

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Intitulé du mémoire :

**Etude expérimentale d'un séparateur à plan
incliné**

Présenté par :
BENSOUILEH Zine Eddine

Sous la direction de :
Dr. KACHI Miloud
Mr. NADJEM Abdelkader

Juin 2017





Remerciements

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

Je tiens à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur, **Dr. KACHI Miloud**, 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. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à son grand dévouement et à sa haute personnalité.

Je tiens aussi à remercier Monsieur **NADJEM Abdelkader**, Doctorant à l'université de Guelma, pour ses multiples conseils, suggestions et pour toutes les heures qu'il a consacrées à établir cette recherche.

Nous tiens tout particulièrement à remercier les enseignants du département génie électrotechnique et automatique pour leur disponibilité et encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma 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, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents

A mes grands parents

Très chers amis, Classe de Réseaux électriques 2017.

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce
travail.*

BENSOUILEH Zine eddine.

Table des matières

Introduction général	1
Chapitre 1 : Etat de charge des isolants	
1.1 Les matières plastiques	3
1.1.1 Les catégories de plastiques	3
1.1.2 Les origines des déchets plastiques	4
1.1.3 Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)	4
1.2 Chargement des matériaux isolants	5
1.2.1 Chargement par la décharge couronne	5
1.2.1.1 Décharge couronne positive	7
1.2.1.2 Décharge couronne négative	8
1.2.1.3 Décharge couronne alternative	8
1.3 Chargement par effet triboélectrique	9
1.3.1 Définition	9
1.3.2 Historique	10
1.3.3 Mécanismes physiques de transfert de charge	10
1.3.4 La liste triboélectrique	11
1.4 Dispositifs de chargement triboélectrique	13
1.4.1 Chargement par ventilateur	13
1.4.2 Dispositif de Chargement par cyclone	14
1.4.3 Dispositif de Chargement statique	14
1.4.4 Chargement tribo-aéro-électrostatique :	15
1.4.5 Dispositif de Chargement à lit fluidisé	16
1.5 Conclusion	17
Chapitre 2 : Technique de la séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants	
2.1 Introduction	18
2.2 Technologies de séparation des matériaux plastiques	18
2.2.1 Principe de fonctionnement	19
2.3 Séparateur tribo-électrostatique	20
2.3.1 Séparateur triboélectrique à tapis roulant	21

2.3.2	Séparateur triboélectrique a chute libre	21
2.3.3	Séparateur tribo-aéro-électrostatique	25
2.4	Les forces exercées sur les matériaux granulaires	28
2.4.1	Forces de la pesanteur	29
2.4.2	Forces de London-Van der Waals	29
2.4.3	Force de Coulomb	30
2.4.4	Forces aérodynamiques	33
2.5	Conclusion	35

Chapitre 3 : Etude expérimentale du chargement triboélectrique à lit fluidisé.

3.1	Introduction	36
3.2	Installation expérimentale	36
3.2.1	Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé	36
3.2.2	Types de collisions dans le chargeur à lit fluidisé	37
3.2.3	Types de particules utilisées	39
3.2.4	Mesure de la charge triboélectrique	40
3.2.5	Mesure de la masse granulaire	41
3.3	Procédure expérimentale	41
3.4	Résultat et discussion	42
3.4.1	Influence du temps de chargement	42
3.4.2	Influence de la vitesse de l'air de fluidisation	43
3.4.3	Influence de la masse granulaire	44
3.4.4	Interprétation et discussion	45
3.5	Conclusion	46

Chapitre 4 : Réalisation et étude d'un séparateur électrostatique à plan incliné.

4.1	Introduction	47
4.2	Installation expérimentales	47

4.2.1	Description du séparateur triboélectrique à plan incliné	47
4.2.2	Types de particules utilisées	50
4.3	Procédure expérimentale	51
4.3.1	Procédure de déroulement des expériences	53
4.3.2	Séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants	54
4.4	Résultats et interprétations	56
4.4.1	Le taux de récupération des produits	56
4.4.2	Pureté des produits récupérés	58
4.5	Conclusion	61
	Conclusion générale	62
	Références bibliographiques	63

Introduction générale

Introduction générale

Le recyclage des matériaux plastiques provenant des équipements électriques et électroniques en fin de leur cycle de vie constitue un vaste domaine de recherche sur le plan mondial. La séparation des divers constituants des mélanges de tels matériaux plastiques constitue une étape clé dans le processus de recyclage. En effet, le tri manuel des matériaux n'est pas rentable en termes de quantité et temps de traitement des déchets et de là vient l'importance des différentes techniques pour automatiser cette opération. Généralement, les différentes techniques utilisées se basent sur les propriétés électromagnétiques des matériaux traités. Par exemple, pour les cas des métaux les propriétés magnétiques sont souvent exploitées, tandis que, le cas des isolants leurs propriétés électrostatiques sont plutôt à la base de leur séparation.

La séparation électrostatique des isolants nécessite globalement deux étapes : le chargement des matériaux isolants puis l'application d'un champ électrique en vue de séparer les isolants portant une charge positive dans un sens et ceux portant une charge négative dans l'autre sens. Suivant la combinaison des mélanges, isolant-isolant ou métal-isolant, le procédé de chargement peut être basé sur la triboélectricité ou la décharge couronne. De même, le type de mélange peut aussi définir la configuration des électrodes de séparation ou le principe de séparation lui-même.

Dans ce travail de fin de cycle, on se propose de réaliser et d'étudier un prototype de séparateur d'un mélange isolant-isolant basé sur le séparateur à chute libre. L'objectif étant de contribuer à l'amélioration du séparateur à chute libre en proposant une configuration plutôt inclinée.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

-Un premier chapitre présentant les catégories de plastiques et quelques notions théoriques sur le chargement des matériaux plastiques. Ainsi les dispositifs de chargement tribo-électrique utilisés au sein des laboratoires de recherche. Par ailleurs, quelques éléments théoriques généraux sur l'électrostatique sont également présentés concernant, notamment, les principales Forces exercées sur les matériaux granulaires isolants.

Dans le second chapitre, un accent classifié est mis sur les séparateurs tribo-électrostatiques y compris une brève description sur leur principe de fonctionnement.

Le troisième chapitre est consacré à la réalisation et l'étude d'un dispositif de chargement tribo-électrique à lit fluidisé. Ce chapitre s'appuie donc sur des expériences de mesures réalisées tout d'abord sur des échantillons de Polystyrène (PS), Polyéthylène (PE), et Polypropylène (PP). L'analyse des résultats amènera à bien comprendre l'effet des plusieurs facteurs sur le chargement triboélectrique des matériaux granulaires isolants.

Une réalisation du séparateur sera présentée à la fin de ce manuscrit, et permettra la séparation d'un mélange granulaire composé de deux produits différents. Des mesures ont été réalisées sur des échantillons de Polycarbonate (PC), Polyamide (PA) ; des expériences de faisabilité seront également abordées dans ce dernier chapitre.

Chapitre 1 :

Etat de charge des isolants



1.1 Les matières plastiques

Les plastiques sont omniprésents dans notre vie : conception des ordinateurs, production d'une simple seringue médicale ou encore la mise au point d'un cœur artificiel...

Au-delà de leurs atouts, une fois consommés, ils génèrent des déchets volumineux par rapport à leur poids. Ces déchets occupent un volume important dans les points de collecte et autres installations de gestion de déchets dont les centres d'enfouissements techniques.

Leur dissémination dans la nature est durable et inesthétique car leur biodégradabilité est dans la plupart des cas faible. Il y a donc lieu d'encourager leur recyclage [1].

1.1.1 Les catégories de plastiques

Il existe deux grandes catégories de plastiques :

a- Les thermoplastiques tels que le polyéthylène haute densité (PEHD), le polyéthylène basse densité (PEBD), le polyéthylène téréphtalate (PET), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC), le polystyrène (PS), le polystyrène expansé (PSE) qui représentent plus de 80% du marché : ils fondent sous l'effet de la chaleur et reprennent leur rigidité en refroidissant.

Techniquement ils peuvent être recyclés ou régénérés [2].

Quelques exemples des déchets thermoplastiques :

- PET : bouteilles de boisson gazeuse, d'huiles de cuisine, fils textiles,
- PEHD : bouteilles, bidons (huiles de moteur), caisses, casiers,
- PVC : barquettes, boîtes alimentaires, films alimentaires, tuyaux de canalisations, gaines électriques,
- PEBD : sacs et emballages plastiques, palettes, films étirables, bouteilles (shampooing),
- PP : sachets et films transparents (emballages biscuits), automobiles (pare-chocs...),
- PS : pots de yaourts, gobelets, emballages.

b- les thermodurcissables, tels que les polyuréthanes réticulés, la bakélite, les polyester insaturés sont des matières initialement liquides qui durcissent sous l'effet de la

chaleur et de la pression. Leur transformation est irréversible, ils sont inaptes à la régénération, par exemple PC : casque, CD/DVD, prothèse,

c- Il existe également des plastiques composites à base de thermoplastiques ou de thermodurcissables mélangés à d'autres pour en améliorer les propriétés mécaniques (fibres de verre) [2].

1.1.2 Les origines des déchets plastiques

Les déchets d'emballages plastiques ont différentes origines :

- Les déchets de l'industrie du plastique (rebus et ratés de production et de transformation),
- Les plastiques contenus dans les ordures ménagères (bouteilles, flacons, gobelets, films...),
- Les déchets de démolition du bâtiment,
- Les emballages industriels et commerciaux,
- Les résidus de broyage automobiles,
- Les plastiques agricoles (films, paillages...),
- Les plastiques issus des déchets d'équipements électriques et électroniques [2].

1.1.3 Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)

Selon l'Université des Nations Unies (*UNU*), le plastique représente un enjeu crucial du recyclage des DEEE. Dans l'Union européenne, si 50% de ce plastique était réutilisé, cela économiserait 5 millions de kilowattheures d'énergie et 2 millions de tonnes d'émission de CO₂, soit l'équivalent de 1,6 millions d'allers - retours Paris New-York en avion [3].

Les déchets d'équipements électriques et électroniques sont une catégorie de déchets constituée des équipements en fin de vie, fonctionnant à l'électricité ou via des champs électromagnétiques, ainsi que les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs (figure. 1.1).



Figure 1.1 : exemple sur les déchets d'équipement électrique et électronique.

1.2 Chargement des matériaux isolants

Deux mécanismes physiques sont couramment employés pour charger les matériaux granulaires en vue de leur séparation dans un champ électrique intense : l'effet couronne, assurant la charge par « bombardement ionique » et l'effet triboélectrique, impliquant le transfert de charge entre deux corps en contact [4].

1.2.1 Chargement par la décharge couronne

La décharge par effet couronne est une décharge électrique autoentretenu dans un gaz qui se produit quand une différence de potentiel suffisamment élevée (quelques Kilovolts) est appliquée entre deux électrodes très dissymétriques (par exemple une pointe ou un fil de faible diamètre et une électrode plane ou un cylindre) distantes de quelques millimètres afin d'obtenir un champ électrique beaucoup plus important au voisinage de l'une des électrodes.

Les processus d'ionisation sont alors initiés dans la région où le champ électrique est le plus intense, Cette décharge existe sous différentes formes et dépend du niveau et du signe de la tension appliquée, ainsi que de la configuration géométrique des électrodes, A cause du champ électrique élevé proche de l'électrode active (électrode à faible rayon de courbure (une pointe ou un fil)), l'air normalement isolant, devient ionisé et les ions résultants (positifs ou négatifs selon la polarité de la pointe) sont dérivés vers l'électrode passive (le plateau) à faible champ, Le seuil d'excitation de la décharge couronne dépend de l'existence d'électrons libres d'énergie suffisante pour déclencher le phénomène d'avalanche responsable de l'ionisation du gaz présents entre les deux électrodes, Les électrons sont des agents ionisants effectifs parce que lors des chocs, ils transfèrent toute l'énergie acquise du champ électrique, aux molécules

du gaz, il se crée une région d'ionisation au voisinage de la pointe qui contient des porteurs de charges des deux polarités (figure 1.2). Autour de cette région on retrouve une région de dérive ou unipolaire où les ions de même signe que la pointe dérivent jusqu'à leur neutralisation sur l'autre électrode.

Les types d'ions générés dans les décharges couronnes positives et négatives selon la polarité de la tension appliquée ont été déterminés par les techniques de spectroscopie de masse. Par exemple, dans l'air les espèces les plus rencontrées dans le cas d'une décharge positive, sont des ions hydratés avec la formule générale $(H_2O)_n H^+$, où n est un entier qui augmente avec le taux d'humidité relative. D'autres espèces d'ions peuvent apparaître à des faibles taux d'humidité tels que $(H_2O)_n ON^+$ et $(H_2O)_n (NO_2)^+$. Pour la décharge négative, les ions les plus déposés sont : CO_3^- , CO_4^- , O_2^- et O_3^- ainsi que d'autres ions hydratés $(H_2O)_n CO_3^-$ à 50% d'humidité relative. La décharge couronne produit aussi des espèces neutres excitées comme l'ozone (O_3), O_2 , N_2 et l'oxyde d'azote. Baum et al ont mis en évidence le rôle des photons de la décharge couronne et des espèces neutres excitées dans l'injection de charges dans le volume pour les échantillons de polyéthylène chargés par décharge couronne négative.

Au voisinage de l'électrode pointue, le champ peut être suffisamment élevé pour provoquer l'ionisation de l'air et les charges qui en résultent sont entraînées vers l'électrode à faible champ où se situe la surface à charger.

L'intervalle d'aire entre électrodes comporte deux zones : une zone ionisée et une zone de dérive.

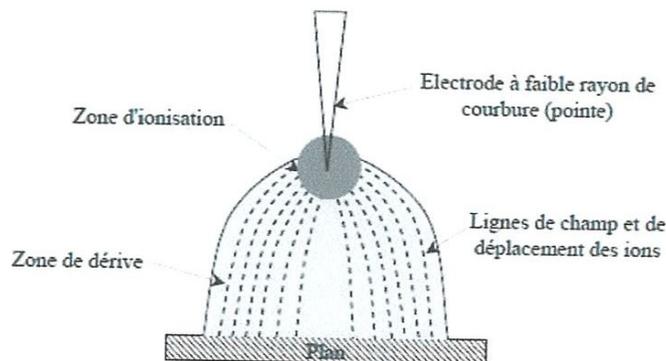


Figure 1.2: zones d'ionisation et de dérive dans la décharge couronne continue.

Le signe de la charge déposée sur l'isolant dépend de la tension appliquée à l'électrode active. Par conséquent, la décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de la tension appliquée à l'électrode à faible rayon de courbure [5].

1.2.1.1 Décharge couronne positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand la pointe est portée à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour de la pointe, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l'anode (la pointe). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zones-en-pointillé sur la figure 1.3. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieure au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible (< 30 kV/cm dans l'air à pression atmosphérique) ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque). Différents régimes existent pour la décharge couronne. Juste au-delà du seuil d'apparition, la décharge couronne positive est pulsative. En augmentant la tension, la décharge positive devient une décharge lumineuse continue. Pour les tensions très élevées, la décharge se transforme en claquage (arc).

Dans l'air ambiant, les espèces dominantes, en décharge positive, sont des ions hydratés de formule générale $(H_2O)_n H^+$, ou n est un entier qui augmente avec l'humidité. A faible taux d'humidité d'autres ions deviennent dominants tels que $(H_2O)_n NO^+$ et $(H_2O)_n (NO_2)^+$

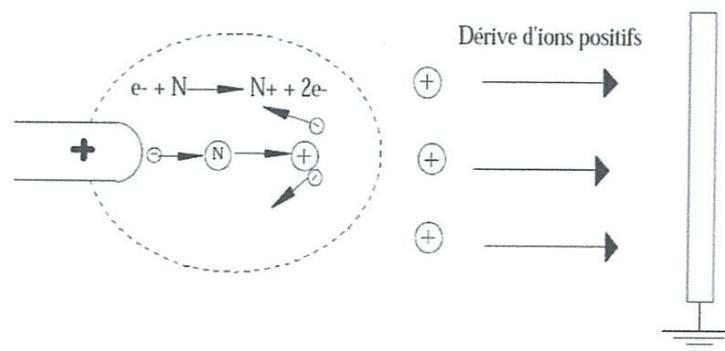


Figure 1.3. Description de la décharge couronne positive [5].

1.2.1.2 Décharge couronne négative

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe. Les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (figure 1.4).

Au-delà du seuil d'apparition, la décharge couronne négative a un régime pulsateur. En augmentant la tension, la décharge négative atteint le régime d'impulsions de Trichel dont la fréquence dépend de la tension appliquée. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle entre deux pics de courant, impulsions de Trichel, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode

En décharge couronne négative les ions les plus dominants sont les ions CO_3^- ; à 50% d'humidité relative environ 10% des ions sont hydratés $(\text{H}_2\text{O})_n \text{CO}_3^-$.

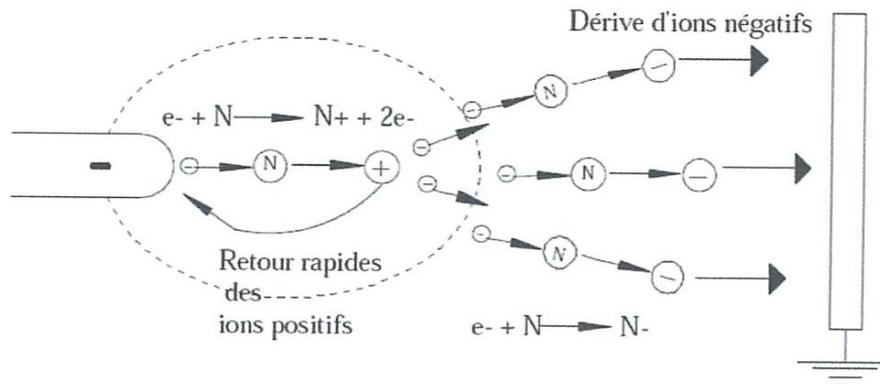


Figure 1.4 : Description de la décharge couronne négative [5].

1.2.1.3 Décharge couronne alternative

Dans ce cas, le processus de la décharge soumise à une excitation alternative est identique à ceux décrits pour une excitation continue, dans la mesure où l'intervalle de temps entre les inversions de polarité est suffisamment long pour que toutes les charges résiduelles de l'alternance précédente soient écoulées. Ceci implique l'existence d'une fréquence f et d'une distance inter-électrodes d limites reliées par l'expression suivante:

$$d_{max} = \frac{\mu E}{\pi f} \Rightarrow f_{max} = \frac{\mu E}{\pi d}$$

Avec μ la mobilité des ions et E l'amplitude du champ électrique.

Tant que la fréquence est inférieure à f_{max} la décharge couronne alternative se comporte comme en continu. Par contre si l'excitation est supérieure à cette fréquence f_{max} , la charge d'espace va osciller et augmenter à chaque période. Cet effet cumulatif aura pour conséquence des passages à l'arc pour des potentiels plus faibles qu'en continu. [5].

1.3 Chargement par effet triboélectrique

Les trois principaux procédés de charge d'un isolant sont :

- 1) le faisceau d'électrons où la charge est directement injecté, avec une certaine énergie, dans le volume du matériau.
- 2) la décharge couronne [6,7] : la charge est déposée sous forme d'ions positifs ou négatifs, et va également être transférée.
- 3) la triboélectricité : impliquant le transfert de charge entre deux corps en contact au niveau superficiel du matériau.

Afin de séparer les matériaux granulaires dans un champ électrique intense, les deux derniers mécanismes de chargement sont largement utilisés : l'effet couronne «bombardement ionique» et l'effet triboélectrique [8].

1.3.1 Définition

La triboélectricité du grec « *tribein* » qui signifie frotter, désigne le phénomène électrostatique par lequel lorsque l'on frotte deux matériaux de nature différente, une partie des charges de la surface de contact d'un des deux matériaux est transféré à l'autre, et ce transfert subsiste lors de la séparation. [8].

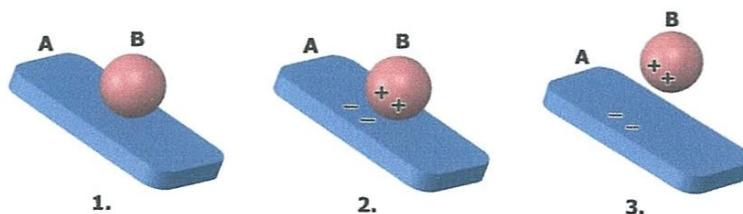


Figure 1.5 : L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux surfaces: 1. Surface A neutre, particule B est neutre; 2. La surface A et la particule B sont en contact; 3. Après la séparation, la surface A a la tendance de se charger négativement, et la particule B positivement.

1.3.2 Historique

Certains des travaux expérimentaux de la triboélectricité sont très anciens, comme l'électrisation de l'ambre frottée avec une étoffe (Thalès, septième siècle avant J.C). L'étude qualitative débute au dix-septième siècle avec Gilbert, puis Boyle, qui appellent électricité la cause du phénomène. Au dix-huitième siècle on découvre l'électrisation des métaux tenus par un manche isolant, la transmission de l'électricité par contact, l'influence, etc. On construit des machines électrostatiques à triboélectricité [9].

1.3.3 Mécanismes physiques de transfert de charge

La génération de charge électrostatique des polymères par contact est un phénomène basé sur la physique des surfaces. La théorie des bandes est un modèle quantique en physique des solides qui détermine les énergies possibles des électrons dans un solide et permet de comprendre la notion de conductivité électrique. Il est issu de la théorie des orbitales moléculaires. Dans un solide, les niveaux d'énergie permis sont confinés dans une bande dont la largeur, de l'ordre de l'électronvolt, dépend du cristal et du recouvrement des orbitales atomique [10].

Quand deux matériaux isolants entrent en contact, des échanges d'électrons se produit entre les différents niveaux d'énergie libres localisés à la surface des deux matériaux. Dans le même matériau, la théorie suppose que les électrons dans un état d'énergie élevée (les états occupés) ne sont pas capables de redescendre seul, par transition, vers des niveaux plus bas en énergie (les états vides), même si cela est favorisé thermodynamiquement, en raison de la grande différence entre les énergies de deux niveaux qui sont très localisés à la surface du matériau. Ainsi, si deux matériaux isolants sont frottés l'un contre l'autre, il se produira un

transfert d'électron à l'interface par effet tunnel d'un isolant à l'autre où des états occupés de haute énergie rencontrent des états vides de basse énergie. Cet échange d'électrons permet aux deux matériaux isolants en contact de se rapprocher de l'équilibre thermodynamique [11].

Le schéma suivant montre le transfert d'électrons entre deux polymères isolants en contact jusqu'au moment où les niveaux Fermi s'égalisent (ils sont séparés ici pour plus de clarté) :

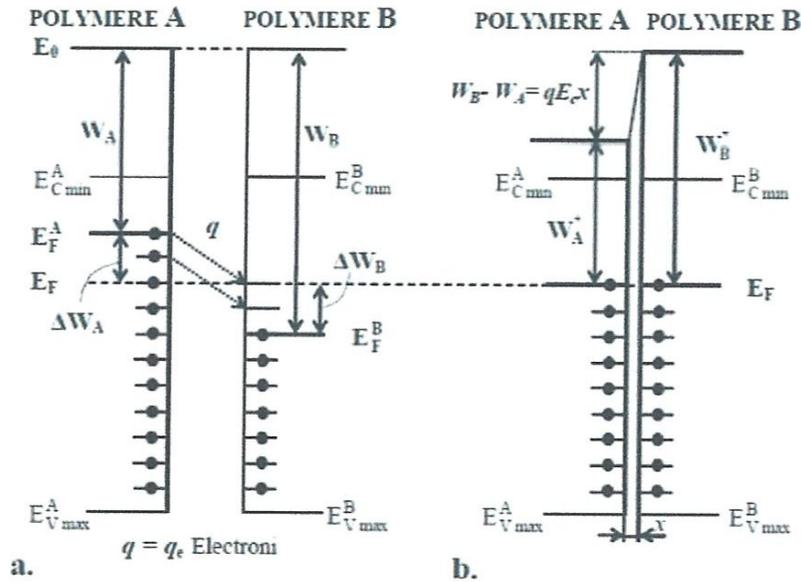


Figure 1.6 : Diagrammes des niveaux d'énergie qui expliquent la triboélectrisation de deux granules de différents polymères par la théorie des niveaux superficiels de haute densité : (a) polymères en contact (électronique). Le polymère A caractérisé par un travail d'extraction faible, transfère des électrons et se charge positivement par rapport au polymère B; (b) le processus de triboélectrisation prend fin par l'accumulation de la charge q à l'interface et par renforcement du champ électrique de contact EC dans l'intervalle x , jusqu'à l'équilibre thermodynamique (les niveaux Fermi E_F^A , E_F^B sont égaux) [10].

1.3.4 La liste triboélectrique

On définit les séries triboélectriques comme étant des listes ordonnées de matériaux. Ces matériaux sont classifiés dans un ordre tel que lorsqu'on frotte l'un sur l'autre, celui qui précède l'autre sur la liste s'électrise positivement: la position relative définit le signe des charges, et la distance au sein de la liste donne une idée de l'importance

de l'échange de la quantité de charges électriques transférée qui dépend de la nature des deux matériaux et de la surface de contact.

En réalité, on ne peut pas se fier complètement à l'ordre des matériaux dans ces listes car il diffère souvent d'un auteur à l'autre (figure 1.7) ; en effet une différence dans le frottement et des facteurs externes peuvent inverser les signes obtenus. Il semble donc impossible de réaliser une liste avec un ordre fiable. Cette particularité de l'électricité statique, qui est le fait que les signes peuvent s'inverser de manière si facile, est très surprenante [11].

La série triboélectrique indique les différences entre les propriétés de surface des matériaux aussi bien que la possibilité de la séparation triboélectrostatique des matériaux granulaires plastiques. Un certain nombre de chercheurs ont élaboré la série triboélectrique pour prévoir la polarité et le comportement de chargement des matériaux puisque la position relative de deux matériaux quelconques dans la série détermine la direction du transfert de charge quand ces matériaux entrent en contact [1].

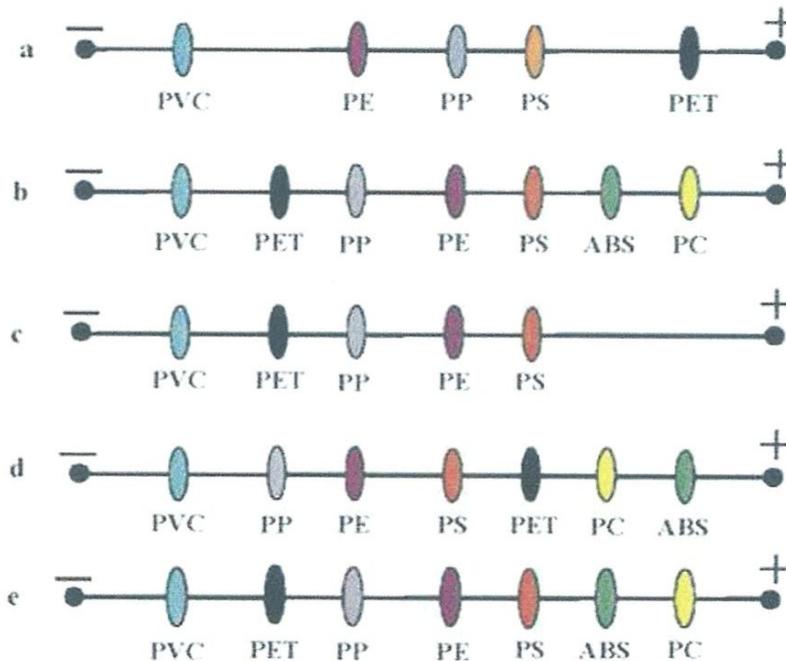


Figure 1.7 : Série triboélectrique expérimentale pour différents matériaux plastiques utilisés dans la fabrication des équipements informatiques et électriques selon différents auteurs : a. Brown, b. Wei, c. Xiao, d. Dodbida, e. Ullmann's Enciclopedia [12].

1.4 Dispositifs de chargement triboélectrique

Le résultat de tout processus de séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules. Les procédés de chargement s'appuyant sur l'effet triboélectrique permettent de charger le niveau surfacique des particules, il est parfois conseillé de mettre un système conçu avec un matériau de conductivité très faible afin d'atteindre des niveaux de chargement élevés nécessaires pour le tri des granules dans un champ électrique intense.

1.4.1 Chargement par ventilateur :

Les principaux éléments de cette installation sont (figure 1.8) : un tube cylindrique isolant, un moteur à courant continu entraînant une hélice isolante et un support métallique.

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

La récupération du mélange chargé, s'effectue par le pivotement du cylindre du dispositif sans faire arrêter le moteur afin d'éviter le collage des particules contre les parois et aussi de vider tous le contenu [8].

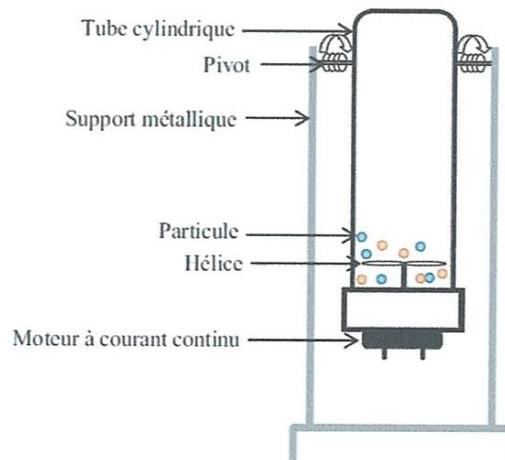


Figure 1.8 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur

1.4.2 Dispositif de Chargement par cyclone

Un cyclone est une unité technologique imposant une rotation rapide à un mélange (figure 1.9), qui a tendance à suivre la même trajectoire que le flux gazeux, son faible coût de capitalisation et d'entretien, sa relative simplicité de construction, son utilisation en continu sans accumulation de particules, sa faible consommation en énergie, la possibilité de s'adapter aux conditions de température et de pression du procédé, ainsi que son efficacité jusqu'à des concentrations très importantes en particules en font un équipement de charge pour la pré-séparation de granules.

Cet appareil utilise la force centrifuge pour la charge mécanique des particules dans un cylindro-conique dans lesquels le mouvement giratoire est obtenu en faisant entrer le mélange tangentiellement à la circonférence, au voisinage de la paroi. Sous l'effet de la force centrifuge les particules se déplacent vers la paroi, y perdent leur vitesse par frottement et tombent dans la partie inférieure de l'appareil avant de sortir par l'apex du cône.

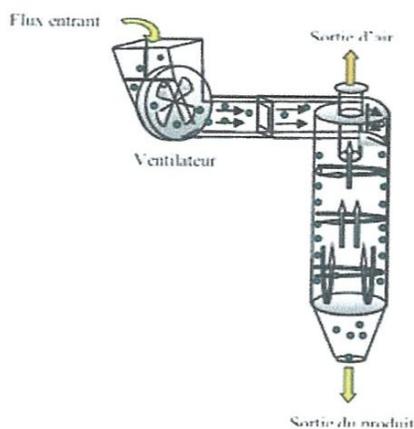


Figure 1.9 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclon

1.4.3 Dispositif de Chargement statique

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique isolante (figure 1.10), y compris des parois inclinées et détachables. Les particules tombent en chute verticale et glissent dans ce dispositif par gravitation. Le chargement de ces particules s'effectue par frottement avec les parois [13].

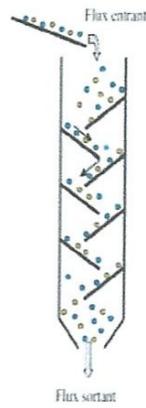


Figure 1.10 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique

1.4.4 Chargement tribo-aéro-électrostatique:

C'est une combinaison de deux modes de chargement en cascade, le procédé est une chambre parallélépipédique isolante comprend deux partie (figure 1.11) : la première pour le chargement aéro-triboélectrique (à lit fluidisé), après avoir mettre les particules en agitation dans un lit fluidisé, elles sont dirigés vers la deuxième partie du dispositif destiné au chargement statique par des parois inclinées, dont le but de pouvoir mieux contrôler la charge acquise, multipliant les paramètres de chargement [14].

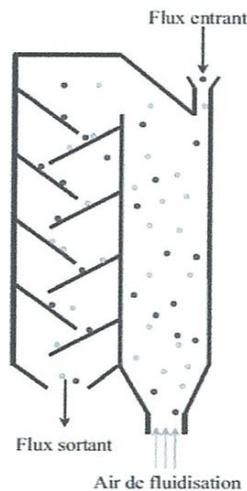


Figure 1.11 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-statique

1.4.5 Dispositif de Chargement à lit fluidisé :

C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes. On considère une couche de particules solides reposant sur une plaque poreuse horizontale à l'intérieur d'un cylindre vertical. On injecte un gaz à travers la plaque dans le sens ascendant :

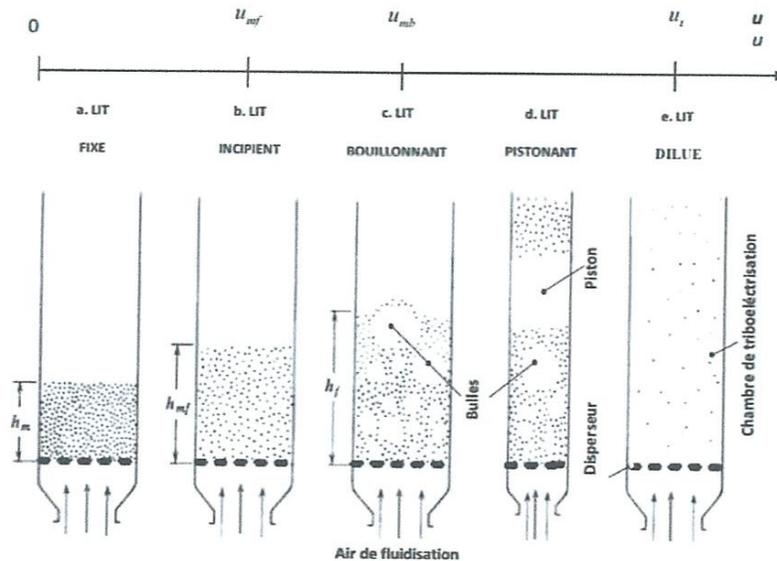


Figure 1.12 : Les régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation; U_{mf} - vitesse minimale de fluidisation; U_{mb} - vitesse minimale d'apparition des boules; u_t - vitesse de transport pneumatique.

- la vibration: pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le disperseur sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.

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

- 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 de distribution de gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en

surface comme dans le cas d'un liquide à ébullition. Vibration Vitesse de gaz U Air de fluidisation Formation Bullage Pistonnage Ringardage Entraînement U_{mf} , U_{mb} et U_t .

- 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.
- le Ringardage: les particules s'accrochent et créent des passages préférentiels pour le gaz.
- l'entraînement : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos U_t , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation : c'est le phénomène d'entraînement

Le dispositif est un tube cylindrique isolant, le mélange de particule est déposé sur le support (un disperseur en tamis isolant), on souffle de l'air à l'aide d'une soufflante au bas du cylindre. Les particules sont fluidisées, elles acquièrent des charges électriques de signe opposé grâce aux collisions entre elles.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une synthèse bibliographique relative aux différents types des déchets plastiques et quelques notions sur les phénomènes électrostatiques en mettant l'accent sur les notions générales afin de faciliter la compréhension du chargement par triboélectricité.

Les différents dispositifs de chargement triboélectrique cités dans ce chapitre pour les études expérimentales de chargement par effet triboélectrique pour la séparation électrostatique des particules granulaires isolant.

Le chapitre suivant sera consacré à une synthèse bibliographique relative à différentes techniques de séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants.

Chapitre 2 :

**Technique de séparation triboélectrostatique
des matériaux granulaires isolants**

2.1 Introduction

La séparation triboélectrostatique pour la purification des mélanges granulaires occupe une place très importante et représente en ce moment une technologie économiquement viable pour la préservation de l'environnement, car elle offre du plastique recyclé de qualité élevée et une meilleure efficacité pour le recouvrement des métaux qu'offre les méthodes conventionnelles de traitement des déchets. Elle représente de nos jours, une technologie moderne de recyclage des matériaux usagés issus des déchets industriels. La diversité des installations et des technologies de séparation électrostatique des particules granuleuses, utilisant l'effet triboélectrique pour la charge des granules plastiques dans l'industrie de recyclage des plastiques, est impressionnante.

Cette technique a été utilisée pour la première fois en 1914, pour la purification des fines particules du charbon extraites des mines. Avec un rendement de 15%, elle n'a connu le succès industriel que bien après durant la deuxième moitié du 20ème siècle. La première installation triboélectrique, proprement dite, fût celle d'une mine de l'Illinois en 1987 car cette dernière « agitait » les particules avant de les séparer des impuretés de sulfure pyrétique qu'elles contenaient. Les équipements et les technologies d'électro-séparation se sont beaucoup développés pendant les dernières décennies, grâce à l'amélioration de circuits à base de composants semi-conducteurs de haute tension et des matériaux isolants caractérisés par des rigidités diélectriques très élevées [15].

2.2 Technologies de séparation des matériaux plastiques

La technologie complexe de recyclage des matériaux plastiques comporte des opérations de séparation selon le type de plastique, en utilisant des procédés pneumatiques, flottaison, et séparation triboélectrostatique [16].

La (figure 2.1) représente un schéma de séparateur triboélectrique à chute libre. Les chargées à l'aide d'un dispositif triboélectrique sont introduites dans l'entonnoir et tombent en chute libre en traversant un champ électrostatique intense créé entre les deux électrodes. L'électrode négative va attirer les particules qui sont chargées positivement ; par contre les particules qui sont chargées négativement vont être attirées vers l'électrode positive. Les particules mal chargées sont électriquement neutres et vont tomber au milieu dans le compartiment du produit mixte [15].

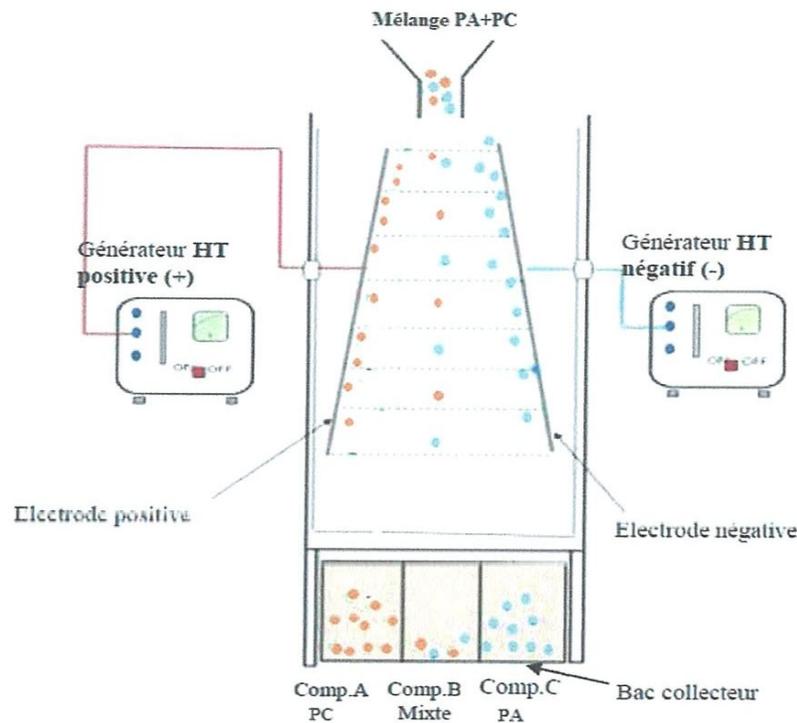


Figure 2.1 : *Les deux phases de la séparation triboélectrostatique: la triboélectrisation des particules et la déviation des particules chargées en champ électrostatique* [15].

2.2.1 Principe de fonctionnement

Les procédés de séparation électrostatique sont déjà utilisés pour le tri des matériaux isolants granulaires mélangés, provenant du broyage des déchets industriels.

Le plus souvent, les matériaux broyés sont chargés par effet triboélectrique dans des dispositifs à vibrations, rotatifs ou à lit fluidisé (chapitre 1). La charge acquise par les particules dans les dispositifs utilisés actuellement n'est pas homogène: certaines particules arrivent à se charger convenablement et pourront donc être séparées dans un champ électrique assez intense, d'autres sortent des dispositifs de charge triboélectriques avec un niveau de charge insuffisant. L'état de charge des particules pourrait être amélioré en augmentant la durée du processus de charge, au détriment de la productivité du procédé. Pour une durée de charge fixée, la quantité de charge effectivement acquise par les particules peut varier [4].

L'efficacité du processus de charge pourrait être améliorée en introduisant des opérations de conditionnement thermique des matériaux et en contrôlant l'atmosphère ambiante, mais ces opérations augmenteraient le coût du procédé. Dans tous les cas, les

granules chargés sont ensuite séparés dans le champ électrique d'une installation de tri électrostatique dite «la chute pour angle», comportant deux électrodes parallèles en position verticale. La productivité des installations utilisées pour la séparation des matériaux isolants granulaires est assez faible et la qualité des produits obtenus ne répond pas toujours aux exigences des clients. Les procédés actuels sont très peu robustes aux variations aléatoires des conditions ambiantes et des propriétés physico-chimiques des matériaux à séparer.

Nr	Situation	Difficulté
1	Séparation des mélanges de 2 plastiques présents en proportions très différentes (1%, 99%)	Electrisation des granules du matériau dominant
2	Séparation des mélanges de 3 ou 4 plastiques présents en proportions égales	Nécessite de plusieurs étapes de séparation
3	Séparation des mélanges de 3 ou 4 plastiques présents en proportions différents	Nécessite d'un plus grand nombre de séparations par rapport au cas 2
4	Séparation des mélanges de granules avec des dimensions ou poids très différents	Impacts des granules de petite masse sur une des deux électrodes
5	Génération de poussières fines de plastique lors du broyage des mélanges	Instabilité de la triboélectrisation
6	Electrisation des mélanges en dispositifs à parois en plastique	Adhésion des granules sur les parois du dispositif et diminution de la charge électrique
7	Humidité relative RH et température T ambiantes	Charge électrique dépendante de l'humidité et la température

Tableau 2.1. Difficultés de la séparation tribo-électrostatique des matériaux plastiques [16].

2.3 Séparateur tribo-électrostatique

multiples installations destinées à la séparation électrostatique des matériaux granulaires plastiques par la tribo-électrification ont été réalisés. Le commun entre ces dispositifs est la nécessité d'avoir deux parties successives, la première celle de chargement

triboélectrique des granules, et l'autre destinée à leur séparation. On distingue les prototypes suivants [8].

2.3.1 Séparateur triboélectrique à tapis roulant :

Le schéma de la figure 2.2 explique le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant TBS (Tribocharged Belt Separation). Les particules sont tribo-électrisées par un dispositif de chargement statique, puis elles tombent sur un tapis roulant et sont transportées vers la région de séparation.

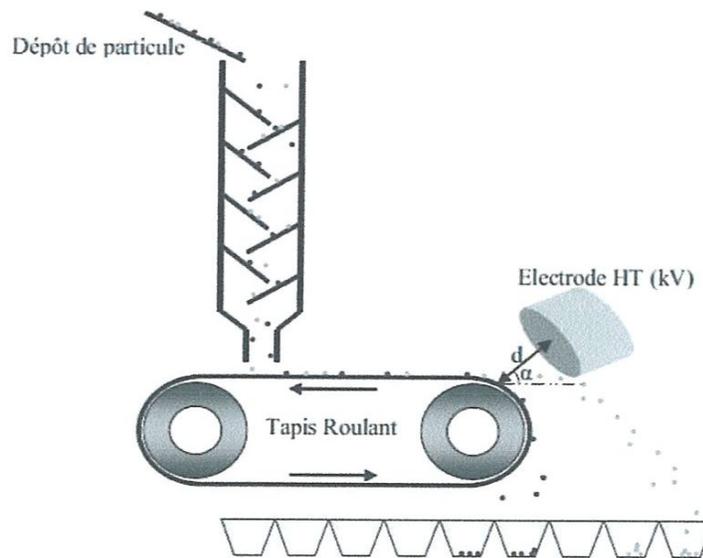


Figure 2.2 : Représentation schématique d'un séparateur TBS

Une électrode haute tension attire les particules d'une polarité et repousse les particules de polarité opposée grâce aux forces électriques d'attraction et de répulsion, permettant ainsi la séparation [8].

2.3.2 Séparateur triboélectrique a chute libre

Le mélange granulaire est chargé par la triboélectricité, il tombe ensuite dans un fort champ électrique horizontal produit entre deux électrodes et situé dans une chambre isolante.

Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge.

Le type du séparateur à chute libre dû au mode de chargement, sinon la deuxième partie de l'installation (la séparation) est la même, dont on distingue :

a. Séparateur à chute libre à vibration :

Le mélange granulaire est chargé par un dispositif à vibration en Zig Zag (figure 2.3) composé d'un moteur à vitesse variable, couplé à un bac par un mécanisme bielle à plusieurs positions. Le moteur engendre un « va et vient » du bac provoquant des collisions entre particules/particules et entre particules/paroi.

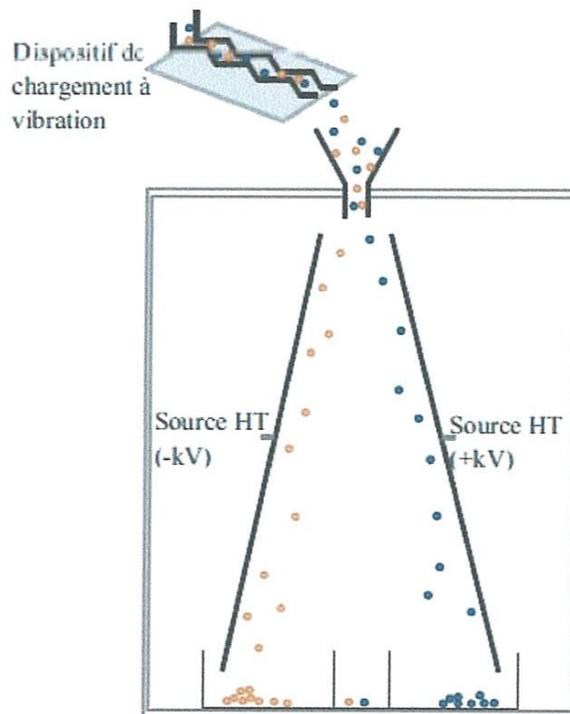


Figure 2.3 : *Représentation schématique d'un séparateur à chute libre à vibration.*

b. Séparateur à chute libre à cylindre tournant :

Les particules isolantes sont introduites dans un cylindre rotatif isolant couplé à un moteur (figure 2.4). La rotation du cylindre provoque la culbute des particules qui se chargent par contacts répétés les uns avec les autres, ou bien avec la paroi interne du cylindre.

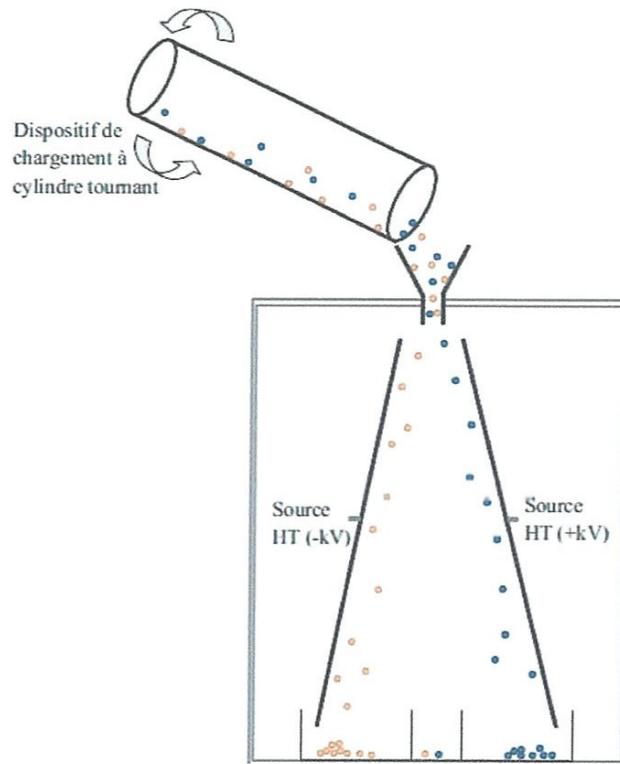


Figure 2.4 : *Représentation schématique d'un séparateur à chute libre à cylindre tournant*

c. Séparateur à chute libre à cyclone :

Les particules ont tendance à se charger dans les dispositifs à chute libre d'une manière relativement insuffisante, à cause de la faible vitesse de frottement. L'utilisation d'un cyclone d'air en tant que dispositif d'acquisition de charge afin de produire une vitesse de frottement plus élevée est la bonne solution (figure 2.5).

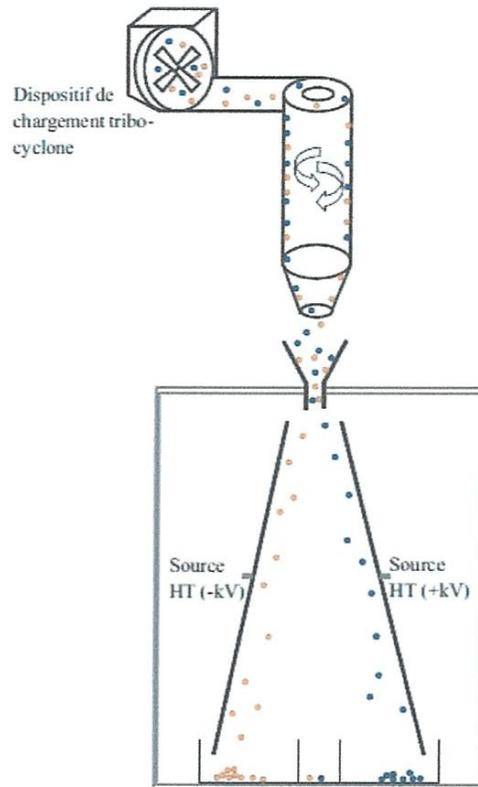


Figure 2.5 : Représentation schématique d'un séparateur à chute libre à cyclone.

d. Séparateur à chute libre à lit fluidisé :

Les mélanges granulaires sont mis à l'intérieur d'une chambre à fluidisation où ils subissent un chargement triboélectrique grâce à l'injection d'air par une soufflante (figure 2.6); une fois chargées, les particules sortent vers le séparateur à chute libre à travers un clapet commandé.

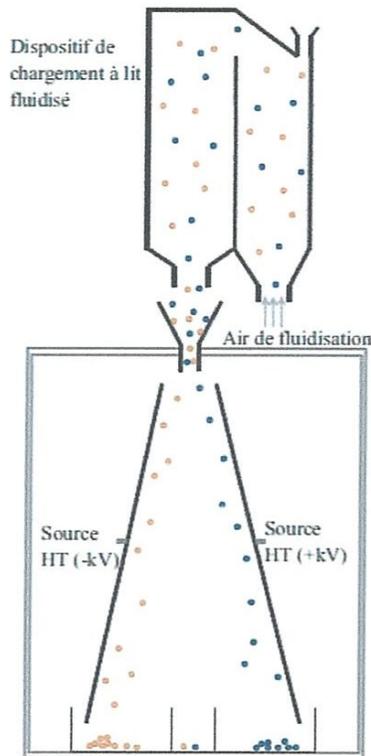


Figure 2.6 : *Représentation schématique d'un séparateur à chute libre à lit fluidisé* [8].

2.3.3 Séparateur tribo-aéro-électrostatique

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

L'avantage de ces dispositifs est la simultanéité des deux opérations : la charge triboélectrique des particules par collisions dans le lit fluidisé et la séparation électrostatique de celles-ci dans un champ électrique intense généré par des électrodes connectées aux générateurs de haute tension continue de polarités inversées, la séparation s'effectue par le fait que les électrodes attirent les particules contrairement polarisées [8].

a. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses

Les électrodes qui vont attirer la matière granulaire fluidisée sont deux bandes transporteuses du tapis roulant ; ils sont à base d'une matière conductrice (figure 2.7) et s'appuient à des tambours isolants. Leur entrainement est assuré par des moteurs triphasés alternatifs commandés par des variateurs de fréquence. Les particules chargées collent sur la surface des bandes contrairement polarisées pour être transportées vers la zone de récupération.

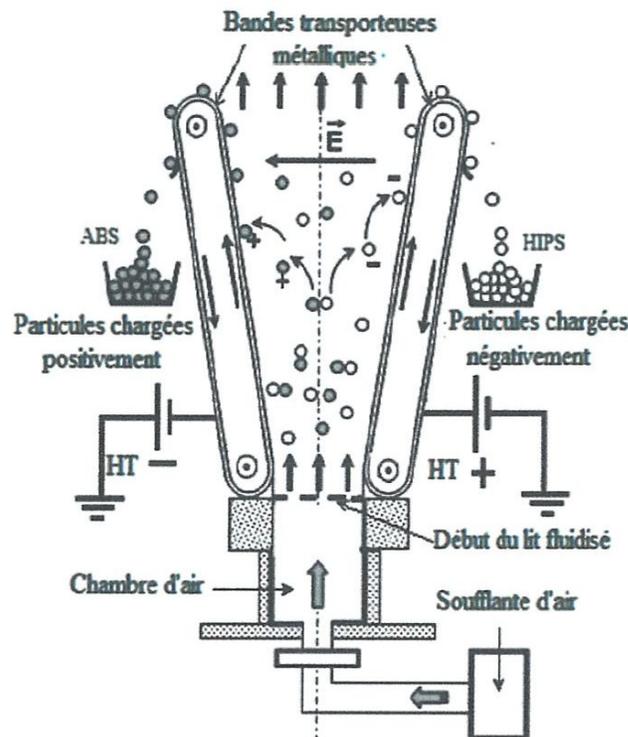


Figure. 2.7 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuse.

b. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à tambours transporteurs

Ce dispositif a le même principe de fonctionnement de celui précédemment cité (figure 2.8), la différence entre les deux procédés se manifeste par les électrodes utilisées.

Cette installation utilise des tambours conducteurs reliés à des arbres entrainés par des moteurs dont le but de diminuer la traversée des particules, de réduire le coût du séparateur et d'augmenter sa robustesse.

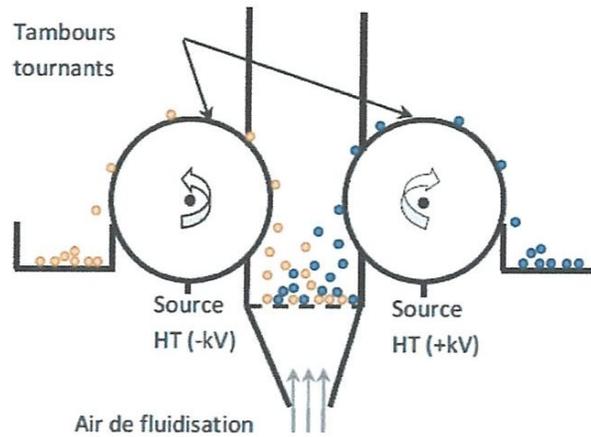


Figure 2.8 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à tambours transporteurs.

c. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants

C'est une installation particulièrement adaptée à la séparation des particules de plastique fines. Deux disques métalliques sont montés sur un même arbre (figure 2.9) entraînés 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.

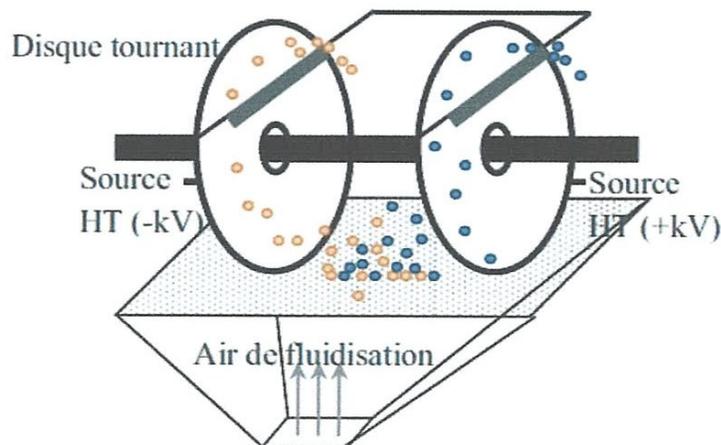


Figure. 2.9 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants.

d. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales:

Deux électrodes verticales collées à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique isolante (figure 2.10), attirent les particules de signe opposé et repoussent celles de même signe, pour les dévier vers les collecteurs.

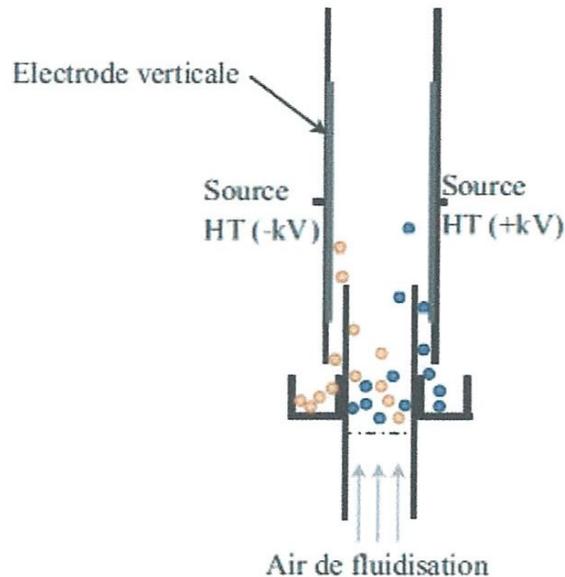


Figure 2.10 : *Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales* [8].

2.4 Les forces exercées sur les matériaux granulaires

Durant le transport, le stockage, l'écoulement, la densification des mélanges granulaires sont soumises à plusieurs types de forces inter particulaires qui prennent naissance lors du frottement ou du simple contact [4]. Les forces qui s'exercent sur les matériaux granulaires sont:

- Les forces de la pesanteur
- Les forces de London-Van der Waals
- Les forces électrostatiques
- Les Forces aérodynamiques.

2.4.1 Forces de la pesanteur

Le poids d'un corps de masse m s'exprime par: $p = mg$
avec : p en Newton (N), m en kg et $g = 9.81 \text{ N.k}^{-1}$ [8].

Aux forces de la pesanteur s'opposent des forces inter partielles. Elles sont différentes pour des particules chargées d'électricité statique ou électriquement neutres.

2.4.2 Forces de London-Van der Waals

Les forces de London-Van der Waals sont des forces de nature électrostatique qui s'exercent sur des molécules ou des particules électriquement neutres. Elles peuvent être estimées en faisant la somme de toutes les combinaisons possibles de paires d'atomes entre particules et s'écrivent:

$$F = \frac{\lambda}{a^7}$$

a : la distance entre les deux centres

λ : est une 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.

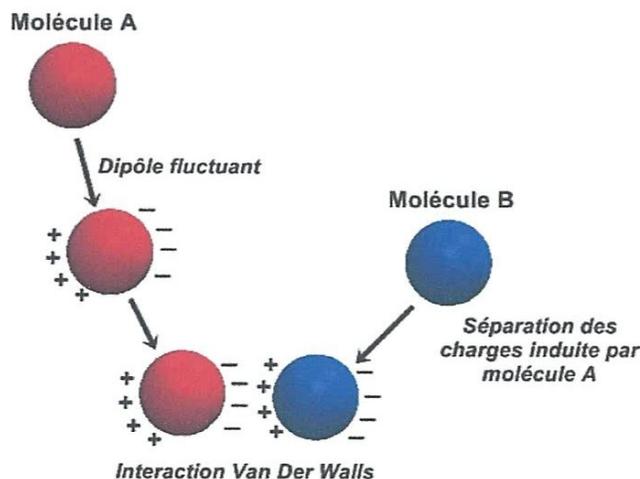


Figure 2.11 : *Le phénomène physique derrière la force Van der Waals : polarisation électrique des atomes ou molécules neutres.*

Le tableau 2.2 donne la valeur des forces d'interaction entre des particules séparées par une distance de 50 \AA , en fonction de leur rayon. Pour des particules de 1 mm, elles sont approximativement identiques. Ces constatations expliquent le fait que les fines particules aient plus tendance à s'agglomérer que les grosses.

Rayon [cm]	Force de Van der Waals $a = 50 \text{ \AA}$	Poids [g.cm/s ²]
10^{-5}	3.3×10^{-4}	4.1×10^{-12}
10^{-4}	3.3×10^{-3}	4.1×10^{-9}
10^{-3}	3.3×10^{-2}	4.1×10^{-6}
10^{-2}	3.3×10^{-1}	4.1×10^{-3}
10^{-1}	3.3	4.1

Tableau 2.2: *Forces de Van der Waals et de pesanteur en fonction de la taille des particules, d'après Higuchi.*

2.4.3 Force de Coulomb

L'expression des *forces attractives ou répulsives* que s'exercent sur deux charges électriques immobiles disposées sur des particules chargées a été découverte expérimentalement par Charles-Augustin de Coulomb. Il a réalisé 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 $1/r^2$.
- La force électrique est proportionnelle à une constante k afin d'évaluer la force électrique en newton.

Si q_1 et q_2 sont les charges des deux particules et r la distance entre leurs centres, la loi de Coulomb permet d'écrire:

$$F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Où :

F_e : Force électrique en newton (N) ;

q_1 : 1^{er} Charge qui applique la force électrique sur la 2^{ème} charge en coulomb (C) ;

q_2 : 2^{ème} Charge qui applique la force électrique sur la 1^{er} charge en coulomb (C) ;

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

k : Constante de la loi de Coulomb, $k = k \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$ et ϵ_0 étant la permittivité du vide. Le calcul de ces forces a été établi pour des éléments supposés sphériques de charges données, de tailles différentes et en proche contact.

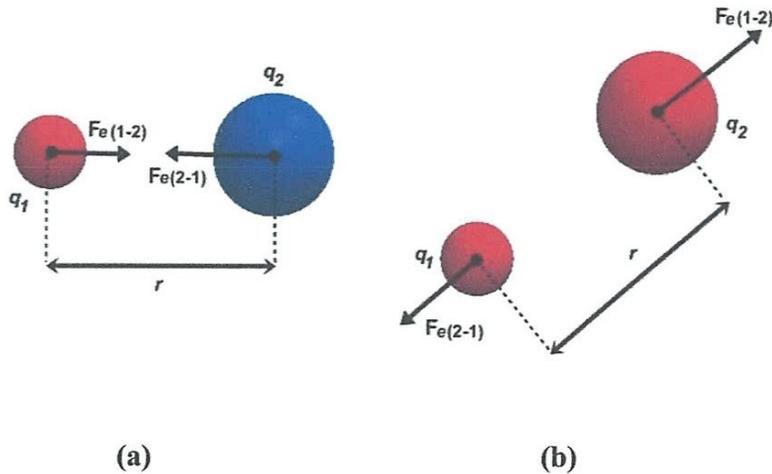


Figure 2.12 : Force de coulomb entre deux sphères chargées (a) : attraction, charges signes contraires ($q_1q_2<0$), (b) : répulsion, charges signes semblables ($q_1q_2>0$).

Le tableau 2.3 montre une comparaison entre les forces électrostatiques et les forces de pesanteur, pour des petites particules.

Rayon [cm]	Force [dyne]	Poids [g.cm/s ²] ; Densité =1
10^{-4}	9×10^{-6}	4.1×10^{-9}
10^{-3}	9×10^{-4}	4.1×10^{-6}
10^{-2}	9×10^{-2}	4.1×10^{-3}
10^{-1}	9	4.1
1	9×10^2	4.1×10^3

Tableau 2.3: Forces d'interaction électrostatique entre deux sphères chargées.

Par conséquent, entre deux particules de 1 μm de diamètre, avec le même maximum de charges, la force qui s'exerce est 1000 fois supérieure à celle de la pesanteur. En analysant les deux tableaux, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les forces de Van der Waals diminuent plus rapidement que les forces électrostatiques, quand la distance entre les particules augmente.
- Pour des particules de diamètre égal ou inférieur au micron, les forces de Van der Waals sont plus importantes que les forces électrostatiques, lorsque ces particules sont en contact.
- Quand le diamètre des particules diminue, les forces de van der Waals décroissent plus lentement que les forces électrostatiques.

La taille des particules chargées et les distances qui les séparent ont une influence sur l'importance de ces forces (les forces de Van-der-Waals et les forces électrostatiques). Les propriétés d'écoulement des matériaux granulaires sont fonction des interactions particulières. Chaque particule se déplace en fonction de son poids, mais elles seront gênées dans leur mouvement par des contacts, soit avec les autres particules, soit avec les parois.

Les phénomènes d'adhésion et de cohésion peuvent être expliqués par les forces de Coulomb qui s'exercent soit entre deux particules, soit entre une particule et la paroi [4].

A. 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 de 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. Ces points sont souvent des arrêtes et protubérances.

B. 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_1 et de la force de pesanteur F_2 . (Figure 2.13)

Comme nous l'avons déjà souligné, les forces de Coulomb jouent un rôle prépondérant et il est bien évident que la nature du matériau support influencera de façon considérable ce phénomène [4].

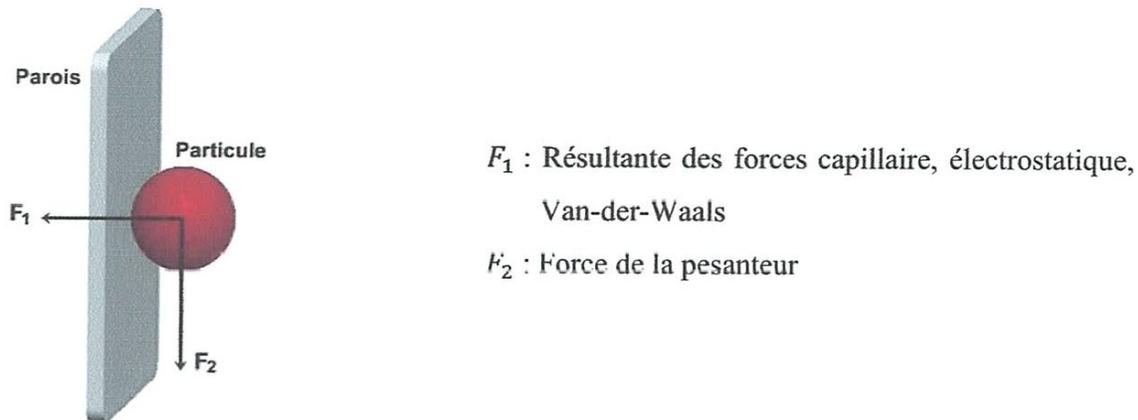


Figure 2.13 : *Représentation de différentes forces intervenant dans l'interaction particule-parois.*

2.4.4 Forces aérodynamiques

Pour étudier théoriquement le mouvement de particules isolantes chargées dans les procédés de chargement par effet triboélectrique, il faut tenir compte des forces aérodynamiques agissant sur ces particules [10].

L'équation des forces agissant sur une particule chargée électriquement est la suivante :

$$F_i = F_{el} (Q, E_0, x) \pm F_a - F_g$$

Où :

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

F_g : la force gravitationnelle.

F_g force d'inertie F_i s'exprime par la relation :

$$F_i = W (\rho_s - K_\rho) \frac{dv}{dt}$$

Où :

v : la vitesse de particule

K_ρ : coefficient de forme (pour les particules sphériques $K= 0,5$),

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

ρ_s : densité d'une particule sphérique

ρ_s : densité de l'air.

La force aérodynamique s'exprime par la relation :

$$F_a = W (\rho_s - K_\rho) \frac{C_d \pi R^2 \rho v_r^2}{2}$$

Où :

v_r : la vitesse relative d'une particule dans l'air

C_d : étant en fonction du nombre du Reynolds.

$$R_e = \frac{V.L}{\nu_i}$$

V : vitesse du fluide [m/s]

L : Dimension du fluide [m]

ν_i : viscosité du fluide [m²/s].

Friction de l'air, ou la résistance de l'air, est un exemple de frottement du fluide. La force de friction est dépendante de la vitesse. Cette dépendance peut être très compliquée, et seulement les cas spéciaux peuvent être traités analytiquement. À des vitesses très faibles des particules, la résistance de l'air est approximativement proportionnelle à la vitesse et peut être exprimée sous la forme :

$$F_f = -bv$$

Où le signe négatif implique qu'il est directement opposé à la vitesse.

2.5 Conclusion

La demande croissante en matières premières secondaires, l'augmentation de la production de déchets... sont autant d'enjeux auxquels la planète doit aujourd'hui faire face. D'ici 2020, l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques) prévoit une production de déchets supérieure de 45 % à celle de 1995. Il est donc indispensable de limiter l'impact des déchets sur l'environnement, et de les revaloriser pour créer de nouvelles ressources et de l'énergie.

La récupération et le traitement de la grande diversité de matières plastiques contenues dans les déchets d'équipements électriques et électroniques en fin de vie est devenue une préoccupation majeure pour toutes les entreprises qui travaillent dans ce secteur. Ce pendant les procédés de séparation électrostatique reposant sur des dispositifs de chargement par corona ou par effet triboélectrique sont considérés parmi les procédés les plus efficaces pour la récupération des principaux polymères des DEEE [1].

Le chapitre suivant sera consacré à une étude expérimentale de chargement triboélectrique des différents matériaux granulaires plastiques utilisant un dispositif de chargement à lit fluidisé.

Chapitre 3 : ..

**Etude expérimentale du chargement
triboélectrique à lit fluidisé**

3.1 Introduction

Le résultat de tout processus de séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules. Le but de ce chapitre est d'évaluer les effets de plusieurs facteurs qui pourraient influencer sur la charge triboélectrique dans le lit fluidisé.

Les études ont porté sur le chargement triboélectrique des particules isolantes, ce qui a permis d'évaluer l'effet de temps de chargement, la vitesse de l'air et aussi l'effet de la quantité granulaire sur la charge produite par effet triboélectrique dans un dispositif de chargement à lit fluidisé.

3.2 Installations expérimentales

Un dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé a été conçu et réalisé au sein du laboratoire de Génie Electrique de l'université de Guelma LGEG. Le dispositif utilise la force aérodynamique pour le chargement des particules, la charge provenant principalement à la suite des contacts entre particules et entre les particules et les parois du dispositif.

3.2.1 Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé

Le dispositif représenté à la (figure 3.1) est destiné à l'analyse expérimentale de l'acquisition de charge triboélectrique sur des petites quantités de matériaux granulaires isolants.

Il est composé de deux parties détachables, la chambre de fluidisation avec des parois transparentes en polyéthylène téréphtalate (PET), afin de permettre la visualisation des phénomènes et un système d'injection d'air à l'aide d'une soufflante.

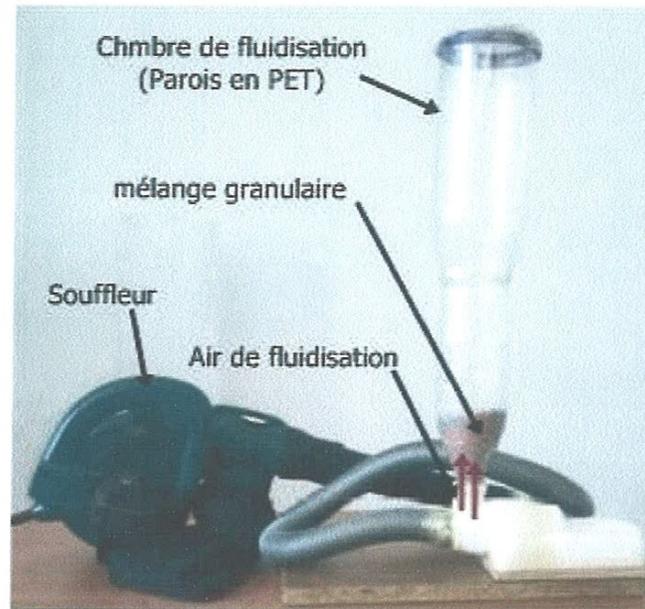


Figure 3.1 : Dispositif de triboélectrisation à lit fluidisé utilisé.

3.2.2 Types des collisions dans le chargeur à lit fluidisé

L'acquisition de charge par effet triboélectrique se produit entre deux surfaces, leur contact est indispensable. Des charges électriques passent de l'une à l'autre, modifiant ainsi le nombre de charges contenues dans chacune des surfaces, ce qui les rend contrairement polarisées [17].

Le mouvement des particules isolantes dans les dispositifs à lit fluidisé implique trois types de collision: collision des particules de même matière, collision des particules de matière différente et collision entre les particules et les parois interne de la chambre de fluidisation [18]. Le phénomène de fluidisation commence par des collisions majoritairement type particule-particule, et finit par des collisions quasiment particule-paroi.

a) Collision des particules de même matière :

Helmholtz dans son modèle éloigne la possibilité du transfert de charge entre deux corps de la même matière tribo-électriquement, en contrepartie, beaucoup d'auteurs ont réussi à électriser positivement et négativement deux morceaux du même isolant frottés l'un contre l'autre, mode inexplicable dans les idées de Helmholtz [19].

Un exemple fréquemment rencontré : frottant deux particules neutres de taille différente, la particule grande a la tendance de se charger positivement et la petite négativement (figure 3.2).



Figure 3.2 : Transfert de charge par collision entre deux particules de même nature

b) Collision des particules de matière différente :

Lorsque deux matériaux différents sont mis en collision (figure 3.3) ils acquièrent des charges électriques de signe opposé. La polarité des charges dépend de nombreux facteurs, notamment l'ordre dans la série triboélectrique, le dernier de la liste est le matériau le plus électronégatif, constamment il se charge négativement, et vice versa. Plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée. En réalité, cet ordre de séries n'est que très approximatif car il diffère souvent d'un auteur à l'autre. En effet, des facteurs externes peuvent facilement inverser les signes obtenus.

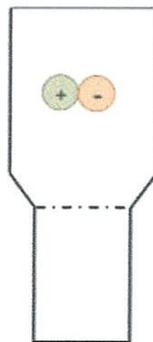


Figure 3.3 : Transfert de charge par collision entre deux particules de différente nature

c) **Collision entre les particules et les parois interne de la chambre de fluidisation:**

Dans un dispositif de chargement tribo-électrique à lit fluidisé, l'intensité de la collision particule-paroi augmente lorsque la vitesse de fluidisation est égale à la vitesse minimum de bullage $U_f = U_{mb}$, ensuite ces collisions deviennent en perpétuelle expansion. Arrivant à la vitesse terminale de chute libre des particules $U_f = U_t$, l'ensemble des granules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation.

Ce frottement (particules-parois) produit évidemment un transfert de charge (figure 3.4), les parois ont la tendance de se charger négativement, et les particules positivement. En réalité, les signes peuvent s'inverser d'une manière facile et très surprenante, sous l'influence de facteurs tels que : l'électronégativité des matériaux, la rugosité de la paroi,...etc.

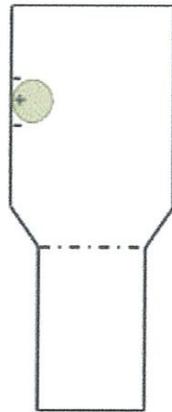


Figure 3.4 : Transfert de charge par collision entre une particule et la paroi de fluidisation

3.2.3 Types de particules utilisées

Les matériaux qui ont fait l'objet de ces études sont des produits plastiques récupérés à partir du broyage de déchets industriels. Il s'agit de particules PS (polystyrène) de forme quasi-sphérique et PE (polyéthylène) de forme sphérique et PP (polypropylène).

L'aspect des matériaux granulaires utilisés est montré sur la (figure 3.5).

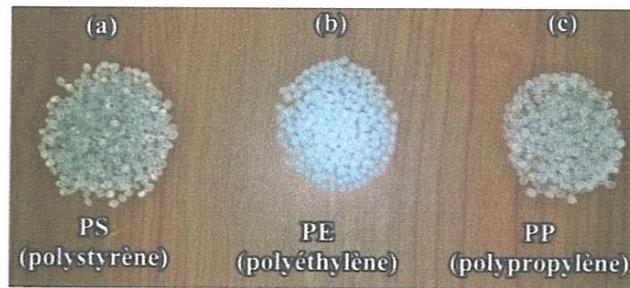


Figure 3.5 : Matériaux utilisés dans les expériences de triboélectrisation : (a) : PS, (b) : PE et (c) : PP.

3.2.4 Mesure de la charge triboélectrique.

La cage de Faraday (figure 3.6) est l'un des dispositifs les plus courants pour mesurer la charge des particules tribo-électrisées. Une cage de Faraday est constituée de deux cylindres conducteurs concentriques séparés par un isolant. Le cylindre extérieur est relié à la terre, non seulement pour éviter que les charges extérieures ne soient mesurées mais aussi pour réduire tous qui est perturbations électriques extérieurs. Le produit dont on doit mesurer la charge est introduit dans le cylindre intérieur. Ce cylindre est isolé de la terre et connecté à un électromètre dont le rôle est de mesurer la charge électrique qui s'y répartit sur la surface extérieure par répulsion électrostatique (les charges de même signe se repoussent le plus loin possible sur la surface).

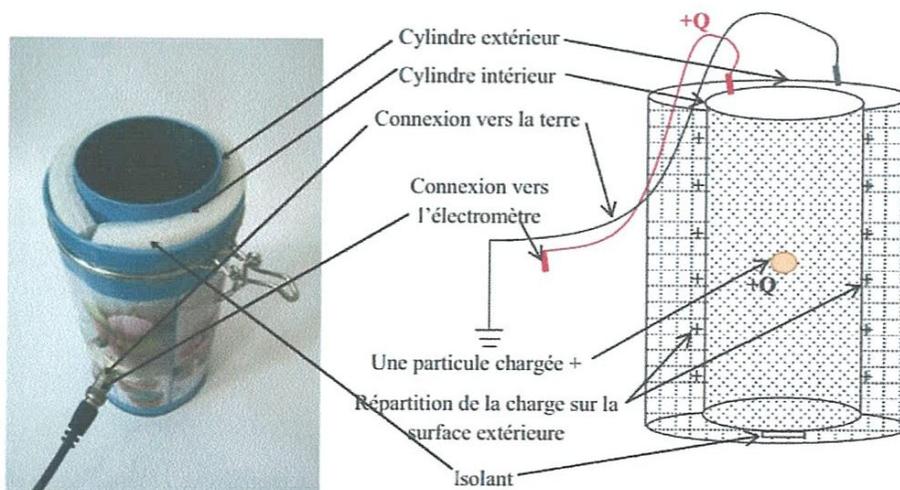


Figure 3.6 : La cage de Faraday utilisé.

Afin de mesurer précisément la charge acquise, Un électromètre numérique Keithley modèle 6514 (figure 3.7) a été utilisé, ayant les avantages principaux suivants [20] :

- Mesures de charge de 10fC à 20 μ C ;
- Haute vitesse - jusqu'à 1200 lectures / seconde ;
- Interfaces facilement avec les commutateurs, les ordinateurs et les gestionnaires de composants ;
- Annule décalages de tension et de courant facilement.



Figure 3.7 : Electromètre numérique Keithley modèle 6514.

3.2.5 Mesure de la masse granulaire

Mesurer la masse granulaire avant chaque expérience est nécessaire, pour cela on utilise une balance électronique modèle (figure 3.8).



Figure 3.8 : Balance numérique.

3.3 Procédure expérimentale

La difficulté de commande et de réglage des paramètres d'un dispositif de chargement tribo-électrostatique réside dans le fait que les signes peuvent s'inverser de manière facile, est très surprenant, c'est une particularité de l'électricité statique. Il est donc très important de

formuler l'ensemble des paramètres qui ont une grande influence sur le contrôle de dispositif [18].

Les essais ont été réalisés sur les trois types d'isolants précédemment cités (PS, PE et PP) séparément.

Les paramètres de contrôle sont :

- le temps de chargement durant chaque expérience [s] ;
- La vitesse de l'air de fluidisation [m^3/min] ;
- la masse du produit granulaire [g] ;

Après chaque opération de chargement, on mesure premièrement la charge des particules à l'aide d'un amplificateur de mesure et une cage de Faraday.

La charge acquise par le matériau granulaire s'exprime en nC/g.

3.4 Résultat et discussion

3.4.1 Influence du temps de chargement

Le tableau 3.1 et la figure 3.9 représentent les résultats expérimentaux de l'influence du temps de chargement sur la charge acquise par des produits granulaires, allant de $t = 30$ s jusqu'à $t = 10$ min, les autres paramètres sont maintenus constants :

- La masse du produit $m = 20$ g ;
- La vitesse de l'air de fluidisation $V = 1,4$ m^3/min ;
- Des parois internes en PET.

	30s	1min	2min	5min	10min
PS	-22.36	-37.57	-61.55	-91.23	-105.42
PE	-39.44	-54.29	-105.61	-128.01	-196.77
PP	-53.05	-92.60	-173.6	-170.13	-190.87

Tableau 3.1 : Influence du temps de chargement sur la charge acquise par le : PS, PE et PP.

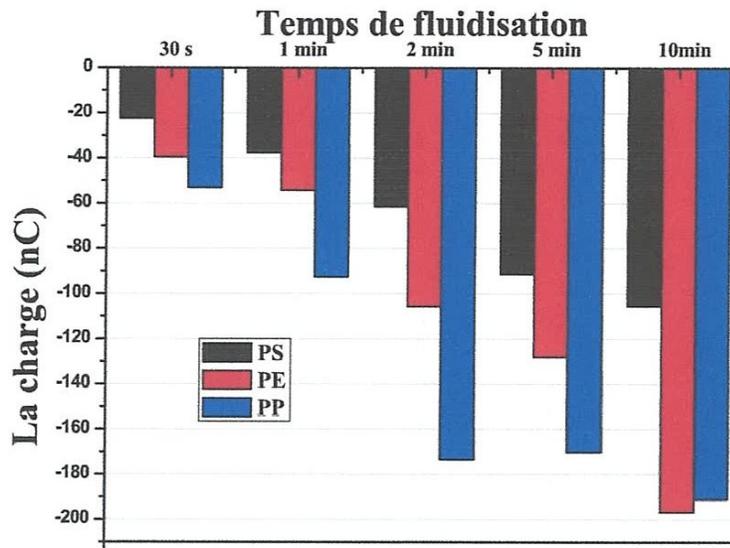


Figure 3.9 : Influence du temps de chargement sur la charge acquise par le : PS, PE et PP.

3.4.2 Influence de la vitesse de l'air de fluidisation

Le résultat de la charge acquise en fonction de vitesses de fluidisation : $V = 1,4 \text{ m}^3/\text{min}$, $V = 2,1 \text{ m}^3/\text{min}$, $V = 2,8 \text{ m}^3/\text{min}$, $V = 3,5 \text{ m}^3/\text{min}$, est présenté dans la figure 3.10, les parois sont en PET, le temps de chargement et la masse granulaire sont constant : $t = 2 \text{ min}$ et $m = 20\text{g}$.

	1,4 m^3/min	2,1 m^3/min	2,8 m^3/min	3,5 m^3/min
PS	-61.55	-48.09	-98.86	-108.73
PE	-105.61	-155.23	-135.12	-164.89
PP	-173.6	-159.48	-203.64	-144.66

Tableau 3.2 : Influence de la vitesse de l'air de fluidisation sur la charge acquise par le : PS, PE et PP.

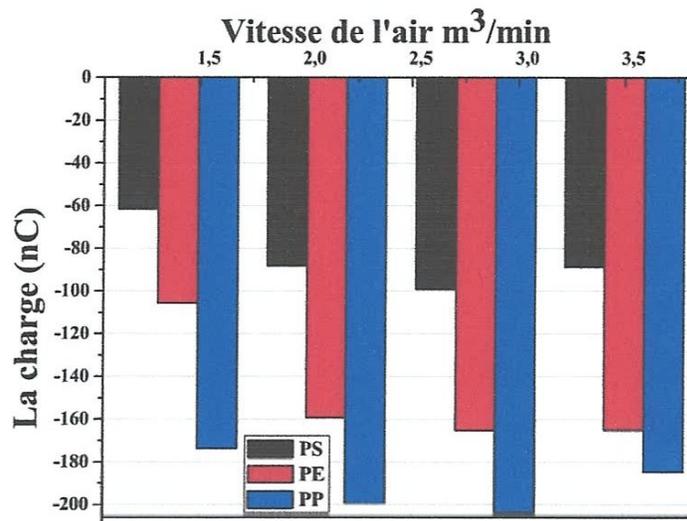


Figure 3.10 : Influence de la vitesse de l'air de fluidisation sur la charge acquise par le : PS, PE et PP.

3.4.3 Influence de la masse granulaire

Le tableau 3.3 et la figure 3.11 montrent l'influence de la masse granulaire sur le chargement des particules, variant la masse de $m = 20$ g jusqu'à $m = 100$ g, avec un pas de 20, les parois sont en PET, le temps de chargement ainsi que la fréquence du souffleur sont constants : $t = 2$ min et $V = 1,4$ m³/min.

	20g	40g	60g	80g	100g
PS	-61.55	-276.45	-3.18.72	-306.13	-249.19
PE	-105.61	-170.12	-175.2	-160.57	-190.02
PP	-173.6	-155.45	-175.21	-153.24	-131.65

Tableau 3.3 : Influence de la vitesse de l'air de fluidisation sur la charge acquise par le : PS, PE et PP.

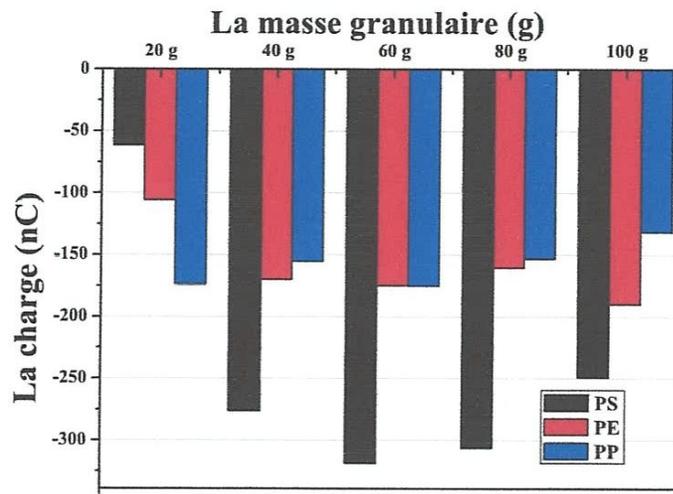


Figure 3.11 : Influence de la masse granulaire sur la charge acquise par le : PS, PE et PP.

3.4.4 Interprétation et Discussion

Les trois matériaux (PS, PE et PP) se chargent négativement dans toutes les expériences, donc les parois des dispositifs de chargement se chargent positivement (PET).

Le PP acquit une petite charge par rapport des deux matériaux (PS et PE).

La charge acquise par les granules de PS, PE et de PP est proportionnelle au temps de leurs chargements et la vitesse de fluidisation à cause du croisement des collisions (figures 3.9 et 3.10).

Selon la figure 3.11, la masse granulaire a une influence sur la charge triboélectrique de PS mais elle n'influe pas considérablement sur le chargement des deux matériaux isolants (PE et PP).

Plus on augmente le débit d'air, plus l'intensité ainsi que le nombre des collisions augmente. La charge commence à diminuer avec l'augmentation du débit d'air de fluidisation. Pour le PEHD, l'influence de la vitesse d'air se manifeste par la neutralisation de la charge acquise.

La charge triboélectrique change d'un matériau à l'autre, ceci revient à la différence entre les constantes diélectriques (permittivité relative).

3.5 Conclusion

Le dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé est considéré comme un moyen pour faire acquérir des charges électriques aux différentes matières plastiques granulaires.

L'étude expérimentale de l'ensemble des paramètres de réglage d'un procédé d'acquisition de charge à lit fluidisé montre que : le temps de chargement et la vitesse de l'air de fluidisation influent considérablement sur la charge acquise des particules, contrairement à leur masse granulaire.

Le chargement avec ce type de dispositif contient deux types de collision : entre des particules de la même matière et entre des particules et des parois. Tandis que lors de la séparation d'un mélange granulaire, le troisième type de collision : entre des particules de matière différente intervient intensément, ce nouveau facteur peut inverser les signes obtenus.

Le chapitre suivant sera consacré à la réalisation d'un séparateur électrostatique à plan incliné et l'étude de l'effet de facteurs internes sur le rendement de l'installation, on va voir dans le chapitre suivant l'influence de la tension appliquée aux électrodes du séparateur et leur angle d'inclinaison sur les taux de récupération et la pureté des produits séparés.

Chapitre 4 :

**Réalisation et étude d'un séparateur
électrostatique à plan incliné**

4.1 Introduction

Le résultat de tout processus de séparation triboélectrostatique est fortement dépendant d'une part de l'efficacité de la charge des particules isolants, et d'autre part du rendement de l'installation de séparation électrostatique. Le but de ce chapitre est d'évaluer les effets de paramètres d'un séparateur à plan incliné, cette installation a été réalisée au sein du laboratoire LGEG de l'Université 8 mai 1945 de Guelma, il pourrait influencer sur l'efficacité de séparation du mélange granulaire isolant. En effet le rendement de l'installation va dépendre de deux paramètres tels que : la haute tension appliquée, l'angle d'inclinaison du séparateur à plan incliné.

Les études ont porté sur le chargement triboélectrique et la séparation des particules isolantes, ce qui a permis d'améliorer de façon importante les résultats de la séparation électrostatique.

4.2 Installations expérimentales

Le dispositif de chargement triboélectrique sur des petites quantités de matériaux granulaires isolants est le même dispositif de chargement utilisé dans le chapitre précédant (dispositif de chargement à lit fluidisé).

Il est composé de deux parties détachables, la chambre de fluidisation avec des parois transparentes en polyéthylène téréphtalate (PET), afin de permettre la visualisation des phénomènes et un système d'injection d'air à l'aide d'une soufflante.

4.2.1 Description du séparateur triboélectrique à plan incliné

La séparation des mélanges granulaires est effectuée dans un séparateur triboélectrique à plan incliné constitué des éléments suivants (figure 4.1) :

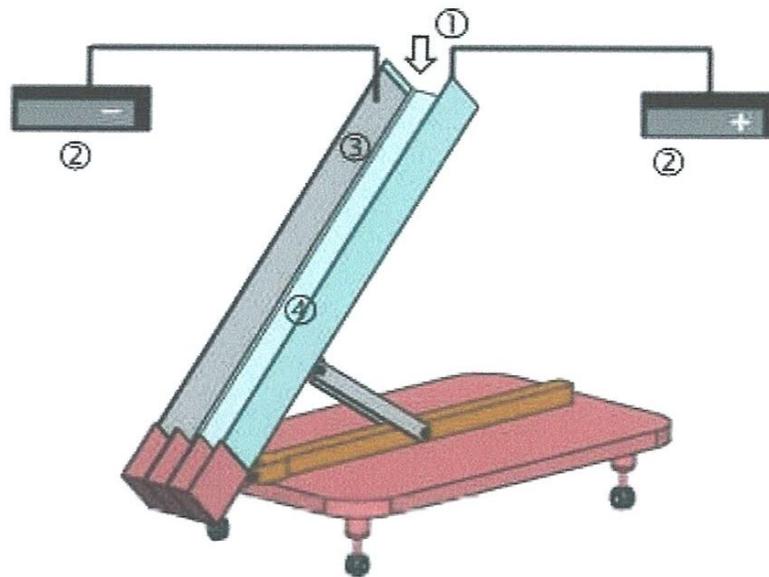


Figure 4.1 : Photographie du dispositif de séparation triboélectrique 1- entonnoir, 2- alimentation haute tension, 3- électrode, 4- bac collecteur.

- un plan incliné isolant.
- deux électrodes rectangulaires de dimensions (10cm × 75cm) ;
- bac collecteur ;
- deux alimentations de haute tension de polarités opposées.

a) Plan incliné :

Les mélanges granulaires sont mis à l'intérieur d'une chambre à fluidisation où ils subissent un chargement triboélectrique grâce à l'injection d'air par une soufflante, il glisse ensuite dans un fort champ électrique produit entre deux électrodes et situé dans un plan incliné isolant (figure 4.1).

Les particules chargées sont alors déviées dans leur glissement, elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge.

b) Les électrodes :

Les électrodes représentent la partie essentielle de ce dispositif. Deux électrodes verticales collées à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique isolante en polyéthylène haute densité (PEHD).

Les deux électrodes sont reliées à deux alimentations de Haute Tension réglable entre 5kv et ± 10 kv et de polarités opposées. On peut donc obtenir une différence de potentiel pouvant atteindre les 20 kV.

c) Bac collecteur :

Les granules chargés positivement se déplacent dans le sens du champ électrique, vers l'électrode négative et les granules chargés négativement sont dirigés vers l'électrode positive. Soumis à l'action de la force électrique, les granules chargés se déplacent vers les électrodes de polarités opposées, qui les entraînent vers le collecteur de produits. Il est fabriqué en bois permettant de récupérer les particules en fin de séparation.

d) Alimentation haute tension :

Les deux électrodes du séparateur sont reliées chacune à une alimentation de haute tension. Le champ généré par ces deux électrodes est d'une grande importance, d'où la nécessité de disposer de grandes valeurs de tension. Les générateurs utilisés est montré à la (figure 4.2 et 4.3).



Figure 4.2 Photographie des générateurs de haute tension négative (-) utilisé.



Figure 4.3 : Photographie des générateurs de haute tension positive (+) utilisé.

4.2.2 Types de particules utilisées

Les expériences ont été effectuées sur quatre types des granules isolants utilisés dans la plasturgie : polycarbonate (PC), polyamide (PA) :

a) Polycarbonate (PC) : [21]

C'est un isolant à très haute résistance aux chocs même à basse température, il maintient sa rigidité dans une large plage de température. Très souvent utilisé dans le Capotage de machines, les vitres de protection. Le tableau 4.1 présente ses principales caractéristiques :

Densité [g/cm ³]	1.2
Couleur	Orange
Forme	Cylindrique
Taille [mm]	Ø 3 x 3.6
Masse [mg]	25
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 % [%]	0.15
Résistance à la traction [N/mm ³]	70
Rigidité diélectrique [kV/mm]	30
Résistivité transversale [Ω/cm]	10 ¹⁵
Constante diélectrique	3

Tableau 4.1 : Caractéristique principales du polycarbonate (PC).



Figure 4.4 : Echantillon des granules de polycarbonate (PC) utilisés.

b) polyamide (PA) : [21]

Il se caractérise par une haute résistance mécanique, rigidité, dureté, une faible reprise d'humidité, des bonnes propriétés de glissement, et une excellente résistance à l'usure. Ses bons caractéristiques permettent de l'utiliser dans les équipements chirurgicaux, le matériel

informatique, les éléments d'accouplements, la construction mécanique, et même dans des milieux aqueux. Ces principales caractéristiques sont représentées dans le tableau 4.2 :

Densité [g/cm ³]	1.14
Couleur	Bleu
forme	Cylindrique
Taille [mm]	Ø 2.5 x 3.4
Masse [mg]	20
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 % [%]	3
Résistance à la traction [N/mm ³]	70
Rigidité diélectrique [kV/mm]	20
Résistivité transversale [Ω/cm]	10 ¹⁵
Constante diélectrique	3.7

Tableau 4.2 : Caractéristique principales du polyamide (PA).



Figure 4.5 : Echantillon des granules de polyamide (PA) utilisés.

4.3 Procédure expérimentale

Dans le cas de notre échantillon PA/PC, les particules de PC seront chargées négativement et se déposent dans le compartiment A (situé près de l'électrode positive). Les particules de PA seront chargées positivement et se déposent dans le compartiment C (situé près de l'électrode négative). Les particules moins chargées ne vont pas être attirées par les électrodes, et tombent par la suite dans le compartiment mixte B (figure 4.6).

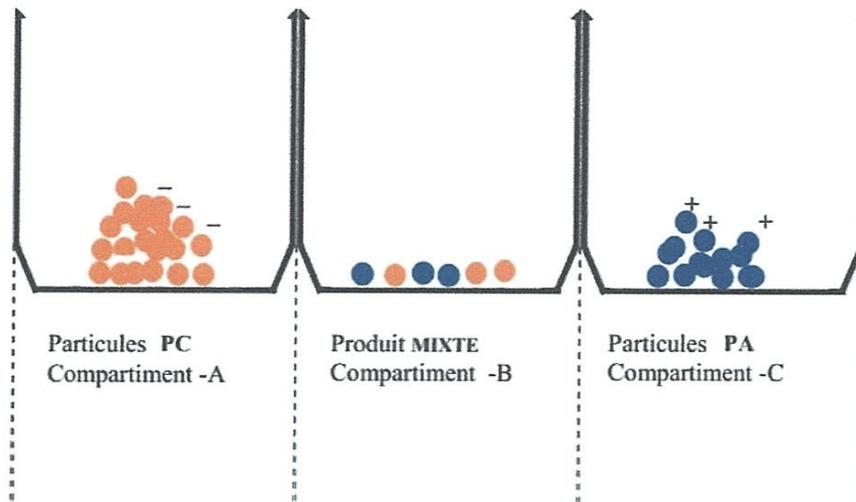


Figure 4.6 : Représentation schématique des trois compartiments du collecteur.

Les produits obtenus après séparation sont pesés avec une balance électronique (précision de 0,01g), pour déterminer la pureté et le taux de récupération de chaque produit.

Les formules suivantes permettent de calculer la pureté et la récupération de chaque produit:

1. Récupération :

Critère pour juger le taux (en pourcentage) du produit récupéré sur le produit total introduit.

$$Rec(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \cdot 100$$

Avec :

m_{ic} : quantité du produit i considéré collecté dans la partie qui lui est réservée.

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

2. Pureté :

Critère pour juger la pureté (en pourcentage) du produit collecté.

$$Pur(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \cdot 100$$

Avec :

mic: quantité du produit *i* considéré collecté dans la partie qui lui est réservée.

mtc: quantité totale (des deux produits) collectée dans cette même partie.

4.3.1 Procédure de déroulement des expériences

Un type d'échantillon (masse de l'échantillon: 100 g) est préparé sous forme de mélange binaire avec une composition 50%PA – 50%PC.

La procédure expérimentale se fait en trois étapes principales :

- ✓ préparation des échantillons et leur introduction dans le dispositif de triboélectrisation ;
- ✓ triboélectrisation puis séparation électrostatique des granulés ;
- ✓ analyse des résultats

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

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

La deuxième étape, qui constitue en l'essai de chargement proprement dit, est composée d'une succession d'opérations :

- alimenter le dispositif;
- chronométrer la durée de triboélectrisation et observer les phénomènes ;
- arrêter l'alimentation;
- récupérer le produit dans un récipient.

La troisième étape consiste à:

- allumer les sources à haute tension et les ajuster aux valeurs établies à priori,
- introduire le produit chargé dans l'entonnoir du séparateur,
- éteindre les sources hautes tension après séparation.

La quatrième étape consiste à l'analyse des résultats, en effectuant les opérations suivantes :

- retirer les produits récupérés dans chaque compartiment du collecteur ;
- évaluer la pureté et la récupération des produits PA et PC.

L'efficacité du processus de séparation sera ensuite jugée en rapport avec la quantité des granules séparée et leur pureté.

4.3.2 Séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants

Le réglage du débit d'air peut être fait en variant la tension à l'aide d'une alimentation réglable. La couche compacte de granules deviendra un lit fluidisé sous l'action du flux d'air. La charge triboélectrique est produite par des contacts répétés entre les particules ou entre les particules et les parois de la chambre de fluidisation.

Après un temps déterminé de fluidisation permettant aux particules d'acquérir une charge suffisante, le dispositif de triboélectrisation est arrêté et le produit récupéré est introduit dans le séparateur après avoir mis en marche les deux alimentations de haute tension

Dans le cas de notre échantillon PA/PC, les particules de PC seront chargées négativement et se déposent dans le compartiment **A** (situé près de l'électrode positive). Les particules de PA seront chargées positivement et se déposent dans le compartiment **C** (situé près de l'électrode négative). Les particules moins chargées ne vont pas être attirées par les électrodes, et tombent par la suite dans le compartiment mixte **B** (figure 4.7).

La construction de l'installation a permis la réalisation des expériences pour configurations des systèmes d'électrode.



Figure 4.7 : Séparateur à plan incliné réalisé au laboratoire LGEG.

Les autres variables du système sont maintenues constantes : la vitesse de l'air de fluidisation débité par le souffleur $1,75 \text{ m}^3/\text{min}$.

La masse de produit granulaire $m=50\text{g (PC)} + 50\text{g(PA)} = 100\text{g}$ (figure 4.8), le débit d'alimentation du produit : $D=1.1 \text{ g/s}$.

Les expériences ont été effectuées sur des granules de polycarbonate (PC) et de polyamide (PA). La séparation de ces granules est impossible par des procédés mécaniques, car ils ont des densités massiques et des formes similaires. L'analyse des résultats a été facilitée par le fait que les granules ont des couleurs différentes.

Après avoir séparé le produit granulaire, la masse des granules récupérés dans chacun des trois premiers compartiments du un collecteurs, a été mesurée en utilisant une balance électronique avec une résolution de $0,01\text{g}$. L'analyse de la pureté a été réalisée manuellement.

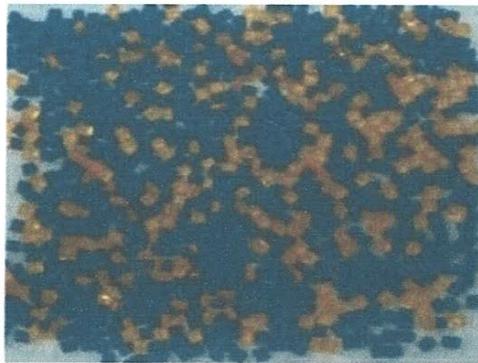


Figure 4.8 : Produit granulaire (PA/PC).

4.4 Résultats et interprétations

Les résultats présentés ci-dessous concernent la mesure de la masse et le taux de pureté des produits récupérés et l'efficacité de la séparation en fonction des deux paramètres variables (la tension appliquée aux électrodes U (kV) et l'angle d'inclinaison du séparateur ($^{\circ}$)).

L'efficacité de l'installation de séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants dépend fortement de la quantité granulaire et la pureté des produits récupérés.

La figure suivante montre les résultats de séparation (la quantité granulaire des produits collectés dans les trois compartiments du collecteur après l'opération de séparation).

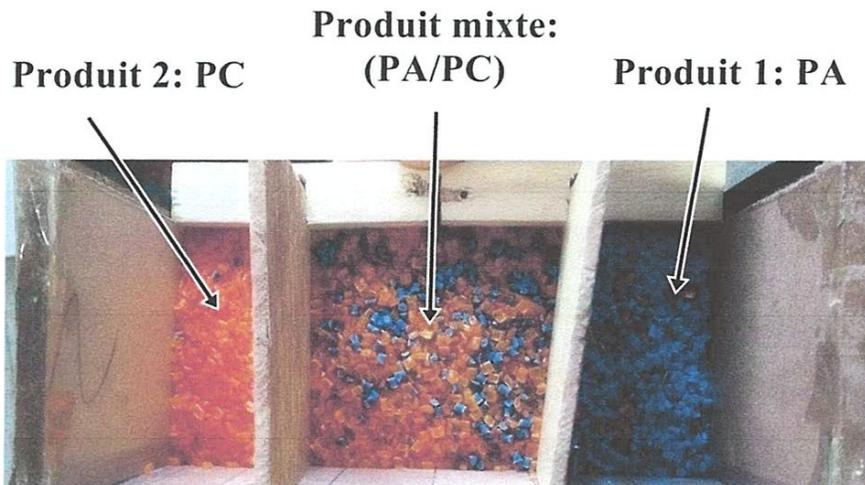


Figure 4.9 : Photographie des deux produits séparés et le produit mixte dans les trois compartiments du collecteur.

4.4.1 Le taux de récupération des produits

Les résultats de récupération sont illustrés par les figures (4.10) et (4.11) pour les deux produits séparés (Pa et PC).

A) Récupération PA

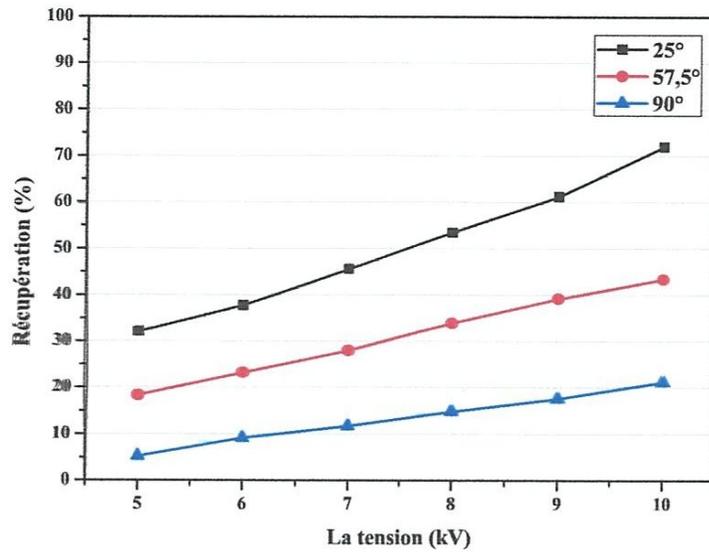


Figure 4.10 : Récupérations du PA obtenues après séparation du mélange granulaire de taille 1mm en fonction de la augmenter la tension et diminue la l'angle.

B) Récupération PC

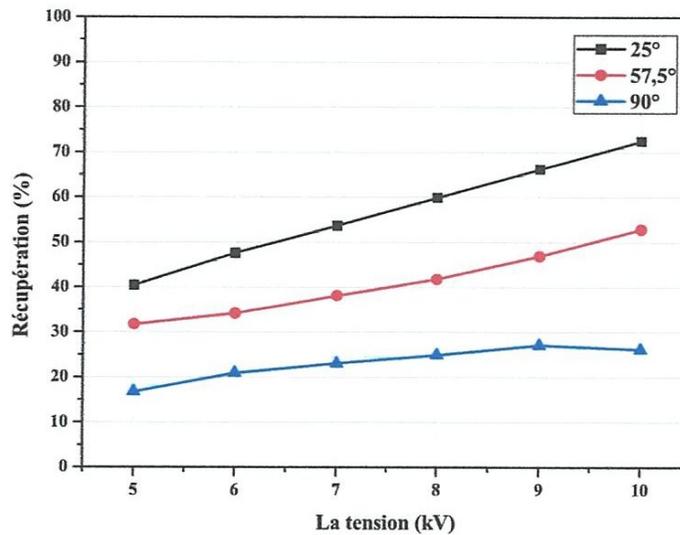


Figure 4.11 : Récupérations du PC obtenues après séparation du mélange granulaire de taille 1mm en fonction de la augmenter la tension et diminue la l'angle.

Pour toutes les expériences, les particules du PC se chargent négativement, alors que les granules du PA acquièrent une charge positive et ce quelque soit le procédé triboélectrisation utilisé dans notre travail.

En effet le PC se trouve en bas de l'échelle de la série triboélectrique [22] par rapport au PA ce qui explique les signes de charge obtenus.

Par ailleurs, il ressort de ces résultats (figure 4.10 et 4.11) que la valeur de la masse récupérée des deux produits séparés dépend de la tension appliquée aux électrodes du séparateur U (kV) et leur angle d'inclinaison ($^\circ$).

Cela peut s'expliquer par :

- Le fait que plus la tension appliquée aux électrodes du séparateur augmente plus la probabilité du champ électrique E augmente, donc la force électrique F_e augmente.
- La bonne distribution du champ électrique assure une meilleure trajectoire des particules.
- La récupération des deux produits diminue si on augmente l'angle d'inclinaison, car la force gravitationnelle augmente plus que nécessaire ce qui rend les particules en mouvement plus rapide.

4.4.2 Le taux de pureté des produits

Les résultats de pureté sont également illustrés par les figures (4.12) et (4.13) pour les deux produits séparés (Pa et PC).

A) Pureté PA

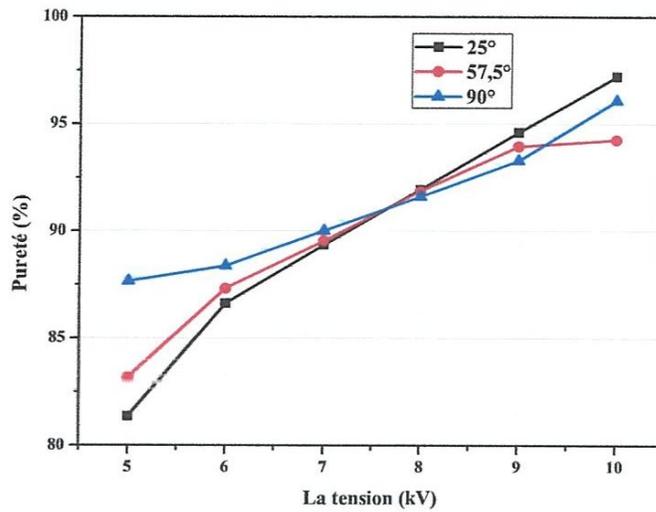


Figure 4.12: Pureté du PA obtenues après séparation du mélange granulaire de taille 1mm en fonction de la augmenter la tension et diminue la l'angle.

B) Pureté PC

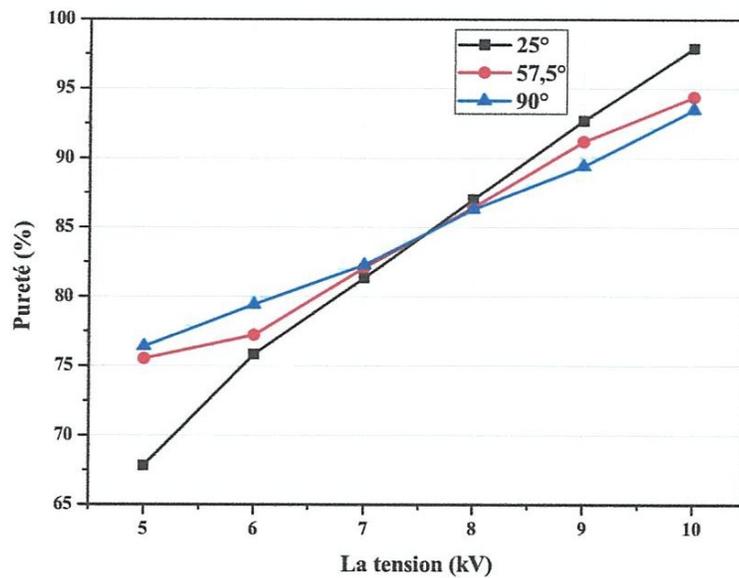


Figure 4.13 : Pureté du PA obtenues après séparation du mélange granulaire de taille 1mm en fonction de la augmenter la tension et diminue la l'angle.

D'après les résultats de mesure de la pureté des deux produits (figure 4.12 et figure 4.13), on remarque que l'influence du facteur de la tension appliquée est plus grande comparativement à l'angle d'inclinaison. Cela peut s'expliquer par le fait que plus la tension appliquée aux électrodes du séparateur augmente plus la probabilité de le champs électrique E augmente, donc la force électrique F_e augmente.

Il ressort de ces résultats de séparation, quelque soit l'angle d'inclinaison, les taux de pureté du PA et du PC sont toujours presque les mêmes, alors que l'angle d'inclinaison n'a aucune influence sur les résultats de la pureté des produits séparés.

Les forces exercées sur les particules durant leur glissement dans le plan du séparateur :

Pour la partie de séparation à plan incliné, Le mouvement de la particule chargé dans un champ électrique E a lieu sous l'action de la force gravitationnelle F_g , force du champ électrique F_e (figure 4.14), selon l'équation vectorielle suivante :

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = \vec{F}_g + \vec{F}_e$$

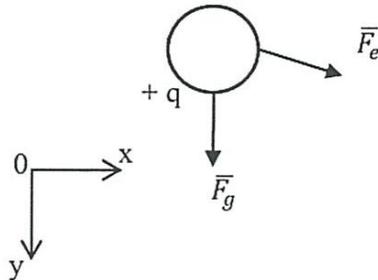


Figure 4.14 : forces agissant sur une particule chargée dans un séparateur à plan incliné.

La force gravitationnelle et la force du champ électrique sont exprimées par les équations suivantes:

$$\vec{F}_g = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

m : La masse du particule, $g = 9,81 \text{ N.k}^{-1}$ et α : l'angle d'inclinaison du séparateur.

$$\vec{F}_e = Q \cdot E$$

L'intensité de la tension appliquée aux électrodes est remarquablement proportionnelle à l'intensité du champ électrique E , cela correspond à la formule du champ électrique en fonction de la tension.

$$E = \frac{\Delta U}{d} [V/m] \quad / \Delta U = (+U) - (-U)$$

Où :

- Q : La charge du particule
- ΔU : La différence de potentiel
- $+U$ et $-U$: les tensions continues appliquées aux électrodes.

4.5 Conclusion

Le système d'électrodes, particulièrement leurs hautes tensions appliquées influe considérablement sur la pureté des produits séparés par notre dispositif réalisé. En effet, le rendement d'un séparateur électrostatique à plan incliné va dépendre de nombreux paramètres.

Le rendement de l'installation de séparation électrostatique à plan incliné est lié forcément à la tension appliquée aux électrodes et l'angle d'inclinaison.

En augmentant la tension appliquée (la force du champs électrique) et en diminuant l'angle d'inclinaison (la force gravitationnelle) il est possible d'augmenter le taux de récupération et la pureté des produits séparés.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail a été focalisé sur deux classes de matériaux isolants qui se trouvent dans les mélanges non conducteurs granulaires triés par les séparateurs électrostatiques: le PA (Polyamide) et le PC (Polycarbonate). Pour atteindre notre objectif, nous avons choisi la technique de séparation électrostatique comme une application dans notre étude.

D'une manière générale, nous pouvons dresser ici un bilan des principales conclusions dégagées au fil des chapitres:

- Les phénomènes tribo-électriques étant extrêmement complexes et mal expliqués, l'approche expérimentale est indispensable à l'étude des applications possibles dans le domaine de la séparation des matériaux granulaires en utilisant les forces des champs électriques.

- L'analyse de l'effet de temps de fluidisation, la vitesse de l'air et la quantité granulaire sur la charge triboélectrique des particules nous a permis de montrer l'importance et le rôle de ces paramètres dans l'évolution du processus de charge à la surface du matériau granulaire.

- Nous avons montré que l'application de la séparation électrostatique des matériaux diélectriques reste performante même pour l'étude des matériaux granulaire.

- L'analyse des résultats expérimentaux en fonction des différents paramètres physiques, nous a permis de montrer que l'augmentation du champ électrique accélère les taux de récupération et pureté des produits. Par ailleurs, l'augmentation de l'angle d'inclinaison diminue les taux de récupération et pureté.

Références bibliographiques

[1] A. Bouanani, M. Bendida, " Contribution a l'étude de la séparation électrostatique d'un mélange de trois matériaux isolants", Mémoire de Master en Électrotechnique, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2014.

[2] <http://www.dechets.picardie.fr/spip.php?rubrique66>

[3] <http://www.consoglobe.com/recycler-plastiques-4312-cg>

[4] Dragan C., "Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéro-électrostatique de matériaux plastiques granulaires". Thèse de Doctorat Université de Poitiers, 2010.

[5] M. Kachi, " Caractérisation et contrôle de l'état de charge des matériaux polymères granulaires, " Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2012.

[6] Das S, Samuila A, Dragan C, Dascalescu L, "Behaviour of charges insulating particles in contact with a rotating roll electrode". In: Journal of Electrostatics, 189- 192,69, 2009.

[7] Dascalescu L, Samuila A, Das S, Dragan C, Medles K, Gauthier M, "Etude expérimentale des procédés de séparation électrostatiques en vue de leur utilisation au recyclage des matières plastiques présentes dans les déchets électriques et électroniques", Contrat WKO Bénéficiaire : APR2730/2006.

[8] AKSA. W, " Réalisation et étude d'un séparateur aérodynamique semi-industriel pour la récupération de particules isolantes", Thèse en sciences en Électrotechnique, Université de SBA, 2013.

[9] Geneviève Sutra « la triboelectricite », le journal de physique et le radium, tome 11, 8-9. août-septembre 1950.

[10] M. Remadnia, " Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants, " Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2012.

[11] T.Hammi, "Etude De Méthodes De Mesures Et Réalisation D'un Banc De Test Pour L'évaluation Des Propriétés Electrostatiques Des Textiles", Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 6 avril 2005.

[12] CALIN L, DASCALESCU L. «Procédé de séparation électrostatique d'un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en œuvre », Brevet FR2943561, Oct.1, 2010.

[13] Benabboun A, Tilmatine A, Medles K, Miloudi M, Dascaluscu L, "étude expérimentale des procédés d'acquisition de charge triboélectrique pour séparateurs électrostatiques de particules de déchets en plastique" Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Génie Electrique (Confrege 2012), Montréal, 28-30 Mai 2012, Canada.

Références bibliographiques

[14] M. Rezoug, ‘‘ Contribution à l’étude de la neutralisation des charges électriques dans les particules isolantes’’, Thèse de Doctorat université de Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2015.

[15] M. Zelmat, ‘‘ Etude expérimentale sur les dispositifs d’acquisition de charge triboélectrique des particules de plastique en vue de la séparation électrostatique’’, Thèse de Doctorat université de Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 28/11.2013.

[16] L. Calin, ‘‘Séparation électrostatique des matériaux plastiques provenant d’équipements informatiques, en utilisant la triboélectrisation en lit fluidisé’’, Thèse de Doctorat université de Poitiers, Juin 2008

[17] Jonathan Ferreira, Cours d’Electrostatique-Electrocinétique, université Joseph Fourier, P 23, 2001-2002.

[18] Miloudi M, Medles K, Aksa W, Tilmatine A, Brahami M et Dascaluscu L, « Association et optimisation de deux nouveaux procédés de chargement tribo-électrique et de séparation électrostatique pour les particules isolantes », Ajour Algerian journal of technologie, 8ème conférence nationale sur la haute tension CNHT, P 276-281, 2011.

[19] Jen Lang, Hu Shuanshui, and Sheng Kemin. ‘‘Separation of the helmholtz equation in prolate spheroidal coordinates’’. Journal of applied physics, 56(5) : P1532–1535, 1984.

[20] www.keithley.com

[21] www.metaux-detail.com.

[22] Armstrong, D., Thurman, R. ‘‘Plastic recovery module’’. In: Addressing defence requirements with tomorrow’s technology. National Defence Center for Environmental Excellence. 2003.