plastiques (99%) utilisés dans le monde est fabriqués à partir de pétrole et de gaz naturel [1].

Différents types de plastique (polymère)

Il existe plusieurs variétés de plastique, qui peuvent être regroupés en trois catégories : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

a. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques se déforment sous l'action de la chaleur et gardent cette forme en refroidissant et ils ne sont pas biodégradables et ont une « durée de vie » de plusieurs centaines d'années. En fonction de la polymérisation on obtient différents produits qui sont [2]:

- les PVC (Chlorure de Polyvinyle)
- les polyéthylènes,
- les polystyrènes,
- les polypropylènes

b. Les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Sous de trop fortes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation). Les molécules de ces polymères sont organisées en de longues chaînes dans lesquelles un grand nombre de liaisons chimiques solides et tridimensionnelles ne peuvent pas être rompues et se renforcent quand le plastique est chauffé. La matière thermodurcissable garde toujours sa forme en raison de ces liaisons croisées et des pontages très résistants qui empêchent tout glissement entre les chaînes [3].

c. Les élastomères

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles même. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité il subit une vulcanisation. C'est un procédé de cuisson et de durcissement qui permet de créer un réseau tridimensionnel plus ou moins rigide sans supprimer la flexibilité des chaînes moléculaires. On introduit dans l'élastomère au cours de la vulcanisation du soufre, du carbone et différents agents chimiques. Différentes formulations permettent de produire des caoutchoucs de synthèse en vue d'utilisations spécifiques. Les élastomères sont employés dans la fabrication des coussins, de certains isolants, des semelles de chaussures ou des pneus [3].

L'impact du Plastique sur l'environnement

La pollution plastique est actuellement l'un des plus gros problèmes environnementaux. Nous vivons dans un monde où beaucoup de déchets plastiques semblent inévitables, mais vous pouvez aider à résoudre le problème de la pollution plastique en comprenant les dangers de la pollution plastique et en prenant des mesures pour la réduire. Des entreprises comme Multi-Action produisent des emballages recyclables pour zéro déchet plastique. À mesure que la population augmente et que les articles en plastique à usage unique tels que les bouteilles d'eau s'accumulent au fil du temps, la quantité de déchets dans le monde augmente également. La pollution plastique se produit lorsqu'une quantité suffisante de plastique s'accumule dans une zone qui affecte l'environnement naturel et nuit aux plantes, aux animaux ou aux humains.

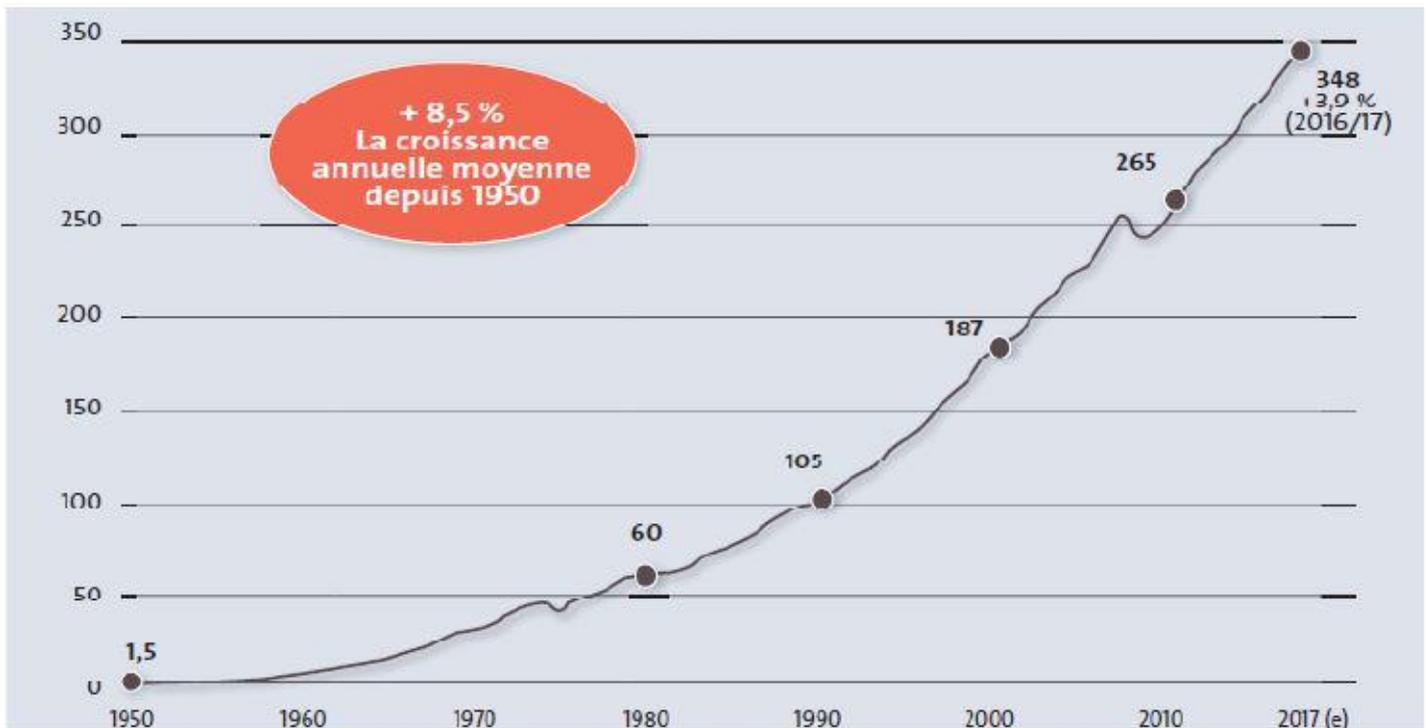


Figure I.1 : Production mondiale de plastique (en millions de tonnes) entre 1950-2017 [1]

Déchets plastique

Par déchets plastiques, nous entendons les résidus de production, de transformation et de consommation, même les produits en plastique destinés à être jetés. Par conséquent, les sources de déchets plastiques sont multiples.

Sources des déchets plastiques

Déchet plastique industriels

➤ Les déchets de production

Ils proviennent des arrêts de réacteur de polymérisation, des purges de réacteurs et des lots déclassés. Ils sont homogènes et présentent la particularité d'avoir un degré de pollution faible, voire inexistant. On y retrouve, en très grande majorité, les polymères de grande diffusion (PE, PP, PS et PVC) [4].

➤ Les déchets de transformation

Ils proviennent de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage,...). On y retrouve, précisément, les lisières et bordures de ces opérations de thermoformage, les pièces présentant des défauts, ou encore, les chutes de démarrage et d'arrêt de machine. Ces déchets peuvent être homogènes comme fortement hétérogène (mélanges provenant de la Co-extrusion, Co-injection, ...) sont, en général, très peu souillés [4].

Les déchets plastiques de post-consommation

Il s'agit soit de consommation industrielle, soit de déchets privés. Nous distinguons:

➤ **Les déchets agricoles**

On retrouve essentiellement les films, sacs, liens, fûts et bidons de produits phytosanitaires. La particularité de ce gisement réside dans ses fortes contamination (terre, cailloux) et pollution. Il s'agit pour l'essentiel de polyoléfines (PE-bd, PE-hd et PP) [4].

➤ **Les déchets commerciaux ou de distribution**

Il s'agit des emballages industriels et commerciaux qui sont en général de bonne qualité. Il y a également les fûts, sacs de grande contenance, conteneurs présents dans les secteurs de la chimie, l'agroalimentaire, le bâtiment et les travaux publics, pour le conditionnement et le transport de divers autres produits. Ces deux premiers gisements sont le domaine prépondérant des polyoléfines en majorité écrasante. Enfin, on peut aussi citer le cas des emballages en polystyrène expansé utilisés pour le calage lors du transport de produits fragiles, et dans une proportion moindre, pour les caisses à poisson et les plateaux horticoles [4].

➤ **Les déchets électriques et électroniques**

C'est un gisement issu de la filière de tous les produits électriques et électroniques tels que les ordinateurs, téléphones, appareils électroménagers et câbles en tout genre [4].

➤ **Les déchets ménagers**

Ils sont essentiellement constitués par les emballages. Pour ce gisement, trois matières principales sont concernées: le PET (bouteilles de boissons gazeuses, eaux minérales,...), le PE hd (bouteilles de lait, produits lessiviels,...), et le PVC (bouteilles d'eau minérale,...) [4].

Recyclage du plastique

Le recyclage du plastique est un enjeu de plus en plus important au fil du temps. Le recyclage des plastiques devient une industrie en raison des volumes mondiaux impliqués. Dans l'immense quantité de déchets plastiques, on retrouve presque toujours les mêmes polymères, qui sont logiquement les thermoplastiques les plus produits. Les déchets thermoplastiques sont traités dans une extrudeuse par tri, broyage, lavage, séchage et fusion et transformés en granulés pour régénération.

Recyclage mono-matière

Il s'agit, la plupart du temps, de séparer les matières plastiques des autres matériaux tels que le verre, le sable, les métaux, les papiers et cartons... mais, également, de séparer les matières plastiques par famille. Généralement, les installations de tri assurent ces deux aspects de la question par une cascade d'opérations unitaires débouchant sur un flux de matières purifiées et un flux de sous-produits, considérés comme des déchets du processus et qu'il convient d'éliminer (incinération, mise en décharge, voire valorisation matière dans certains cas). Les méthodes de tri sont relativement nombreuses mais les méthodes couramment appliquées sont en nombre plus restreint, certains procédés s'avérant pour l'instant peu économiques [2].

Recyclage des mélanges de matières plastiques

Il peut s'avérer pratiquement (séparation délicate) ou économiquement (diminution du coût de recyclage en évitant l'étape de tri) intéressant de recycler des déchets plastiques sous forme de mélanges contenant deux produits ou plus; le problème est que les polymères impliqués sont généralement incompatibles, lorsqu'on veut faire un mélange, on essaye de disperser au mieux une phase dans l'autre. Pour cela, on est parfois amené à utiliser un composé supplémentaire qui permettra de comptabiliser le mélange en améliorant ses propriétés [5].

Conclusion

Les substances utilisées pour produire les plastiques sont des produits naturels tels que la cellulose, le charbon, le gaz naturel, le sel, et bien sûr le pétrole brut. Les plastiques dominent tous les produits de consommation en raison de leurs propriétés connues. Leur présence dans la nature et leur longévité associée peuvent avoir un impact sur les écosystèmes. Leur recyclage est nécessaire pour protéger notre environnement. Dans ce chapitre on a présenté un aperçu général sur la matière plastique, sa définition, ses différents types, aussi quelques statistiques concernant la production, ainsi que l'impact des déchets plastiques sur l'environnement.

Chapitre II

Techniques de chargement et séparation Électrostatique des matériaux isolants en plastique

Introduction

Le mélange de matériaux isolants granulaires en plastique peut être séparé électrostatiquement dans un champ électrique fort, s'ils ont des charges différentes. Par conséquent, la charge électrostatique des matériaux particuliers est cruciale pour leur séparation dans des champs électriques puissants.

Grandeurs fondamentales de l'électrostatique

Principe de l'électrostatique

L'électrostatique est basée sur des formules pour analyser les forces potentielles et les interactions entre différents acteurs potentiellement chargeables. La loi de Coulomb analyse la force d'interaction électrique entre deux charges et est donc à la base de cette branche. Aujourd'hui, l'électrostatique est largement utilisée dans l'étude des matériaux antistatiques. Se pose alors le problème d'éviter le phénomène d'électrification des objets en libérant automatiquement toute électricité [6].

Charge électrique

La charge électrique est une propriété fondamentale de la matière qui respecte le principe de conservation. C'est une notion abstraite, comparable à celle de la masse, qui permet d'expliquer certains phénomènes physiques. Contrairement à la masse, la charge électrique peut prendre deux formes, que l'expérience amène à considérer comme «opposés» ; On les qualifie arbitrairement de positive et négative. Deux charges de même nature, deux charges positives par exemple, se repoussent, alors que deux charges de nature opposée s'attirent.

La charge électrique peut être directement mesurée avec un électromètre. Son unité est le coulomb. Les particules observées possèdent des charges qui sont des multiples entiers de la charge élémentaire qui est une constante physique fondamentale.

Les charges électriques interviennent dans de nombreux phénomènes. Le premier phénomène qui nous intéresse est la force F d'attraction ou de répulsion qui existe entre deux corps ayant les charges Q_1 et Q_2 situé à une distance de l'un par rapport à l'autre. La loi de coulomb exprime cette force électrique [6] :

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 d^2} \quad (\text{II.1})$$

Où $\epsilon_0 = 1/(4 \pi \cdot 9 \cdot 10^9)$ F/m est une constante (c'est la permittivité électrique du vide). Si les charges sont de la même polarité, la force (positive) est une force de répulsion (Figure II.1). Si les charges sont de polarité contraires ($Q_1 = q_A < 0$ et $Q_2 = q_B > 0$), la force (négative) est une force d'attraction (Figure II.1) [6].

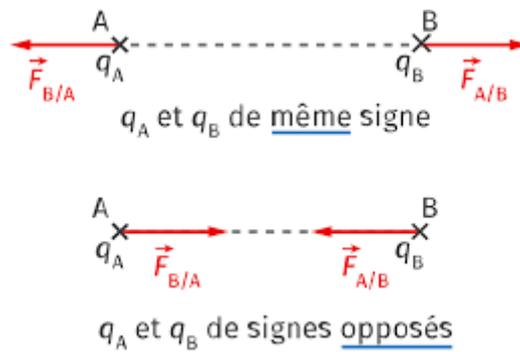


Figure II.1 : Force d'attraction entre deux particules.

Champ électrique

Dans les installations électriques, comme les séparateurs électrostatiques, il y a généralement plusieurs corps chargés ayant des configurations complexes. Dans ce cas, le calcul de la force électrique à l'aide de la loi de Coulomb devient long pour s'affranchir de ce problème, il convient de calculer le champ électrique E produit par une charge Q_1 dans un point P située à une distance r_p de celui-ci [6] :

$$E = k \frac{Q_1}{r_p^2} \quad (\text{II.2})$$

En ce point, le vecteur champ électrique est dans la même direction que le vecteur force électrique F^{\rightarrow} exercé sur une charge positive Q_2 placée en ce point [6] :

$$\vec{F} = Q_2 E \quad (\text{II.3})$$

Une particule chargée dans un champ électrique possède une accélération proportionnelle à la force électrique exercée sur elle (en supposant que la force électrique est seule). Le vecteur accélération de la particule se trouve dans la direction du vecteur force électrique. Cette propriété nous permettra de calculer ensuite les trajectoires des particules [6].

Potentiel électrique

Le potentiel électrique est le travail W d'une force s'exercent sur une particule de charge unitaire $Q = 1C$ qui se déplace entre points (A et A') d'un champ électrique E . La différence de potentiel entre A et A' est de 1 volt, si la force s'exerçant sur une charge électrique de 1 coulomb effectue un travail de 1 joule lorsque celle-ci se déplace de A jusqu'à A'. Ceci se traduit par la relation suivante [6] :

$$\Delta V = \frac{W}{Q} \quad (\text{II.4})$$

Le potentiel électrique est visualisé par les équipotentiels. Une équipotentielle est une ligne (dans un espace 2-D) ou une surface (dans un espace 3-D) sur laquelle le potentiel électrique est constant. Les équipotentiels sont équivalentes aux lignes de niveau sur les cartes topographiques. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée aux bornes d'un condensateur, des charges s'accumulent sur les deux armatures en quantités égales mais avec leur polarité opposée (Figure II.2) [6].

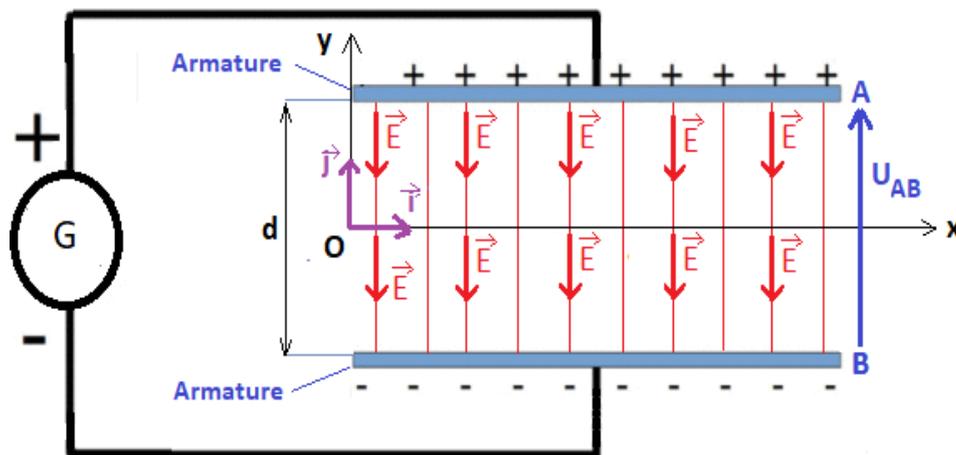


Figure II.2. champ électrique entre les armatures d'un condensateur plan [6]

Un champ électrique est produit par les charges présentes sur les armatures du condensateur, située à une distance d [cm]. Il y a une relation direct reliant ce champ électrique (uniforme) E entre les armatures et la différence de potentiel V aux bornes du condensateur plan [6] :

$$E = \frac{V}{d} \quad (\text{II.5})$$

Le chargement tribo-électrique

L'électrification triboélectrique, se produit lorsque deux solides entrent en contact puis se séparent, le transfert de charge se produit entre les deux matériaux, Dans l'ensemble, il en résulte une charge positive excessive à la surface de l'un ou l'autre et un excès de charge négative sur l'autre matériau.

Matériaux conducteur ou isolant

Bien que communément utilisées, les notions de conducteur et d'isolant électrique ne sont pas un concept trivial. Un même matériau peut être considéré comme un conducteur dans un certain contexte, et comme un isolant dans un autre. Par exemple, dans le cas de l'électrotechnique ou des potentiels électriques très élevés sont utilisés, certains matériaux isolants peuvent devenir conducteur temporairement pour permettre le passage de charges électriques. Il convient donc de proposer une définition plus élaborée [7] [8].

Un matériau conducteur est un corps dont la particularité est de pouvoir transporter l'électricité. On parle de corps parce qu'un conducteur peut aussi bien être sous forme solide (bois, métaux, etc.) que liquide (eau contenant des impuretés) ou gazeux (air ionisé).

Un matériau isolant est un matériau dont la bande d'énergie la plus élevée est complètement remplie. Généralement au milieu de la bande interdite, la bande d'énergie qui sépare la bande de valence de la première bande d'énergie celle qui n'est pas occupée par des électrons s'appelle la bande de conduction.

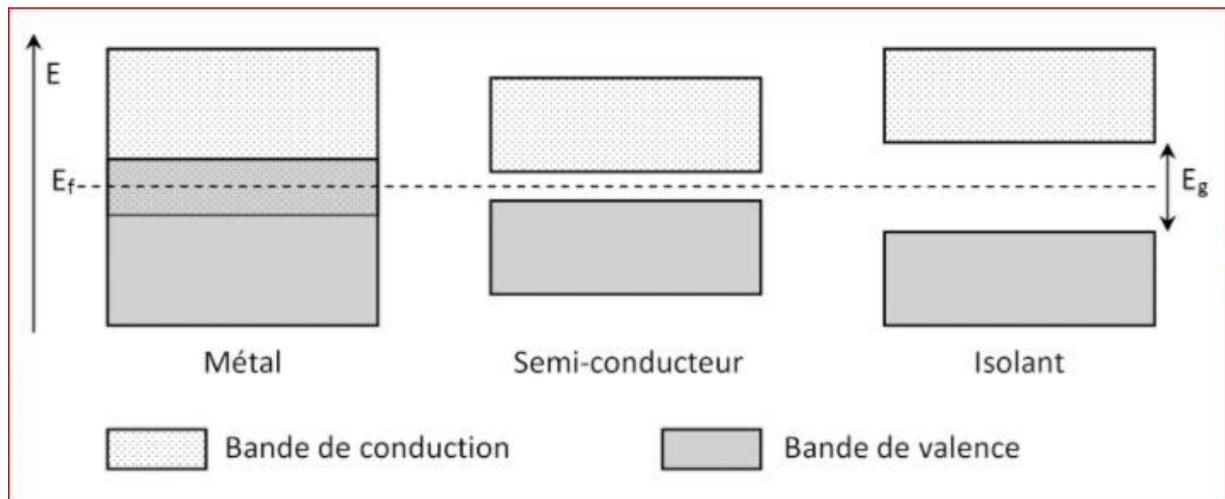


Figure II.3. Schéma représentatif des densités d'états d'énergie électronique pour des matériaux de différentes natures électriques : conducteur, semi-conducteur et isolant [8]

Série tribo-électrostatique

On appelle série triboélectrique, un classement des diverses matières dans un ordre tel que, de deux matières qui se suivent, la première est positive. Plus les deux matériaux frottés sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée. Certaines séries sont proposées de longues dates. Wilcke (1759), Faraday (1840), Jamin et Bouty donnent à peu près la même série [9].

Une série beaucoup plus étendue a été donnée par Shaw (1917) qui a mieux défini les échantillons employés [9]. La série triboélectrique varie d'un chercheur à l'autre dans tous les cas, et chaque série reflète la culture matérielle de son moment historique. Il existe en effet des différences de friction, et des facteurs externes qui peuvent inverser les signes acquis, il semble donc impossible de faire une liste avec un ordre fiable, le fait que les signes puissent être inversés aussi facilement est assez surprenant.

Nom d'isolant	Rapport de la charge [nC/J]	Charge acquise si frotté avec du métal F: faible , N: normal	Remarques
Polyuréthane solide	+40	+N	Un peu conducteur
Nylatron (nylon+)	+28	+N	/
Verre	+25	+N	Un peu conducteur
Papier	+10	-F	Un peu conducteur
Bois (pin)	+7	-F	/
Silicone	+6	+N	/
Coton	+5	+N	Légèrement
Caoutchouc nitrile	+3	-F	/
Laine	0	-F	/
Polycarbonate	-5	-F	/
ABS	-5	-N	/
Acrylique	-10	-N	/
Epoxy (circuit)	-32	-N	/
Caoutchouc en styrène butadiène	-35	-N	/
PET (mylar) solide	-40	+F	/
Polystyrène	-70	-N	/
Polyamide	-70	-N	/
Silicone	-72	-N	/
Oléfines (alcènes): LDPE, HDPE, PP	-90	-N	/
PVC (vinyle rigide)	-100	-N	/
Latex (naturel) en caoutchouc	-105	-N	/
Caoutchouc en EPDM remplie	-140	-N	Un peu conducteur
Téflon	-190	-N	Très électronégatif

Tableau II.1. Série triboélectrique

Dispositif de chargement triboélectrique

Plusieurs travaux ont été publiés sur les chargements triboélectriques, qui utilisent principalement : des ventilateurs, des cylindres tournants, des lits fluidisés (générés par des soufflantes ou des compresseurs), des micros cyclones, des chargeurs statiques, ou des vibrations.

Dispositif de charge par ventilateur

Le dispositif consiste en une chambre cylindrique isolante en polyvinyle chlorure PVC (Figure II.4). A son extrémité inférieure, la chambre est munie d'une hélice coaxiale, entraînée par un moteur électrique à courant continu à vitesse variable. Le dispositif, utilise l'air ascendant qui donne naissance à des turbulences dans le tube contenant le mélange granulaire, provoquant ainsi leur tribo-électrification lorsque celles-ci entrent en collisions entre-elles ou avec les parois du tube [10,11].

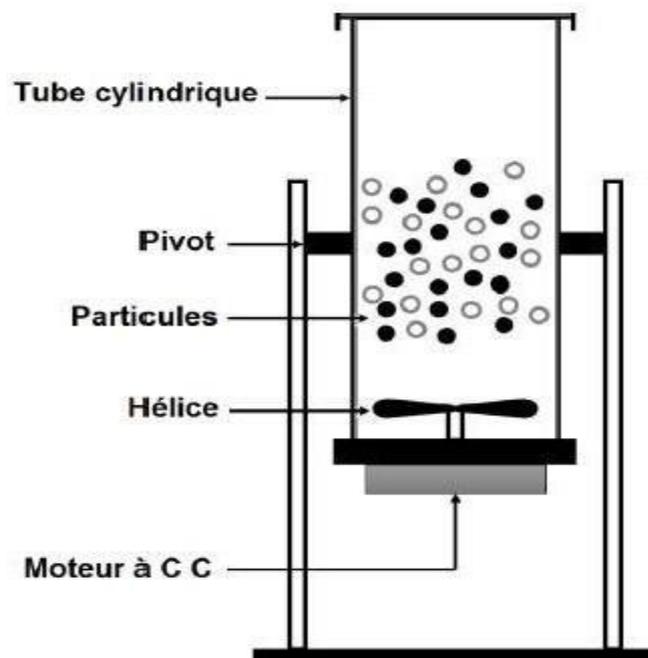


Figure II.4. Représentation schématique du dispositif d'un chargement par ventilateur [10].

Dispositif de charge par cyclone

L'unité se compose d'un cylindre isolant placé verticalement et d'un ventilateur à vitesse variable (Figure II.5). Il permet aux particules chargées d'être soufflées par frottement avec les parois internes de l'appareil.

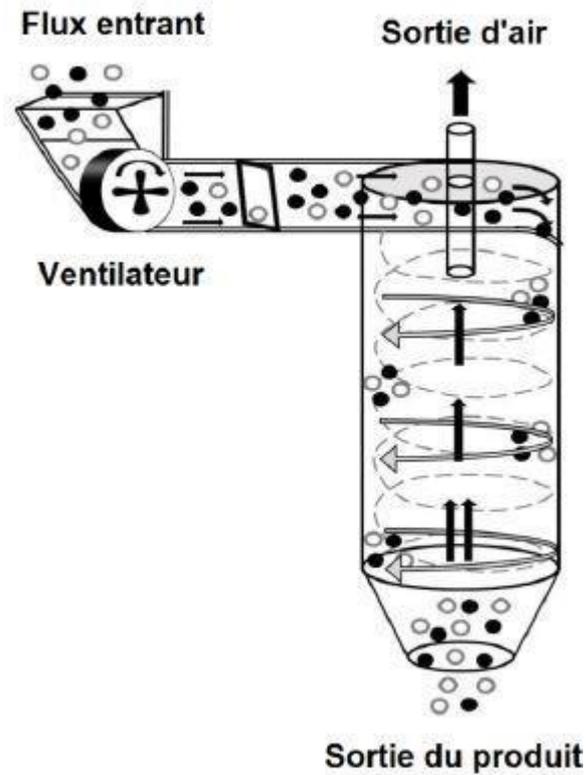


Figure II.5. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [10].

Dispositif de chargement statique

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique en matière isolante (Figure II.6), à l'intérieur de laquelle sont disposées plusieurs plaques inclinées et détachables. Les particules glissent le long de ces plaques par gravitation et se chargent par frottement avec celles-ci [11,12].

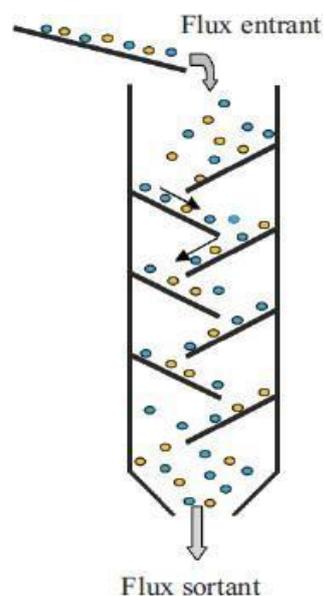


Figure II.6. Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [13].

Dispositif de charge a cylindre rotatif

Le dispositif est constitué d'un tube isolant utilisé comme dispositif de charge triboélectrique. Le mélange granulaire se déplace à l'intérieur d'un cylindre, qui tourne autour d'un axe horizontal légèrement incliné (Figure II.7), et les particules traversent le tube par gravité. Afin de créer une agitation du mélange granulaire, il y a des nervures dans le tube faites du même matériau que le tube lui-même. Ils s'étendent radialement vers l'intérieur à partir de la paroi du tube. L'accumulation de charge des particules est attribuée à deux mécanismes : les collisions entre particules et les collisions entre les particules et les parois du cylindre.

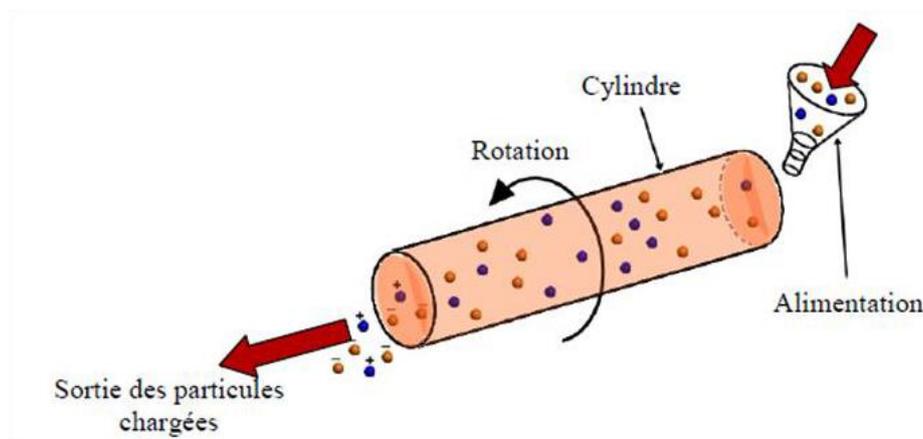


Figure II.7. Dispositif de tribo-charge à cylindre rotatif [12].

Dispositif de charge par vibration

Cette installation a été développée par Blajan et al [14] (Figure II.8). Le matériau à charger glisse dans des canaux en Zig-Zig mis en mouvement vibratoire sur les deux axes X et Y [15-16]. La vibration du dispositif de charge est commandée par un moteur électrique associé au système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent d'abord avec les parois du dispositif. En modifiant la vitesse du moteur, le mouvement oscillant du dispositif de charge peut être modifié.

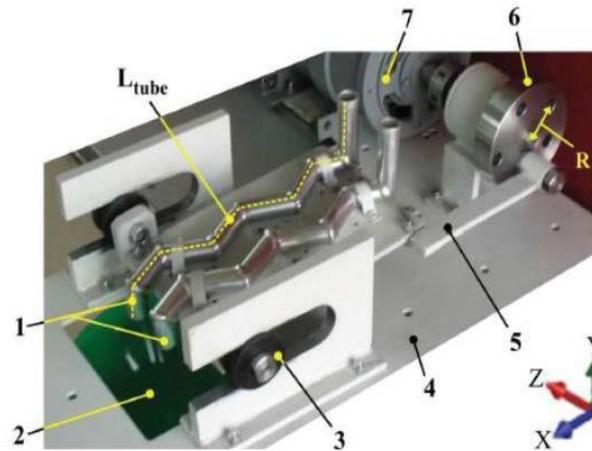


Figure II.8. Dispositif à vibrations (1: tubes de charge; 2: sortie des particules chargées; 3: glissière; 4: support; 5: bielle; 6 : manivelle; 7: moteur électrique; R: rayon; X, Y, Z : direction du mouvement; L_{tube} : longueur du tube) [9].

Dispositif de charge à lit fluidisé

Le dispositif le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique, à souvent la forme d'un tube cylindrique isolant, en position verticale. Le mélange de particules est déposé sur un support (un diffuseur d'air, en tamis isolant), situé en bas du cylindre. L'air de fluidisation est produit d'une soufflante connectée au bas du cylindre. Les particules fluidisées acquièrent des charges électriques de signes opposés grâce aux collisions entre elles. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six (06) phénomènes [9] :

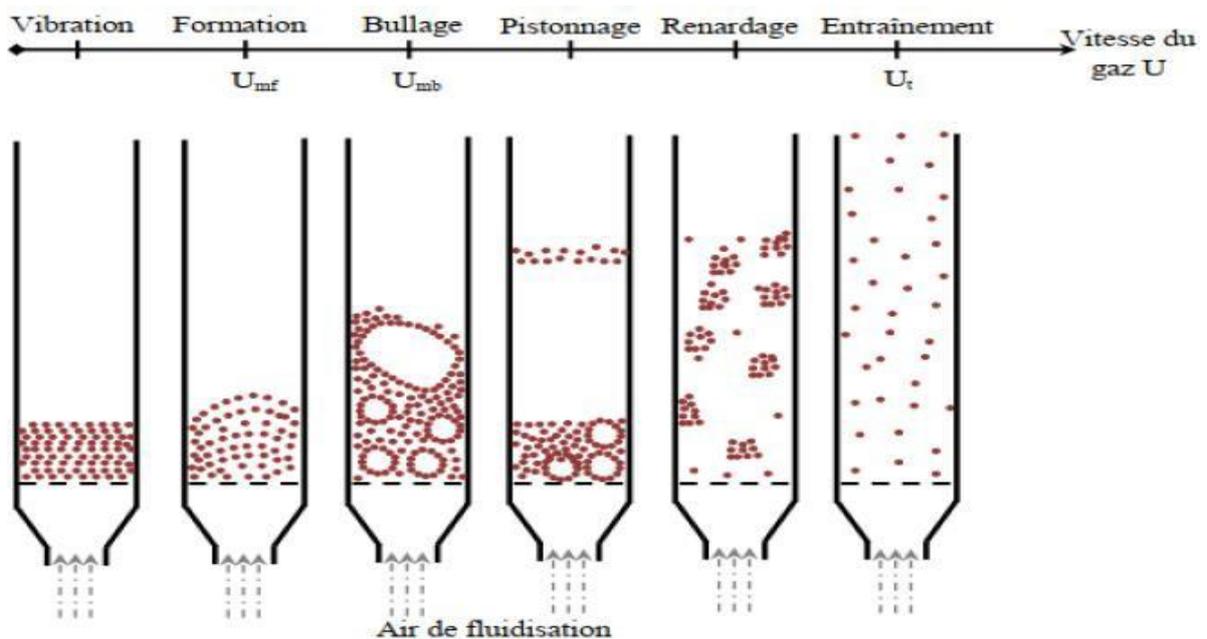


Figure II.9. Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation [9].

- ❖ **vibration:** pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le tamis sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules [1].
- ❖ **La formation :** le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques similaires aux fluides: ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation U_{mf} . Le lit montre une certaine expansion de la couche de particules, la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules est alors atteinte [1].
- ❖ **Le bullage:** à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage U_{mb} , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse permettant la distribution du gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide en ébullition [1].
- ❖ **Le pistonnage :** en excès au-delà de U_{mb} , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière [1].
- ❖ **Le renardage:** les particules s'accrochent et créent des passages préférentiels pour le gaz [1].
- ❖ **L'entraînement:** quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos U_t , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation [1].

Forces exercées sur les matériaux granulaires

Il y a trois types de forces s'exercent sur les matériaux granulaires qui prennent naissance lors d'un frottement ou lors d'un simple contact:

- Les forces de la pesanteur
- Les forces électrostatiques
- Les forces aérodynamiques

Forces de la pesanteur

La pesanteur est la force d'attraction d'un corps céleste sur un objet massif proche que l'on mesure dans la pratique ; elle résulte principalement de la gravité mais aussi d'autres effets tels que le mouvement du corps, les forces de marée... etc.

Le poids d'un corps de masse m s'exprime par:

$$P = mg \quad (\text{II.6})$$

Avec : $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ et P en Newton

Forces de London-Van der Waals

Les forces de van der Waals coïncident à une interaction électrique d'intensité faible ayant lieu à courtes distances entre atomes et/ou molécules. Elles peuvent être estimées en faisant la somme de toutes les combinaisons possibles de paires d'atomes entre particules et s'écrivent [17] :

$$F = \frac{\lambda}{a^7} \quad (\text{II.7})$$

A : La distance entre les deux centres.

λ : La constante qui dépend de la polarisation et de l'énergie d'ionisation des atomes impliqués.

Les forces de London – Van Der Waals étant inversement proportionnelles à la septième puissance de leur distance, cela entraîne un accroissement rapide de l'interaction pour les courtes distances (Figure II.11).

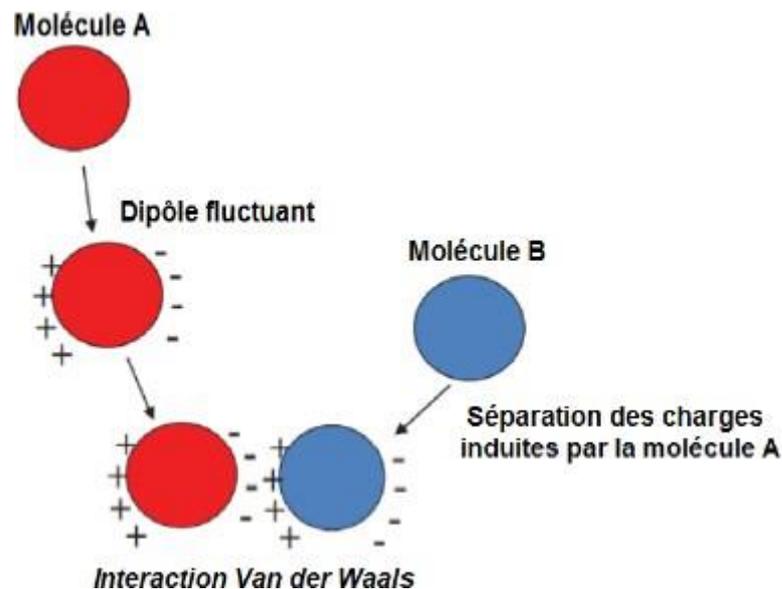


Figure II.10: Le phénomène physique responsable de la force Van der Waals: polarisation électrique des atomes ou molécules neutres [17].

Force de coulomb

Charles-Augustin de Coulomb découvre expérimentalement l'expression de la force électrique qui s'exerce sur deux charges électriques immobiles disposées sur des sphères. Coulomb réalise que le module de la force électrique dépend des paramètres suivants :

- La force électrique est proportionnelle au produit des deux charges q_1 et q_2 en attraction ou en répulsion.
- La force électrique est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges.
- La force électrique est proportionnelle à une constante k afin d'évaluer la force électrique en Newton.

L'expression scalaire de la loi de Coulomb en électrostatique est donnée par :

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} K \quad (\text{II.8})$$

Avec :

F_e : Force électrique en newton (N) ;

q_1 : première charge qui applique la force électrique sur la deuxième charge en coulomb.

q_2 : deuxième charge qui applique la force électrique sur la première charge en coulomb.

r : distance entre les deux charges ponctuelles en mètre (m) :

k : Constante de la loi de Coulomb, $k = 9.109 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ et ϵ_0 étant la permittivité du vide.

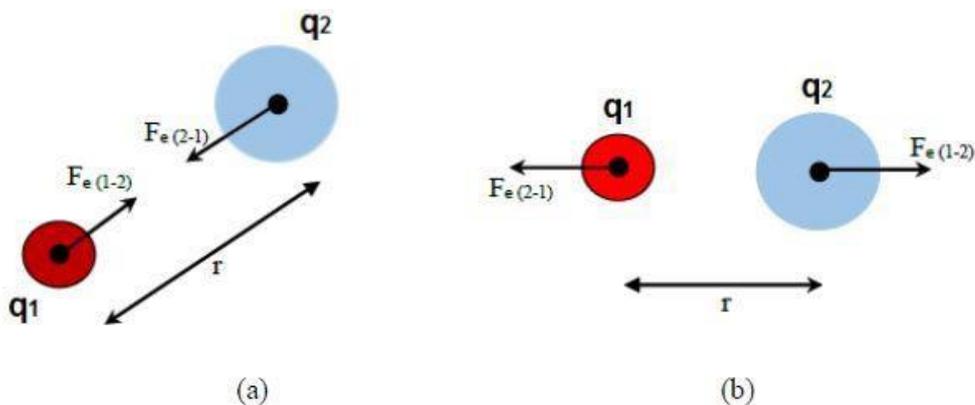


Figure II.11. Force de coulomb entre deux sphères chargées.

Forces aérodynamiques

Dans l'étude théorique du mouvement des particules en présence ou en absence de champ électrique, il faut tenir compte des forces aérodynamiques agissant sur ces particules. L'équation des forces agissant sur une particule chargée électriquement est la suivante Avec :

$$F_i = F_e(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad (\text{II.9})$$

F_i : La force d'inertie.

F_{el} : La force exercée par un champ électrique uniforme d'intensité E_0 sur une particule chargée, de charge Q , située à une distance x de l'électrode.

F_a : La force aérodynamique et F_g la force gravitationnelle.

Où:

F_i : Est la force d'inertie, F_{el} est la force exercée par un champ électrique uniforme d'intensité E_0 sur une particule chargée, de charge Q , située à une distance y de l'électrode. F_a : C'est la force aérodynamique et F_g la force gravitationnelle. La force d'inertie F_i est donnée par la relation :

$$F_i = (\rho_s - \rho_p) \cdot \frac{dv}{dt} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

v : La vitesse de particule

K_p : Coefficient de forme (pour les particules sphériques $K_p = 0,5$),

W : Le volume d'une particule ayant la densité ρ_s

ρ : Densité de l'air.

Où:

v : C'est la vitesse de particule, K : coefficient de forme (pour les particules sphériques $K = 0,5$).

W : Le volume d'une particule ayant la densité ρ_s ; ρ densité de l'air. La force aérodynamique s'exprime par la relation :

$$F_a = \frac{C_d \pi R^2 \rho v_r^2}{2} \quad (\text{II.11})$$

Cohésion due aux forces électrostatiques

La cohésion entre particules est due aux forces d'attraction de nature électrostatique qui prennent naissance lors du contact ou de la friction. Les charges électrostatiques formées au niveau des surfaces de contact se comporteront avec diverses façons en fonction de la nature du matériau: conducteur ou isolant. Lorsque deux isolants chargés de signe opposé se rencontrent,

la cohésion a lieu et persiste. Les électrons ne peuvent pas se répartir et les force d'attraction ne s'annulent pas. Les charges restent localisées aux points de contact et de friction avec le matériau responsable de l'électrisation

Adhésion due aux forces électrostatiques

L'adhésion des particules sur une paroi dépend des forces capillaires d'adhésion, des forces d'interaction électrostatique et de Van der Waals. Le mouvement d'une particule dans un système d'écoulement est donc le résultat des forces d'adhésion F_a (ou F_1) et de la force de pesanteur F_g (ou F_2).

Installations de séparation tribo-électrostatique des mélanges granulaires isolants

Principe de la Séparation tribo-électrostatique

La séparation tribo-électrostatique est un procédé de séparation à sec qui permet le tri des mélanges granulaires, sans aucun additif. Dans l'ensemble des installations tribo-électrostatiques le mélange granulaire est introduit dans une installation de tribo-électrisation (figure II.12). Dans cette installation les particules en plastique sont soumises à une agitation continue. Au cours de leurs mouvements, les particules du mélange entrent en collision entre elles et avec les parois de la chambre de tribo-électrisation. Les contacts particules/particules et particules/parois chargent électriquement les particules. Cette méthode de chargement est reconnue comme l'un des processus les plus économiques utilisés dans le chargement des particules en plastique destinées à la séparation électrostatique. Les particules chargées par tribo-électrisation sont soumises à l'action d'un champ électrostatique intense généré entre deux ou plusieurs électrodes d'un séparateur électrostatique [18].

Ce type de procédé est entièrement automatique et continu. Il permet d'obtenir des fractions d'une grande pureté pouvant dépasser les 99,5 %. Le procédé est caractérisé par sa faible consommation d'énergie ; un faible taux de défaillance et d'entretien et une capacité productive qui peut atteindre 2 T/h dans quelques installations industrielles. L'utilisation de ce type de procédé nécessite des étapes importantes [18] :

- Broyage.
- Dépoussiérage.
- Lavage et séchage.

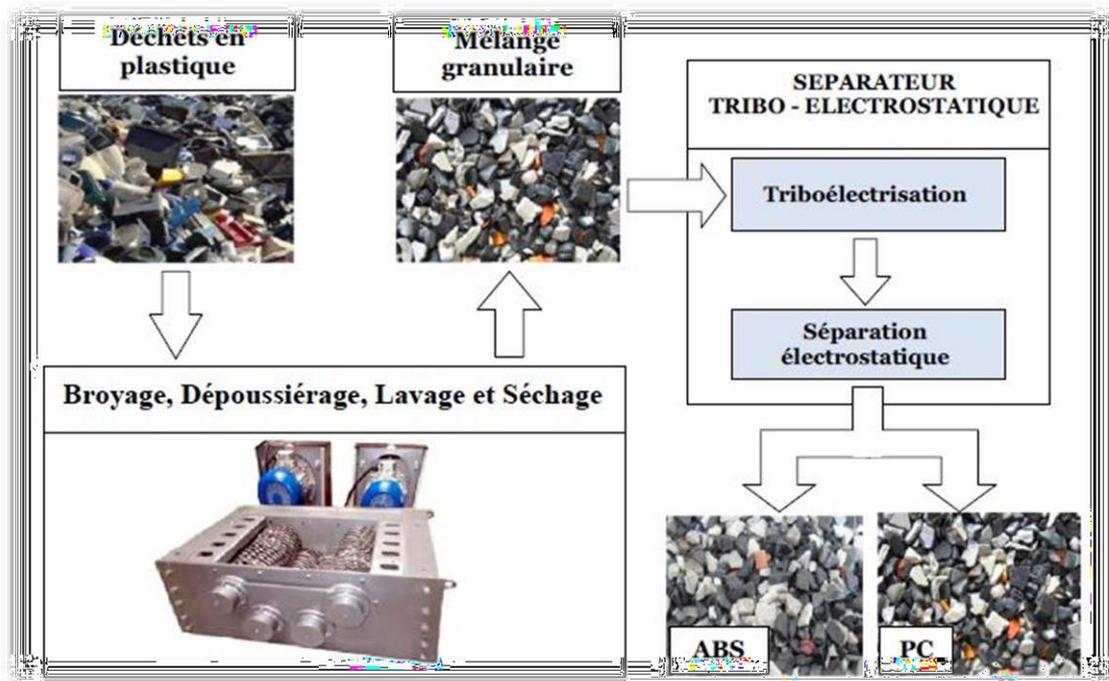


Figure II.12. Eléments de base d'une ligne de tri des déchets d'équipement électriques et Électronique DEEE [18].

Certains matériaux perdent ou obtiennent facilement leur charge. Ce qui permet l'introduction de la notion d'extraction de travail par les isolateurs à noter que le symbole de la charge portée par l'isolant en contact avec le placement, les autres isolateurs dépendent des valeurs respectives de ces deux ouvrages d'extraction Matériel. Le travail d'extraction est défini en tant que l'énergie nécessaire pour arracher un électron à partir de la surface des particules. Le tableau II.1 regroupe le travail d'extraction de quelques matériaux en plastique.

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

Tableau II.2. Valeurs du travail d'extraction de quelques polymères [18].

Séparateurs tribo-électrostatiques des mélanges granulaires

Il existe de nombreux systèmes de séparation pour le tri des matières plastiques. Le point commun entre ces dispositifs est la nécessité d'effectuer deux opérations séquentielles, la charge triboélectrique des particules, suivie de leur séparation.

Séparateur tribo-électrostatique à chute libre

Dans un séparateur électrostatique à chute libre (Figure II.13), les deux produits qui composent le mélange granulaire sont pré chargés par un dispositif triboélectrique, l'un avec une charge négative et l'autre avec une charge positive. Le mélange tombe alors dans un fort champ électrique horizontal créé entre les deux électrodes et situé dans une chambre isolante. Les particules chargées seront polarisées vers des électrodes avec des polarités de signe opposées.

Le séparateur électrostatique à chute libre est largement utilisé dans le tri et la purification des minerais de taille sous-millimétrique [18].

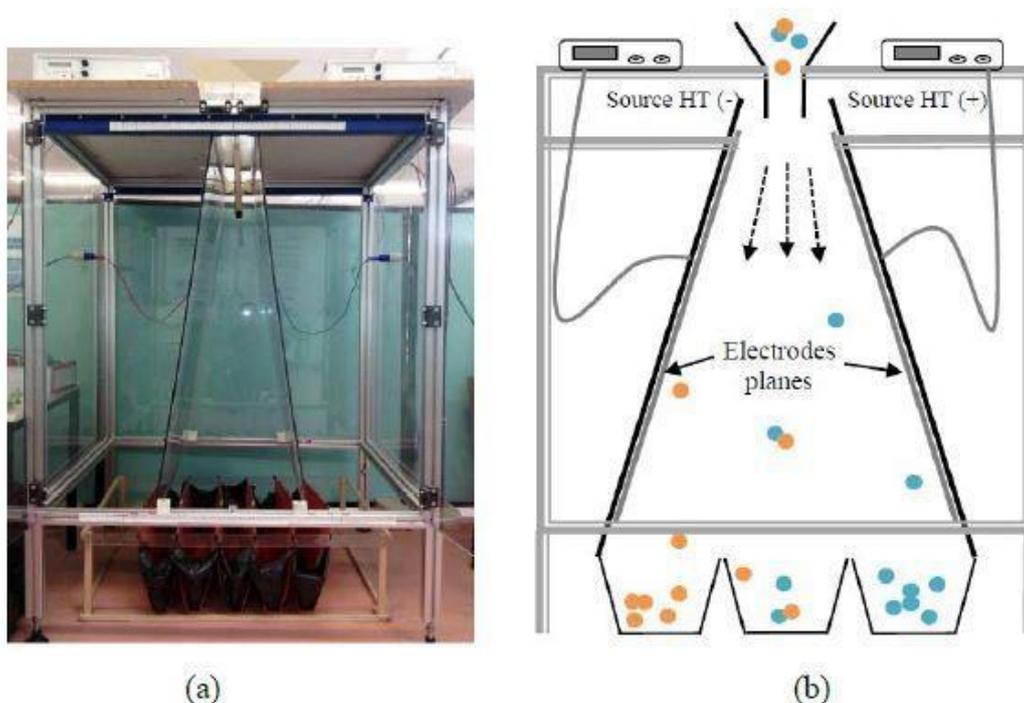


Figure II.13. Séparateur tribo-électrostatique à chute libre. (a): Photographie du dispositif; (b): Schéma du dispositif [12].

Séparateur tribo-électrostatique à tapis roulant

Il se compose de deux parties :

La première partie est utilisée pour le chargement triboélectrique, où l'introduction du mélange de particules est effectuée par un convoyeur vibrant ; les particules sont soumises à la gravité

et entrent en collision avec différentes parois, ce qui entraîne une charge triboélectrique, qui est le chargeur électrostatique.

La deuxième partie se compose d'un tapis roulant avec une bande isolante en néoprène mise à la terre, une électrode ovale connectée à une source d'alimentation CC haute tension (+) et un collecteur de particules.

Les particules sont chargées par un dispositif de chargement statique puis elles tombent sur un tapis roulant qui les transporte vers la zone de séparation. La séparation est effectuée par une électrode haute tension, qui attire les particules d'une polarité et repousse les particules de polarité opposée en raison de la force de coulomb.

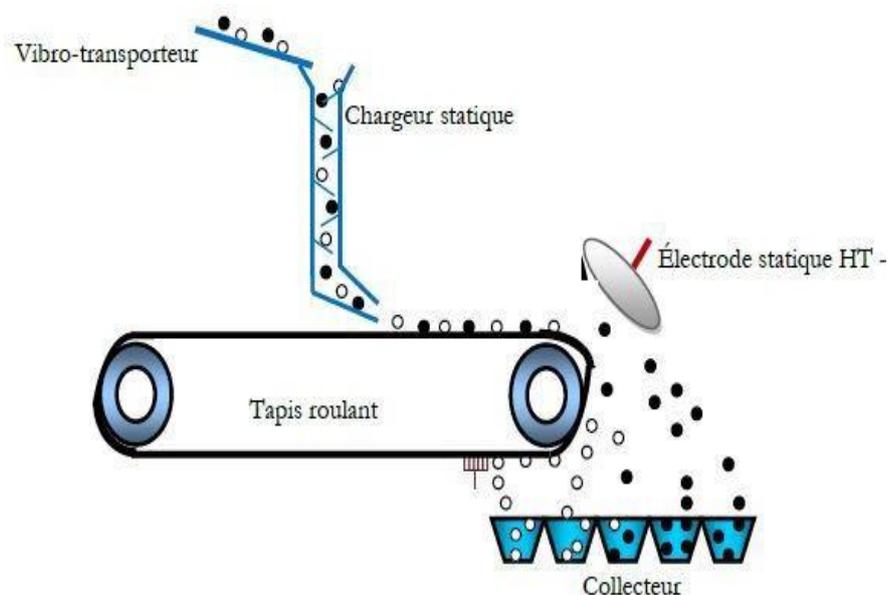


Figure II.14. Séparateur électrostatique à tapis roulant [18].

Séparateurs tribo-aéro-électrostatique pour les mélanges granulaires

Dans les séparateurs tribo-aéro-électrostatique Les granules sont chargés et séparés simultanément, le chargement et la séparation sont combinés en une seule opération.

Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses

La matière granulaire fluidisée est attirée par les électrodes des deux bandes transporteuses du tapis roulant, ils sont à base d'une matière conductrice (figure II.15), elles s'appuient à des tambours isolants, leur entraînement est assuré par des moteurs triphasés alternatifs, commandés par des variateurs de fréquence. Les particules chargées collent sur la surface des bandes contrairement polarisées, pour être transporté vers la zone de récupération [19] [20].

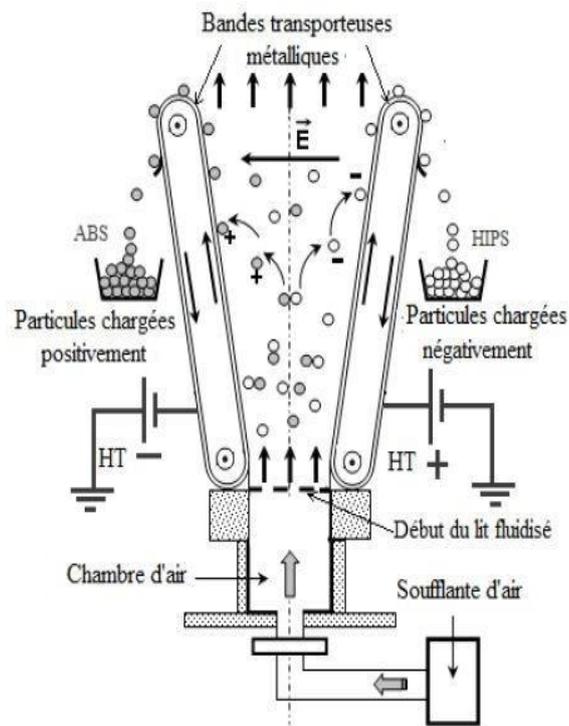


Figure II.15. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses [19].

Séparateur tribo-aéro-électrostatique à cylindres tournants

Ce dispositif a le même principe de fonctionnement que le séparateur tribo-aéro-électrostatique à bande transporteuse, la différence entre les deux procédés réside dans la forme des électrodes utilisées. Cette installation utilise des tambours conducteurs reliés à des arbres entrainés par des moteurs (figure II.16) dont le but est de diminuer la traversée des particules, d'augmenter sa robustesse, et réduire le coût du séparateur [18].

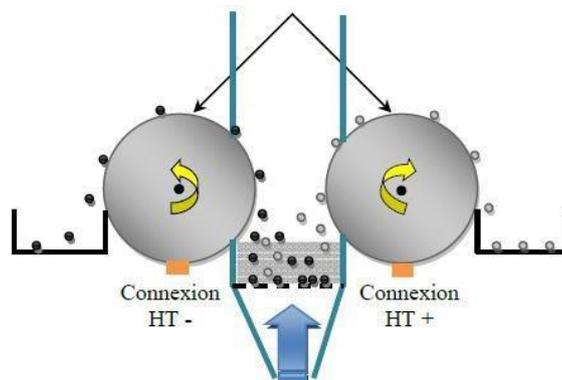


Figure II.16. Séparateur électrostatique à cylindres tournant [18].

On a aussi Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants, qui est une installation spécialement adaptée à la séparation des particules de plastique fines [21-22]. Deux disques métalliques sont montés sur un même arbre (figure II.17), entraîné par un moteur électrique, afin de les tourner dans un mélange de particules fluidisé. Les deux disques qui sont alimentés à deux sources de haute tension et de polarités opposées, soulèvent les particules chargées. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques.

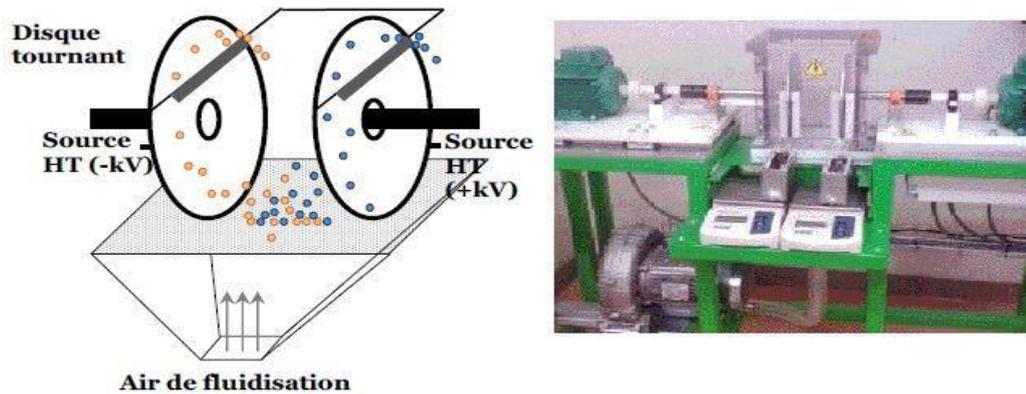


Figure II.17. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à Disques tournants [22].

Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales:

Deux électrodes verticales collées à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique isolante (figure II.18), vont attirer les particules de signe opposé et vont repousser celles de même signe après chargement dans un lit fluidisé, pour les dévier vers les collecteurs [18].

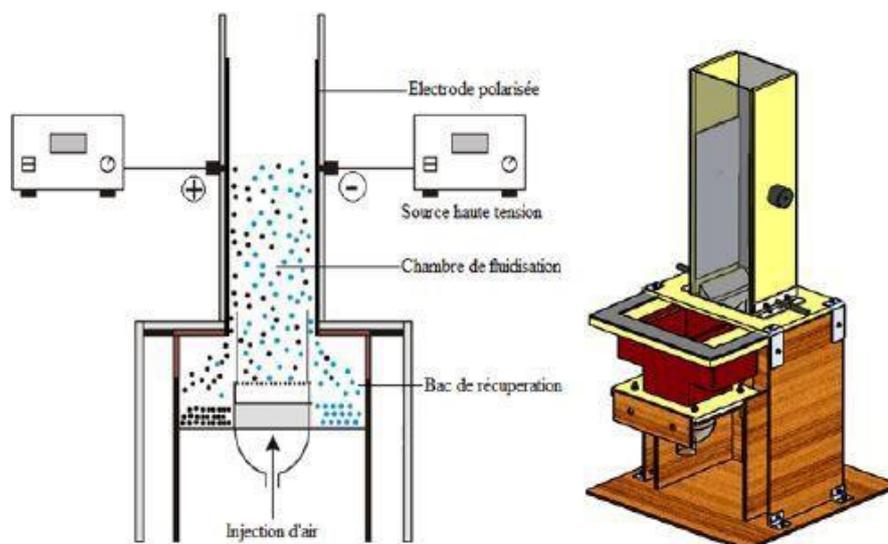


Figure II.18. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales [18].

Conclusion

Dans ce chapitre on a parlé sur les phénomènes électrostatiques qui sont dû à la présence de charges électriques, qui n'existent pas indépendamment du support matériel ; même les charges élémentaires portées par les électrons sont portées par des particules de matière. Ces charges sont soit des électrons, soit des ions positifs, soit des ions négatifs, et le phénomène régissant la tribo-électricité sont extrêmement complexes et difficiles à expliquer, et sont influencés par une variété de facteurs externes et internes. Plusieurs travaux de recherche ont été menés sur les dispositifs de chargement par friction et les séparateurs triboélectriques pour les déchets d'équipements électriques et électroniques, et leur efficacité a été démontrée dans des applications spécifiques.

Chapitre III

Les plans d'expérience

Aperçu historique

Les plans d'expériences sont issus de méthodes mathématiques et statistiques appliquées à l'expérimentation. Les premiers scientifiques à s'être posé le problème de l'organisation des essais sont des agronomes. Ils avaient en effet beaucoup de paramètres à étudier et n'avaient pas la possibilité de multiplier le nombre d'expériences. De plus, la durée des expériences constituait une contrainte supplémentaire forte [23].

Fisher, pour la première fois en 1925, proposa une méthode avec laquelle on étudiait plusieurs facteurs à la fois. Cette méthode fut reprise puis développée par des statisticiens et des mathématiciens qui définirent des tables d'expériences permettant de réduire considérablement le nombre d'expériences à effectuer sans diminuer la pertinence de la campagne d'essais [24].

Les grandes entreprises se sont ensuite intéressées à cette méthodologie dans le cadre de l'approche qualité à la suite des travaux du Docteur Taguchi. Il a fortement contribué à l'expansion de l'utilisation des plans d'expériences en milieu industriel au Japon dans les années 1960. Au cours de ces dernières années, cette méthodologie, du fait de la pertinence des informations apportées, s'est développée dans la plupart des secteurs d'activités [25].

Introduction

Les problèmes difficiles de l'organisation optimale ont toujours confronté l'expérimentateur, quel que soit son domaine d'étude. On peut poser la question : comment obtenir les bonnes informations dans les meilleurs délais et pour le moindre coût ?

Les scientifiques n'ont abordé ce sujet que depuis peu d'années. Les premiers qui se sont penchés sur ce problème sont des agronomes et des statisticiens. Les techniques et les notions qu'ils ont développées sont si générales qu'elles peuvent être utilisées dans tous les domaines. Cette science de l'organisation des essais est récente puisqu'elle a démarré avec les travaux de R.A. Fisher (début du vingtième siècle) [6].

Les plans d'expériences ont d'abord été utilisés en agronomie. Puis, peu à peu, ils ont été utilisés dans d'autres domaines techniques. Les chimistes les ont adaptés à leurs problèmes. Récemment, les responsables de la qualité ont découvert ces techniques et ils en font maintenant grand usage. L'universalité de ces méthodes devrait les faire employer dans de nombreux domaines [6].

La méthode des plans d'expériences est au moins trois à quatre fois plus efficace que les démarches habituelles de conduite des essais, c'est à dire qu'elle permet d'arriver aux mêmes résultats avec trois à quatre fois moins d'essais. Ajoutons que cette méthode apporte à l'expérimentateur un puissant outil de réflexion et d'analyse qui lui permettra de conduire son expérimentation avec sûreté et précision [6].

Définition du plan d'expérience :

Les plans des expériences (PEX) est une branche de la statistique appliquée axée sur l'utilisation de la méthode scientifique pour la planification, la réalisation, l'analyse et l'interprétation de données issues d'essais ou d'expériences contrôlés. PEX est une méthodologie mathématique utilisée pour planifier et mener efficacement une étude scientifique qui modifie simultanément les variables d'entrée (X) appelées Facteurs afin de révéler leurs effets sur une variable de sortie (ou plusieurs) (Y) appelée Réponse.

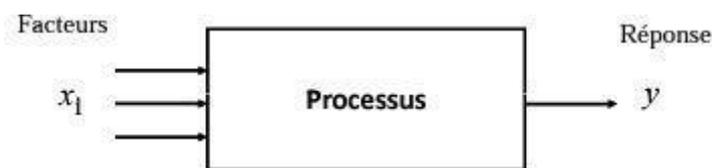


Figure III.1. Processus du plan d'expérience

en combinant plusieurs variables dans une étude au lieu de créer une étude pour chacune, le nombre d'essais requis sera considérablement réduit et une meilleure compréhension du processus est obtenue. Ceci est en contraste direct avec l'approche typique d'un facteur à la fois (UFAF), qui limite la compréhension et gaspille les données. En outre, les études UFAF ne peuvent pas assurer la détection des effets de combinaisons des facteurs (une condition qui sera ultérieurement définie comme une interaction).

Principe du plan d'expérience

Son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est à dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats [26].

On peut le plus souvent schématiser l'étude d'un phénomène, de la manière suivante : on s'intéresse à une grandeur Y que nous appellerons par la suite réponse qui dépend d'un grand nombre de variables, x_1, x_2, \dots, x_n que nous appellerons facteurs.

La modélisation mathématique consiste à trouver une fonction f telle que $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Une méthode classique d'étude consiste en la mesure de la réponse Y pour plusieurs valeurs de la variable x_1 tout en laissant fixe la valeur des $(n - 1)$ autres variables. On itère alors cette méthode pour chacune des variables. Ainsi, par exemple, si nous avons 4 variables et si l'on décide 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'expérience à effectuer sans pour autant perdre la qualité des résultats recherchés [27].

Plans factoriels complets à deux 2^k (modèle du 1^{er} degré)

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

Plans complets à deux facteurs

Le cas simple du plan est 2^2 , nous allons expliquer cette notation :

- Le 2 en exposant signifie qu'il y a 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 .

On peut donner une représentation géométrique du domaine d'étude. Chaque point de ce domaine représente des conditions de fonctionnement possible et est donc une expérience que l'opérateur peut réaliser. Le problème fondamental de l'expérimentateur est le choix de meilleures expériences. En l'absence de toute information sur la fonction f , on se donne, a priori, une loi d'évolution de la réponse en fonction des variables. Comme on ne désire effectuer, dans un premier temps, que deux essais par facteur, soit deux niveaux par facteur, on adopte une loi du premier degré par rapport à chaque variable. Cette loi est la suivante : [6]

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 \quad (\text{III.1})$$

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.

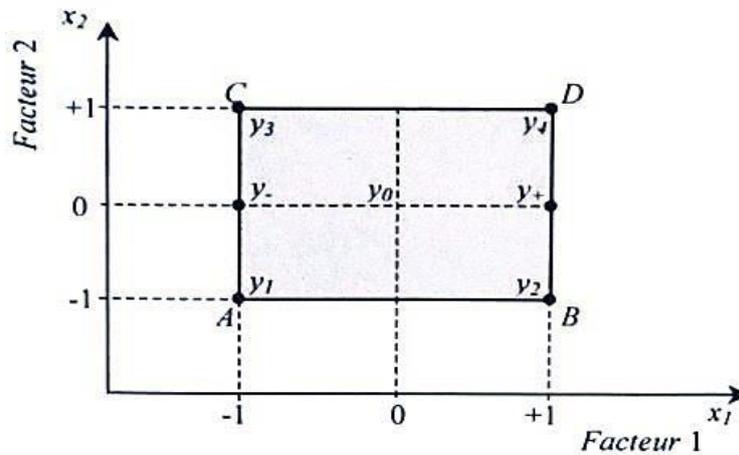


Figure III.2. Définition du domaine d'étude [6].

La figure (III.1) 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.

Nous allons expliquer la construction de la matrice d'expérience du plan 2^2 associée à la figure (III.1), pour montrer la correspondance entre deux représentations.

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

Tableau III.1. Matrice d'expérience [6].

La matrice d'expérience est composée de deux tableaux : Le premier définit les essais à réaliser. Le premier sous tableau comprend trois colonnes ; la première identifie les essais (1, 2, 3, et

4) ; la seconde et la troisième indiquent les coordonnées des points représentatifs des expériences prévues (Tableau III.1).

Le deuxième tableau désigne le domaine d'étude. Le deuxième sous tableau indique, en unité courante, les valeurs des niveaux haut et bas de chacun des facteurs. Par exemple : nous avons indiqué des tensions et 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 III.1).

Effet d'un facteur

L'expérimentateur effectuant le test à quatre valeurs de 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_3 En remplaçant dans la relation (III.1) les x_i par leur valeur du tableau III.1 on obtient :

$$y_1 = a_0 - a_1 - a_2 + a_{12} \quad (\text{III.2})$$

$$y_2 = a_0 + a_1 - a_2 - a_{12} \quad (\text{III.3})$$

$$y_3 = a_0 - a_1 + a_2 - a_{12} \quad (\text{III.4})$$

$$y_4 = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 \quad (\text{III.5})$$

Après avoir résolu le système on aura :

$$a_0 = \frac{1}{4} (+y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \quad (\text{III.6})$$

$$a_1 = \frac{1}{4} (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{III.7})$$

$$a_2 = \frac{1}{4} (-y_1 - y_2 + y_3 + y_4) \quad (\text{III.8})$$

$$a_{12} = \frac{1}{4} (+y_1 - y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{III.9})$$

▪ La signification de a_0 :

Si on donne à x_1 et à x_2 la valeur zéro, on définit le centre du domaine d'étude. Alors la relation (III.1) devient :

$$y_0 = a_0 \quad (\text{III.10})$$

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

▪ **La signification de a_1 :**

On donne la valeur zéro à x_2 , la relation (III.1) devient :

$$y = a_0 + a_1x_1 \quad (\text{III.11})$$

Après, on donne maintenant respectivement -1 et +1 à x_1 , on obtient alors les deux réponses y_- et y_+ :

$$y_- = +a_0 - a_1 \quad (\text{III.12})$$

$$y_+ = +a_0 + a_1 \quad (\text{III.13})$$

D'où :

$$a_1 = \frac{1}{2}(+y_+ - y_-) \quad (\text{III.14})$$

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 (fig. III.1). Aucune expérience n'a été réalisée en ce point mais, si l'on utilise les relations (III.6) et (III.7), on vérifie que, y_- est la moyenne des réponses au niveau bas du facteur 1, en effet [6] :

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

Ce qui donne :

$$y_- = \frac{1}{2}(+y_1 + y_3) \quad (\text{III.16})$$

On montrerait de même que y_+ est la moyenne des réponses au niveau haut du facteur 1 :

$$y_+ = \frac{1}{2}(+y_2 + y_4) \quad (\text{III.17})$$

Alors a_1 est la demi différence entre ces deux moyennes, on peut dire aussi qu'il représente la moitié de la variation de la réponse quand on passe du niveau bas au niveau haut du facteur 1 (fig.III.2). [6]

La signification de coefficient a_1 est donnée par ce résultat. C'est la variation de la réponse due au facteur 1 seul, quand on passe du centre du domaine d'étude au niveau haut de ce facteur ; a_1 s'appelle l'effet du facteur 1. [6]

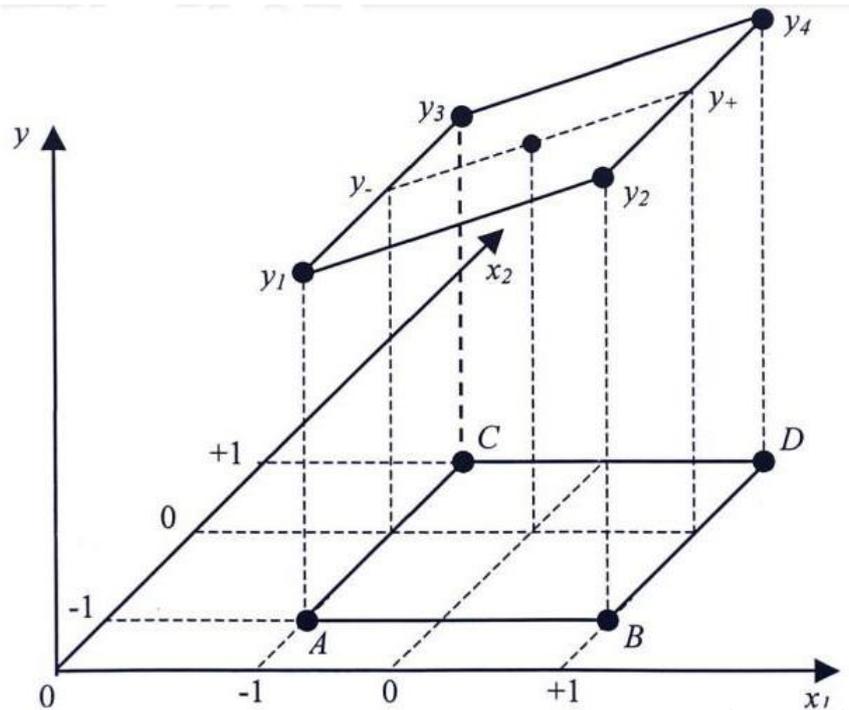


Figure III.3. Représentation géométrique tridimensionnelle d'un plan 2^2 et de la surface de réponse correspondante [6]

On démontrerait 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 (III.3) où l'on fait appel au plan de coupe yox_1 passant par $x_2 = 0$ pour le facteur 1. [6]

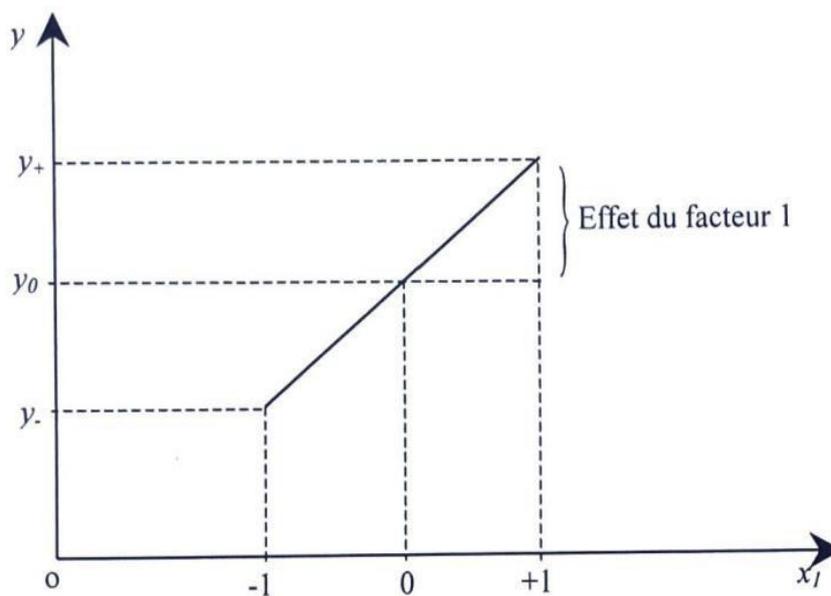


Figure III.4. Représentation de l'effet d'un facteur dans le plan vertical (Fig. III.2) passant par x_2 [6]

Interaction entre deux facteurs

L'effet d'un facteur a été défini au niveau de zéro de l'autre facteur. Mais on peut aussi définir l'effet d'un facteur pour un autre niveau de l'autre facteur. En particulier, on peut 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 du facteur 2 et de l'effet du facteur 1, e_- , au niveau bas du facteur 2. [6,28]

On a :

$$E_{12} = \frac{1}{2}(e_+ - e_-) \quad (\text{III.18})$$

Si l'on compare la valeur de E_{12} à celle de a_{12} , relation (III.9) on constate qu'elle lui est égale. Si l'on faisait le même calcul pour le facteur 2, en prenant les niveaux haut et bas du facteur 1, on trouverait que l'interaction est la même et qu'elle est égale, elle aussi, à a_{12} . [6]

Calcul de l'effet d'un facteur

Reprenons la formule (III.7) qui donne l'effet du facteur 1 :

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

On constate :

- ✓ 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'expérience, soit - + - +.
- ✓ Qu'il y a un coefficient, (ici 1/4), dont le dénominateur est égal au nombre d'expérience effectuées.

On remarque 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'expérience.

Le calcul pratique d'un effet est le suivant : on multiplie chaque réponse par le signe correspondant de la colonne du facteur : on additionne les produits et l'on divise la somme par le nombre d'expérience. [6]

Matrice de calcul des effets

Nous venons de voir que les signes de la matrice d'expérience permettent de calculer l'effet. Mais il faudrait pouvoir calculer aussi la moyenne de l'interaction. [6]

- **Calcul de la moyenne :**

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

- **Calcul de l'interaction :**

La suite des signes de la relation (III.9) est + - - +. Chacun de ces signes provient du produit x_1x_2 figurant dans la relation (III.1). On peut retrouver cette suite de signes de la manière suivante ; on écrit, en colonne les signes correspondant à x_1 et à x_2 , puis on applique 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'expérience, il est facile de construire la matrice de calcul des effets (tableau III.2) en ajoutant une colonne de signe + pour la moyenne et en calculant celle de l'interaction par la règle des signes.

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

Tableau III.2. Matrice de calcul des effets [6].

Plan factoriel 2^k

Il s'agit de plans pour lesquels on étudie k facteurs prenant chacun deux niveau. 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. [28]

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{aijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum a_{ij\dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (\text{III.21})$$

Un plan 2^k comporte 2^k point expérimentaux qui se situent aux 2^k sommets d'un hyper cube de k dimensions. Le modèle mathématique contient 2^k coefficients qui sont les inconnus. L'ensemble des résultats d'un plan 2^k conduit donc à un système de 2^k équation à 2^k inconnues, si l'on ne tient pas compte des erreurs expérimentales. Ce système peut se mettre sous la forme matricielle : [6]

$$Y = X_a \quad (\text{III.22})$$

Avec :

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

A : vecteur ayant composante la moyenne, les effets des facteurs et toute les interactions, et représenté par une matrice colonne ($2^k, 1$), ces composantes sont les inconnus que l'on cherche à déterminer.

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

Si nous reprenons le système du plan 2^2 du paragraphe III.5.1, la relation (III.22) prend la forme suivante :

$$\begin{array}{l} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{array} \begin{array}{ccccc} +1 & -1 & -1 & +1 & a_0 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & a_1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & a_2 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & a_3 \end{array} \quad (\text{III.23})$$

La matrice X comporte une colonne +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 . En effet d'après *Hadamard* on a, pour ce type de matrice la relation suivante : [6]

$$X^t X = nI \quad (\text{III.24})$$

Avec n multiple de 4 et I représente la matrice unité. L'opération compliquée de l'inversion d'une matrice se réduit alors à la transposition de X. soit un simple échange de lignes et de colonnes. Le calcul de l'inconnue a s'effectue à partir de la relation (iv-22) en tenant compte de la relation :

$$\begin{aligned} X^t Y &= X^t X a \\ X^t Y &= nI a \\ a &= \frac{1}{n} X^t Y \end{aligned} \quad (\text{III.25})$$

Cette relation est valable pour tout le plan factoriel complet. Chaque élément de a est donc de la forme :

$$a_1 = \frac{1}{n} [\pm y_1 \pm y_2 \pm y_3 \pm \dots \pm y_n] \quad (\text{III.26})$$

La relation semblant à (IV-6) (IV-7) (IV-8) (IV-9) nous permet de généraliser le processus de calcul que nous avons décrit pour le plan 2^2 pour tous les plans 2^k .

Validation du modèle du premier degré

Le modèle du premier degré permet de calculer la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude. Il est facile de comparer cette valeur à la mesure réelle effectuée en ce point. [6]

- ✓ Si ces deux valeurs diffèrent peu, on considère le modèle du 1^{er} degré comme valide.
- ✓ Si ces deux valeurs diffèrent trop, il faut adopter un modèle du second degré.

On réalise alors des expériences supplémentaires pour déterminer tous les coefficients de ce nouveau modèle.

Au lieu d'effectuer une seule mesure au centre du domaine on peut en faire plusieurs cela permet d'obtenir une estimation de l'erreur expérimentale.

On remarquera que des mesures au point central introduisent un niveau supplémentaire d'étude des facteurs il y a maintenant trois niveaux par facteur : -1 ; 0 ; +1 [6, 28,29].

Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une étude théorique sur le plan d'expérience, on a pris comme exemple : le plan factoriel complet a deux niveau 2^k . Ce dernier a été utilisé ensuite pour déterminer les valeurs optimales du fonctionnement du séparateur électrostatique.

La méthode des plans d'expériences a pris un essor considérable avec le développement de l'informatique et la puissance de calcul qui l'accompagne dans l'optimisation des procédés par des logiciels tel que le logiciel MODDE5.0 capable de faciliter d'une façon significative des calculs parfois trop lourds.

Chapitre IV
Etude d'un séparateur
Electrostatique à chute libre

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons le processus de séparation des mélanges granulaires composé de matériaux de récupération ABS et HIPS qui sont ensuite broyés à des tailles granulaires de 2 mm à 5 mm. La séparation d'un mélange granulaire isolant ABS et HIPS, se fait sur le séparateur tribo-électrostatique à chute libre voir figure IV.1. Il est composé de deux parties, la première partie sert au chargement des matériaux par un dispositif vibratoire couvert d'un matériau PET (2mm) et de la deuxième partie qui est la chambre de séparation composée par deux électrodes parallèles disposées verticalement, son principe inclut l'action combinée des forces gravitationnelle et électrique afin de séparer ces mélanges granulaires isolants dans leurs compartiments respectifs. Une analyse par les plans d'expériences a été faite sur le dispositif tribo-chargeur.

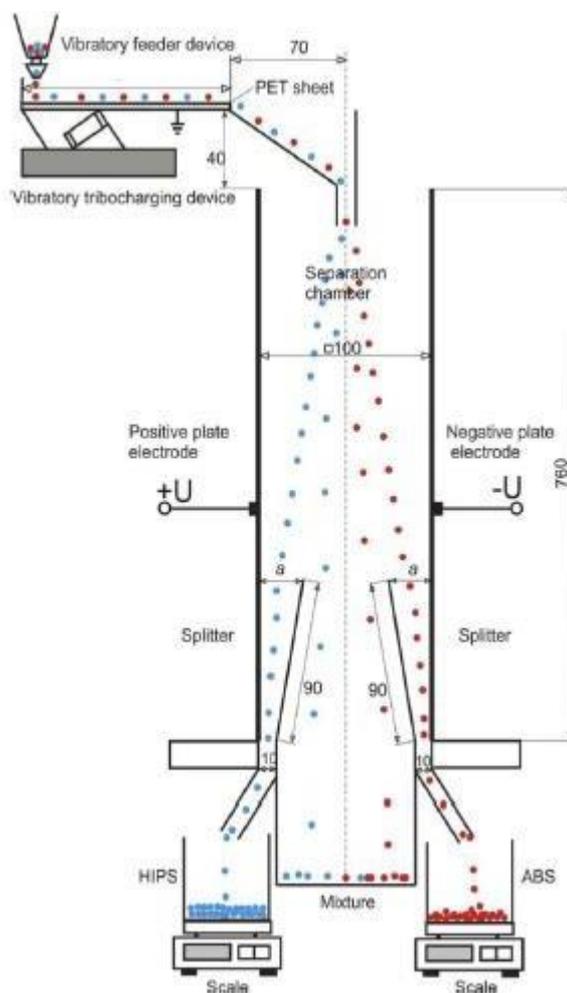


Figure IV.1. Représentation graphique du séparateur à chute libre.

Etude du processus de chargement par vibration

Les chargements par vibration sont une classe de dispositifs qui ont déjà fait l'objet d'investigations rigoureuses, en relation avec le développement de nouveaux procédés de séparation électrostatique. Cependant, l'identification de leurs conditions de fonctionnement optimales reste un enjeu critique pour

l'application industrielle des dispositifs de tribo-charge vibratoire [31].

L'objectif est de formuler un ensemble de recommandations concernant le choix des paramètres de réglage à effectuer pour procéder au chargement triboélectrique (Aucune procédure standard n'est disponible pour maximiser l'efficacité du processus . Parmi ces paramètres on trouve : la longueur du plateau L [cm] pour étudier ce paramètre, le même matériau a été réutilisé dans n expériences sur le tribo-chargement de sorte que $L = n * l_0$. La vitesse de transport des granules sur la plaque vibrante v [cm/s] et le débit d'alimentation ϕ [g/s] des granules sur le dispositif tribo-chargeur de type vibratoire voire figure IV.2.

IV.3. Dispositif expérimental :

Le dispositif d'électrification représenté sur la figure IV.2 par vibration, est constitué d'un vibreur de type Vibra France, modèle APB4=30 qui est constitué d'un plateau métallique en acier inoxydable recouvert d'un matériau isolant de type polyéthylène téréphtalate (PET), de longueur $l_0= 230$ mm, la largeur $l=100$ mm, et la hauteur $h=30$ mm. Afin d'éviter l'accumulation de charge, le plateau métallique vibrant est mis à la terre. L'amplitude des vibrations v (cm/s) (la vitesse de transport des granules sur la plaque vibrante) peut être ajustée par un potentiomètre.

Un deuxième alimentateur vibrant de type Fischer Bioblock, modèle DR 100 (1), est utilisé pour contrôler le taux d'écoulement ϕ [g/s]] des granulés d'ABS et HIPS sur la feuille de PET. La matière plastique est chargée en raison des collisions entre les granulés et entre les granulés et la feuille de PET. La charge acquise sur le plateau vibrant est mesurée en recueillant les granules par un seau de Faraday connecté à un électromètre électronique (Keithley Instruments, modèle 6415) représenté sur la figure en fonction des paramètres de réglage du dispositif de chargement.

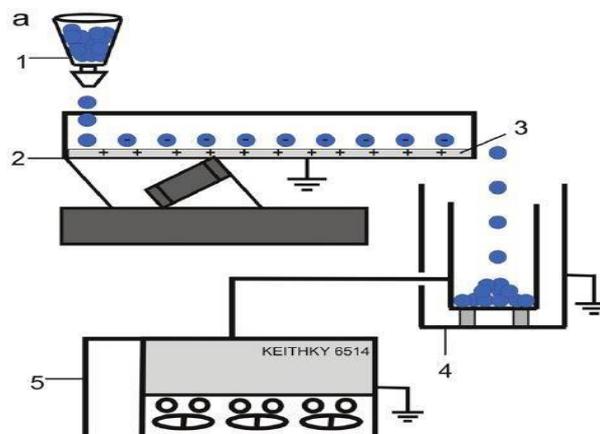


Figure IV.2. Représentation schématique du dispositif expérimental :

- 1 - Dispositif d'alimentation vibrant, 2- Dispositif de chargement par vibrant tribo-chargeur, 3- feuille de PET couvrant le plateau vibrant, 4- seau de Faraday, 5- électromètre.



Figure IV.3. Photographie du montage de mesure de la charge électrique: (1) Seau de Faraday, (2) Electromètre numérique (Keithley - modèle: 6514).

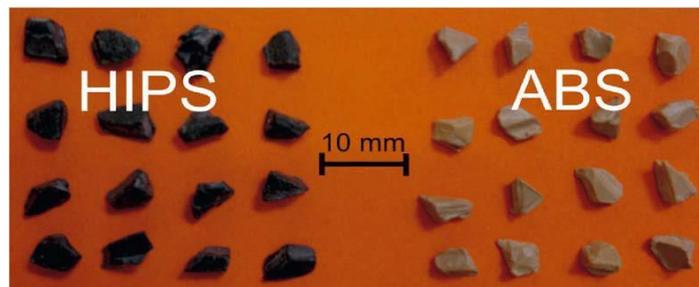


Figure IV.4. Photographie des produits utilisés.

A fin de déterminer si les deux matériaux granulaire (figure IV.4) peuvent être chargé sur la plaque vibrante une expérience a été faite par l'équipe de recherche, qui consiste au chargement de 100 g ABS et 100g HIPS séparément sur la plaque vibrante couverte de PET. Le graphe ci-dessous représente les résultats qui ont obtenus [31].

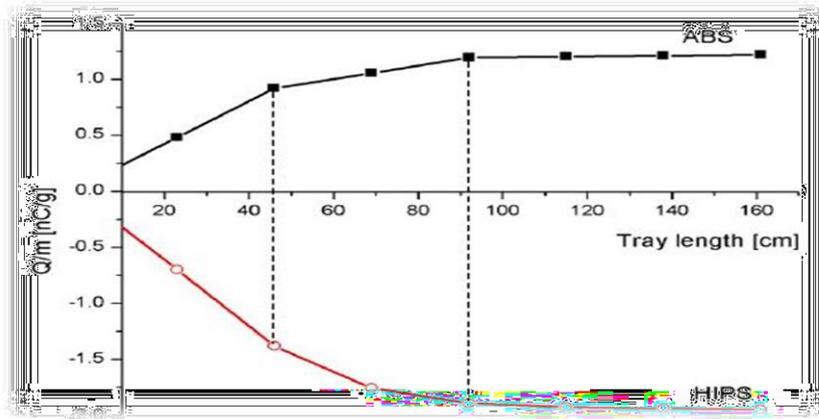


Figure IV.5. Rapport charge/masse des granules d'ABS et de HIPS en fonction de la longueur du plateau vibrant ($v = 7.7 \text{ cm/s}$, $F = 3.8 \text{ g/s}$). Chaque valeur est la moyenne de trois mesures résultats obtenu par Gabériala [31].

On constate que les granules ABS se chargent positivement en contact avec la plaque vibrante et les granules HIPS se charge négativement en contact avec la plaque vibrante couverte de PET. Ce qui nous amène à dire que les deux matériaux granulaire peuvent être séparés en utilisant les matériaux PET pour leur chargement triboélectrique.

La méthodologie des plans d'expérience [30] a été utilisée afin d'évaluer les effets des facteurs qui influencent la charge accumulée par les granules de plastique sur le plateau d'alimentation vibrant et pour déterminer les valeurs optimales des variables de contrôle du processus de tribo-charge.

Détermination du domaine expérimental

Des expériences préliminaires ont été réalisées afin d'identifier le domaine de variation de la vitesse de transport v et de la vitesse d'alimentation ϕ .

Ces deux facteurs doivent être corrélés car une vitesse d'alimentation trop élevée et une vitesse de transport trop lente produisent une multicouche de granules sur le plateau vibrant, de sorte que les granules au-dessus ne puissent entrer en contact avec la feuille de PET à charger par effet triboélectrique.

Au contraire, avec une vitesse d'alimentation plus faible et une vitesse de transport élevée, le taux de couverture du plateau est réduit et le processus de tribo-chargement devient inefficace.

Une vitesse de transport minimale $v = 6 \text{ cm/s}$ assure une monocouche de granules sur le plateau du tribo-chargeur (taux de couverture 100%), à la vitesse d'alimentation maximale $\phi = 5 \text{ g/s}$. A une

vitesse d'alimentation minimale $\phi = 2,6 \text{ g/s}$ et une vitesse de transport maximale $v = 9,4 \text{ cm/s}$, seuls 35 % de la surface du plateau sont recouverts de granulés.

Afin d'identifier le domaine de variation du plateau d'alimentation vibrant L, une série d'expériences a été réalisée avec des granulés ABS et HIPS à des valeurs constantes de vitesse de transport et de vitesse d'alimentation (valeurs moyennes du domaine de variation, $v = 7,7 \text{ cm/s}$, $\phi = 3,8 \text{ g/s}$). Les résultats sont présentés sur la Figure IV.4 pour la longueur du plateau. Les conditions ambiantes étaient stables ($T = 21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$; $RH = 60 \% \pm 2 \%$).

Les granulés acquièrent une charge plus importante lorsque le plateau est plus long, mais présentent une tendance à la saturation pour une longueur de plateau supérieure à $L=92 \text{ cm}$. Pour la plaque vibrante de longueur 46 cm, la charge acquise par les granulés ABS et HIPS représente 77 % respectivement 73 % de la charge sur la plaque vibrante de longueur 92 cm. Sur la base de ces résultats, le domaine de variation de la longueur du plateau a été établi entre 46 cm et 92 cm.

Le résultat obtenu pour les domaines de variation des variables est représenté sur le tableau IV.1 :

Vitesse de déplacement v [cm/s]	6 cm/s – 9.4 cm/s
débit d'alimentation ϕ [g/s]	2.6 g/s – 5 g/s
Longueur de la plaque vibrante	46 cm - 92 cm

Tableau IV.1. Résultats obtenu pour les domaines de variation des variables.

Une série d'expériences a été réalisée avec des échantillons de 100 g de chacune de ces classes de granulés ABS et HIPS ont été chargés séparément sur le dispositif de tribo-chargeur. Les résultats obtenus sont représentés sur la dans le tableau IV.2 :

N°	Vitesse de déplacement v [cm/s]	Débit d'alimentation Φ [g/s]	Longueur l (cm)	Charge/mass ABS Q/m [nC/g]	Charge/mass Q/m [nC/g]
1	6	2.6	46	0.944	-1.518
2	9.4	2.6	46	0.706	-1.1665
3	6	5	46	0.913	-1.536
4	9.4	5	46	0.688	-1.1643
5	6	2.6	92	0.9377	-2.1555
6	9.4	2.6	92	1.0918	-1.836
7	6	5	92	1.0999	-2.1172
8	9.4	5	92	1.0928	-1.819
9	6	3.8	69	0.9257	-1.882
10	9.4	3.8	69	1.041	-1.729
11	7.7	2.6	69	0.9342	-1.682
12	7.7	5	69	0.9587	-1.625
13	7.7	3.8	46	0.9226	-1.382
14	7.7	3.8	92	1.1941	-1.8935
15	7.7	3.8	69	1.056	-1.742
16	7.7	3.8	69	1.046	-1.844
17	7.7	3.8	69	1.0632	-1.6872

Tableau IV.2. Rapport charge/masse [Q/m] de l'ABS et HIPS, pour les 17 cycles du plan expérimental composite.

la méthodologie des plans d'expérience [30] a été utilisée afin d'évaluer les effets des facteurs qui influencent la charge accumulée par les granulés de plastique sur le plateau d'alimentation vibrant et pour déterminer les valeurs optimales des variables de contrôle du processus de tribo-chargeur.

Un plan composite centré a été adopté [30] afin de dériver un modèle polynomial du second ordre corrélant la réponse y (soit le rapport charge/masse [Q/m]) avec les variables considérées dans l'étude.

Pour les facteurs considérés, c'est-à-dire la vitesse d'alimentation du matériau ϕ , la vitesse de transport v et la longueur du plateau, le modèle quadratique de la réponse y a la forme générale :

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 v^* + \alpha_2 \Phi^* + \alpha_3 l^* + \alpha_{11} v^{*2} + \alpha_{22} \Phi^{*2} + \alpha_{33} l^{*2} + \alpha_{12} v^* \Phi^* + \alpha_{13} v^* l^* + \alpha_{23} \Phi^* l^* \quad (\text{IV.1})$$

L'analyse des résultats expérimentaux a été réalisée avec le programme MODDE 5.0 [30] (Umetrics, Umea, Suède), qui calcule les coefficients a_{ij} du modèle mathématique, dessine les contours de réponse, identifie les meilleurs ajustements des paramètres pour optimiser le processus. Le programme évalue deux critères statistiques : la qualité de l'ajustement R^2 et la qualité de la prédiction Q^2 . Un bon modèle a des critères R^2 et Q^2 avec la valeur numérique proche de l'unité. Afin de valider le point de consigne recommandé par MODDE 5.0, une expérience de séparation électrostatique a été réalisée sur un équipement de chute libre standard.

Résultat et discussion

Les modèles mathématiques des réponses Q/m représenté sur tableau IV.3 ont été obtenus avec MODDE 5.0 en utilisant les données des résultats obtenus des tableaux IV.2.

ABS	Q/M
	$R^2 = 0.997$
	$Q^2 = 0.997$
	$\frac{Q}{m} = 1.05 - 0.02v^* + 0.12\Phi^* + 0.13l^* + 0.006v^{*2} - 0.10\Phi^{*2} + 0.09v^*l^* + 0.04\Phi^*l^*$
HIPS	$R^2 = 0.998$
	$Q^2 = 0.980$
	$\frac{Q}{m} = -1.7 + 0.16v^* + 0.009\Phi^* - 0.31l^* - 0.01v^{*2} + 0.053\Phi^{*2} + 0.0036l^{*2} - 0.00013v^*\Phi^* - 0.0131v^*l^* + 0.0088\Phi^*l^*$

Tableau IV.3. Modèles mathématiques de Q/m et h obtenus avec MODDE 5.0.

Influence du paramètre débit du dépôt des granules sur la plaque vibrante ϕ

Selon le modèles, le débit de dépôt des granules ABS sur la plaque vibrante $\phi = 3.8$ g/s nous donne un rapport charge masse $Q/m = 1.05$ nC/g (Figure.IV.5.a). Pour les granules HIPS (figure IV.5.b) le meilleur rapport charge masse qui est égale $Q/m = -1.7$ nC/g est obtenu pour un débit de dépôt des granules de HIPS sur la plaque vibrante pour $\phi = 3.8$ g/s. Ceci peut être explique par le fait que les granules ABS et HIPS rentrent en contact de façon adéquate sur plaque vibrante et que le transfert de charge entre la plaque vibrante couverte de PET et les granules ABS ou HIPS s'est fait de manière efficace.

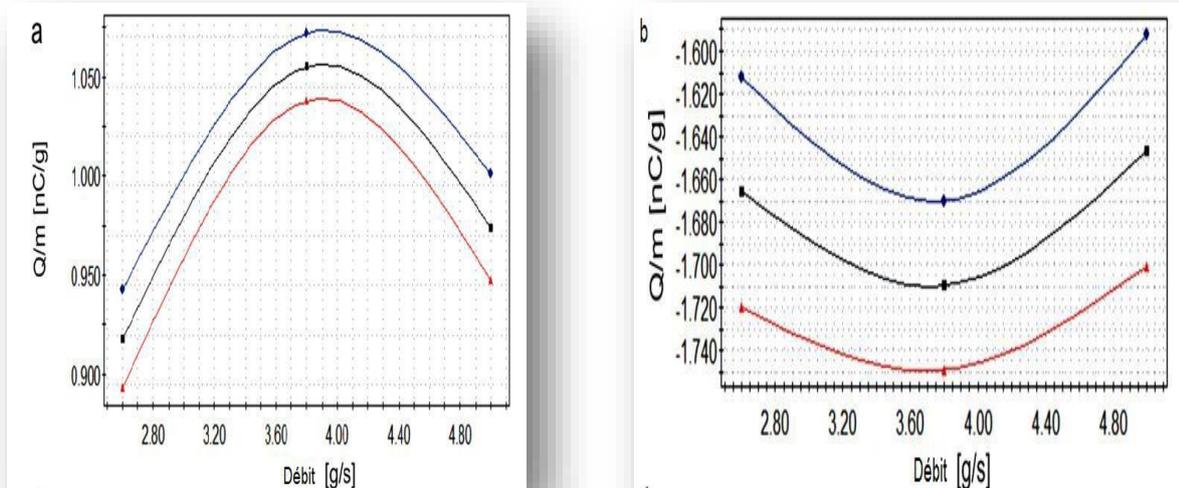


Figure IV.6. Représentation graphique Q/m de l'ABS (a) et HIPS (b) prédits par MODDE 5.0 en fonction du débit de dépôt des granules ϕ , Les autres variables sont maintenues égales aux valeurs centrales : $v = 7.7$ cm/s, $L = 69$ cm. Les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de confiance à 95%.

Influence du paramètre de la longueur de la plaque vibrante L

Sur les figure IV.6.a pour ABS et figure IV.6.b pour HIPS, on constate le rapport charge masse Q/m augmente linéairement avec l'augmentation de la longueur de la plaque vibrante L . on obtient un meilleur rapport charge masse de $Q/m = 1.05$ nC/g pour ABS et $Q/m = -2$ nC/g pour une longueur de $L = 92$ cm Ceci est dû à la répétition des contacts des granules sur la plaque vibrante.

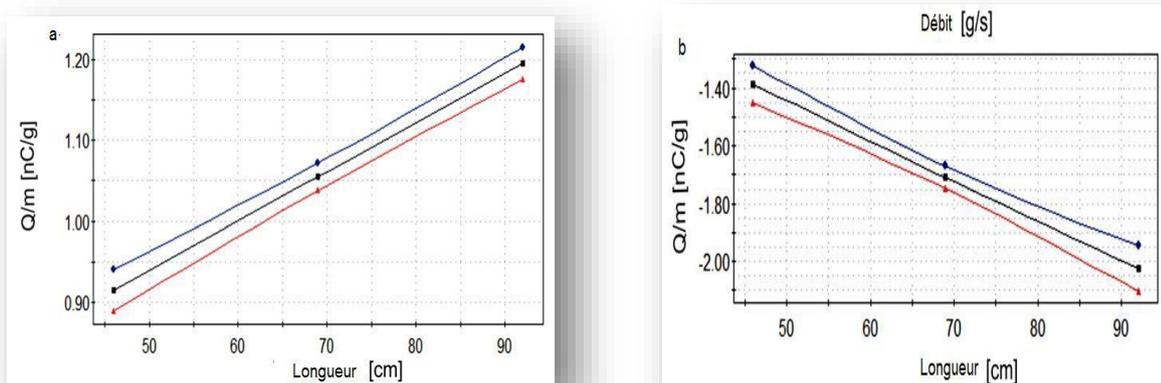


Figure IV.7. Représentation graphique Q/m de l'ABS (a) et HIPS (b) prédits par MODDE 5.0 en fonction de la longueur de la plaque vibrante, Les autres variables sont maintenues égales aux valeurs centrales : $v = 7.7$ cm/s, $\phi = 3.8$ g/s cm. Les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de confiance à 95%.

Influence du paramètre vitesse de déplacement des granules sur la plaque vibrante v

Le rapport charge masse des granules d'ABS et HIPS présente diminution avec l'augmentation de la vitesse de transport v (figure. IV.7.a) et (figure. IV.7.b). A une vitesse de transport plus faible, le mouvement des granules est caractérisé par des sauts plus courts et un nombre plus élevé de collisions des granules avec la plaque vibrante. Tandis qu'à une vitesse de transport plus élevée, les granules ont des sauts plus élevés, des collisions plus énergiques, mais le nombre d'impacts est réduit et le rapport charge masse diminue.

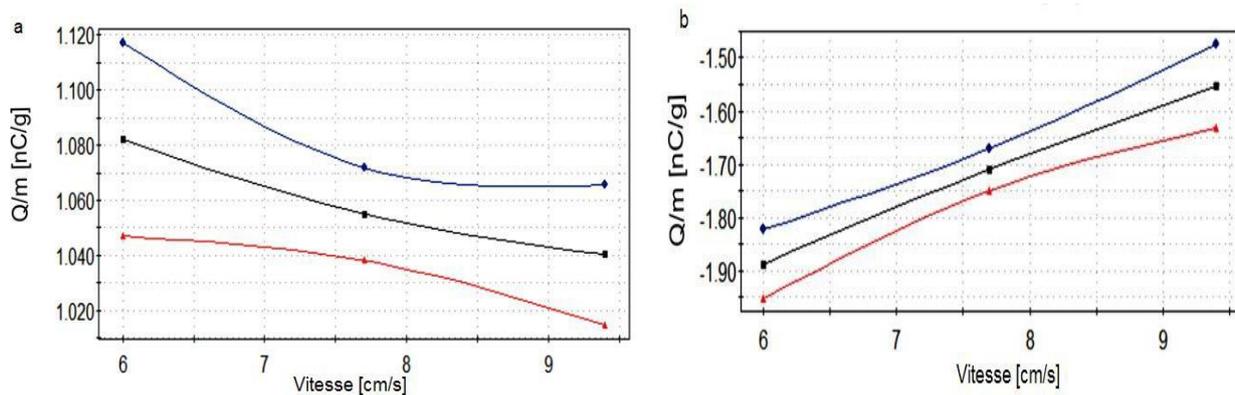


Figure IV.8. Représentation graphiques Q/m de l'ABS (a) et HIPS (b) prédits par MODDE 5.0 en fonction de la longueur de la plaque vibrante. Les autres variables sont maintenues égales aux valeurs centrales : $L = 69$ cm/s, $\phi = 3.8$ g/s cm. Les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de confiance à 95%.

séparation électrostatique d'un mélange 50% ABS + 50% HIPS en fonction de la longueur de la plaque vibrante

Le matériau granulaire a été chargé dans le tribo-chargeur vibrant, dans lequel seule la longueur du plateau L a été modifiée, tandis que les autres paramètres ont été maintenus constants : $v = 7,7$ cm/s, $\phi = 5$ g/s, $T = 22$ C, $RH = 52$ %. Ensuite, le matériau chargé a été introduit dans un séparateur électrostatique à chute libre standard, où le champ électrique de haute intensité a été généré entre deux électrodes plates alimentées à $U = 16$ kV.

Le taux de pureté est un indicateur qui détermine l'efficacité du processus. Ce paramètre permet d'évaluer le taux de la pureté (en pourcentage) du produit collecté, il est calculé par la formule suivante :

$$P(\%) = \left(\frac{m_{ic}}{m_{tc}} \right) \cdot 100 \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

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

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

La performance du processus de séparation est estimée après le pesage des quantités des produits collectées dans chaque compartiment afin de calculer les taux de récupération de chaque matériau. Cet indicateur détermine l'efficacité du processus et permet d'évaluer le taux (en pourcentage) du produit récupéré en rapport avec le produit total introduit. Le taux de récupération des produits séparés a été calculé par la formule suivante :

$$W(\%) = \left(\frac{m_{ic}}{m_{it}} \right) \cdot 100 \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

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

Les forces électrostatiques et mécaniques qui agissent sur les particules durant le processus de séparation dans un séparateur à chute libre sont illustrées sur la figure IV.8. La particule de masse m , portant une charge Q et évoluant dans un champ électrique uniforme d'intensité E .

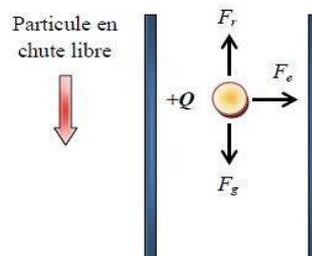


Figure IV.9. Représentation schématique des forces agissant sur une particule chargée en chute libre dans un champ électrique.

Le mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique intense créé entre les deux électrodes du séparateur à chute libre est affecté par l'action de la force du champ électrique F_e et la force gravitationnelle F_g , selon l'équation de la deuxième loi de Newton :

$$\sum F = m \cdot a = F_e + F_g \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$$F_e = Q * E$$

$$F_g = m * g$$

$$E = \frac{\Delta U}{d}$$

F_r : La force de l'air supposée négligeable;

m : La masse de la particule [Kg];

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

Q : La charge de la particule [C];

E : Le champ électrique [kV];

ΔU : La différence de potentiel [kV];

d : La distance entre les électrodes [m].

Selon le graphique de la (Figure.IV.8), des résultats similaires (c'est-à-dire, pureté P [%] et récupération W [%]) ont été obtenus pour l'ABS et le HIPS, dans le cas d'une longueur de plateau de 46 cm, 69 cm et 92 cm. Les résultats expérimentaux représentés ci-dessus figure IV.8 montrent que le meilleur résultat obtenu après la séparation qui est représenté par la pureté du produit récupérer dans son compartiment est obtenu pour $L=92$ cm.

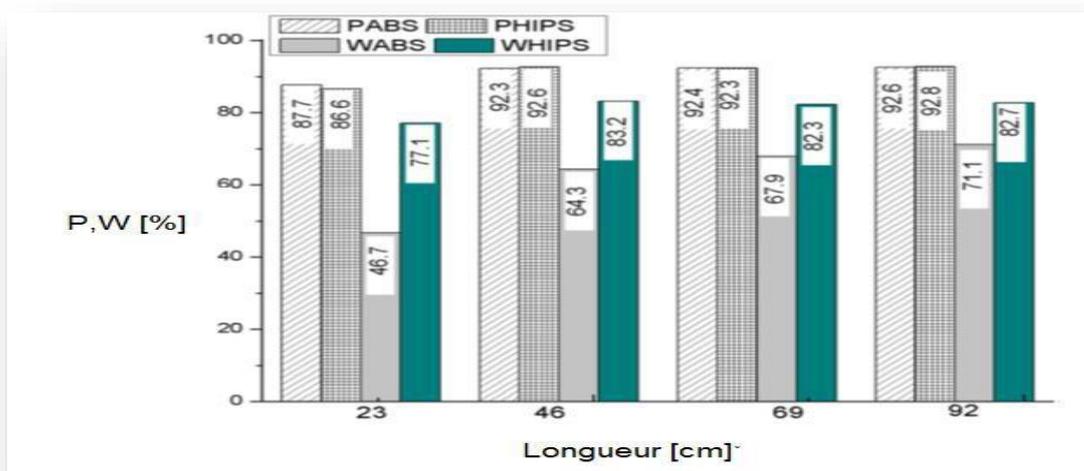


Figure IV.10. Résultats de la séparation du mélange ABS HIPS en fonction de la longueur du plateau (P [%] : pureté ; W [%] : récupération).

IV6. séparation ABS/HIPS

Description expérimental

L'étude a été réalisée sur un séparateur tribo-électrostatique à chute libre (voir Figure IV.1). Les granules chargés ont été introduits dans la chambre de séparation et ont dévié sur différentes trajectoires sous l'action du champ électrique de forte intensité généré par deux électrodes à plaque de polarité opposée espacées de 100 mm.

Trois compartiments ont été utilisés pour collecter trois fractions des granules : granules chargées positivement (ABS), les granules chargées négatives (HIPS) et insuffisamment chargées (mélange). Deux balances électroniques (résolution 0,1 g) ont été utilisées pour peser les fractions de séparation. Les expériences ont été réalisées sur des granulés d'ABS et de HIPS d'une taille moyenne de 2mm à 5 mm (voir figure IV.4).

La tension appliquée aux électrodes à plaque U , la vitesse de transport v et la distance a entre les palettes et les électrodes. Sont les trois variables du plan expérimental composite qui a été adopté pour la séparation tribo-électrostatique.

Le domaine de la vitesse de transport a été restreint. Domaine des vitesses de transport a été limité à $v = 6-8$ cm/s. La distance a entre les séparateurs et les électrodes a été choisie après une expérience préliminaire. Pour une distance inférieure à 15 mm, il est difficile d'évacuer le matériau séparé de la chambre de séparation de la chambre de séparation, tandis que pour une distance supérieure à 35 mm, la pureté des fractions collectées n'est plus satisfaisante.

Le domaine de la haute tension U a été choisi entre ± 10 kV (pour assurer un effet de déviation minimal des granules chargés) et ± 16 kV (pour éviter les décharges par étincelles entre les électrodes de plaque).

Ce qui a conduit à un modèle polynomial du second ordre corrélant les réponses avec les variables considérées dans l'étude (v , U , et a). Le modèle quadratique de la réponse y du plan composite, pour les facteurs considérés dans cet article la haute tension U , la distance a entre les séparateurs et la vitesse de transport v , ont la forme générale suivante :

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 U^* + \alpha_2 a^* + \alpha_3 v^* + \alpha_{11} U^{*2} + \alpha_{22} a^{*2} + \alpha_{33} v^{*2} + \alpha_{12} U^* a^* + \alpha_{13} U^* v^* + \alpha_{23} a^* v^*. \quad (\text{IV.5})$$

L'analyse des résultats expérimentaux a été réalisée avec le programme MODDE 5.0 [30] (Umetrics, Umea, Suède), qui calcule les coefficients du modèle mathématique, dessine les contours de la réponse et identifie les meilleurs ajustements des paramètres pour optimiser le processus.

Résultats et discussion

Les expériences de conception de composites ont été réalisées avec un mélange granulaire 50% ABS + 50% HIPS, à des conditions ambiantes constantes $T = 22$ °C et $RH = 61\%$.

La pureté et le taux de récupération ont été enregistrés à différentes valeurs de la vitesse de transport v , de la haute tension U et de la distance a entre les séparateurs.

Les résultats du plan d'expérience factoriel composite réalisé sur les mélanges ABS + HIPS sont résumés dans le tableau IV.4. Les modèles mathématiques correspondants calculés par le programme MODDE 5.0 et les statistiques sont donnés dans le tableau IV.5.

N°	V (cm/s)	U (kv)	a [mm]	W_{abs} [%]	W_{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	56.3	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	44.5	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

Tableau IV.4. Résultat séparation tribo-électrostatique [32]

Statistique	Model Quadratique
$Q^2 = 0.9338$ $R^2 = 0.986$	$P_{ABS} = 90.64 + 0.02v^* + 0.58U^* - 0.83\alpha^* + 0.63U^{*2} - 0.27v^*U^* + 1.03U^*\alpha^*$
$Q^2 = 0.949$ $R^2 = 0.991$	$W_{ABS} = 35.58 + 0.14v^* + 6.79U^* + 17.78\alpha^* + 0.84U^{*2} - 1.08v^*U^* - 3.53U^*\alpha^*$
$Q^2 = 0.925$ $R^2 = 0.972$	$P_{Hips} = 91.13 + 0.22v^* + 0.65U^* - 2.1\alpha^* - 2.79v^{*2} + 2.61U^{*2} + 1.5\alpha^{*2} + 1.12U^*\alpha^*$
$Q^2 = 0.919$ $R^2 = 0.987$	$W_{Hips} = 65.63 + 0.33v^* + 4.90U^* + 16.29\alpha^* + 0.96v^{*2} - 6.02U^{*2} - 6.02\alpha^{*2} - 1.71U^*\alpha^*$

Tableau IV.5. Modèles mathématiques P ABS [%], W ABS [%], P HIPS [%], W HIPS [%] obtenus par MODDE 5.0.

La haute tension U est un facteur important dans la séparation tribo-électrostatique. Les résultats des expériences montrent clairement que le taux de récupération de l'ABS et du HIPS est supérieur à 60% lorsque la tension appliquée est supérieure à ± 14 kV (voir Figure. IV. 9).

Concernant la pureté les résultats obtenus qui sont illustré sur la figure IV.10 montrent que des résultats similaires ont été obtenus pour c'est-à-dire le maximum de pureté des matériaux collectés ont été obtenus pour une tension de 16 kV.

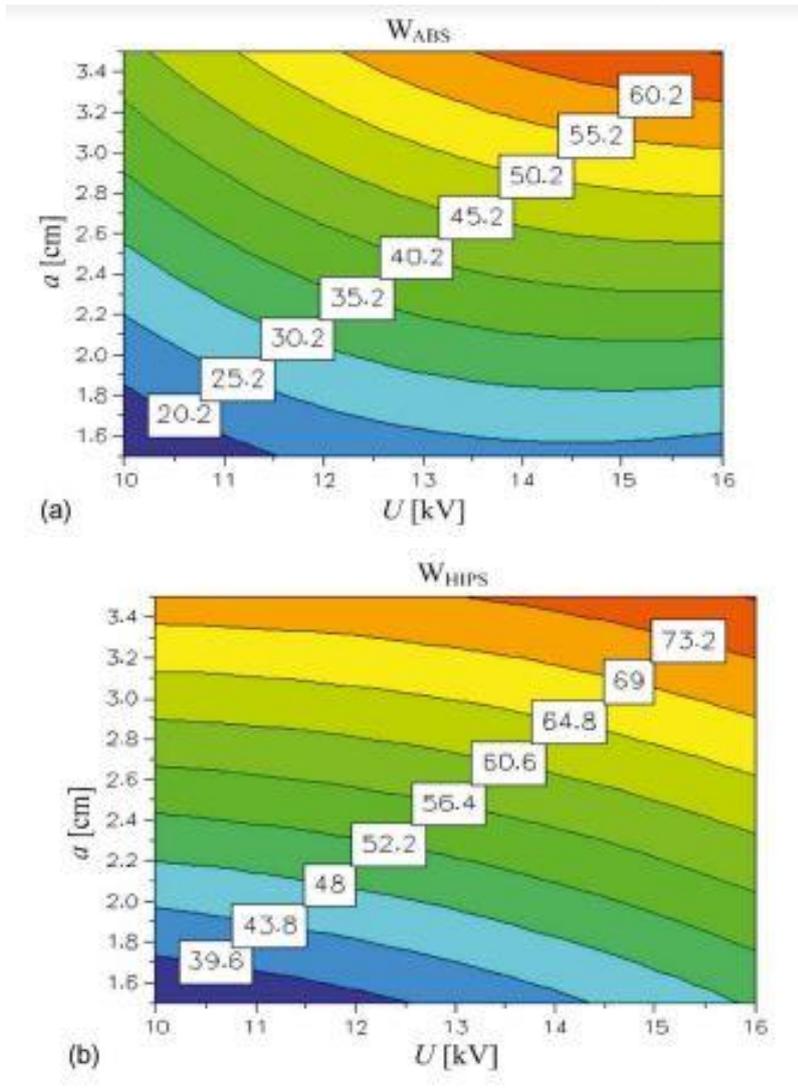


Figure.IV.11. Représentation des résultats obtenus sur la récupération w [%] des granules ABS et HIPS en fonction des deux paramètres U [kV] et a [cm]. [31]

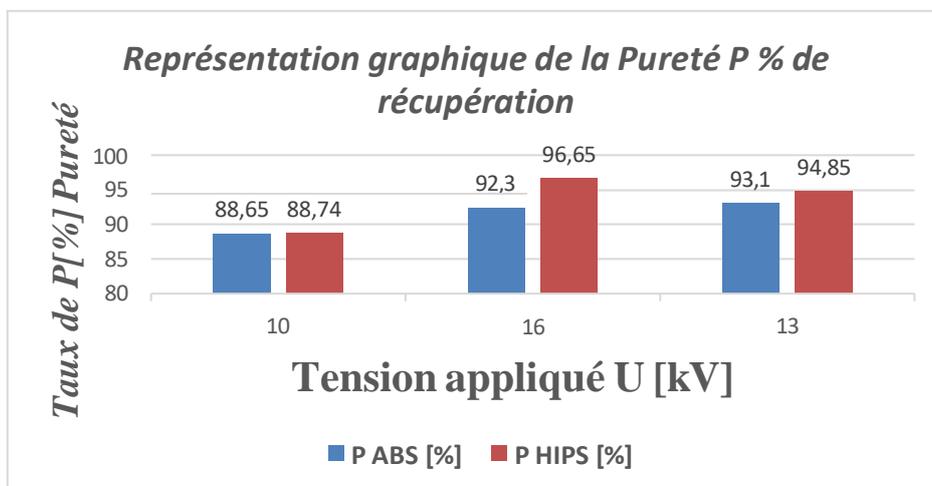


Figure.IV.12 Représentation des résultats obtenus sur la Pureté P [%] des granules ABS et HIPS en fonction du paramètre tension U [kV].

IV.7. Conclusion

- Le tribo-chargeur vibratoire, le rapport charge/masse augmente avec la longueur du plateau et diminue avec la vitesse de transport.
- L'augmentation excessive de la longueur du plateau n'est pas nécessairement due au fait que le rapport charge/masse du matériau présente une tendance à la saturation
- Le mélange ABS + HIPS peut être séparé avec succès lorsque les granules sont tribo-chargés sur un dispositif d'alimentation vibrant conçu sur mesure.
- Le programme MODDE 5.0 facilite l'optimisation de la séparation par tribo-chargement. Séparation pour différentes fonctions de réponse, choisies en fonction des objectifs de l'utilisateur.
- Pour la séparation de mélanges granulaires 50%-ABS-50% HIPS, les valeurs optimales des variables de contrôle du procédé sont pratiquement les mêmes lorsque l'objectif est la maximisation de la pureté et du taux de récupération.

Conclusion générale

La quantité de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) connaît une forte croissance, liée à l'utilisation croissante des équipements et à l'évolution rapide des performances techniques. Ces déchets sont constitués de diverses matières plastiques.

La récupération et le recyclage de ces matériaux en fin de vie sont essentiels pour récupérer cette ressource peu coûteuse par rapport au coût des matières premières. Les opérations de recyclage pour le retraitement des déchets nécessitent la recherche et le développement de nouvelles technologies de séparation physique.

Le but de ce travail est de favoriser l'amélioration des séparateurs électrostatiques à chute libre pour augmenter le taux de recyclage des matières plastiques. L'analyse des résultats expérimentaux montre que la disposition des électrodes haute tension et la distance des palettes des collecteurs entre les électrodes ont une grande influence sur le taux de récupération et la pureté des produits séparés.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Khirouni Y, “Etude expérimentale d’un séparateur électrostatique à plan incliné” Mémoire de Master, Réseaux électrique, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2020

- [2] Seddiki Y, Mihoub A A E, “Etude expérimentale d’un séparateur électrostatique à chute libre” Mémoire Master, Réseaux électrique, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2021

- [3] http://colleges.ac-rouen.fr/signoret/IMG/pdf/differents_plastiques.pdf
Dossier Enseignant. « VOYAGE EN INDUSTRIE » CAP SCIENCES 2006.

- [4] Coulibaly M., “Modélisation micromécanique et caractérisation expérimentale du comportement des matériaux hétérogènes élastoviscoplastiques: application à la valorisation des polymères recyclés”, Thèse de Doctorat en mécanique des matériaux, Université Paul Verlaine de Metz, France, 2008.

- [5] Kossentini Kallel T., “Etude de mélanges PE/PS Contribution au recyclage”, thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.

- [6] Senouci K, “maitrise statistique des procedes de séparation électrostatique des matériaux granulaire” Mémoire magister, conversion d’énergie et commande, Université Djillali Liabes – Sidi Bel Abbes ; septembre 2005.

- [7] Ugo Lesprit, “Etude expérimentale du chargement triboélectrique d'une bille de verre en interaction avec des matériaux polymères”, Thèse de doctorat en Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique et énergétique, Université de Poitiers, France, 2020.

- [8] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin. Solid state physics. Holt, Rinehart and Winston, 1976.

Bibliographie

- [9] Mekhalef Benhafssa A., “Etude d’un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges des matériaux poudreux”, Thèse de Doctorat en électrotechnique, Université de Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [10] Fekir D. E., “Chargement triboélectrique et séparation électrostatique pour deux types de mélange granulaire binaire isolants de taille fine et ceux de grosse taille”, Thèse de Doctorat en électrotechnique, Université de Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [11] Messal S. “Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l’industrie agro-alimentaire”, Thèse de Doctorat université de Poitiers, Décembre 2016.
- [12] Nadjem A. “Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques”, Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2019.
- [13] Aksa W., “Réalisation et étude d’un séparateur aérodynamique semi-industriel pour la récupération de particules isolantes”, Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2014.
- [14] Blajan M., Samuila A., Neamtu V., Beleca R., Caliap L., Vadan D., Iuga A., and Dascalescu L., “Experimental modeling of particle electrification in vibrated zigzag shaped metallic tubes”, Proceedings of ESA/IEJ/IEEE-IAS/SFE Joint Conference on Electrostatics, University of California, and Berkeley. California, pp. 538-543, 2006.
- [15] Dascalescu L., Urs A., Bente S., Huzau M., and Samuila A., “Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices”, Journal of Electrostatics, vol. 63, pp. 705-710, 2005.
- [16] Buda G., Bilici M., Samuila A., and Dascalescu L., “Experimental study of the tribocharging process of plastic granular materials on a vibratory feeder device,” IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., vol. 20, pp. 1489-1496, 2013.

Bibliographie

- [17] Dragan C., “Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéro-électrostatique de matériaux plastiques granulaires”, Thèse de Doctorat Université de Poitiers, 2010.
- [18] Labair H, “Simulation des trajectoires des particules isolantes dans les séparateurs triboélectrique à chute libre et à cylindre tournant”, Thèse de doctorat université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, septembre 2017.
- [19] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu (2013) “Experimental study of the optimum operating conditions of a pilot-scale tribo-aero-electrostatic separator for mixed granular solids”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 49, No. 2, pp. 699-706.
- [20] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, K. Medles, A. Tilmatine, (2014) “Performance improvement of a separator tribo-electrostatic aero for granular materials plastics recycling of waste electrical and electronic equipment”, Ind. App. Society. Ann. Meet., pp. 1-6.
- [21] T. Zeghloul, A.M. Benhafssa, G. Richard, K. Medles, L. Dascalescu, (2017) “Effect of particle size on the tribo-aero-electrostatic separation of plastics”, J. Electrostat., vol. 88, pp. 24-28.
- [22] A. Tilmatine, A. Benabboun, Y. Brahmi, A. Bendaoud, M. Miloudi, L. Dascalescu, (2014) “Experimental Investigation of a New Triboelectrostatic Separation Process for Mixed Fine Granular Plastics”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, No. 6, pp. 4245-4250.
- [23] R. Fisher, Statistique Méthodes for Resarci Jokers, Oliver and Boyd, 1925.
- [24] R. Fisher, The design of expérimetas, Oliver and Boyd , 1935.
- [25] G. Taguchi et Y. Wu, Introduction to off-line quality control, Central Japon Quality Control Association, 1985.

Bibliographie

- [26] F. Louvet et L. Delplanque, Les Plans d'Expériences par la méthode Taguchi, Experimentique, [Lou05], 2005.
- [27] F. Gillon, "modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur a communications électriques", thèse de doctorat, université des sciences et technologies, Lille, 1997.
- [28] J.Goupy, "Plans d'expérience", technique de l'ingénieur, PE 230 – 1, 2005.
- [29] J.Goupy, "Plans d'expériences pour surfaces de réponse", dunod, paris, 1999.
- [30] www.elsevier.com/local/elstat, High Intensity Electric Fields Laboratory, Technical University of Cluj Napoca, 28, Memorandumului Street, 400114 Cluj Napoca, Romania ; PPRIME Institute, UPR 3346, CNRS University of Poitiers e ENSMA, IUT d'Angoulême, 4 Av. de Varsovie, 16021 Angoulême, France, 2013
- [31] **Set-Point Identification and Robustness Testing of a Triboelectrostatic Separation Process for Mixed Granular Plastics**, Gabriela Buda, Adrian Samuila, Member, IEEE, Mihai Bilici, Student Member, IEEE, Salah Atroune, and Lucian Dascalescu, Fellow, IEEE