

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Génie Electrique

Département d'Électrotechnique

Thèse présentée par :

BRAHAMI YOUSOUF

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat 3^{ème} cycle en Électrotechnique

Option : Réseaux électriques

Intitulé de la thèse :

*Réalisation et étude expérimentale d'un nouveau séparateur
triboélectrique à électrodes plaques immergées dans le mélange
de particules fines*

Devant le jury composé de :

Président :	Dr. Hadjeri Samir	Professeur	UDL Sidi Bel Abbès
Directeur de thèse :	Dr. Tilmatine Amar	Professeur	UDL Sidi Bel Abbès
Examineurs :	Dr. Zelmat Mohamed El Mouloud	M.C.A	USTO MB Oran
	Dr. Miloudi Mohamed	M.C.A	UDL Sidi Bel Abbès

Laboratoire: Applications of Plasma, Electrostatics & Electromagnetic Compatibility
APELEC

Soutenue en: 2016

Remerciements

Avant tout je tiens à rendre grâce à DIEU qui nous a octroyé la raison qui place l'être humain au sommet du piédestal et qui le prédispose à domestiquer la nature à travers la science.

Cette thèse est le fruit des années de travail, dans le domaine de l'électrostatique appliquée au sein du laboratoire APELEC « **Applications of Plasma, Electrostatics & Electromagnetic Compatibility** » à l'université Djillali liabes Sidi Bel Abbes. Quelques lignes sont trop courtes pour exprimer ma profonde reconnaissance pour mon directeur de thèse, Docteur **Amar TILMATINE**, professeur à l'université de Sidi Bel Abbes.

Tout a commencé il y'a quelques années, quand il m'a encadré en Master, C'est lui qui m'a formé à la rigueur de la démarche expérimentale et aux exigences de la communication scientifique, en dirigeant aussi tous mes travaux, effectués au laboratoire. Ses conseils éclairés, ses encouragements constants et sa confiance sans faille ont été essentiels à notre succès au cours de toutes ces années de travail.

En outre, j'adresse mes remerciements les plus sincères au Professeur **HADJERI Samir** pour avoir accepté de présider le jury, tout comme j'adresse ma profonde reconnaissance aux Docteurs **ZELMAT Mohamed El Mouloud** et **MILOUDI Mohamed** pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce modeste travail.

Mes remerciements à toute ma famille en particulier, je dois à mes parents, beaucoup de ce que je suis devenu. Je les remercie pour leur amour, leur soutien et leur confiance à travers les dernières 27 années. Mes parents ont toujours placé l'éducation comme la première priorité dans ma vie et m'ont incité à fixer des très hauts objectifs pour moi-même.

Mes amis: Merci à **Salim, Said, Chamso, Adel, Mohamed, Aziz, Abdelhamid, Kadirou, Hakim, Larbi et Hammouda**.

Je ne pourrais terminer sans avoir à remercier particulièrement mes collègues du laboratoire ainsi que tous ceux ou celles qui m'ont apporté leur soutien et en particulier **Aicha** et **Djillali**.

SOMMAIRE

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	<i>1</i>
 Chapitre I ETAT DE L'ART SUR LA SEPARATION TRIBOELECTROSTATIQUE DES PARTICULES	
<i>Introduction</i>	<i>4</i>
<i>I-1 Matériaux DEEE et proportion des matériaux plastiques</i>	<i>4</i>
<i>I-2 Récupération et recyclage des câbles électriques</i>	<i>7</i>
<i>I-3 Triboélectricité</i>	<i>8</i>
<i>a- Définition</i>	<i>9</i>
<i>b- Historique</i>	<i>9</i>
<i>I-4 Mécanisme de transfert de charge</i>	<i>9</i>
<i>I-5 Série triboélectrique</i>	<i>10</i>
<i>I-6 Chargeurs triboélectriques</i>	<i>12</i>
<i>a- Dispositif de charge à cylindre rotatif</i>	<i>12</i>
<i>b- Lit fluidisé</i>	<i>13</i>
<i>c- Chargement par hélice (ventilateur)</i>	<i>14</i>
<i>d- Chargement par cyclone</i>	<i>14</i>
<i>e- Chargement par dispositif statique</i>	<i>15</i>
<i>f- Chargement par vibration (zigzag)</i>	<i>16</i>
<i>I-7 Forces exercées sur les matériaux granulaires</i>	<i>16</i>
<i>a- Forces de pesanteur</i>	<i>17</i>
<i>b- Forces de London-Van der Waals</i>	<i>17</i>
<i>c- Forces de Coulomb</i>	<i>18</i>
<i>d- Forces aérodynamiques</i>	<i>19</i>
<i>I-8 Séparateurs tribo-électrostatiques</i>	<i>20</i>
<i>a- Séparateur triboélectrique à chute libre</i>	<i>20</i>
<i>b- Séparateur triboélectrique à tapis roulant</i>	<i>22</i>
<i>c- Séparateur tribo-aéro-électrostatique à tambours transporteurs</i>	<i>23</i>
<i>d- Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses</i>	<i>23</i>
<i>e- Séparateur triboélectrique à deux disques</i>	<i>24</i>
<i>Conclusion</i>	<i>25</i>

Chapitre II *MATERIELS ET METHODES*

<i>INTRODUCTION</i>	26
<i>II-1 Description du séparateur triboélectrique à électrodes plaques</i>	27
<i>a- Moteur électrique</i>	30
<i>b- Système bielle manivelle</i>	30
<i>c- Electrodes haute tension</i>	31
<i>d- Lit fluidisé</i>	31
<i>II-2 Autres accessoires</i>	32
<i>a- Source Haute Tension</i>	32
<i>b- Souffleur</i>	32
<i>c- Électromètre</i>	33
<i>d- Balance</i>	34
<i>e- Thermo-hygromètre</i>	34
<i>f- Tachymètre</i>	34
<i>g- Cage de faraday</i>	35
<i>h- Capteur de charge PASCO</i>	36
<i>II-3 Caractérisation des produits utilisés</i>	36
<i>II-4 Principe de fonctionnement du dispositif</i>	38
<i>II-5 Mécanisme de charge triboélectrique</i>	38
<i>II-6 Procédure expérimentale</i>	39
<i>II-7 Procédure de déroulement des expériences de mesure de charge</i>	42
<i>a- Préparation des échantillons</i>	42
<i>b- Déroulement des expériences</i>	42
<i>II-8 Modélisation expérimentale par plans d'expériences</i>	43
<i>II-8-1 Développement de la méthode</i>	43
<i>A. Vocabulaire utilisé</i>	43
<i>A.1 Réponses, facteurs, niveaux</i>	43
<i>A.2 Variables codées</i>	44
<i>B. Plans composites</i>	45
<i>II-8-2 Logiciel MODDE 5.0</i>	47
<i>Conclusion</i>	48

Chapitre III *ETUDE EXPÉRIMENTALE PARAMÉTRIQUE DU SÉPARATEUR À DEUX ELECTRODES PLAQUES EN MOUVEMENT VERTICAL « VA-ET-VIENT »*

<i>INTRODUCTION</i>	49
<i>III-1 Optimisation du procédé de séparation électrostatique</i>	49
<i>III-1-1 Analyse de l'efficacité de séparation</i>	49
<i>III-1-2 Expériences de criblage « un-facteur-à-la-fois »</i>	50
<i>a- Influence du champ et de la distance sur la récupération</i>	50
<i>b- Influence de la vitesse de rotation sur la récupération</i>	53
<i>c- influence de la fréquence du variateur</i>	54
<i>III-2 Identification du point de fonctionnement optimal</i>	56
<i>III-3 Analyse des résultats obtenus</i>	58
<i>III-4 Etude de la charge acquise</i>	61
<i>III-4-1 Analyse de la charge triboélectrique acquise</i>	61
<i>a- Influence de la configuration des électrodes</i>	61
<i>b- Influence de la masse totale</i>	63
<i>c- Influence du champ électrique</i>	64
<i>d- Influence de la fréquence</i>	66
<i>e- Influence de la composition de la masse</i>	67
<i>Conclusion</i>	69

Chapitre IV ETUDE EXPERIMENTALE PARAMETRIQUE DU SEPARATEUR EN MOUVEMENT HORIZONTAL « VA-ET- VIENT »

<i>INTRODUCTION</i>	70
<i>IV-1 Etude expérimentale</i>	71
<i>IV-1-1 Analyse de l'efficacité de séparation</i>	71
<i>IV-1-2 Expériences préliminaires</i>	71
<i>a- Choix de la configuration d'électrodes</i>	71
<i>b- Influence de la masse totale</i>	72
<i>c- Influence de champ électrique</i>	74
<i>d- Influence de la vitesse de rotation sur la récupération</i>	75
<i>e- Influence du débit d'air injecté</i>	76
<i>IV-2 Etude de la charge acquise</i>	77
<i>IV-3 Méthode de mesure de la charge électrique</i>	78
<i>a- Influence de la configuration des électrodes</i>	78
<i>b- Influence de la masse totale</i>	80
<i>c- Influence du champ électrique</i>	81
<i>d- Influence de la fréquence</i>	83
<i>IV-4 Etude expérimentale et comparaison entre deux processus de chargement des particules isolantes</i>	84

<i>IV-4-1 Dispositifs de chargement tribo-électrique à lit fluidisé</i>	85
<i>IV-5 Procédure expérimentale</i>	86
<i>IV-5-1 Préparation des échantillons</i>	86
<i>IV-5-2 Déroulement des expériences</i>	86
<i>IV-6 Etude des paramètres de contrôle</i>	87
<i>IV-6-1 Influence du temps de chargement sur la charge acquise</i>	87
<i>IV-6-2 Influence du débit sur la charge acquise</i>	88
<i>IV-6-3 Influence de la composition du mélange</i>	89
<i>Conclusion</i>	91

CHAPITRE V ANALYSE DE LA PURETE

<i>INTRODUCTION</i>	92
<i>V-1 Traitement d'images</i>	92
<i>V-2 Définition de l'image</i>	92
<i>a- Image Numérique</i>	93
<i>b- Caractéristiques d'une image numérique</i>	93
<i>V-3 Seuillage et Segmentation</i>	94
<i>V-4 Prélèvement des images</i>	94
<i>V-5 Méthodes d'analyse</i>	96
<i>V-5-1 Analyse par un programme écrit sous MATLAB</i>	96
<i>V-5-2 Méthode de Classification Knn</i>	99
<i>V-5-3 Logiciel Image J</i>	100
<i>V-6 Résultats et discussions</i>	102
<i>V-6-1 Echantillons des particules de taille micronisées</i>	102
<i>V-6-2 Echantillon de particules granulaires</i>	106
<i>Conclusion</i>	110
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	111
<i>Références Bibliographiques</i>	

INTRODUCTION GENERALE

L'évolution très rapide des nouvelles technologies et l'augmentation des performances des équipements et appareils produisant des déchets composés de matériaux plastiques connaissent une forte croissance pendant des périodes très courtes, a réduit la durée de vie de ces équipements, chose qui a poussé le taux de déchets à s'accroître à un rythme alarmant. Donc le recyclage des déchets constitue un domaine prioritaire de recherche sur le plan mondial.

Le monde a produit 74 millions de tonnes de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) en 2014 [19]. Quasiment tous ces équipements contiennent des matériaux pouvant être dangereux pour l'environnement ou la santé humaine (Figure1). C'est la raison pour laquelle ils doivent être collectés séparément et traités par des méthodes efficaces du recyclage.

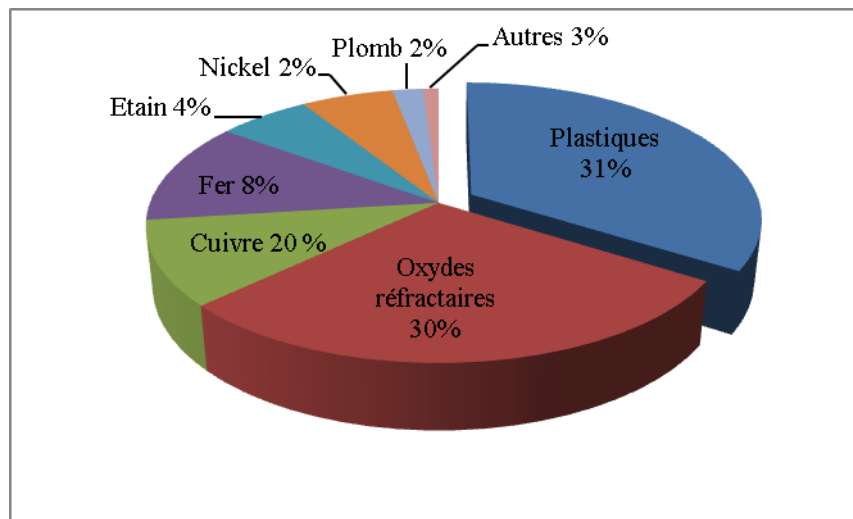


Figure 1 : Composition des DEEE.

Les technologies électrostatiques se sont imposées comme la solution de choix pour le recyclage des matériaux isolants contenus dans ces déchets. D'autant plus que la séparation électrostatique est une technologie non-polluante, caractérisée par une faible consommation d'énergie.

La séparation des différents matériaux plastiques granulaires et poudres représente aujourd'hui un important domaine d'application industrielle de l'électrostatique. Le tri des particules ayant des caractéristiques électriques différentes est produit par des forces qui agissent sur les objets chargés par un procédé adéquat et séparées par un champ électrique assez intense. Ces conditions permettent d'assurer la bonne pureté ainsi qu'un bon rendement.

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

Pour cela la thèse est organisée en cinq chapitres. Le **premier chapitre**, décrit l'effet triboélectrique ainsi que les dispositifs de chargement triboélectrique réalisés au sein des laboratoires *APELEC* et *IRECOM* de l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbas. Par ailleurs, quelques éléments théoriques généraux sur l'électrostatique sont également présentés concernant, notamment, les séparateurs tribo-électrostatiques.

Le **second chapitre**, traite la conception et la réalisation du nouveau séparateur triboélectrique à deux électrodes plaques en mouvement avec un dispositif de chargement à base d'un lit fluidisé. Une des grandes difficultés de la séparation électrostatique est le choix du mode de chargement des particules. L'acquisition de charge par un lit fluidisé a l'avantage d'être une méthode simple à mettre en œuvre et surtout d'assurer une bonne solution viable. Ainsi le matériel et les méthodes expérimentales utilisées dans cette thèse sont présentés. Ce chapitre s'appuie donc sur le choix des paramètres. Pour cette raison la méthode des plans d'expériences a été appliquée.

Le **troisième chapitre**, est consacré à l'étude expérimentale du séparateur à deux électrodes plaques en mouvement vertical. Cette étude concerne les expériences préliminaires de la récupération en variant tous les paramètres chacun à part, ainsi que l'étude de la charge massique acquise par les particules après séparation. D'un autre côté, plusieurs expériences de séparation effectuées sur des échantillons de mélanges de particules micronisés de PVC blanc et PVC gris pour l'identification du point optimal d'un processus de ce procédé de séparation tribo-électrostatique sont présentées.

Le **quatrième chapitre** contient une étude expérimentale du séparateur à deux électrodes plaques en mouvement horizontal après modification pour faciliter la récupération des matériaux des deux électrodes après séparation. Cette étude concerne les expériences préliminaires de la récupération en variant tous les paramètres chacun à part, ainsi que l'étude de la charge massique acquise par les particules après séparation. D'un autre côté, une comparaison entre deux processus de chargement à base d'un lit fluidisé, à deux parois

différentes, une transparente en plexiglas et l'autre métallique en aluminium, a fait l'objet de plusieurs expériences pour mesurer la charge de particules micronisés et connaître les effets des différents facteurs influençant l'efficacité du processus de chargement en lit fluidisé.

Le **cinquième chapitre**, est consacré à l'analyse de la pureté des différents matériaux granulaires utilisés dans la séparation. L'analyse est faite en se basant sur le traitement d'image. Les images sont prises par un microscope optique et une caméra à haute résolution pour l'analyse deux méthodes sont utilisées : la première est un programme écrit sous MATLAB. Pour que notre travail soit clair et approuvé, une autre méthode est utilisée, avec un logiciel appelé (Image J). Cette méthode est utilisée pour la confirmation et la validation.

L'objectif du travail effectué est de déterminer le pourcentage de deux produits dans un mélange millimétrique ou bien micrométrique, composé de particules homogènes (même taille) et dont les couleurs sont différentes dans le but d'augmenter l'efficacité des systèmes de séparation.

La conclusion générale, fournit un bilan des travaux réalisés et précise les perspectives ouvertes par cette thèse.

Chapitre I : Etat de l'art sur la séparation triboélectrostatique des particules

Introduction

Le recyclage des polymères : technique issue de Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE) est une stratégie importante pour l'utilisation durable des ressources naturelles [1-3]. D'une grande diversité, le volume des DEEE connaît une forte croissance liée à un taux d'équipement de plus en plus élevé et à l'obsolescence due à l'évolution très rapide des performances technologiques. C'est pour cela que le problème de la récupération et du traitement des équipements informatiques en fin de vie est devenue une préoccupation majeure pour toutes les entreprises qui travaillent dans ce secteur.

Séparation électrostatique [4] est le terme générique pour une classe importante de technologies de traitement des matériaux, largement utilisées pour le tri sélectif des matériaux solides par des forces électriques qui agissent sur les particules chargés ou polarisées [5-6]. Dans la plupart des cas, les champs électriques de l'ordre de 10^6 Vm^{-1} sont nécessaires [7-9], c'est pourquoi le développement des technologies et des équipements de séparation électrostatique a toujours été synchronisé avec les progrès de l'ingénierie de haute tension [10].

La gamme d'application, se traduisant par des centaines de brevets, s'étend de traitement des minérales et de conditionnement des semences [11] jusqu'au recyclage des métaux et plastiques à partir de déchets industriels [9-12-13].

Selon les dernières statistiques, les équipements électriques et électroniques connaissent une forte croissance (+25% entre 2000 et 2005), avec une proportion de plastiques qui augmente dans cette même période (30%) [1-2].

I-1 Matériaux DEEE et proportion des matériaux plastiques

Les Equipements Electriques et Electroniques regroupent tous les objets ou les composants d'objets qui fonctionnent grâce à des courants électriques ou électromagnétiques. À l'heure du tout électrique, ils sont présents dans les habitations (télévision, robot de cuisine), les lieux de travail (ordinateurs, téléphones), les véhicules (autoradio) ou tout simplement dans les poches (téléphones portables, appareils photos)... Ce sont par exemple les gros appareils ménagers (réfrigérateur, cuisinière, machine à laver), les petits appareils ménagers (rasoir, machine à café, grille-pain), les équipements informatiques et de

télécommunications (ordinateur, console de jeux, baladeur), le matériel grand public (radios, téléviseurs, jouets et câbles informatiques et électriques, lecteur DVD, magnétoscope, réveil), les outils électriques et électroniques (perceuses, tondeuses électriques).

Un EEE devient un DEEE dès lors que son propriétaire l'a abandonné ou le destine à l'abandon parce qu'il n'en a plus l'utilité. Dans une société où le taux d'équipement est de plus en plus élevé et où les produits sont très rapidement obsolètes avec l'évolution rapide des technologies, les quantités de DEEE s'accroissent de 3 à 5% par an. Plus de 50 % de ces déchets sont issus des ménages, ce qui représente 14 kg/hab/an et d'ici 10 ans, leur volume devrait avoir doublé [14].

Les DEEE professionnels concernent les équipements spécifiques à des activités industrielles et commerciales comme les distributeurs de billets de banque ou les appareils à carte bleue, et des EEE assimilés aux ménagers mais dont les quantités sont importantes à l'instar des parcs informatiques. Dans cette famille d'équipements (figure I-1), on distingue plusieurs catégories de produits, avec des taux et des types de plastique différents [15-16] :

- les produits blancs (lavage, cuisson, conservation) dont le gros électroménager froid (24% de plastiques), le gros électroménager hors froid (12% de plastiques), le petit électroménager (20% de plastiques).
- les produits bruns : l'audiovisuel (22% de plastiques).
- les produits gris : informatique et bureautique.
- les lampes.

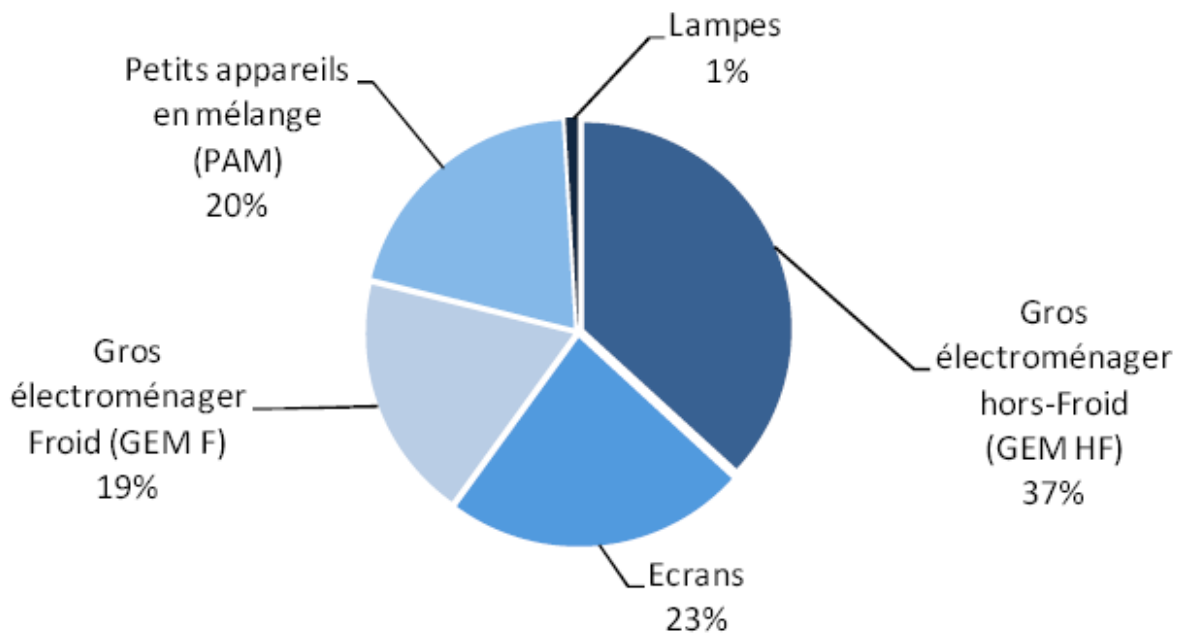


Figure I-1 : Répartition des déchets ménagers traités en 2010 [16]

Le graphique I-2 présente la ventilation des tonnages d'équipements ménagers traités en 2010 par type de traitement.

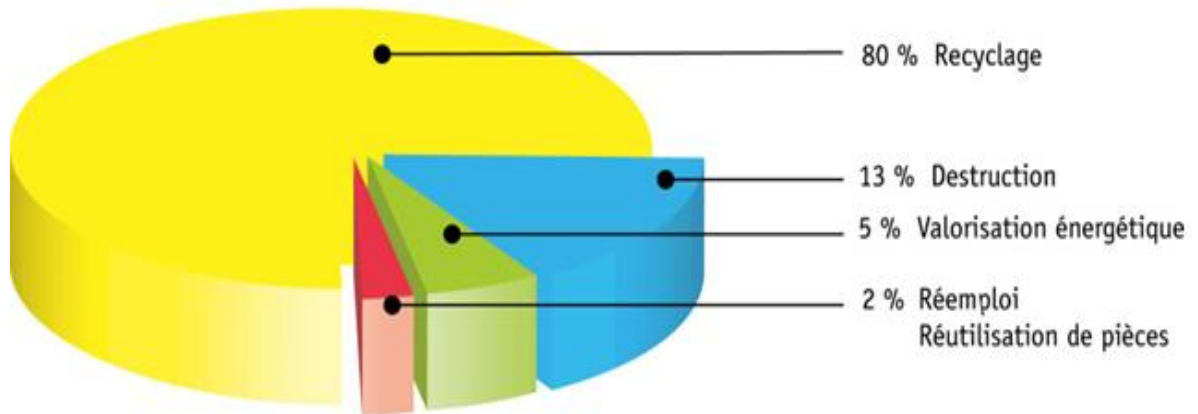


Figure I-2: Ventilation des tonnages d'équipements ménagers traités en 2010 [16]

Vu la pollution qu'elle constitue d'un côté et vue les prix exorbitants des hydrocarbures qui ne cessent d'augmenter d'un autre côté, le recyclage des DEEE est le principal mode de traitement (80 % des tonnages en 2010 contre 75 % en 2009) alors que 13 % des tonnages ont été détruits en 2010 sans valorisation (contre 16 % en 2009).

Beaucoup de travaux sont menés pour déterminer et mettre au point des techniques de valorisation des DEEE les mieux adaptées, La récupération et le recyclage de ce type de déchets constitue actuellement une grande importance dans notre vie quotidienne. Cette opération de récupération nécessite l'emploi de différentes techniques et procédés de tri, parmi elles, on cite :

- séparation chimique, le tri automatique simple ou à plusieurs étages.
- méthodes préalables de désassemblage pour constituer des lots plus homogènes.

La principale caractéristique des plastiques contenus dans les DEEE est la dominance des produits tels que le PC, l'ABS, l'ABS-PC et le HIPS représentant plus de 70% du contenu total des matières plastiques dans ces déchets (figure I-3) [15-16].

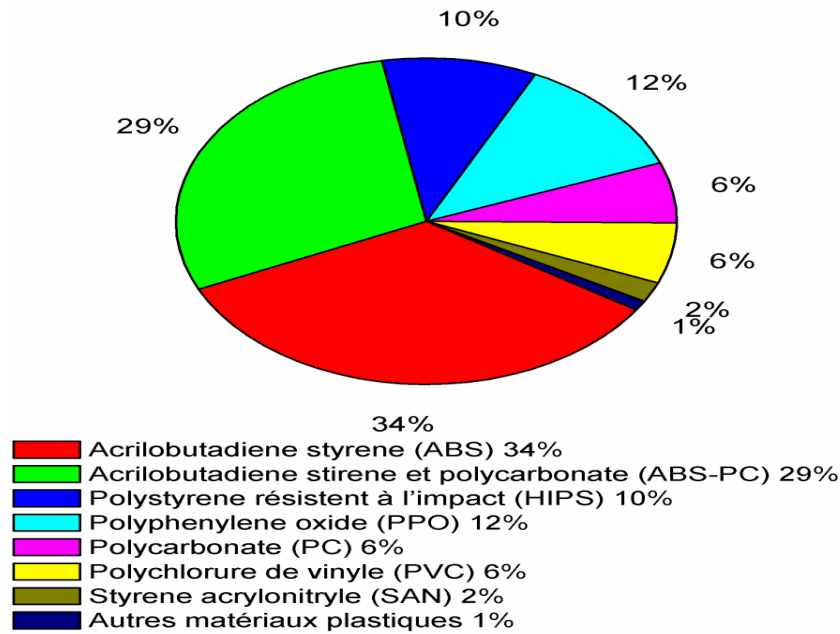


Figure I-3: Proportion des différents constituants des déchets plastiques

I-2 Récupération et recyclage des câbles électriques

Ce type de déchets est considéré comme l'un des plus répondeur et des plus rentables après son recyclage. Il est généralement constitué de mélanges de différentes sortes de métaux, plastiques, caoutchouc. Ces mélanges sont disponibles en deux catégories : la première est constituée de produits propres et homogènes et la deuxième englobe des composants contaminés avec de la poussière, huile, graisse....ce qui rend la séparation plus difficile. Cependant, la majorité des câbles destinés pour le recyclage font partie de la deuxième catégorie qui généralement provient des activités de maintenance et de rénovation.

La dissociation mécanique du métal et du plastique, est assurée par une ou deux étapes de broyage, puis elle est suivie par une séparation magnétique destinée à l'élimination des contaminants ferreux. Ensuite, comme le poids spécifique et la forme des granules métalliques diffèrent des caractéristiques des granules isolants, les fractions de grande et moyenne taille peuvent être traitées par deux techniques : la première consiste en la séparation par différence de densité par rapport à une solution liquide (*precipitation from solution*) qui utilise des substances chères et toxiques, accompagnée par l'adsorption du liquide dans les granules isolants, et par conséquent la détérioration de leurs caractéristiques diélectriques, la deuxième est la plus utilisée, elle est employée par L'ENTREPRISE DE RECUPERATION DE L'OUEST (**E.R.O ORAN**), assurée par une séparation basée sur la différence de densité par rapport à l'air (*air-gravity separation*), elle repose sur les technologies pneumatiques caractérisées par de grandes consommations d'énergie et un faible recouvrement. Le matériau granulaire provenant du broyage de déchets des câbles électriques est soumis à un processus de concentration pneumatique et mécanique, en utilisant un tamis vibrant. Le produit de faible pesanteur considéré comme « déchet », contient presque en totalité des particules isolantes fines.

L'organigramme présenté à la figure I-4, décrit les étapes suivies pour la collecte, le traitement et la récupération des produits extraits des câbles et fils électriques, que sont le métal et l'isolant [17] [18].

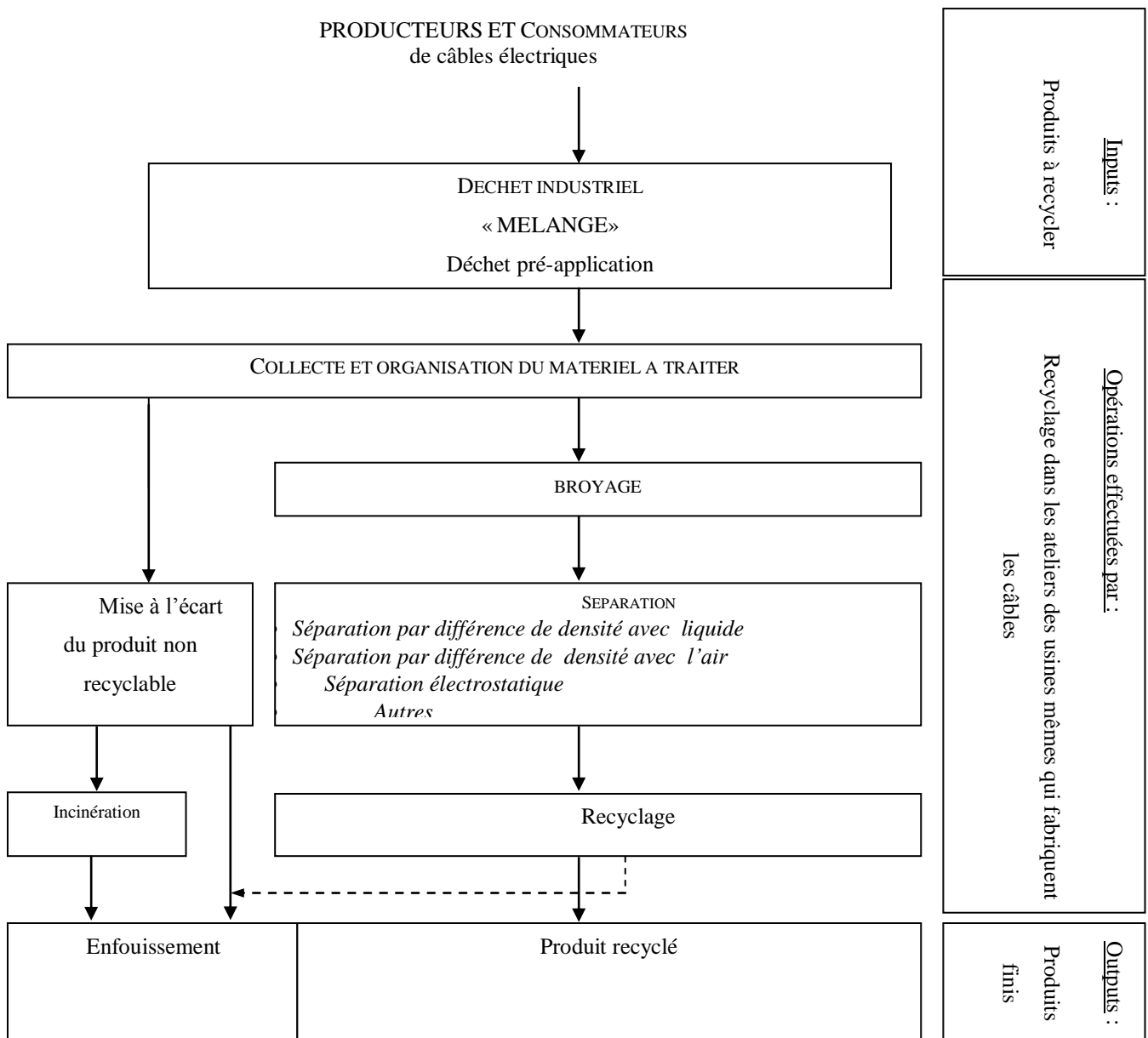


Figure I-4: Traitement des déchets de câbles et fils électriques

I-3 Triboélectricité

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

- 1) le faisceau d'électrons où la charge est directement injectée, avec une certaine énergie, dans le volume du matériau.
- 2) la décharge couronne [19-20] : 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 [21].

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.

a- 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.

b- 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.

I-4 Mécanisme de transfert de charge

Un des mécanismes physiques employés pour charger les matériaux en vue de leur séparation dans un champ électrique intense est l'effet triboélectrique, qui implique le transfert de charge entre deux corps en contact.

Lorsque deux matériaux différents sont mis en contact ils acquièrent des charges électriques dues au phénomène de tribo-électrisation.

D'après Harper (1967), les trois chemins fondamentaux dans lesquels la charge peut être transférée d'une substance à une autre est : i) par transfert de l'électron, ii) transfert de l'ion, et iii) transfert matériel figure I-5 [22].

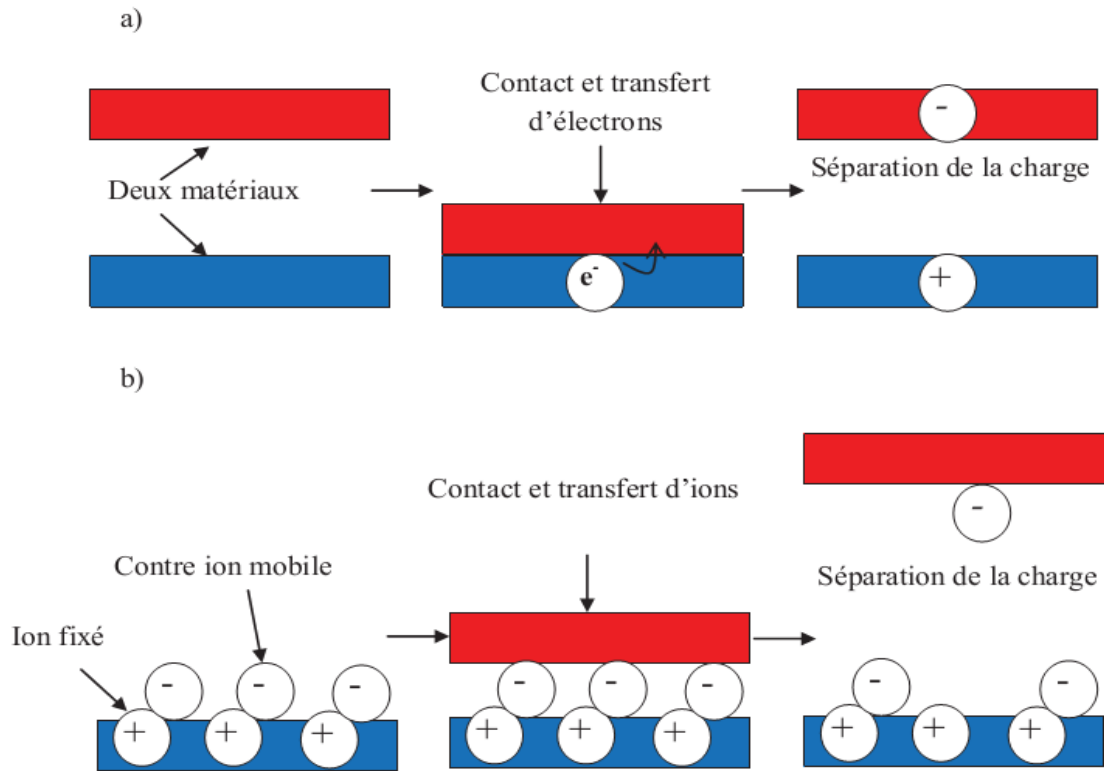


Figure I-5 : Mécanismes de transfert de charge :a) Transfert d'électrons; b) Transfert d'ions

La plupart des chercheurs ont supposé que la tribo-électrisation des isolants implique également le transfert d'électrons, mais les observations expérimentales semblent contredire ce point de vue. La tribo-électrisation des isolants n'est pas en corrélation avec les propriétés électroniques des matériaux, telles que la constante diélectrique, ou des propriétés atomiques, telles que l'énergie d'ionisation, affinité électronique, ou électronégativité [23].

I-5 Série triboélectrique

On appelle série triboélectrique une série de substances classées dans un ordre tel que lorsqu'on frotte l'une sur l'autre, celle qui précède l'autre dans le classement se charge positivement tandis que l'autre se charge négativement Figure I-6



Figure I-6 : Liste de série triboélectrique

Ce classement n'est donc que très approximatif et l'ordre des différents matériaux peut varier sous l'influence de facteurs tels que : la rugosité de la surface, les forces de contact, le travail de sortie... En définitive ce diagramme n'est qu'un outil de comparaisons relatives entre les différents corps plutôt qu'une référence absolue. Les différents auteurs ne sont pas d'accord sur le classement des matériaux et il n'existe pas de série triboélectrique universellement reconnue. On trouvera différents exemples en bibliographie [24].

I-6 Chargeurs triboélectriques

Plusieurs procédés d'acquisition de charge par effet triboélectrique peuvent être utilisés pour charger les particules afin de séparer les mélanges des particules.

La plupart des technologies de la séparation électrostatique sont basées sur les forces électriques qui agissent sur les corps chargées. Ce fait justifie les efforts continus vers l'amélioration des méthodes employées pour le chargement de matières granuleuses [25].

Au cours de ces dernières années, plusieurs tentatives ont été faites pour améliorer l'efficacité des technologies existantes, qui font usage aux appareils tribo-chargeurs en mode vibreur ou à cyclone. Le tribo-chargement des particules plastiques, qui est une solution de séparation électrostatique avant d'exposer les particules en chute libre à l'action des forces du champ électrique, a été déjà validée par l'industrie du recyclage [26].

Les cyclones et le lit fluidisé ont été développés pour servir comme appareils du tribo-chargeur. Ils sont plus fréquents et vraisemblablement la meilleure solution pour charger les particules par contact particule-particule et/ou les contacts du particule-mur, et le rehaussement de l'efficacité de la séparation [22].

Nombreux dispositifs de tribo-chargement destinés à la séparation des mélanges granulaires et particules fines ont été réalisés au sein de laboratoires *IRECOM* et *APLEC*, de l'université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, dont :

a- Dispositif de charge à cylindre rotatif

Une méthode de chargement du cylindre tournant où les particules entrent d'un côté du cylindre et sortent de l'autre côté totalement chargé. Le matériau granulaire est mis en mouvement à l'intérieur d'un cylindre tournant, qui tourne à une certaine vitesse autour d'un axe horizontal ou légèrement incliné (Figure I-7). La charge accumulée par les particules est due aux collisions entre particules (mécanisme principal) et entre particules et paroi du cylindre (mécanisme secondaire) [23].

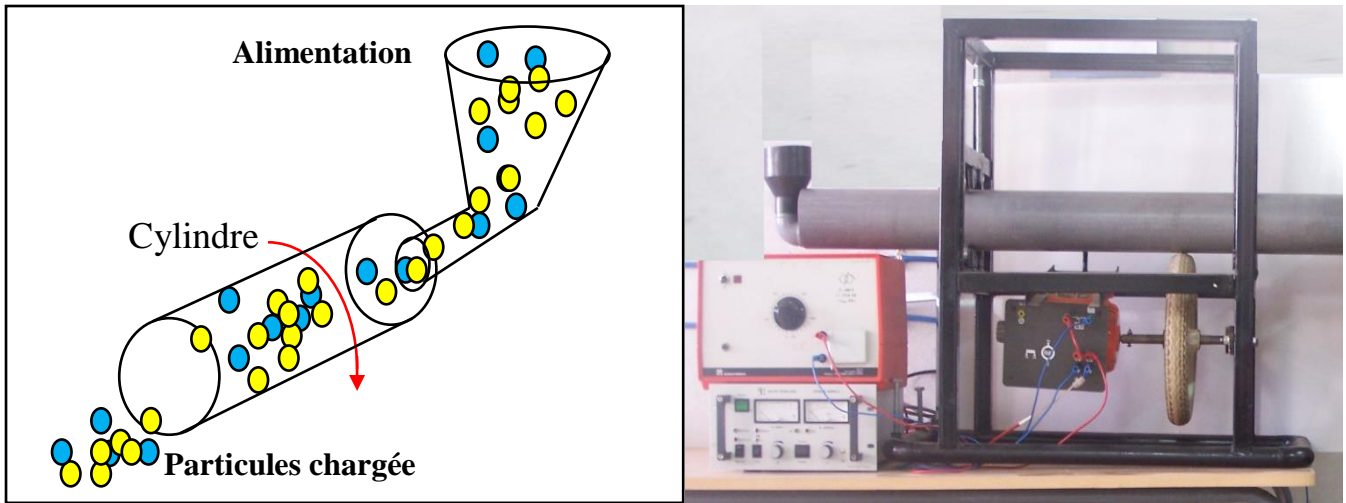


Figure I-7 : Dispositif de chargement par cylindre rotatif.

b- Lit fluidisé

Le dispositif "lit fluidisé" est destiné pour le chargement triboélectrique des particules fines et de granule. Il est composé de deux parties : la chambre de fluidisation et un système d'injection d'air à l'aide d'une soufflante Figure I-7

Le mélange de particules est disposé dans la chambre de fluidisation dont les parois transparentes en plexiglas permettent l'observation de produit à séparer.

Un système d'injection d'air comprimé permet l'agitation des particules, qui entrent en collision entre eux et avec les parois de la chambre. De ceci résulte leur chargement par frottement.

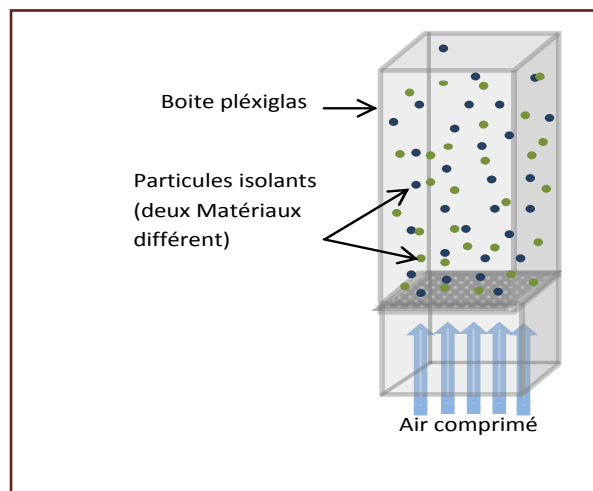


Figure I-8 : Dispositif de chargements par lit fluidisé

c- Chargement par hélice (ventilateur)

Le dispositif est constitué d'un moteur à courant continu entraînant une hélice dans un cylindre en plexiglas de diamètre 10 cm et de hauteur de 35 cm voir (Figure I-9).

La rotation de l'hélice crée un courant d'air ascendant donnant naissance à des turbulences aérodynamique hélicoïdales multipliant les collisions des particules granulaires à l'intérieur du cylindre [27]. Le chargement de ces particules s'effectue par collision.

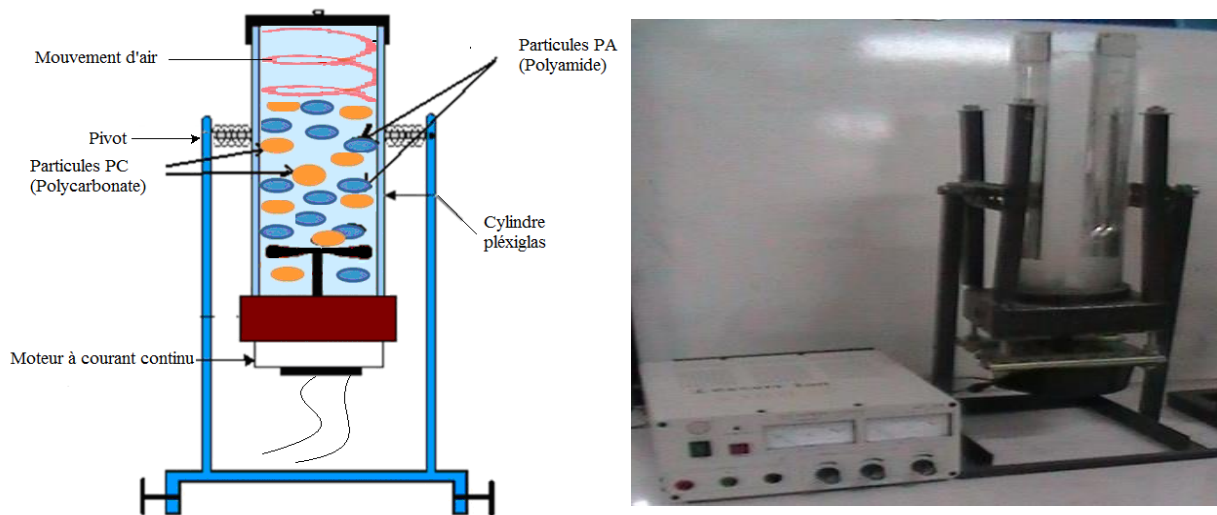


Figure I-9 : Dispositif de chargements par hélice.

d- Chargement par cyclone

Les particules qui vont pénétrer à l'intérieur du cyclone à l'aide d'un ventilateur se chargent par contact et frottement contre la paroi du cyclone. Les particules descendent vers le bas par le mouvement de l'air qui traverse le cyclone, vers la partie conique pour atteindre le fond. Puis, l'air ressort par une ouverture qui se trouve en haut tandis que les particules sortent par une ouverture en bas du cyclone. Enfin les particules se chargent totalement comme le montre la (Figure I-10) [28].

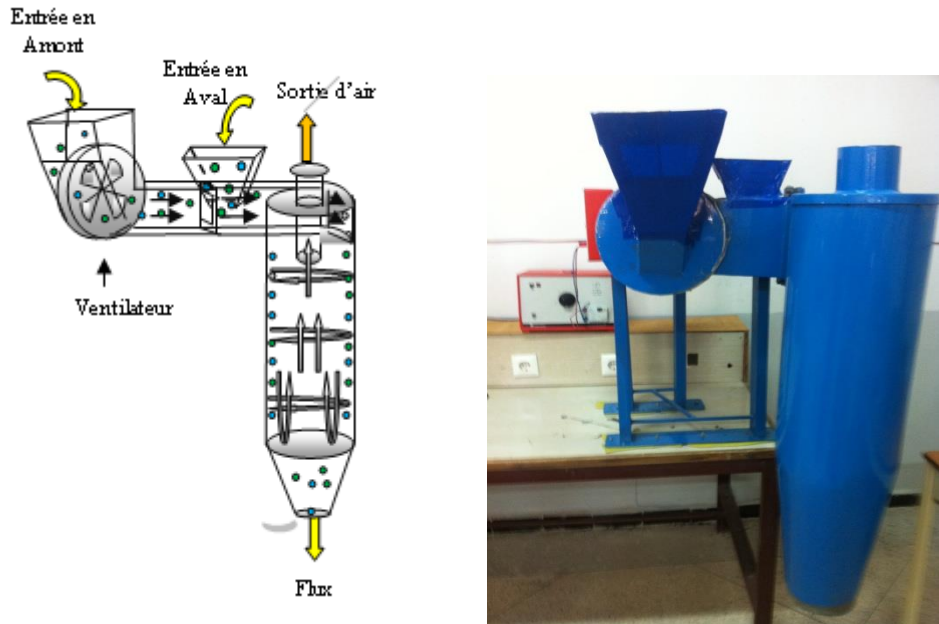


Figure I-10 : Dispositif de chargements par cyclone.

e- Chargement par dispositif statique

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique isolante (Figure I-11), 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 [27].

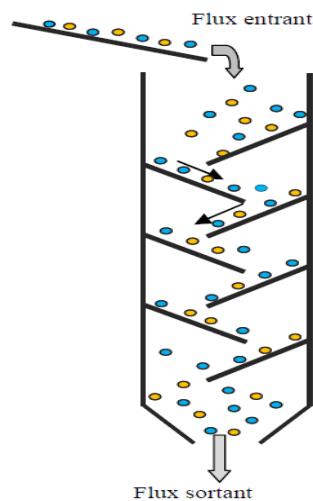


Figure I-11 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique.

f- Chargement par vibration (zigzag)

Une autre solution pour charger les particules est donnée par le dispositif à vibrations. Une installation de ce type a été développée par Blajan et al (Figure I-12). Le matériau à charger glisse dans des canaux en zigzag mis en mouvements vibratoires sur les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique et un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif. En changeant la vitesse du moteur, il est possible de modifier le mouvement oscillant du dispositif de charge [23].

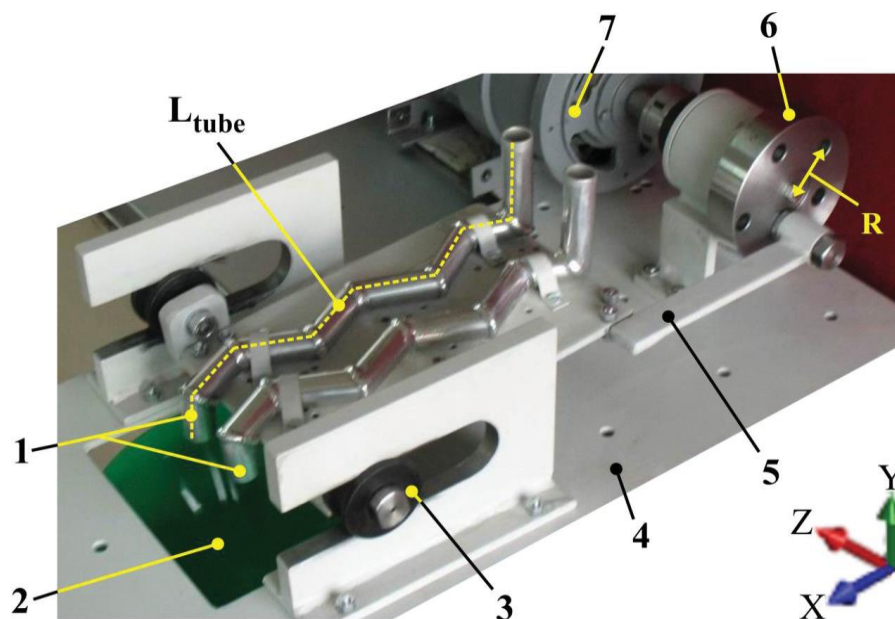


Figure I-12 : Dispositif à vibrations; 1: tubes de charge; 2: sortie des particules chargées; 3: glissière; 4: support; 5: bielle; 6: manivelle; 7: moteur électrique; R: rayon; X, Y, Z: direction du mouvement des particules ; L_{tube} : longueur du tube.

I-7 Forces exercées sur les matériaux granulaires

Trois types des forces inter particulaires agissent sur les matériaux granulaires lors du frottement ou du simple contact :

- A. Les forces de pesanteur
- B. Les forces électrostatiques
- C. Les forces aérodynamiques

a- Forces de pesanteur

Le poids d'un objet est égal à la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre. Cette force de pesanteur est caractérisée par une origine : le centre de gravité G (ou centre d'inertie) du corps, une direction : la verticale passant par G, un sens : vers le bas et une valeur $P = m.g$ avec P en Newton (N), m en kg et $g = 9.81 \text{ N.kg}^{-1}$ [29].

b- Forces de London-Van der Waals

Il s'agit de forces attractives (figure I-13). Si on considère deux atomes distants de r , la force d'interaction F [N] entre moments dipolaires instantanés [30] s'écrit :

$$F = -\frac{\alpha^2}{r^7} \frac{4}{3} \frac{hc}{\lambda_i} \quad (\text{I-1})$$

Où α est la polarisabilité de l'atome, $\frac{hc}{\lambda_i}$ son énergie d'ionisation.

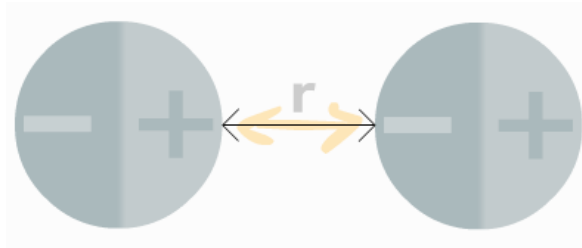


Figure I-13 : Force attractive de London-Van der Waals

La figure I-14 montre la force d'interaction entre deux sphères matérielles : c'est la somme de toutes les forces d'interaction de London-Van der Waals relatives aux paires constituées d'un atome dans chaque sphère.

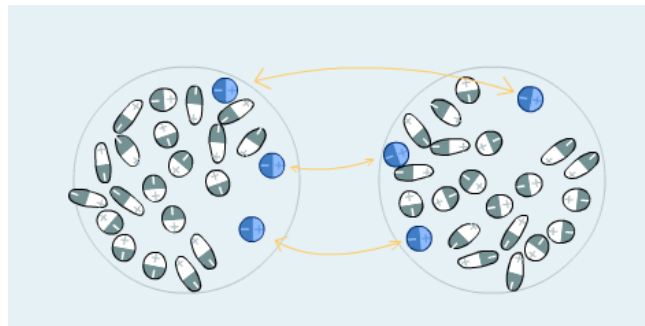


Figure I-14 : Force attractive de London-Van der Waals entre deux sphères

Le calcul réalisé par Hamaker, [31] pour 2 sphères identiques de rayon R séparées de r (distance centre à centre) et baignant dans le vide conduit à :

$$F_A = -\frac{A}{6(r-2R)} \left(\frac{2R^2}{r^2-4R^2} + \frac{2R^2}{r^2} + \ln \frac{r^2-4R^2}{r^2} \right) \quad (\text{I-2})$$

Où A est la constante de Hamaker.

Les forces de London Van der Waals ne sont significatives (pour le processus d'agrégation) que si la distance inter-particulaire ($r-2R$) est inférieure à 100 nm ; l'équation donnée par *Hamaker* est donc suffisante. Une approximation de cette dernière, obtenue pour $r \ll R$, est largement utilisée :

$$F_A = -\frac{A \cdot R}{12(r - 2R)^2} \quad (I-3)$$

c- Forces de Coulomb

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

- La force électrique est proportionnelle au produit des deux charges q_1 et q_2 en attraction ou en répulsion.
- La force électrique est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges $1/r^2$.
- La force électrique est proportionnelle à une constante k afin d'évaluer la force électrique en newton.

L'expression scalaire de la loi de Coulomb en électrostatique est donnée par : [32]:

$$F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (I-4)$$

Où :

F_e : Force électrique en newton (N) ;

q_1 : première charge qui applique la force électrique sur la deuxième charge en coulomb (C) ;

q_2 : deuxième charge qui applique la force électrique sur la première charge en coulomb (C) ;

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

k : Constante de la loi de Coulomb, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ et ϵ_0 étant la permittivité du

vide.

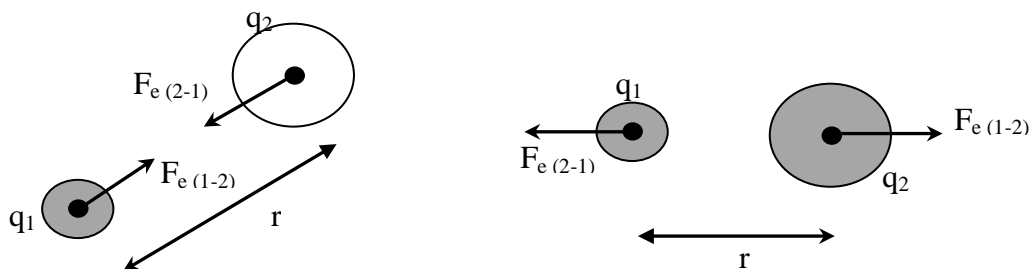


Figure I-15: Force de coulomb entre deux sphères chargées
 (a) : attraction, charges de signes contraires ($q_1q_2<0$)
 (b) : répulsion, charges de signes semblables ($q_1q_2>0$)

d- Forces aérodynamiques

Afin de bien étudier les mouvements des particules dans les procédés de chargement triboélectrique, il va falloir maîtriser les forces aérodynamiques agissant sur ces particules.

Le mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique a lieu sous l'action de la force suivante :

$$F_t = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \tag{I-5}$$

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 et F_g la force gravitationnelle.

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

$$F_i = W(\rho_s - K\rho) \frac{dv}{dt} \tag{I-6}$$

Où :

v : la vitesse de particule

$K\rho$: coefficient de forme [33] (pour les particules sphériques $K\rho = 0,5$),

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

ρ : densité de l'air.

La force aérodynamique s'écrit :

$$F_a = \frac{C_d \pi R^2 \rho v_r^2}{2} \tag{I-7}$$

Ca étant en fonction du nombre du Reynolds : $R_\theta = \frac{V L}{\nu_i}$

V : vitesse du fluide [m/s] ;

L : dimension du fluide [m] ;

ν_i : viscosité du fluide [m²/s] ;

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

La force de frottement avec l'air est dépendante de la vitesse, cette dépendance peut être très compliquée, et seulement les cas spéciaux peuvent être traités analytiquement.

I-8 Séparateurs tribo-électrostatiques

La séparation Tribo-électrostatique implique le chargement de particules par contact ou frottement avec les autres particules ou avec une surface du contact. Alors les particules chargées traversent un champ électrique qui sépare ces particules d'après la magnitude et le signe de leur charge [22]. À cause des caractéristiques physiques différentes, le signe de charge acquise par les particules est différent. Ceci permet la séparation des produits.

Le tri des matériaux granulaires et de particules fines dans les séparateurs tribo-électrostatiques est produit par les forces qui agissent sur les particules qui sont déjà chargées.

Multiplés installations destinées à la séparation électrostatique des matériaux granulaires plastiques par la tribo-électrification ont été réalisées. Le commun entre ces dispositifs est la nécessité d'avoir deux parties successives, la première celle de chargement triboélectrique des granules et même des particules fines, et l'autre destinée à leur séparation. On distingue les prototypes suivants :

a- Séparateur triboélectrique à chute libre

Les particules granulaire sont chargées par cylindre tournant où les particules entrent d'un côté du tambour et sortent de l'autre côté totalement chargées. A l'intérieur les particules sont en collision quand le tambour tourne à une certaine vitesse comme l'explique la figure I-15 qui résume le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à cylindre tournant:

Un flux de particules plastiques propre, sec et broyé est introduit dans un tambour rotatif. La rotation du tambour provoque la culbute des particules qui se chargent par contacts répétés : c'est le phénomène de triboélectricité.

Les particules chargées entrent ensuite dans un fort champ électrique horizontal produit entre deux électrodes soumises à haute tension de polarité opposée. Les particules

chargées sont alors déviées dans leur chute suite au champ intense qu'elles traversent et chaque type de matériau prend un côté dans les bacs de récupération.

Les granules chargées positivement sont attirées vers l'électrode négative, et contrairement, les granules chargées négativement sont attirées vers l'électrode positive. Les produits purifiés tombent près de l'électrode positive et de l'électrode négative, alors que les produits neutres tombent dans le bac du milieu [27].

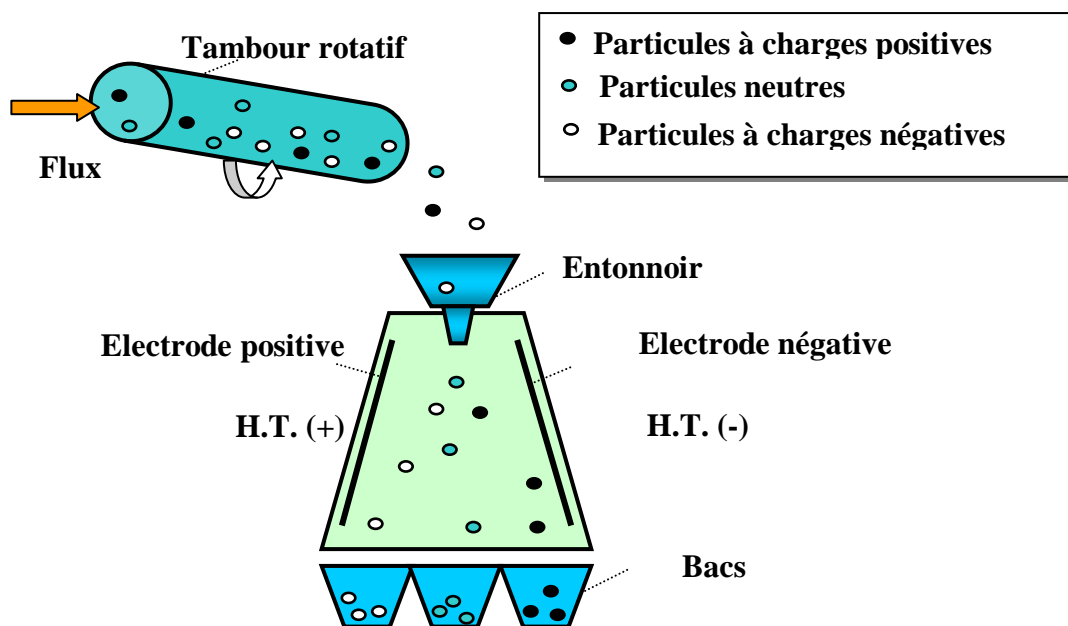


Figure I-16 : Dispositif de séparation à chute libre avec chargement triboélectrique par cylindre tournant.

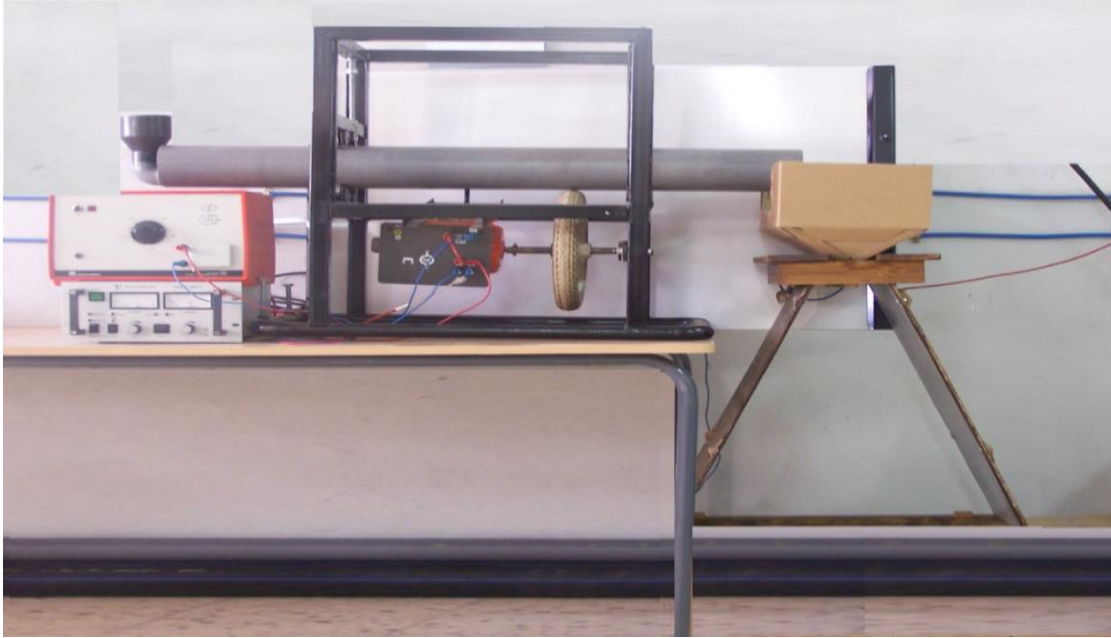


Figure I-17: Photographie de dispositif de Séparation Triboélectrique à chute libre « Séparateur triboélectrique des matériaux plastiques » (Réalisé au laboratoire IRECOM de l'université Sidi Bel Abbès) [41].

b- Séparateur triboélectrique à tapis roulant

Le schéma de la (Figure I-17) explique le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant TBS (Tribocharged Belt Separator). Les particules sont tribo-électrisées par un dispositif de chargement tribo-électrostatique, puis elles tombent sur un tapis roulant et sont transportées vers la région de séparation. 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 [27].

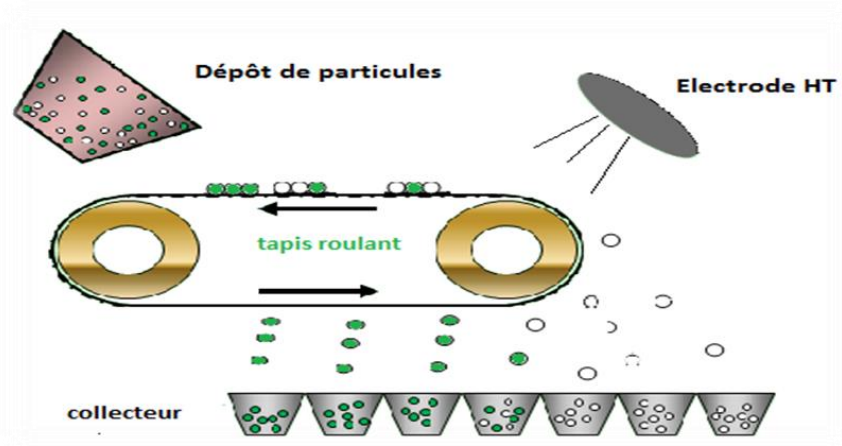


Figure I-18 : Dispositif de séparation à tapis roulant.

c- Séparateur tribo-aéro-électrostatique à tambours transporteurs

Ce dispositif consacré à la séparation des particules fines. En premier lieu les particules sont disposées dans la chambre de fluidisation. Elles entrent en collisions entre elles et entre les parois de la chambre sous l'effet de l'air comprimé du souffleur, ce qui provoque leur chargement. Donc elles acquièrent deux charges de signe opposé.

Ces particules sont soumises à un champ électrique intense, produit entre les deux électrodes métalliques ayant une forme cylindrique, reliées à deux sources de haute tension ayant des polarités opposées. Les particules chargées négativement sont attirées vers l'électrode positive et vis-versa.

Les cylindres métalliques servent en même temps d'électrodes et de moyen de transport des particules chargées et séparée vers la zone de récupération.

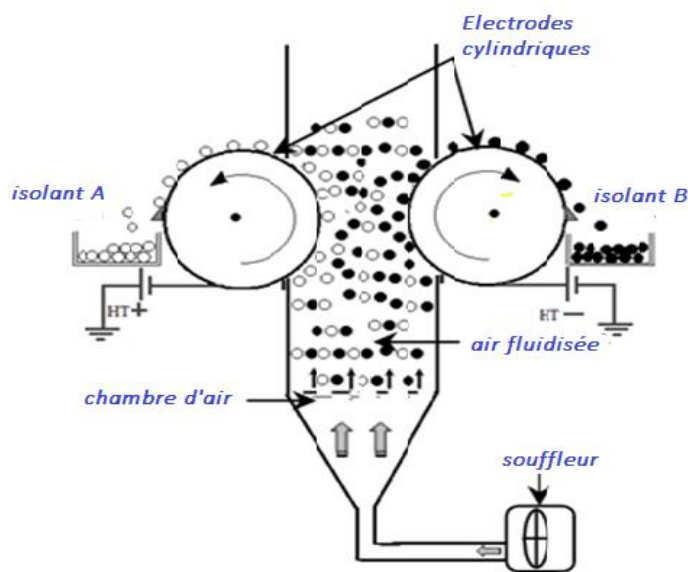


Figure I-19 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à tambours transporteurs. [27]

d- Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses

Les électrodes qui vont attirer la matière granulaire fluidisée sont deux bandes transporteuses du tapis roulant, elles sont à base d'une matière conductrice (Figure I-19). Elles s'appuient sur 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 [27].

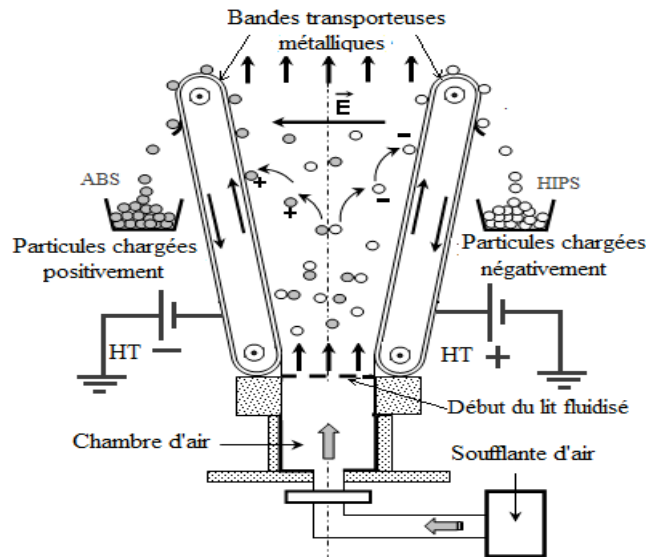


Figure I-20 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteur [27].

e- Séparateur triboélectrique à deux disques

Le schéma de la (Figure I-20) représente le séparateur triboélectrique à disques tournants, consacrée à la séparation des particules fines.

Le chargement de particules est assuré par l'injection de l'air comprimé à l'aide de souffleur dans la chambre de fluidisation, et par la suite elles seront séparées et collectées par les deux disques reliés aux sources de haute tension de polarité opposée.

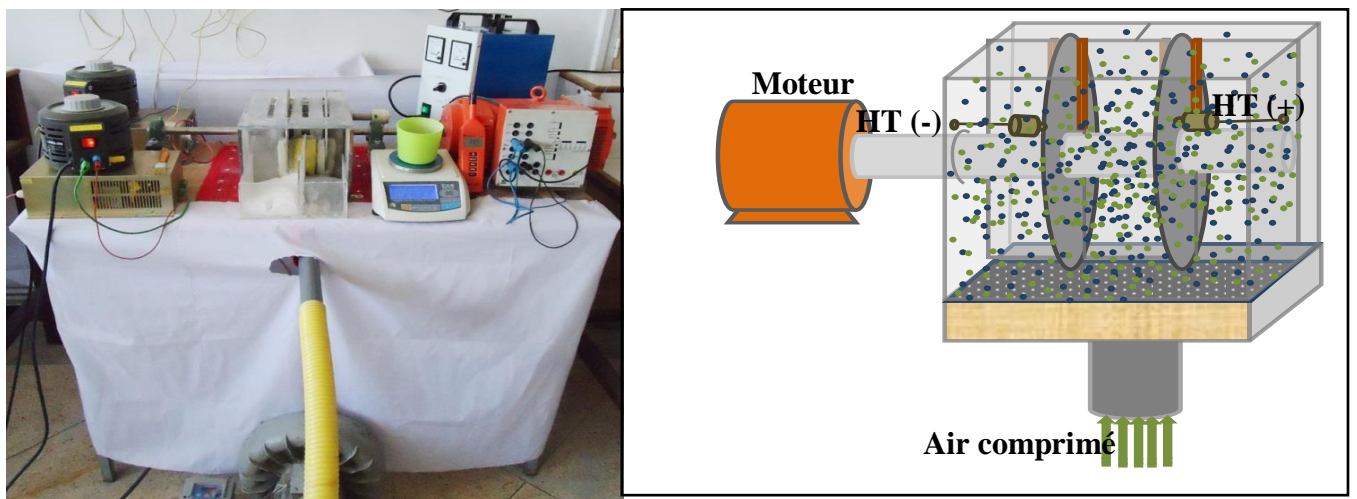


Figure I-21 : Photographie et schéma d'un séparateur triboélectrique à disques tournants réalisé au laboratoire IRECOM de Sidi Bel-Abbes [34].

Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de définir et présenter des notions théoriques sur l'effet tribo-électrique et la tribo-électrisation des particules, ainsi que quelques types de séparateurs tribo-électriques existant et montrer leur principe de fonctionnement. Il existe une multitude de dispositifs de charge triboélectrique déjà réalisés aux laboratoires *APELEC* et *IRECOM* au niveau de l'université de Sidi Bel-Abbés (cylindre rotatif, lit fluidisé...), dont l'efficacité a déjà été prouvée. Les études réalisées par les chercheurs sur des modèles de laboratoires montrent que le lit fluidisé pourrait représenter une solution fiable pour la charge tribo-électrique des matériaux plastiques granulaires et particules fines. Ce mode sera utilisé pour le chargement des particules fines dans notre dispositif de séparation triboélectrique qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II MATERIELS ET METHODES

Introduction

Par ailleurs, de nos jours, les poudres et les particules micronisées sont largement utilisées comme matières premières, ou produits intermédiaires, voire comme produit final. Lorsque la poudre est mise en mouvement dans un processus industriel quelconque, les surfaces des particules deviennent chargées tribo-électriquement et divers phénomènes se produisent, comme par exemple l'adhésion aux parois des particules chargées dans les canalisations de transport pneumatique ou dans des lits fluidisés grâce aux forces électrostatiques [35-36]. D'un autre côté, paradoxalement ces forces électrostatiques peuvent être utilisées pour contrôler le mouvement des particules chargées. Ainsi, de nombreuses applications électrostatiques mettant en jeu des particules micronisées ont été développées, telles que le poudrage, la précipitation et la séparation [37].

La séparation électrostatique est un système multifactoriel difficile à contrôler, plusieurs facteurs peuvent influencer son efficacité. Le présent chapitre est une présentation du nouveau dispositif de séparation tribo-électrostatique de particules micronisées à électrodes plaques en mouvement « va-et-vient », immergées dans un lit fluidisé qui contient le matériau micronisé à séparer, en premier lieu. Le processus est étudié en mouvement vertical puis il a été modifié en mouvement horizontal pour faciliter la récupération des produits séparés et développer le système de récupération prochainement.

Ce chapitre est réparti en trois sections. La première concerne la description et la définition des caractéristiques des différents composants, ainsi que les éléments utilisés pour les mesures et la procédure expérimentale afin de déterminer l'influence des différents paramètres sur le processus. La seconde section est réservée aux différentes techniques de mesure employées et enfin nous présentons à la troisième section un aperçu sur la méthode des plans d'expérience, outils incontournables pour tout expérimentateur.

II-1 Description du séparateur triboélectrique à électrodes plaques

Un nouveau séparateur Tribo-électrostatique de particules micronisées à électrodes plaques en mouvement « va-et-vient » est réalisé au sein du Laboratoire APELEC de l'université de Sidi Bel Abbés dont le procédé de chargement triboélectrique est à base d'un lit fluidisé.

Ce dispositif offre la possibilité de varier plusieurs paramètres afin de permettre l'étude de l'influence de chacun d'eux sur le rendement de la séparation en mouvement vertical et horizontal, ce qui fait de lui un banc d'essai de laboratoire important.

Pour atteindre une séparation d'un mélange composé de particules fines isolantes de taille micronisée, en premier temps il est nécessaire de charger par un dispositif d'acquisition de charge électrique par effet triboélectrique en utilisant un lit fluidisé, puis la seconde étape de séparation est obtenue à l'aide du champ électrique appliqué entre deux électrodes plaques parallèles par l'intermédiaire des sources de haute tension comme le montre le schéma descriptif global de système pour les deux mouvements (Figure II-1) et (Figure II-2).

Le dispositif est constitué des éléments suivants :

1. Moteur électrique
2. Système bielle-manivelle
3. Deux électrodes.
4. Deux générateurs Haute Tension.
5. Lit fluidisé
6. Souffleur

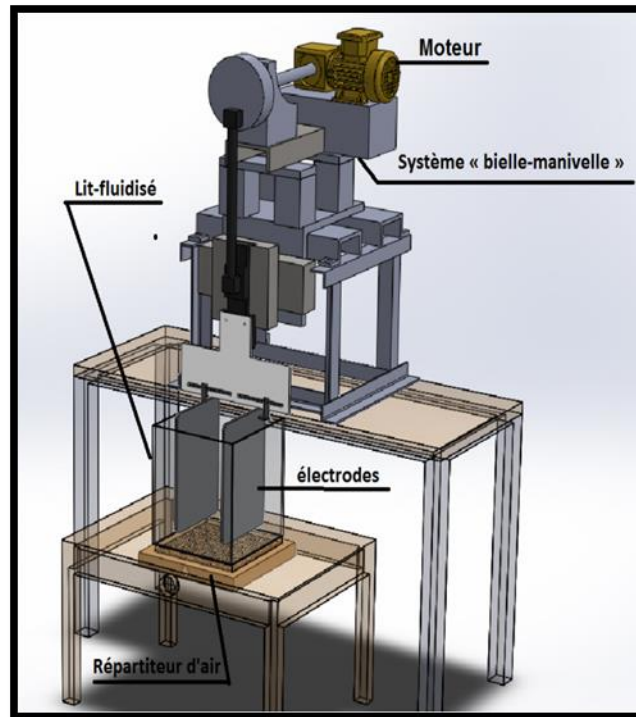


Figure II-1-a : Schéma descriptif global de séparation à deux électrodes plaques en mouvement vertical.

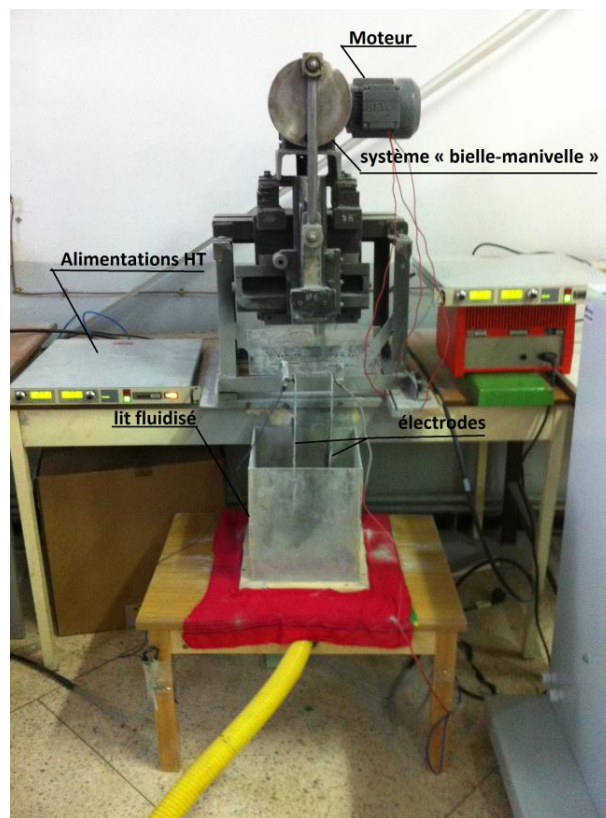


Figure II-1-b : Photographie du séparation à deux électrodes plaques en mouvement vertical.

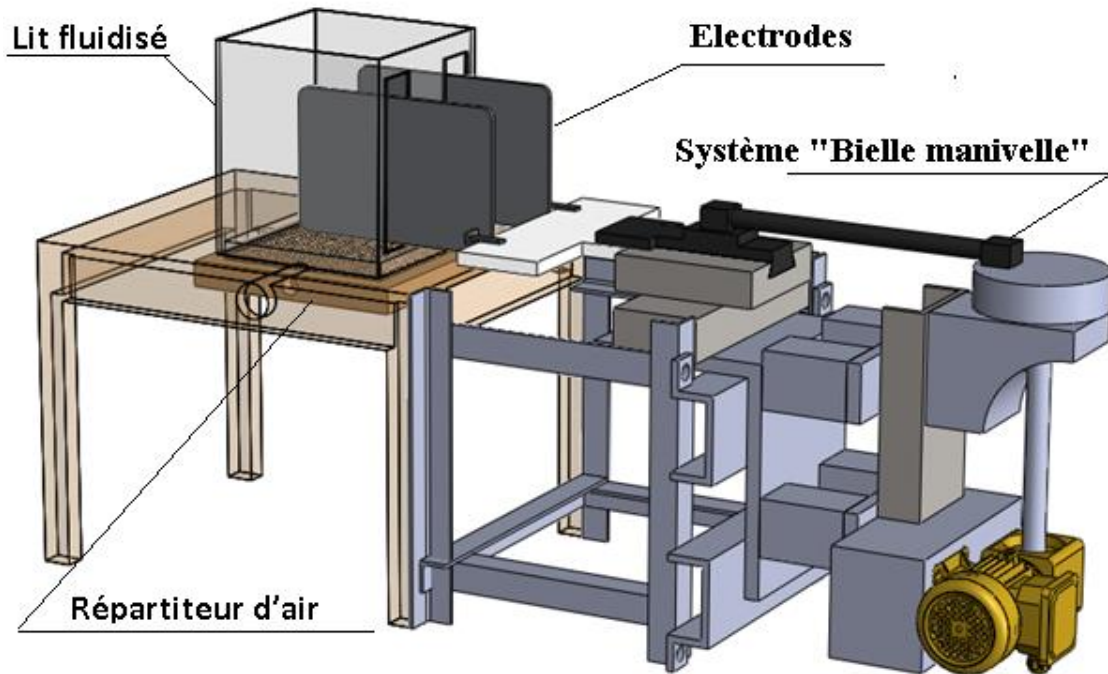


Figure II-2-a : Schéma descriptif global de séparateur à deux électrodes plaques en mouvement horizontal.



Figure II-2-b : Photographie du séparateur à deux électrodes plaques en mouvement horizontal.

a- Moteur électrique

Un moteur électrique triphasé, tourne à une vitesse 1500 tr/min. En utilisant un réducteur pour limiter la vitesse de rotation à 50 tr/min "adaptée " au système de séparation, la vitesse de rotation peut facilement varier en agissant sur la tension d'alimentation de la source triphasée (figure II-3).



Figure II-3: Moteur électrique.

b- Système bielle manivelle

Le système bielle-manivelle a un rôle très important qui est la transformation d'un mouvement rotatif en un mouvement de translation (Figure II-4). La distance de translation est en fonction du diamètre de disque qui est de 17.5 cm et relie l'axe du réducteur avec la manivelle, qui permet d'introduire les électrodes à l'intérieur de la chambre de fluidisation.



Figure II-4-a : Photographie de la bielle-manivelle.

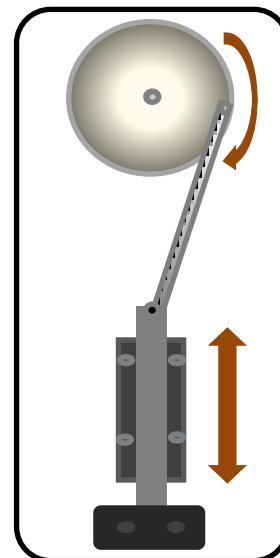


Figure II-4-b : Système bielle-manivelle.

c- Electrodes haute tension

Les électrodes sont des plaques métalliques de dimension 20 x 30 cm² et sont fixées à un système bielle-manivelle entraîné par un moteurs triphasé Le système d'électrodes (figure II-5) destiné à créer le champ électrostatique est alimenté par deux sources haute tension, afin de collecter les particules et faire la séparation des produits composant le mélange.

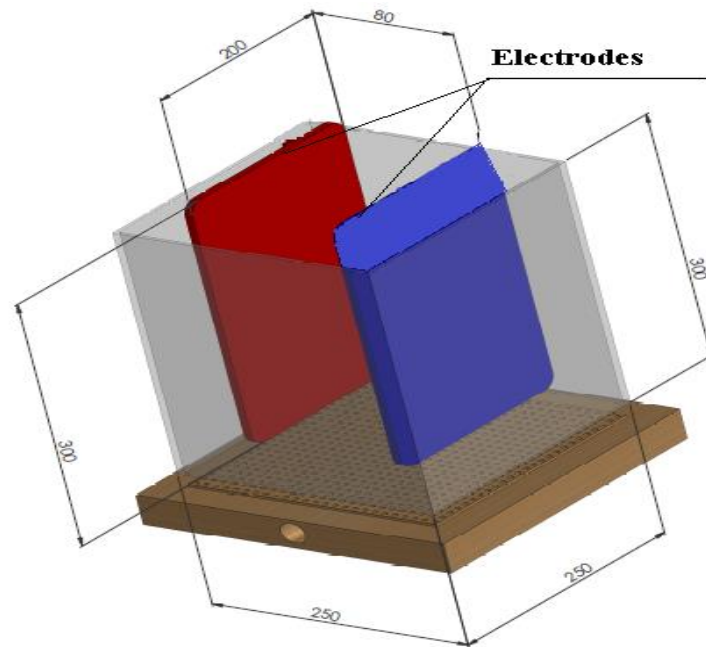


Figure II-5: Schéma descriptif des électrodes.

d- Lit fluidisé

Le dispositif (figure II-6) de dimensions 26x26x28 cm³ est composé de deux parties :

- 1) une chambre supérieure dont les quatre parois transparent en plexi glace où on met les produits pour le chargement par l'injection d'air afin d'être collectés aux électrodes haute tension.
- 2) une chambre inférieure équipée d'un diffuseur d'air pour l'uniformisation, a pour rôle la tribo-électrisation des particules dans la chambre supérieure par la mise en collision.

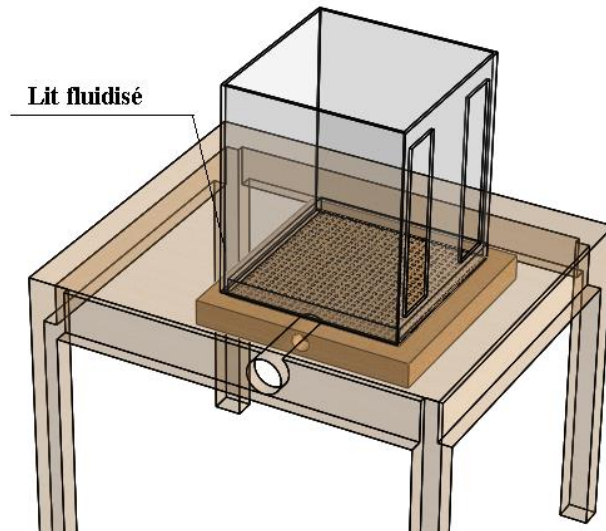


Figure II-6 Schéma descriptif du lit fluidisé.

II-2 Autres accessoires

a- Source Haute Tension

Les deux électrodes sont toutes deux reliées à deux sources de haute tension, d'où la nécessité de disposer de grandes valeurs de la tension pour créer un champ électrique suffisamment fort généré par les deux générateurs haute tension réglable variant entre 0 et $\pm 60\text{kV}$ et de polarité opposées (figure II-7).



Figure II-7: Sources Haute Tension pour l'alimentation des électrodes du séparateur.

b- Souffleur

Le rôle du souffleur (Figure II-8) est l'injection de l'air comprimé dans la chambre de fluidisation à travers le répartiteur d'air. Un mouvement d'air aléatoire se crée à l'intérieur de la chambre, ce qui donne une tribo-électrisation des poudres. Le chargement des particules fines se fait grâce à la collision entre elles, entre les particules et les parois, en variant le débit d'air de fluidisation du souffleur à l'aide d'un variateur de fréquence (Figure II-9).

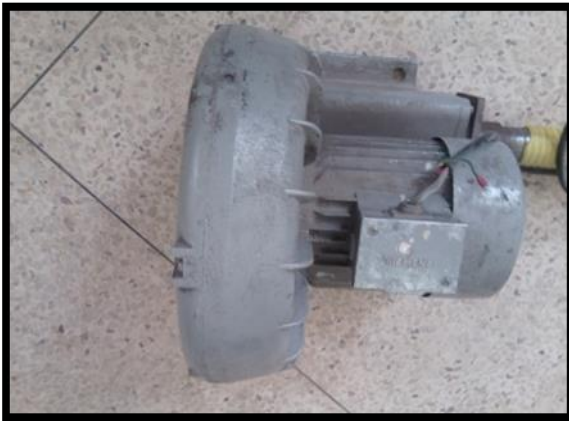


Figure II-8: Photographie du souffleur.



Figure II-9: Photographie du variateur de fréquence.

c- Électromètre

Un électromètre est un multimètre de marque (Keithley 6514) figure II-10 capable de mesurer des tensions, en consommant un courant très faible grâce à une résistance d'entrée très grande ($> 10^{15} \Omega$);

- des courants très faibles ($< 10^{-9}$ A et jusqu'à 10^{-17} A);
- des charges électriques jusqu'à 10^{-15} C ou moins.

Le circuit d'entrée d'un électromètre est généralement, un amplificateur opérationnel à transistors à effet de champ (FET), qui présente, en plus de la résistance d'entrée très grande, un courant de fuite et une tension de décalage (offset) très faibles.



Figure II-10: Photographie de l'électromètre utilisé.

d- Balance

On a mesuré la masse des poudres récupérées dans chaque compartiment durant toutes les expériences à l'aide d'une balance électronique d'une résolution de 0.1g (Figure II-11).



Figure II-11 : Balance électronique de laboratoire.

e- Thermo-hygromètre

La mesure de la valeur de l'humidité relative (RH%) est pris avant chaque série d'expériences. On utilise un thermo-hygromètre numérique Figure II-12, de marque WaveTeck, qui permet également de mesurer la température.



Figure II-12: Thermo hygromètre numérique

f- Tachymètre

La mesure de la vitesse de rotation de la roue d'entraînement a été relevée sur l'arbre du réducteur par un tachymètre qui donne le nombre de tours par minute (tr /min) (Figure II-13).



Figure II-13: Photographie du tachymètre utilisé.

g- Cage de faraday

Une cage de Faraday est une enceinte utilisée pour protéger des nuisances électriques et électromagnétiques extérieures ou inversement empêcher un appareillage de polluer son environnement. Elle est constituée de deux cylindres (ou cubes) concentriques séparés par un isolant. Le cylindre extérieur est relié à la terre qui fait écran, non seulement pour éviter que les charges extérieures ne soient mesurées mais aussi pour réduire les perturbations électriques extérieures et le second cylindre est relié à l'appareil de mesure notamment un électromètre ou un capteur pour la mesure des charges électriques d'un produit considéré.

Pour mesurer la charge électrique d'un échantillon, il suffit de l'introduire dans le cylindre intérieur Figure II-14, en évitant tout contact prématuré, celui-ci étant relié à un dispositif de mesure (voltmètre). On mesure alors une charge globale, somme algébrique de toutes celles que porte l'échantillon, donnée par la relation suivante :

$$Q = C \cdot V$$

(II .1)

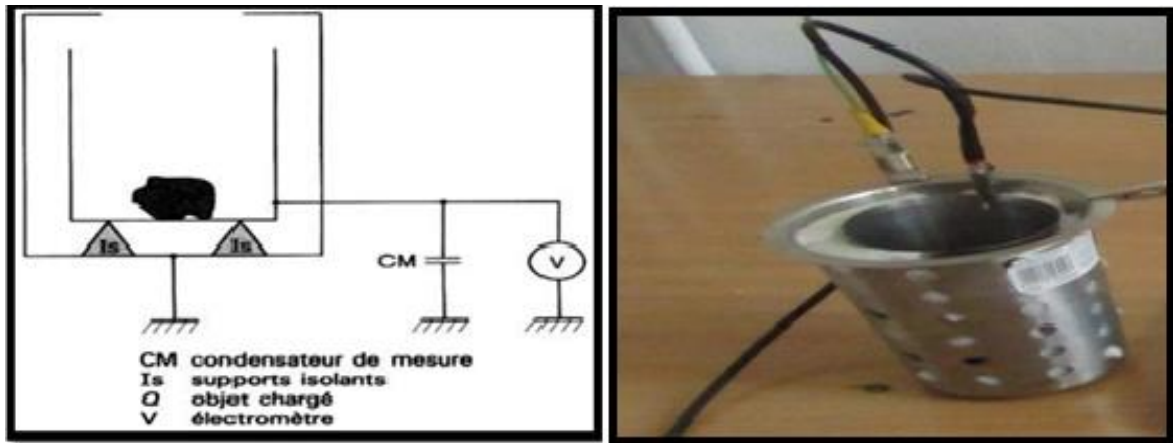


Figure II-14: Schéma de principe de cylindre de Faraday.

h- Capteur de charge PASCO

PASCO figure II-15, c'est un logiciel (instrument de mesure) qui relie en même temps la cage de Faraday et le microordinateur. Il permet d'évaluer la valeur d'une charge électrique. Le capteur est utilisé pour mesurer la charge acquise par le mélange binaire des particules fines de PVC blanc et gris qui sont exposé dans la cage de faraday. Le signe et l'amplitude de la charge est affiché directement sur ordinateur.



Figure II-15: Cage de faraday reliée avec un ordinateur.

II-3 Caractérisation des produits utilisés

Le mélange de matériaux utilisé dans notre étude comprend deux types de PVC : un PVC de couleur Blanche et PVC de couleur Grise broyés dans une usine algérienne de fabrication de tuyaux en plastique au niveau de Sidi Bel Abbas. La taille des particules est comprise entre 100 et 150 μm (Fig II-16).



Figure II-16 :A) PVC blanc, B) PVC gris.

Le poly (chlorure de vinyle), dont le symbole international PVC découle de l'appellation anglaise « Poly VinylChloride », est une matière thermoplastique de synthèse composée de carbone, d'hydrogène et de chlore. Le carbone et l'hydrogène proviennent du pétrole (43 %) tandis que le chlore est originaire du sel (57 %). La production industrielle du PVC remonte au début des années 1930.

Le PVC est un plastique très présent dans notre vie quotidienne car l'ensemble de ses propriétés mécaniques et physiques et son aptitude à être modifié selon les besoins en font un matériau adapté à de multiples usages.

Le PVC est présent dans tous les secteurs économiques : bâtiment (57 % pour l'Union européenne), emballage, électricité, électronique, biens de consommation, santé, transports. C'est la troisième matière plastique employée dans le monde (20 % de la consommation mondiale totale des plastiques, soit de l'ordre de 28 millions de tonnes) figure II-17.

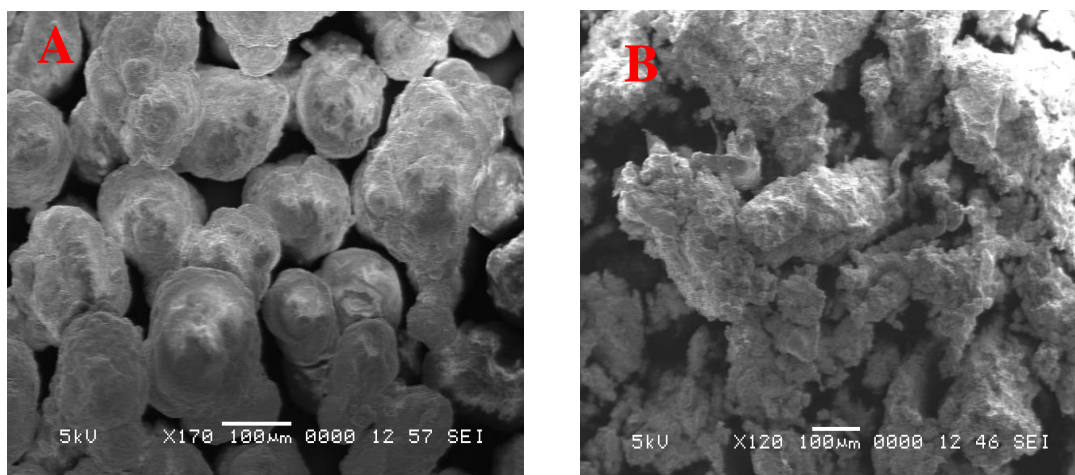


Figure II-17: Observation par microscope électronique à balayage MEB pour les échantillons :A) PVC blanc ;B) PVC gris

II-4 Principe de fonctionnement du dispositif

Un mélange binaire de produit isolant composé de PVC blanc et de PVC gris est introduit en premier lieu dans la chambre de chargement après mesure de leur masse par une balance. L'injection de l'air comprimé grâce à un souffleur permet aux particules d'entrer en collision répétée entre particules de même nature et particules de nature différente sous l'effet de courant d'air de fluidisation ascendant. Les particules seront chargées électriquement d'une manière brève par frottement dans le lit fluidisé, où elles acquièrent deux charges de signes opposés.

Les mécanismes principaux de charge sont le plus souvent les collisions particules-particules, mais aussi la charge peut apparaître par des collisions avec les parois en plexiglas de la chambre de séparation, ou par décharge couronne créée par les plaques.

L'alimentation du moteur triphasé permet d'entraîner le système bielle manivelle qui a pour rôle d'immerger les électrodes à l'intérieur du lit fluidisé avec un mouvement de va-et-vient pour collecter les deux produits.

Les particules qui sont chargées électriquement avec des charges de polarité différente sont séparées sous l'action de la force électrique exercée par le champ électrostatique généré entre les deux électrodes, qui sont reliées à deux générateurs de haute tension continue ayant des polarités opposées, positive et négative.

L'électrode positive attire le produit chargé négativement, par contre les particules chargées positivement sont attirées par l'électrode reliée à la source haute tension négative et resteront collées à celles-ci.

Le mouvement de bille manivelle permet d'arrêter le système pour que les électrodes soit à l'extérieur de la chambre du lit fluidisé. Enfin la récupération des deux produits séparés est faite manuellement. La quantité de masse récupérée sera déterminée en utilisant une balance électronique.

II-5 Mécanisme de charge triboélectrique

La plus importante source de charges électrostatiques reste le phénomène de charge triboélectrique.

Lorsque les particules sont agitées par le dispositif de chargement, il se produit trois types de collisions permettant le chargement triboélectrique figure II-18 :

Cas A : Collisions entre particules et parois du dispositif.

Cas B : Collisions entre particules et particules de matières différentes.

Cas C : Collisions entre particules de même nature.

Le signe et la valeur de la charge acquise par chaque particule sont déterminés par la combinaison de l'action de ces mécanismes.

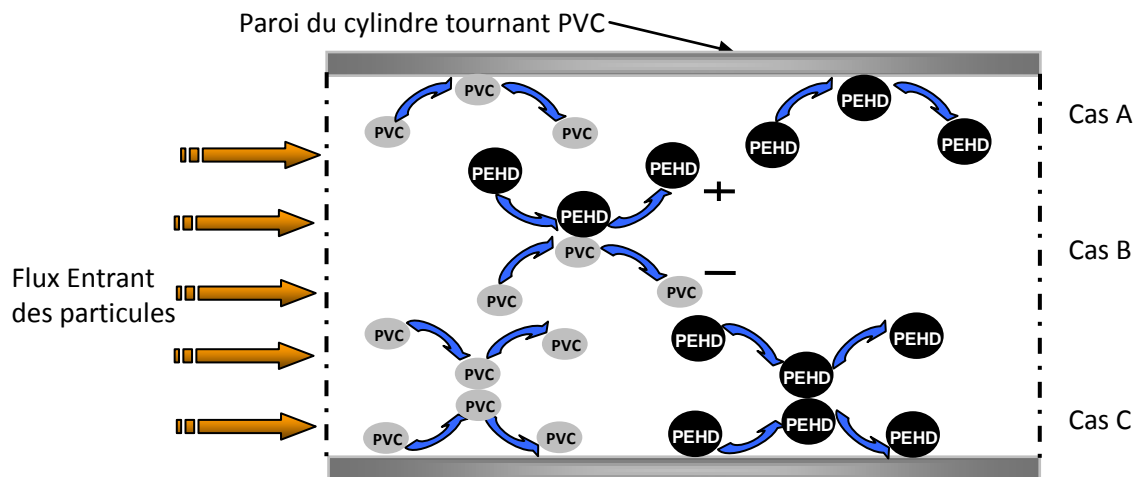


Figure II-18 Mécanisme de charge électrique.

II-6 Procédure expérimentale

Le produit micronisé utilisé pour la présente étude comprend deux types de PVC, originaire de déchets plastiques traités par un fabricant de PVC industriel de tuyaux en plastique, Groupe CHIALI, Sidi-Bel-Abbès, Algérie: PVC de couleur blanche (PVCb) utilisé pour fabriquer des tuyaux en PVC et PVC recyclé (broyé) de couleur grise (PVCg).

Les matières micronisées de PVCg ont été obtenues par broyage des tuyaux usagés en PVC. Un tamis vibrant a été utilisé pour récupérer les fines particules de granulométrie moyenne de 200 μm . Les expériences ont été effectuées sur des échantillons de masse totale 2000 g constitués de 50% de PVC blanc et 50% de PVC gris, avec une analyse expérimentale paramétrique du nouveau séparateur tribo-électrostatique, utilisant deux électrodes plaques parallèles reliées à deux alimentations de haute tension continue de polarités opposées. L'étude expérimentale est effectuée en deux mouvements verticaux et horizontaux alternatifs « va-et-vient » à l'intérieur d'un lit fluidisé de particules micronisées. Pour ce dispositif, les opérations de charge triboélectrique et de séparation se produisent simultanément et ce dans la même zone.

Le dispositif est constitué de deux électrodes métalliques qui sont des plaques verticales et parallèles de dimensions $30 \times 20 \text{ cm}^2$, reliées à deux alimentations de haute tension continue de polarités opposées (SPELLMAN) et qui sont entraînées dans un mouvement alternatif vertical « va-et-vient » à l'aide d'un dispositif à système « bille-manivelle ». Par ce mouvement, les deux électrodes plongent dans un lit fluidisé constitué par un mélange de particules micronisées de PVC blanc et de PVC gris d'une dimension micrométrique moyenne de $100 \mu\text{m}$ (Fig II-19).

Le PVC blanc est du PVC pur tandis que le PVC gris est obtenu en y ajoutant du carbone.

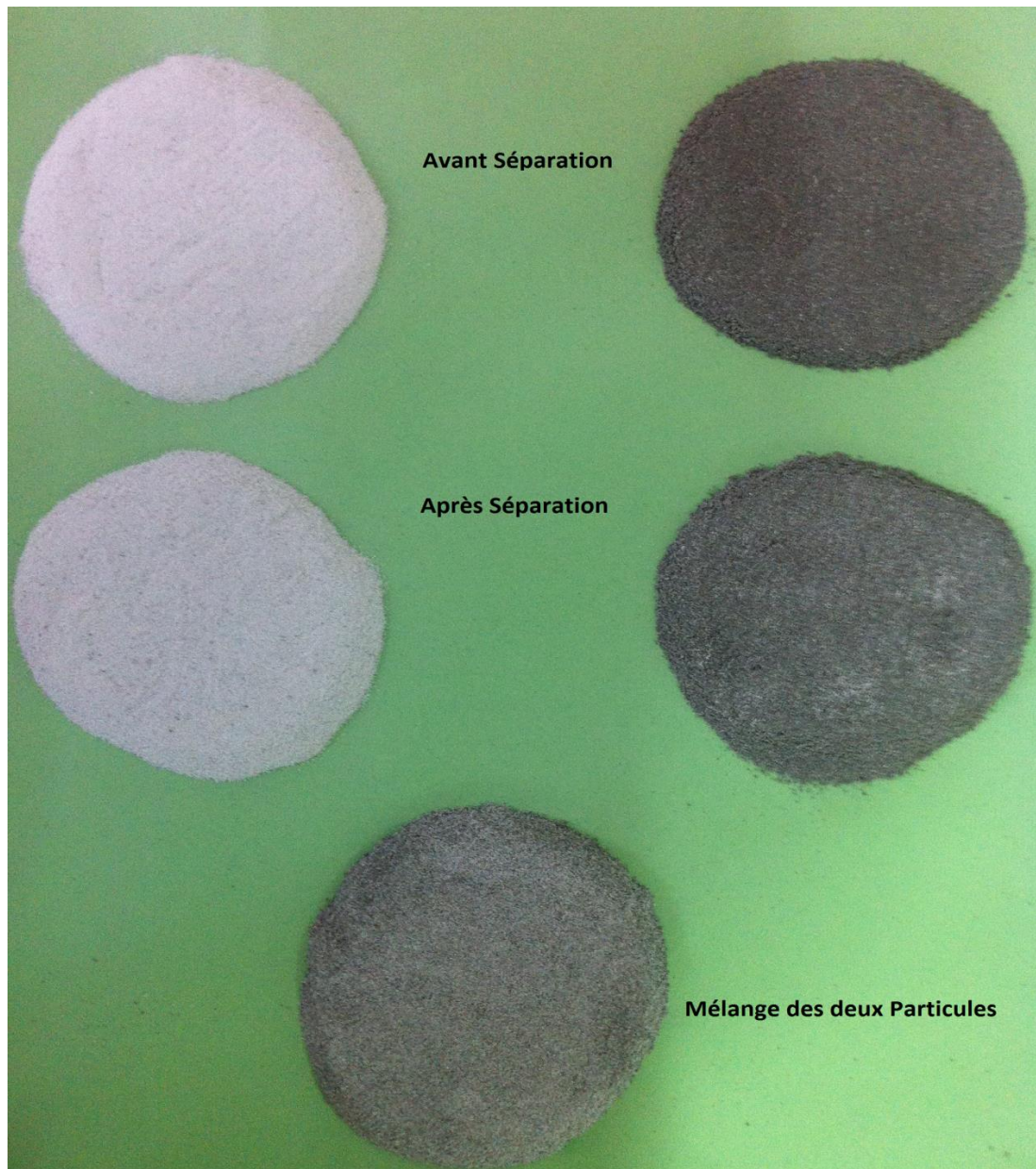


Figure II-19: Aspect des particules utilisées.

Le lit fluidisé est de forme parallélépipédique de dimensions 25 x 25 x 30 cm³. Toutes les parois verticales sont en plexiglas pour pouvoir observer le mouvement des particules tandis que la paroi horizontale inférieure est un tamis en plastique de dimensions 25 x 25 cm² sur laquelle est déposé le mélange à séparer. Un compresseur à air de puissance 0,45 kW, dont le débit est rendu variable grâce à l'utilisation d'un variateur électronique de vitesse, permet d'injecter de l'air pour provoquer la fluidisation du mélange et ainsi charger tribo-électriquement les particules.

Une fois le mélange déposé sur le tamis, l'injection de l'air provoque la fluidisation du mélange ce qui entraîne le chargement triboélectrique des particules qui acquièrent des charges de signes opposés, et finissent par s'attacher à l'électrode correspondante de polarité opposée au signe de la charge.

La procédure expérimentale est la suivante :

- Placer les deux électrodes à l'extérieur du lit fluidisé ;
- Mettre en mouvement le système « bielle-manivelle » qui est entraîné par un moteur triphasé de puissance 0.37 kW, immergeant ainsi les électrodes à l'intérieur du lit fluidisé ;
- Stopper le moteur dès que les deux électrodes sortent complètement du lit fluidisé ;
- Récupérer manuellement le produit sur chaque électrode et le peser à l'aide d'une balance électronique de précision 0,1 g.

Le travail expérimental a commencé par la détermination de la configuration optimale du système d'électrodes. Trois configurations sont possibles : « électrode positive – électrode terre », « électrode négative – électrode terre » et « électrode positive – électrode négative ». Des expériences ont été effectuées dans les trois cas en prenant le soin de garder par ailleurs les mêmes conditions expérimentales. Ensuite une analyse expérimentale paramétrique a été menée avec la configuration optimale d'électrodes pour étudier l'influence des différents facteurs sur le rendement de ce procédé de séparation.

Les facteurs qui ont été analysés sont :

- Champ électrique E (kV/cm).
- Niveau appliqué à haute tension U (kV).
- Distance Inter-électrodes d (cm).
- Vitesse de déplacement des électrodes n (tr/min).

- Débit d'air D (L / min) par le relevé de la fréquence f (Hz) du variateur de vitesse.
- masse du produit à séparer m (g).
- Composition du mélange à différentes quantités de masse pour le PVC blanc et le PVC gris.

Une telle étude expérimentale est réalisable lorsqu'il s'agit d'une humidité relative idéale, ce qui exclut en particulier toute mesure où l'humidité (HR%) est inconvenable. Donc, on doit la mesurer avant chaque série d'expériences, utilisant un thermo hygromètre numérique (Amprobe TH-3).

II-7 Procédure de déroulement des expériences de mesure de charge

Le lit fluidisé est parmi les meilleures méthodes de chargement des poudres. Il est constitué de deux chambres, l'une au-dessus de l'autre, séparées par une membrane poreuse conçu spécialement. La chambre supérieure est remplie de poudre, l'air introduit dans la chambre inférieure est uniformément diffusée par un répartiteur d'air.

La poudre présente des caractéristiques de fluidisation et d'application uniques. Les propriétés telles que la composition, la forme des particules et la distribution de taille des particules.

a- Préparation des échantillons

Les échantillons des particules fines sont préparés avant chaque expérience sous forme de mélange binaire avec un ratio 50% PVC_b – 50% PVC_g en mesurant la charge initiale de chaque matériau avant de le verser dans le lit fluidisé.

b- Déroulement des expériences

Les masses des deux produits sont mesurées par une balance électronique. Après avoir introduit le produit dans le dispositif de chargement, il est mis sous l'action de l'air dans un lit fluidisé. Cet air est propulsé à une vitesse variable par une soufflante située à la base de la chambre de chargement. Les particules sont fluidisées pendant différents temps, à des intervalles qui sont suffisants pour que l'effet triboélectrique lié aux collisions particule-particule se manifeste.

En outre, l'estimation de la charge massique Q/m (nC/g) a été effectuée en mesurant la charge acquise par chaque produit après séparation, en utilisant l'électromètre Keithley, en les versant dans une cage de Faraday, reliée à un instrument de mesure (capteur de charge) appelé PASCO. Ce dernier est relié à un ordinateur PC pour donner directement le signe et

la valeur de la charge acquise, Notons que le PVC blanc acquière une charge positive et le PVC gris une charge négative.

Par ailleurs, toutes les expériences effectuées durant ce travail de mesure de la masse ou de la charge électrique, ont été répétées deux fois, ensuite la valeur moyenne a été considérée pour tracer les courbes.

II-8 Modélisation expérimentale par plans d'expériences

La méthodologie des plans d'expérience permet de déterminer le nombre d'expériences à réaliser conformément à un objectif bien défini, afin d'étudier plusieurs facteurs simultanément, à réduire la dispersion associée à des mesures, d'apprécier les effets de couplage entre les facteurs et enfin d'évaluer les influences respectives des facteurs et leurs interactions. De nombreux articles ont été écrits sur l'application de cette méthodologie dans les processus électriques et électrostatiques.

Nous présentons les principes de base de la modélisation expérimentale du séparateur électrostatique avec le logiciel MODDE 5.0 que nous avons utilisé pour la modélisation et l'optimisation de ce séparateur afin d'identifier le point de fonctionnement optimal pour une meilleure récupération.

II-8-1 Développement de la méthode

A. Vocabulaire utilisé

A.1 Réponses, facteurs, niveaux

Avant d'aborder le principe des plans d'expériences, il est important de préciser le vocabulaire utilisé.

Les phénomènes étudiés sont mis sous la forme mathématique suivante :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{f}(\mathbf{U}_{ij}) \quad (\text{II. 2})$$

Où \mathbf{Y} , la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur, est appelée **la réponse**,

\mathbf{U}_{ij} , les variables (naturelles) qui influencent un phénomène, sont appelées **les facteurs**.

\mathbf{f} est une fonction mathématique qui prédit les variations de la réponse selon les différentes valeurs données aux \mathbf{U}_{ij} : en principe il s'agit d'un polynôme du premier ou deuxième degré dans le cas des plans d'expériences.

Lorsque l'on étudie un facteur \mathbf{U}_{ij} , on définit toujours, en fonction des besoins de l'étude, une valeur inférieure et une valeur supérieure. Les variations du facteur sont donc limitées par

deux bornes qui sont appelées **niveau bas** et **niveau haut**. On désigne le niveau bas (codé -1) par le signe (-) et le niveau haut (codé +1) par le signe (+).

A.2 Variables codées

Pour pouvoir comparer entre eux les "poids" des paramètres, on préfère ne pas utiliser les valeurs des variables naturelles U_{ij} qui dépendent des unités utilisées. Pour surmonter cette difficulté, on utilise les valeurs des **variables codées** X_{ij} dont l'origine correspond au centre du domaine expérimental. Les valeurs des variables codées sont définies de la manière suivante :

$$X_{ij} = (U_{ij} - U_j^0) / \Delta U_j \quad (\text{II. 3})$$

avec X_{ij} : valeur de la variable codée j pour l'expérience i ;

U_{ij} : valeur de la variable naturelle j à l'expérience i ;

U_j^0 : valeur de la variable naturelle au centre du domaine ;

ΔU_j : pas de variation de la variable naturelle j (moitié de l'écart entre la valeur maximum et la valeur minimum de la variable).

Trouver des modèles mathématiques de bonne qualité avec un minimum d'efforts dépend de la façon dont les intervalles des facteurs sont sélectionnés. Cette méthode peut être utilisée comme suit :

- ✓ Sélection des facteurs les plus intéressants et influents.
- ✓ Détermination des valeurs maximales, minimales et centrales de chaque facteur.
- ✓ Réalisation d'une matrice d'expériences avec tous les états possibles et les réponses correspondantes.

Avant de commencer les expériences, il est nécessaire de définir le meilleur plan approprié qui permet de modéliser le processus avec le plus de précision possible. Dans ce qui suit, nous choisissons le plan composite double à faces centrées (CCF) qui donne des modèles quadratiques. Il est possible de déterminer une relation quadratique entre la fonction de sortie afin de l'optimiser (réponse) et les variables d'entrée u_i ($i = 1, \dots, k$) (facteurs):

$$y = f(u_i) = c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ii} u_i^2 \quad (\text{II.4})$$

Sachant que Δu_i et u_{i0} sont respectivement le pas de variation et la valeur centrale du facteur i , les valeurs centrales réduites des facteurs peuvent être définies par la relation suivante:

$$x_i = (u_i - u_{i0}) / \Delta u_i \quad (\text{II. 5})$$

Avec ces nouvelles variables, la fonction de sortie devient:

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 \quad (\text{II. 6})$$

Les coefficients peuvent être calculés ou estimés par un programme de traitement de données, de manière à avoir un écart minimum entre le modèle mathématique prédictif et les résultats expérimentaux.

B. Plans composites

Les plans composites centrés, connue dans la littérature anglo saxon par « design of experiment », font partie des plans d'expérience pour l'étude des surfaces de réponse. Ce type de dispositif expérimental, permet d'estimer les effets moyens des facteurs et les interactions entre les effets des facteurs. Lorsque ces derniers sont quantitatifs, il arrive que l'on souhaite compléter cette première approche par une étude d'optimisation.

La première partie de l'étude est un plan factoriel complet ou fractionnaire complétée par des points au centre pour vérifier la validité du modèle du premier degré. Si les tests de validation sont positifs l'étude s'achève le plus souvent, mais s'ils sont négatifs on entreprend des essais supplémentaires pour établir un modèle du second degré. Les essais supplémentaires constituent la seconde étape du déroulement de l'étude. Ces nouveaux essais sont représentés par des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Les points situés sur les axes de coordonnées sont appelés les points en étoile figure II-20.

Les plans composites présentent donc trois parties :

- le plan factoriel : c'est un plan factoriel complet ou fractionnaire à deux niveaux par facteurs. Les points expérimentaux sont aux sommets du domaine cubique d'étude.
- Le plan en étoile : les points du plan en étoile sont sur les axes et ils sont en général tous situés à la même distance du centre du domaine d'étude.

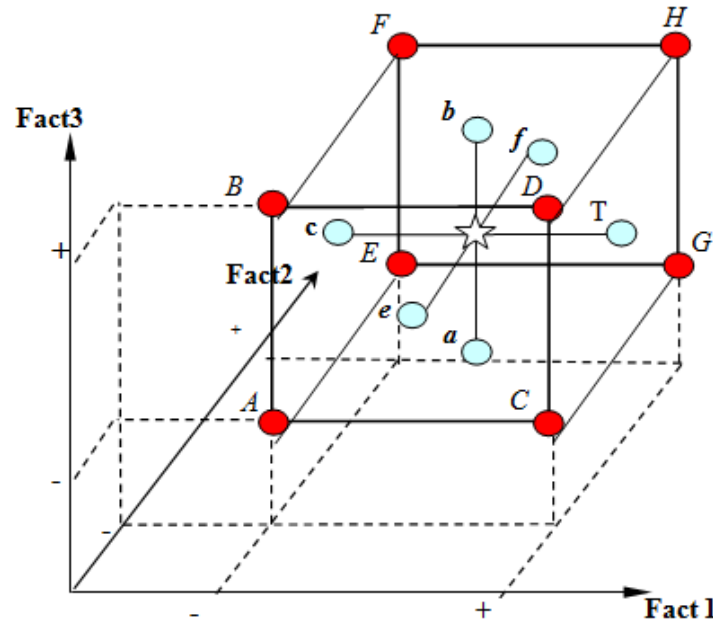


Figure II-20: Disposition des expériences dans un plan composite centré.

- Les points au centre du domaine d'étude : on ajoute toujours des points expérimentaux situés au centre du domaine d'étude et cela aussi bien pour les plans factoriels que pour les plans en étoile (composite).

Le nombre total d'essais n à réaliser est la somme :

- des essais du plan factoriel, soit n_f ;
- des essais du plan en étoile, soit n_α ;
- des essais au centre, soit n_0

Le nombre n d'essais d'un plan composites est donné par la relation suivante :

$$n = n_f + n_\alpha + n_0 \quad (\text{II.7})$$

Lorsque le domaine expérimental est défini à partir des variations de k facteurs, le nombre de traitements expérimentaux proposés par un plan composite centré est donc égal à :

$$n = 2^k + 2k + n_0 \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- 2^k : nombre d'essais correspondant au plan factoriel.
- $2k$: nombre d'essais du plan en étoile.

- n_0 : nombre d'essais au centre.

L'intérêt des plans composites réside dans le fait qu'ils prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont inexplicables par un modèle du premier degré. Il suffit d'effectuer les expériences correspondantes aux points en étoile et de faire les calculs sur l'ensemble de toutes les expériences. Les plans composites sont parfaitement adaptés à l'acquisition progressive des résultats. Le nombre de niveaux d'un plan composite est de cinq par facteur :

Le point central, les deux niveaux du plan factoriel et les deux niveaux des points en étoile.

Les points en étoile sont sur les axes des facteurs, mais quelle coordonnée faut-il leur donner ?

Mettons-nous dans le cas idéal où tous les emplacements sont possibles et où les contraintes expérimentales ne gênent pas. La disposition des points expérimentaux dépend alors du critère d'optimalité que l'on choisit. En général, on s'arrange pour que les erreurs sur les coefficients du modèle soient les plus petits possibles [49].

II-8-2 Logiciel MODDE 5.0

Nous avons utilisé le logiciel MODDE 5.0 qui est un programme Windows pour la création et l'évaluation de modèles expérimentaux. Le programme aide l'utilisateur à l'interprétation des résultats et la prévision des réponses. Il calcule les coefficients du modèle mathématique et identifie les meilleures adaptations des facteurs permettant d'optimiser le processus.

En outre, le programme calcule deux importants critères statistiques qui permettent de valider ou non le modèle mathématique, symbolisé par R^2 et Q^2 . Le premier est appelé la qualité de l'ajustement, et est une mesure de la façon dont le modèle peut être adapté à des données brutes, il varie entre 0 et 1, où 1 indique un modèle parfait et 0 indique aucun modèle. Le deuxième critère est appelé la qualité de prédiction, et estime la puissance prédictive du modèle. Comme R^2 , Q^2 a une limite supérieure 1, mais sa limite inférieure est moins l'infini ($-\infty$). Pour qu'un modèle puisse passer le test de diagnostic, les deux paramètres doivent être élevés, et de préférence non séparés par plus de 0,2 à 0,3.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le nouveau séparateur qui a été utilisé durant ce travail, ainsi que les méthodes expérimentales pour la séparation et la mesure de la charge électrique. En outre, nous avons décrit sommairement la méthodologie des plans d'expériences que nous avons utilisés pour la modélisation.

Les essais du séparateur développé feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

Etude expérimentale paramétrique du séparateur à deux électrodes plaques en mouvement vertical « va-et-vient »

INTRODUCTION

Ce chapitre présente, dans un premier temps l'étude expérimentale paramétrique du séparateur électrostatique à deux électrodes verticales. Les expériences ont pour but de connaître l'influence des différents paramètres comme : la tension, la masse, le débit et l'intensité de champ électrique ...etc. sur le processus de séparation. Vu l'interdépendance de tous ces éléments entre eux, qui ont donné des résultats permettant de déterminer les caractéristiques efficaces pour une meilleure séparation afin d'avoir un bon rendement, nous proposons une procédure expérimentale se basant sur la méthodologie des plans d'expérience, afin d'identifier les points de fonctionnement optimaux de ce procédé en vue d'une meilleure récupération.

Dans un deuxième temps, et vu que le processus de séparation dépend aussi de la charge et du comportement entre les deux types des particules, nous étudions l'influence de la charge de chacun des deux matériaux sur la séparation pour améliorer l'efficacité de récupération.

III-1 Optimisation du procédé de séparation électrostatique

III-1-1 Analyse de l'efficacité de séparation

Pour améliorer et trouver les bonnes caractéristiques et valeurs optimales de chaque paramètre de ce séparateur pour un meilleur rendement, on effectue plusieurs expériences en variant tous les paramètres qui influent sur la séparation qui sont : la distance, le champ, le débit, la vitesse de rotation, avec une humidité variant entre 50% et 70%.

Chaque paramètre dans le processus de séparation est étudié à part, c'est-à-dire à chaque fois on fait une série d'expériences en variant un seul paramètre et on fixe tous les autres à des valeurs constants. Cela est valable pour les autres paramètres.

Nous nous sommes basés sur la mesure de la masse collectée, c'est à dire le taux de récupération.

III-1-2 Expériences de criblage « un-facteur-à-la-fois »

Des expériences de criblage sont faites pour identifier le domaine de variation des trois facteurs. C'est une expérience classique de type « un-facteur-à-la-fois ». L'étape d'optimisation d'un procédé expérimental devrait permettre la détermination des valeurs de facteurs pour lesquelles la récupération des produits est maximale.

Nous exposons successivement les résultats concernant l'influence des paramètres de contrôle notamment, le champ électrique, la distance inter-électrodes, la vitesse de rotation et le débit d'air injecté sur le rendement du dispositif (la masse récupérée des produits).

a- Influence du champ et de la distance sur la récupération

Le nouveau séparateur offre la possibilité de faire varier l'espace inter-électrodes à certaines valeurs par exemple (4, 6, 8, 10, 12 cm) et le champ varie avec chaque distance de 1 à 4,5 kV/cm. Cela correspond à une variation de différence de potentiel entre les plaques,

Une série d'expériences de cinq intervalles de la distance inter électrodes $d = 4-6-8-10-12$ cm a été effectuée. Pour chaque expérience, on a fait varier la tension appliquée aux bornes des deux électrodes entre 4 kV et 54 kV tandis que les autres paramètres ont été maintenus constants, comme suit:

- Fréquence du variateur $F = 22$ Hz,
- Masse du mélange de PVC $m = 2000$ g,
- Vitesse de rotation $n = 50$ tr/min

Les résultats obtenus concernant la mesure de la masse de PVC_b et PVC_g récupérée en fonction du champ électrique pour les cinq différentes valeurs de l'intervalle d , sont représentés aux figures (Fig III-1 - Fig III-5).

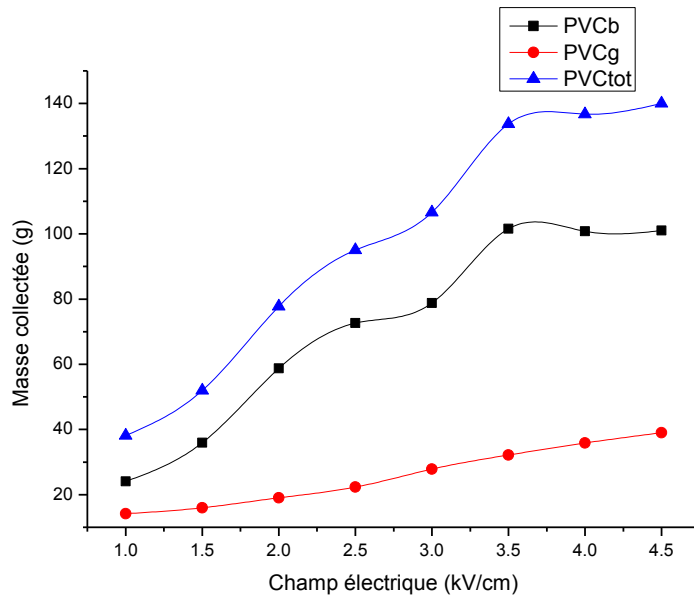


Figure III-1: Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g et PVC_{tot} en fonction du champ pour d = 4cm.

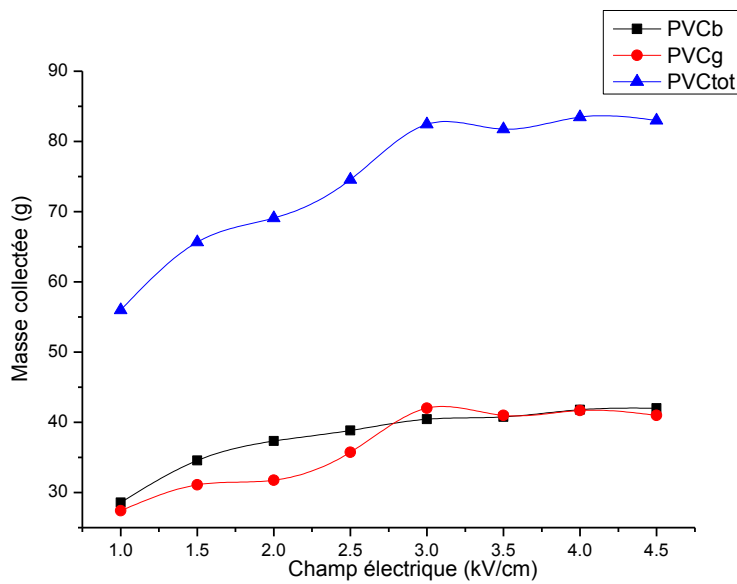


Figure III-2: Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g et PVC_{tot} en fonction du champ pour d = 6cm.

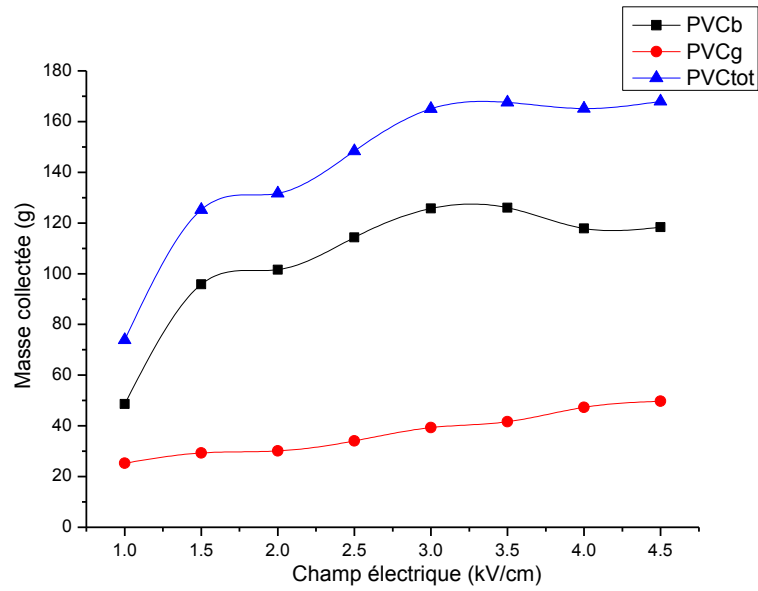


Figure III-3: Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g et PVC_{tot} en fonction du champ pour d = 8cm.

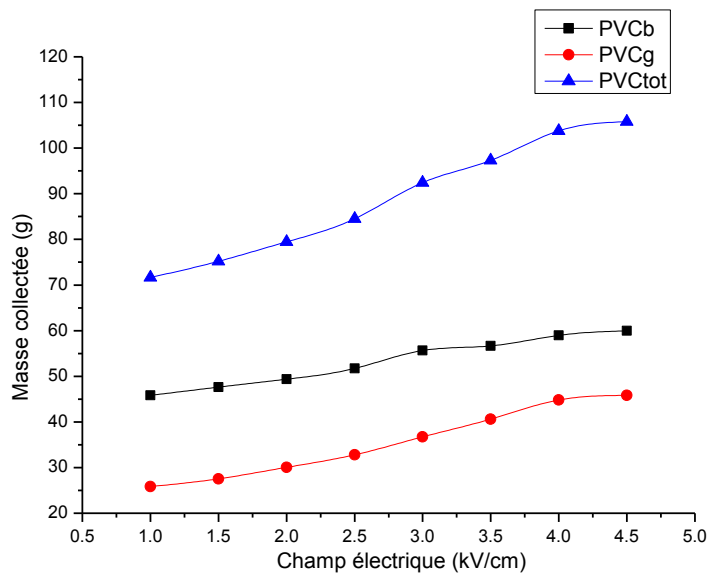


Figure III-4: Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g et PVC_{tot} en fonction du champ pour d = 10cm.

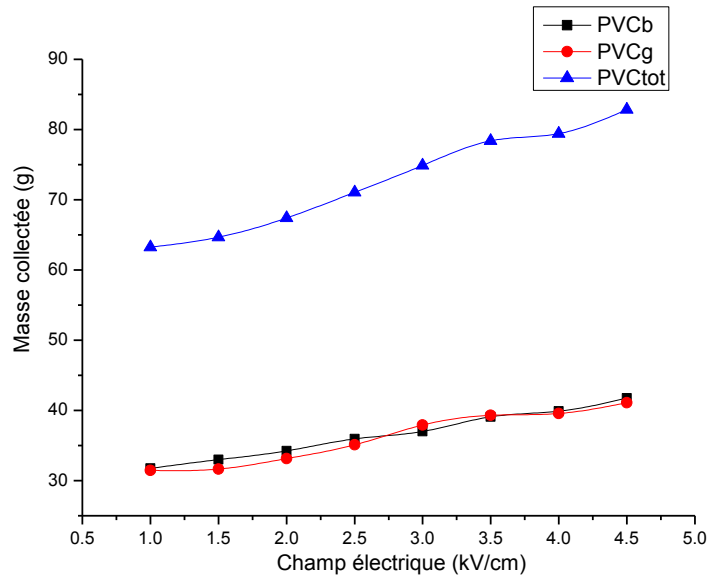


Figure III-5: Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g et PVC_{tot} en fonction du champ pour $d = 12$ cm.

D'après les résultats montrés aux (fig III-1 - III-5), on observe que la récupération de PVC varie en fonction de la distance inter-électrode d . D'un autre côté, Pour chaque valeur de d cette récupération est proportionnelle à la variation du champ. Donc à chaque fois que le champ croît la récupération augmente aussi. Nous obtenons un meilleur rendement de séparation avec $m = 167,55$ g pour $d = 8$ cm et un champ de 3,5 kV/cm. Si on dépasse cette valeur de champ, on trouve un taux élevé de récupération mais cela provoque la diminution de l'efficacité de séparation.

Pour $d = 10$ cm et $d = 12$ cm. Par contre, il y a une faible récupération de 38,17 g pour $d = 4$ cm et un champ $E = 1$ kV/cm, Par conséquent, le domaine de variation du champ électrique a été définie comme $E_{min} = 3$ kV/cm et $E_{max} = 4$ kV/cm et la distance est fixée à $d = 8$ cm pour les expériences qui suivent.

b- Influence de la vitesse de rotation sur la récupération

Les électrodes sont mises en mouvement par un moteur triphasé de puissance 0.37 kW relié à un réducteur de 50 tr/min, qui met en mouvement le système « bielle-manivelle ». Ce dernier immergeant ainsi les électrodes à l'intérieur du lit fluidisé, chaque vitesse correspond à une tension appliquée aux bornes du moteur, Les résultats de la variation de la masse récupérée en fonction de la vitesse de rotation n représentés à la figure III-6 pour un champ

électrique $E= 3.5$ kV/cm, une fréquence $f = 22$ Hz, une masse $m = 2000$ g et une distance inter électrodes $d = 8$ cm.

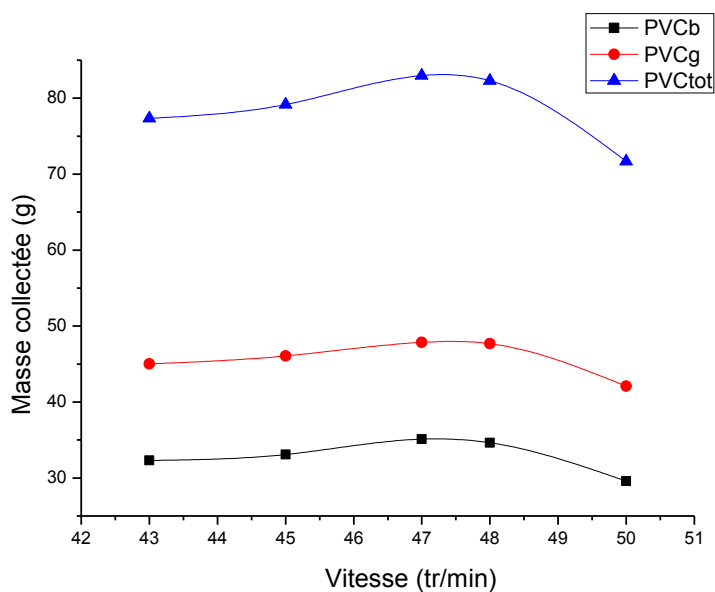


Figure III-6: Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g en fonction de la vitesse de déplacement des électrodes.

La vitesse de déplacement des électrodes dépend de la vitesse du «système bielle-manivelle » entraîné par un moteur électrique à courant alternatif. Ce dernier étant muni d'un réducteur, la vitesse de rotation n se situe dans une plage comprise entre 42 et 50 tr/min. Les résultats représentés sur la figure III-6 montrent que, lorsque la vitesse de rotation augmente le temps de séjour des électrodes diminuent dans le lit fluidisé, ainsi la masse récupérée des particules de PVC_b et PVC_g diminue avec l'augmentation de la vitesse. Par conséquent, on a opté pour les valeurs limites de la vitesse de rotation $n_{min} = 42$ et $n_{max} = 50$ tr/min.

c- Influence de la fréquence du variateur sur la récupération

La fréquence du variateur (c'est-à-dire la vitesse de l'air injecté qui provoque le mouvement des particules) est un des paramètres dont le contrôle est important pour l'optimisation du processus. En effet ceci permet d'assurer les meilleures conditions de chargement électrique des granules par le lit fluidisé, afin de permettre à toutes les particules isolantes d'acquérir une charge électrique suffisante leur permettant d'adhérer à la surface des électrodes de signe opposé.

Le débit d'air est contrôlé par l'augmentation ou la diminution de la vitesse du compresseur à l'aide d'un variateur électronique de vitesse par la variation de la fréquence.

La figure III-7 montre les résultats obtenus de l'influence de la fréquence du variateur sur la récupération de la masse des particules fines, en variant la fréquence f entre 18 Hz à 30 Hz. Les autres paramètres ont été maintenus constants:

- Champ électrique $E = 3,5$ kV/cm.
- Vitesse de rotation $n = 47$ tr/min.
- Masse $m = 2000$ g.
- Distance inter électrodes $d = 8$ cm.

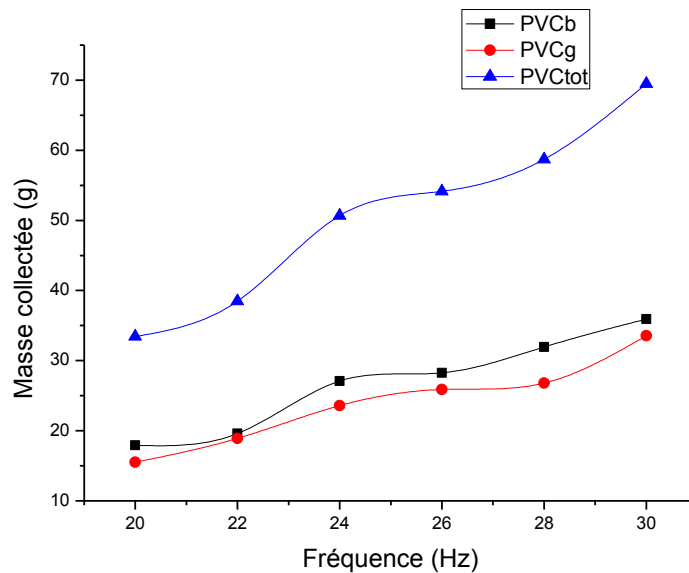


Figure III-7: Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g en fonction de la fréquence.

La fréquence du variateur qui contrôle le compresseur est l'un des paramètres important qui influe sur le processus de séparation de façon directe. La fréquence du variateur influe sur la charge acquise des particules par les collisions et les contacts de ces dernières. La variation de la masse récupérée en fonction du taux de fluidisation, représenté sur la Fig III-7, montre que lorsque f augmente les granules acquièrent une charge triboélectrique plus élevée, ce qui permet d'améliorer l'efficacité de la séparation. L'augmentation de la masse recueillie est probablement due au fait qu'une fluidisation plus intense, en raison d'une fréquence plus élevée du moteur d'entraînement du compresseur, accélère la vitesse d'agitation de la particule et donc les particules sont mieux chargées et plus attirées par les électrodes. Par conséquent, nous avons opté pour les valeurs limites de la fréquence $f_{\min} = 22$ Hz et $f_{\max} = 28$ Hz.

III-2 Identification du point de fonctionnement optimal

L'identification des valeurs optimales des paramètres de commande du séparateur a été effectuée en utilisant un plan composite à faces centrées (CCF) qui permet d'établir une relation entre les grandeurs d'entrée et les grandeurs de sortie.

Le taux de récupération des produits PVC_b et PVC_g ont été considérés comme des réponses significatives pour l'évaluation du nouveau processus de séparation et représenté en fonction de trois facteurs de contrôle. Vu la difficulté d'étudier la pureté comme réponse, en raison de la petite taille des particules, un chapitre entier lui sera consacrée, proposant une nouvelle méthode d'estimations de la pureté.

Selon les expériences préliminaires, trois facteurs ont été considérés comme les plus influents, dont les limites de variation ont été déduites à partir des expériences préliminaires de criblage:

- Champ électrique $E : E_{min} = 4 \text{ kV/cm} ; E_{max} = 14 \text{ kV/cm}$
- Vitesse de rotation $n : n_{min} = 43 \text{ tr/min} ; n_{max} = 50 \text{ tr/min}$
- Fréquence $f : f_{min} = 30 \text{ Hz} ; f_{max} = 50 \text{ Hz}$

L'identification du point optimal E_0 , n_0 et f_0 en utilisant un plan composite à faces centrées (CCF), a été réalisée. Les deux niveaux "max" et "min" sont les limites établies dans la section précédente pour chacune des trois variables de contrôle (E_{min} , E_{max}), (n_{min} , n_{max}) et (f_{min} , f_{max}). Le point central (E_c , n_c et f_c) a été déterminé comme suit:

$$E_c = (E_{max} + E_{min}) / 2 = (14 + 4) / 2 = 9 \text{ kV / cm} \quad (\text{III.1})$$

$$n_c = (n_{min} + n_{max}) / 2 = (43 + 50) / 2 = 46,5 \text{ tr / min} \quad (\text{III.2})$$

$$f_c = (f_{min} + f_{max}) / 2 = (26 + 30) / 2 = 28 \text{ Hz} \quad (\text{III.3})$$

Les résultats du plan d'expérience CCF sont représentés dans le tableau III-3.

Tab III-1. Résultats du plan composite à faces centrées

N° Experience	Champ électrique <i>E</i> (kV/cm)	Vitesse de rotation <i>n</i> (tr/min)	Fréquence <i>f</i> (Hz)	Masse PVC _b (g)	Masse PVC _g (g)	Masse PVC _{tot} (g)
1	3	43	26	13,045	12.135	25.18
2	4	43	26	15,795	15.49	31.285
3	3	50	26	16,475	16.42	32.895
4	4	50	26	18,3	18.245	36.545
5	3	43	30	21,63	23.055	44.685
6	4	43	30	21,84	23.19	45.03
7	3	50	30	24,78	26.1	50.88
8	4	50	30	23.07	26.275	49.345
9	3	46.5	28	20.23	19.36	39.59
10	4	46.5	28	20.065	16.03	36.095
11	3.5	43	28	12.41	13.11	25.52
12	3.5	50	28	13.5	15.03	28.53
13	3.5	46.5	26	17.93	20.985	38.915
14	3.5	46.5	30	24.52	31.21	55.73
15	3.5	46.5	28	16.815	17.055	33.87
16	3.5	46.5	28	13.985	12.69	26.675
17	3.5	46.5	28	14.675	13.9	28.575

Puisque tous les tests statistiques conduisent à des modèles mathématiques validés du moment que les critères R^2 et Q^2 atteignent des valeurs élevées, les trois modèles ont été validés et utilisés pour la prédiction et l'analyse.

Après l'élimination de quelques effets non significatifs, les modèles mathématiques de la récupération des produits proposés par MODDE 5.0 sont exprimées par les équations suivantes :

$$\text{PVC}_b = 16.20 + 0.29 E^* + 1.14 n^* + 3.43 f^* + 3.15 E^*E - 4.03 n^*n^* + 4.23 f^*f^* \quad (\text{III.4})$$

$(R^2 = 0,92 \text{ et } Q^2 = 0,80).$

$$\text{PVC}_g = 16.49 + 0.21 E^* + 1.51 n^* + 4.65 f^* - 0.26 E^*E - 3.89 n^*n^* + 8.13 f^*f^* \quad (\text{III.5})$$

$(R^2 = 0,89 \text{ et } Q^2 = 0,70).$

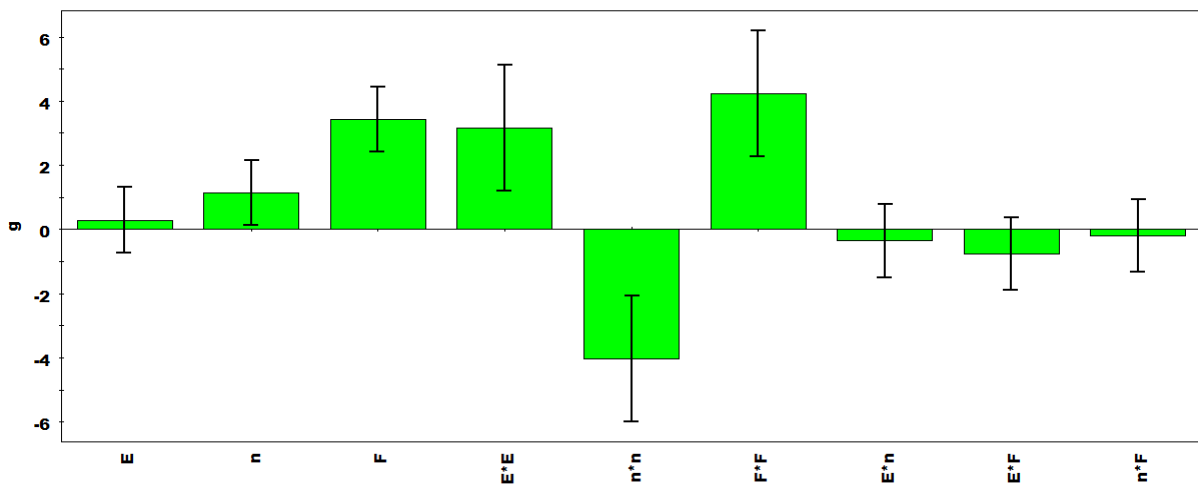
$$\text{PVC}_{\text{tot}} = 32.70 + 0.51 E^* + 2.64 n^* + 8.08 f^* + 2.89 E^*E - 7.92 n^*n^* + 12.37 f^*f^* \quad (\text{III.6})$$

$(R^2 = 0,91 \text{ et } Q^2 = 0,76).$

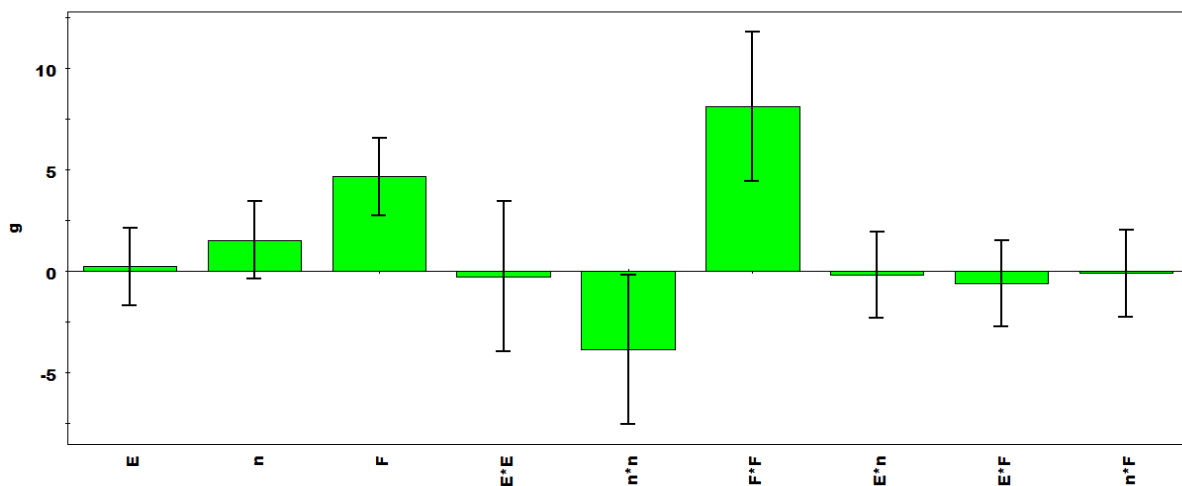
III-3 Analyse des résultats obtenus

Les valeurs des coefficients associés aux facteurs dans le modèle mathématique montrent le degré d'influence de chaque facteur. Les tracés des coefficients pour les trois modèles sont représentés à la figure III-8. Il découle du modèle mathématique proposé que dans les limites de la variation des intervalles choisis, la fréquence f du convertisseur qui alimente le ventilateur est celle qui a le plus d'effet pour les trois réponses.

Le champ électrique appliqué E et la vitesse de rotation du moteur n , dans l'intervalle que nous avons choisi, semblent avoir peu d'influence sur les trois réponses. D'un autre côté nous remarquons que différentes interactions entre les facteurs sont très faibles et ne présentent aucun effet sur la récupération des produits.



a)



b)

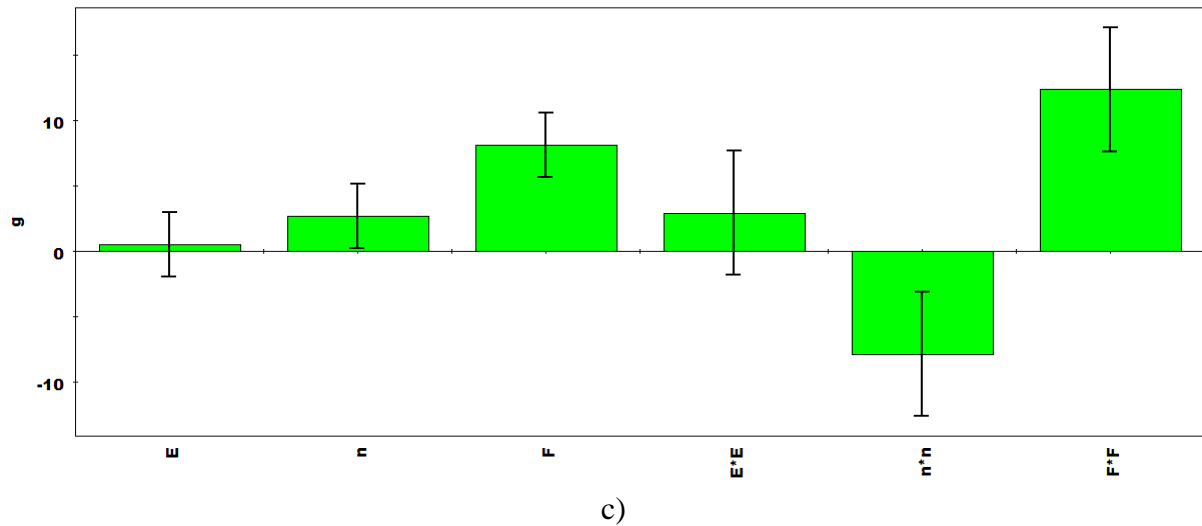
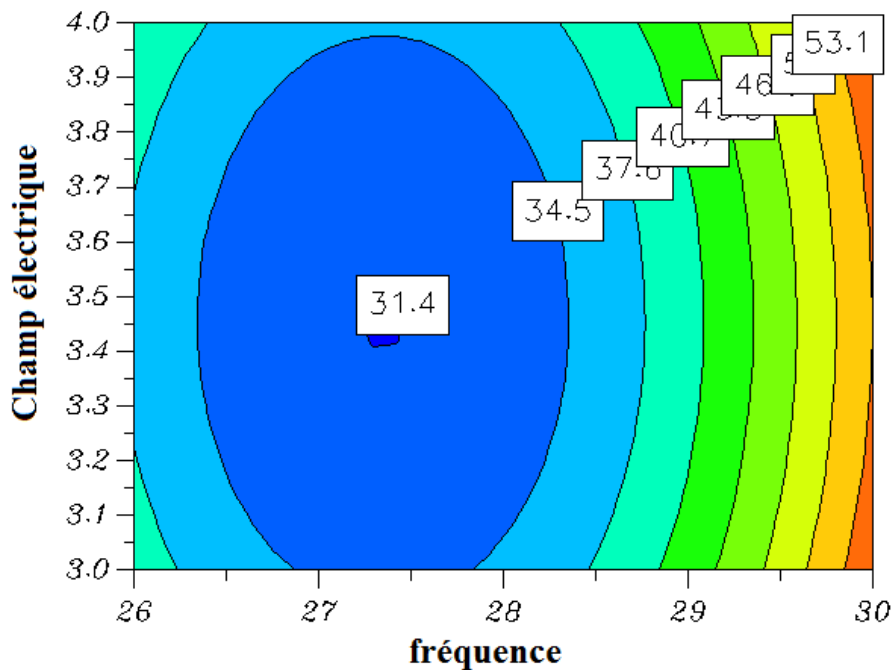
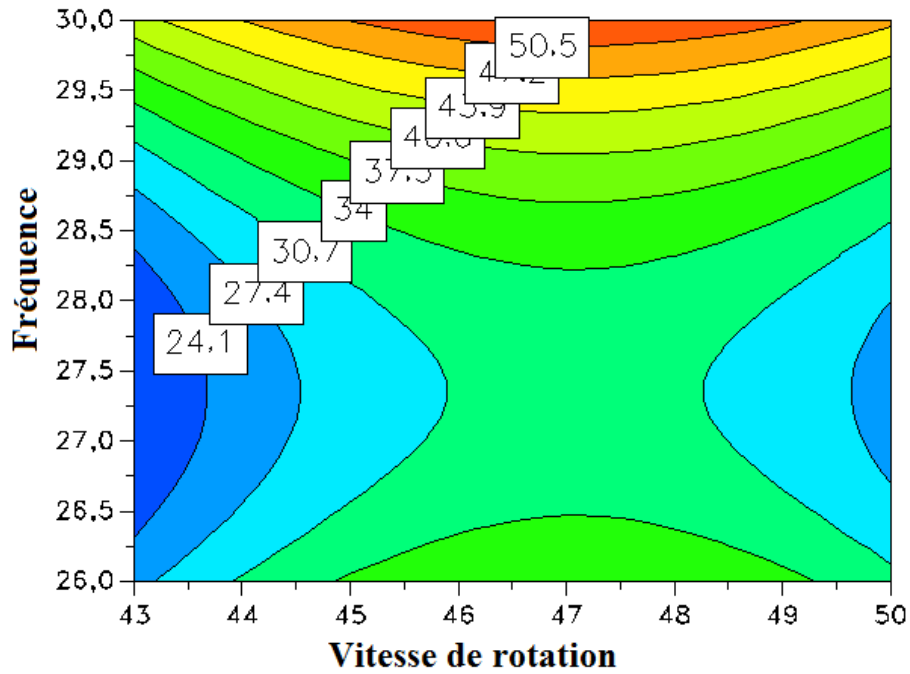


Figure III-8: Effets des facteurs et leur interaction sur le taux de récupération
 a) PVC blanc b) PVC gris c) PVC total

Les tracés de contours iso-réponse pour le PVC total obtenus avec MODDE 5.0 sont représentés à la figure III-9. Ces courbes confirment que la récupération totale du PVC est très influencée par le facteur « *Fréquence* » en comparaison avec les deux autres facteurs. Ces résultats montrent que les zones optimales (en orange) où la récupération est maximale, sont obtenues pour un intervalle de fréquence de (29.5 - 30 Hz), un champ électrique de (3.9 - 4 kV/cm) et une vitesse de rotation de (45 - 49 tr/mn).



a) Pour n = 46.5 tr/mn



a) Pour $E = 3.5 \text{ kV}$

Figure III-9 Tracés des contours iso-réponses du modèle (PVC total).

A partir du modèle mathématique obtenu, on peut aussi prédire l'influence de chaque facteur sur la réponse, en traçant la variation des réponses en fonction de ces facteurs choisis (figure III-10)

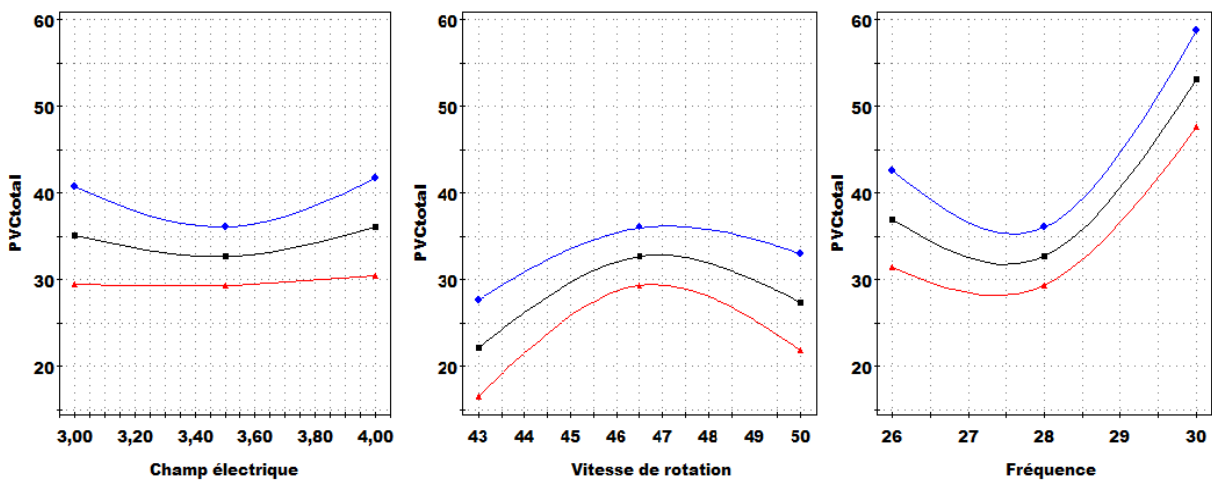


Figure III-10 : Courbes de prédiction du taux récupéré de la masse du PVC total :
 a) champ électrique b) Vitesse de rotation et c) Fréquence

Le programme dispose également d'une sub-routine d'optimisation qui donne les valeurs optimales des facteurs pour obtenir des récupérations maximales. Les valeurs optimales proposées sont :

$$E = 3.8 \text{ kV/cm}, n = 47.10 \text{ tr/min} \text{ et } f = 29,9 \text{ Hz}$$

$$\text{Pour les masses: } PVC_{\text{tot}} = 54.57 \text{ g } PVC_{\text{b}} = 25.20 \text{ g } \quad PVC_{\text{g}} = 29.37 \text{ g}$$

III-4 Etude de la charge acquise

Il est connu que la distribution de la charge des particules joue un rôle important sur le comportement de la séparation électrostatique. Donc il est important de comprendre l'interaction entre les particules micronisées et leur charge.

Le séparateur à électrodes plaques et muni d'un système de chargement à base de lit fluidisé qui est considéré parmi les meilleures méthodes de chargement des poudres. Cette partie du chapitre a pour but de mesurer et étudier l'acquisition de la charge des particules directement après la séparation par la variation de plusieurs paramètres.

III-4-1 Analyse de la charge triboélectrique acquise

La mesure de la charge électrostatique produite par les collisions entre les particules de PVC_{b} et PVC_{g} chargées tribo-électriquement par la méthode du lit fluidisé, a été mesurée par un électromètre et une cage de Faraday, durant les expériences, l'humidité varie de 40% à 50%.

L'ensemble des deux produits est mis à l'intérieur de la cage de Faraday l'un après l'autre tout juste après avoir été séparés et récupérés manuellement, puis on mesure séparément à l'aide d'un électromètre la charge Q ,

a- Influence de la configuration des électrodes

Les résultats obtenus concernent la mesure de la charge électrique, produite par les deux matériaux en fonction de la configuration des électrodes. Ces expériences ont été effectuées avec les paramètres constants suivants:

- Champ électrique $E=3,5 \text{ kV/cm}$;
- Distance inter-électrodes $d = 8\text{cm}$;
- Vitesse de rotation des disques $n = 47 \text{ tr/min}$;
- Fréquence du variateur $f = 28 \text{ Hz}$

Nous avons étudié trois configurations d'électrode possibles suivantes:

- Cas 1: électrode de polarité positive et l'autre reliée à la terre "P-T".
- Cas 2: électrode de polarité positive et l'autre de polarité négative "P-N".
- Cas 3: électrode de polarité négative et l'autre reliée à la terre "N-T".

Les résultats obtenus de la masse collectée et de la charge massique pour les trois types de configuration possibles sont représentés aux figures III-11 et III-12.

Après avoir choisi la meilleure configuration on a analysé le taux de récupération et la charge massique pour trois masses différentes (1200, 1600 et 2000 g).

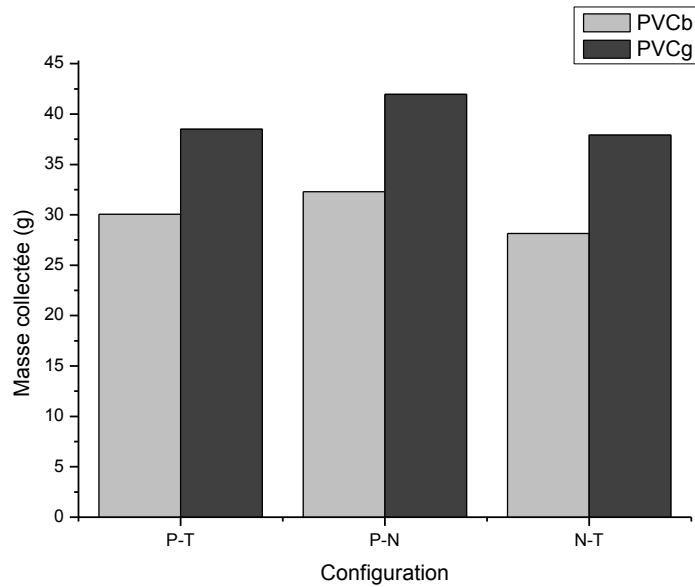


Figure III-11 : Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g pour les trois configurations.

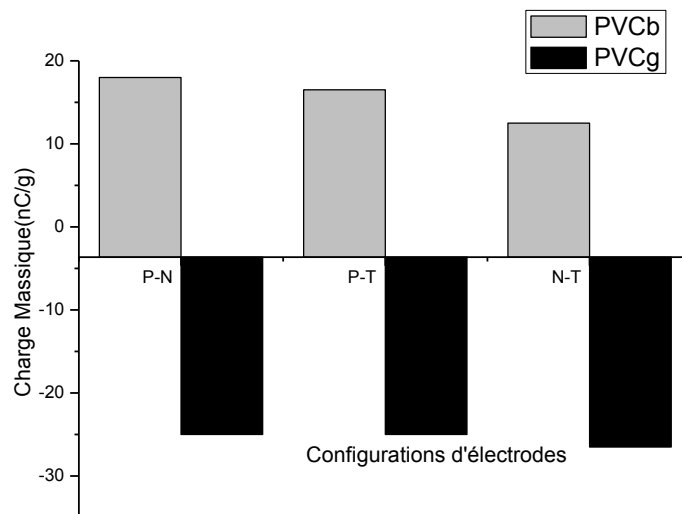


Figure III-12 : Variation de la charge massique PVC_b et PVC_g pour les trois configurations.

D'après les résultats obtenus, on remarque que le type de configuration influence légèrement sur l'efficacité de la charge massique et de la masse collectée.

A partir des histogrammes on obtient un meilleur rendement de récupération pour la configuration "positif-négative" et que chaque variation de type de tension provoque une variation de quantité de charge massique par les particules. On trouve une grande quantité de charge de PVC blanc positive (+20nC) pour une tension de type P-N, tandis qu'une grande quantité de charge de PVC gris négative (-28,27 nC) pour un type de tension P-N.

Pour toutes les expériences qui vont suivre, c'est la configuration « Positive-Négative » qui sera utilisée

b- Influence de la masse totale

Les expériences effectuées dans cette section concernent l'étude de l'influence de la masse totale du mélange introduit dans le lit fluidisé. Trois valeurs de m_{tot} ont été expérimentées : $m_{tot} = 1200, 1600$ et 2000 g. Après chaque expérience on mesure la valeur de la charge massique et la masse récupérée du PVC_b et PVC_g récupéré.

Les résultats obtenus de la masse collectée et de la charge massique pour trois valeurs différentes de la masse du lit fluidisé sont représentés aux figures III-13 et III-14.

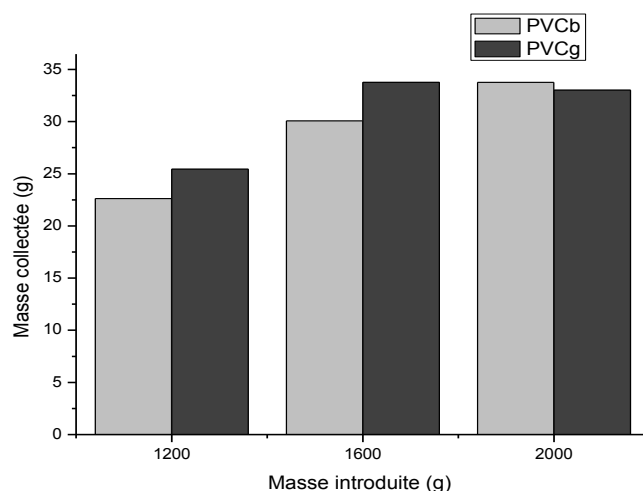


Figure III-13 : Variation de masse collectée de PVC_{blanc} et PVC_{gris} en fonction de la masse introduite.

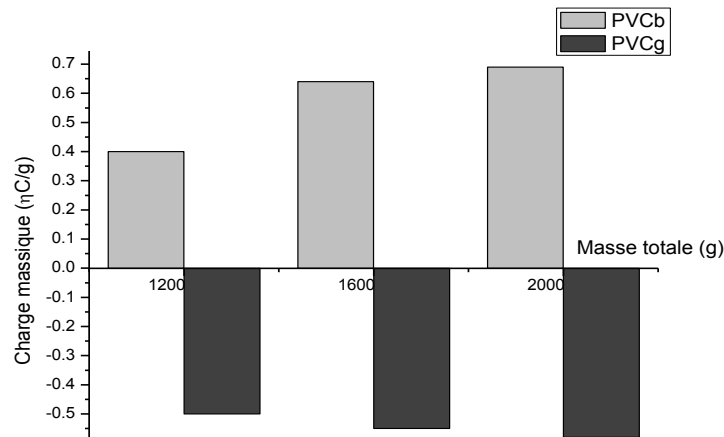


Figure III-14 : Variation de la charge massique de PVCb et PVCg en fonction de la masse introduite.

Dans les expériences de tribo-électrisation, comme l'acquisition de charge est le résultat des collisions entre particules, l'influence de la masse totale du produit à séparer a été analysée en effectuant des expériences similaires pour 3 masses m différentes (1200, 1600 et 2000 g). D'après ces résultats, il apparaît qu'il est recommandé d'utiliser une valeur minimale de la masse de produit total, dans notre cas $m_{\text{tot}} = 1600$ g. En effet, plus il y a de particules, meilleure est la charge triboélectrique acquise à cause du nombre plus élevé des collisions entre les particules. Ces résultats sont encore confirmés par les résultats de la charge électrique acquise en fonction de la masse, présentés à la figure III-14.

Nous remarquons qu'il y a une valeur de charge élevée pour $m_{\text{tot}} = 2000$ g et un bon rendement pour les deux valeurs massiques initiales 1600 g et 2000 g.

c- Influence du champ électrique

Les résultats obtenus concernant la mesure de la charge massique des deux matériaux PVC_b et PVC_g, en fonction du champ électrique qui varie de 1 à 4,5 kV/cm, sont illustrés par les figures III-15 - III-16. Ces expériences ont été effectuées avec les paramètres constants suivants:

- Masse initiale $m = 2000$ g;
- Distance inter électrodes $d = 8$ cm;
- Vitesse de rotation des disques $n = 47$ tr/min;
- Fréquence du variateur $f = 28$ Hz.

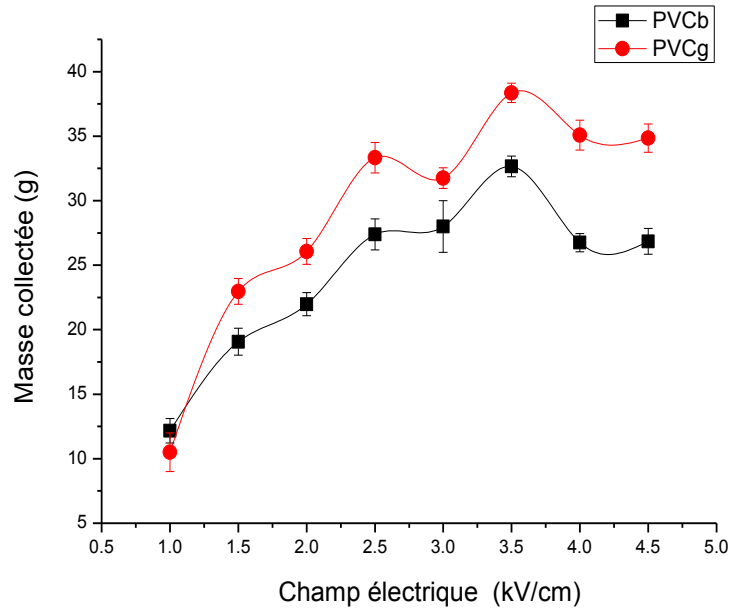


Figure III-15: Variation de la masse collectée en fonction du champ électrique.

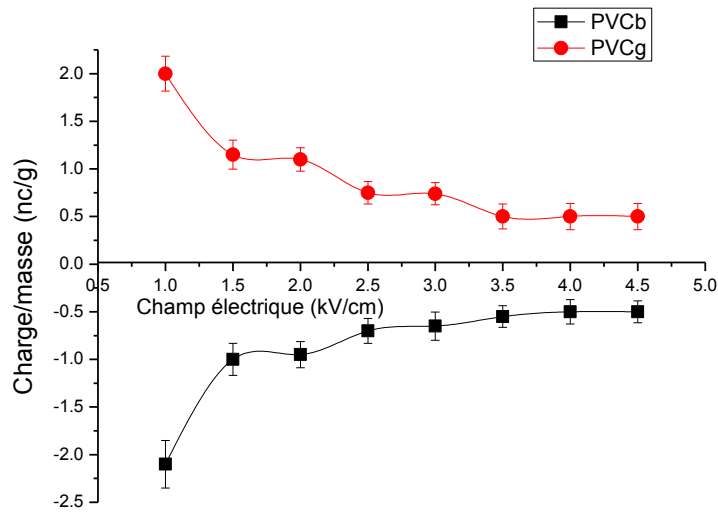


Figure III-16: Variation de la charge massique en fonction du champ électrique.

La masse de produit collecté augmente avec le champ électrique E jusqu'à 3,5 kV/cm grâce à la force d'image électrique qui facilite l'attachement des particules qui devient plus fort avec E , ensuite elle diminue. Ce renversement est dû au fait que lorsque l'une des électrodes est entièrement recouverte par la couche de l'un des deux produits, l'autre produit de charge opposée commence à son tour à s'attacher à cette électrode causant ainsi la diminution du rendement.

Comme on pouvait s'y attendre, le champ électrique n'a pas d'influence sur la valeur de la charge triboélectrique acquise, à l'exception pour les petites valeurs de E pour lesquelles la quantité collectée est fiable ce qui donne une valeur de charge massique élevée (Fig III-16).

d- Influence de la fréquence

L'influence du débit d'air injecté sur la charge massique et le taux de récupération a été analysée en faisant varier la fréquence du souffleur de 20 à 30 Hz. Les résultats obtenus sont illustrés par les figures III-17 et III-18, Les masses des échantillons des particules fines de PVC_b et, de PVC_g sont maintenues constantes (m=1000g pour chaque produit). Les autres paramètres maintenus constants sont les suivant:

- Champ électrique E=3,5kV/cm;
- Distance inter électrodes d=8cm;
- Vitesse de rotation V = 47 tr/min ;
- Masse totale du produit 2000g (50% PVC_b -50% PVC_g).

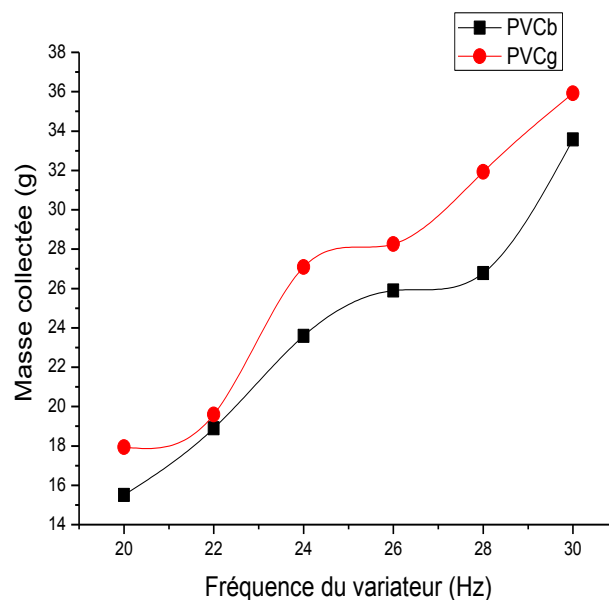


Figure III-17: Variation de la masse récupérée en fonction de la fréquence du variateur.

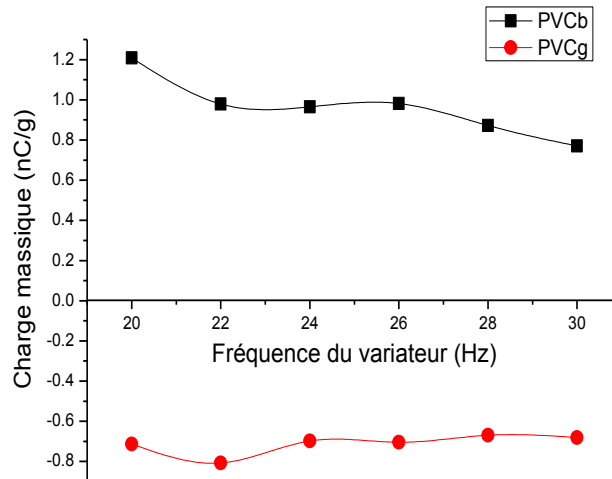


Figure III-18: Variation de la charge massique en fonction de la fréquence du variateur.

En analysant la variation de la masse collectée en fonction du débit d'air de fluidisation (Fig III-17), il apparaît à première vue que le rendement de la séparation augmente avec l'intensité de la fluidisation dû à l'accroissement de la charge triboélectrique. D'un autre côté en estimant la valeur de la charge en fonction de la fréquence f du variateur de vitesse qui commande le compresseur d'air, comme montré à la (fig III-18), nous avons remarqué qu'au contraire la charge se stabilise avec f pour le PVC_g et que même elle diminue pour le PVC_b. Cette augmentation de la masse collectée serait probablement due au fait qu'une plus grande quantité de produit est fluidisée grâce à l'augmentation de la fréquence.

e- Influence de la composition de la masse

Toutes les expériences effectuées par avant on était réalisé avec une composition de 50% PVC_b et 50% PVC_g.

Comme il est bien établi que la charge triboélectrique dépend beaucoup de la masse et de la composition du produit micronisé à séparer, un ensemble d'expériences a été réalisé pour deux valeurs de la masse totale du produit déposé sur le tamis du lit fluidisé ($m = 1200$ g et $m = 1600$ g), en fonction de la composition du mélange de particules (fig III-19, III-20). Les expériences ont été effectuées pour $E = 3,5$ kV / cm, $n = 47$ tr/min et $f = 28$ Hz. Les valeurs de composition PVC_b seulement sont présentées sur l'axe horizontal des graphes, par exemple «20%» signifie 20% de PVC_b et 80% des PVC_g.

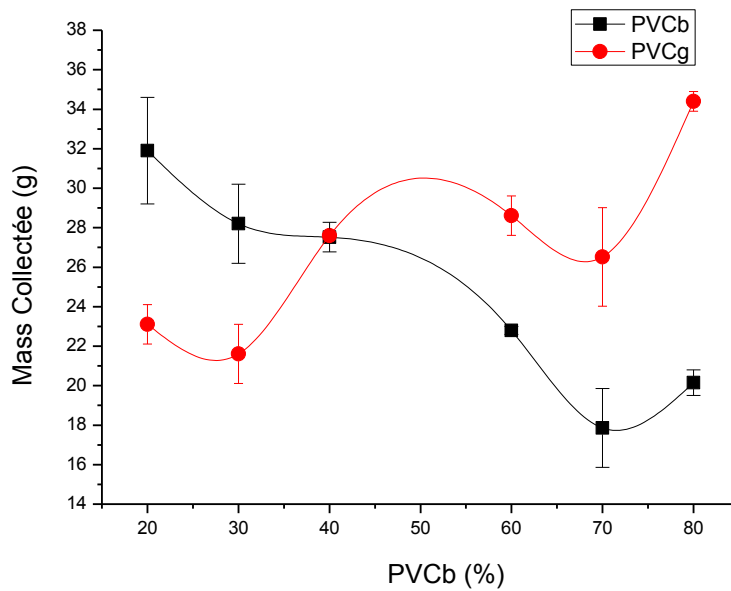


Figure III-19: Masse collectée du PVC_b et PVC_g en fonction de la composition de l'échantillon pour une masse totale M = 1200 g

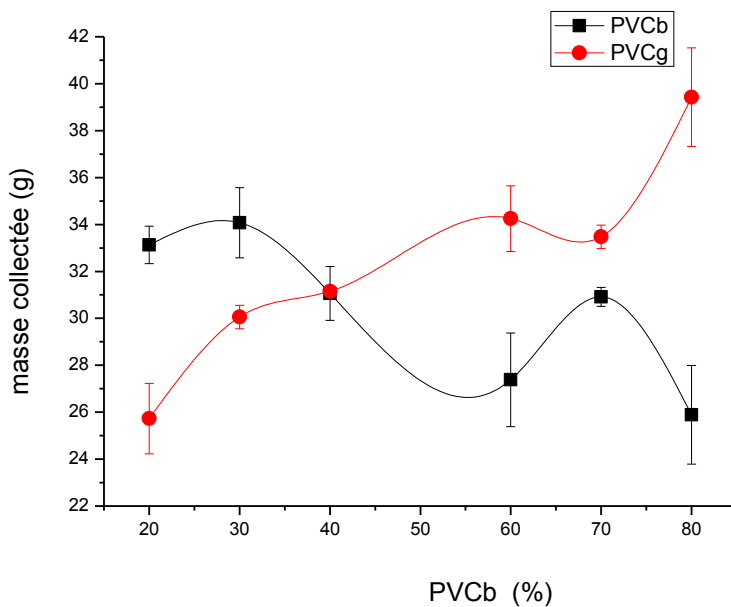


Figure III-20: Masse collectée du PVC_b et PVC_g en fonction de la composition de l'échantillon pour une masse totale M = 1600 g

Les résultats expérimentaux ont montré que le produit minoritaire est caractérisé par une plus grande charge électrique et un meilleur taux de récupération. Ceci est dû au fait que le produit minoritaire subit plus de collisions avec les particules du produit majoritaire.

En outre, nous avons remarqué que les valeurs les plus élevées de la pureté pour les deux types de PVC ont été obtenus avec une composition de 50% -50%.

Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude expérimentale paramétrique d'un nouveau dispositif de séparation tribo-électrostatique, à électrodes verticales et parallèles en mouvement de « va-et-vient » à l'intérieur d'un lit fluidisé de particules fines de PVC.

Un nouveau procédé de séparation tribo-électrostatique de particules fines est décrit et analysé dans le présent chapitre. La méthodologie des plans d'expériences est un outil puissant pour l'identification du point optimal d'un processus de ce procédé de séparation tribo-électrostatique.

Le dispositif est un processus multifactoriel, trois facteurs ont été analysés: le champ électrique, le taux de fluidisation et la vitesse de déplacement des électrodes. Parmi les paramètres étudiés, la fréquence du lit de fluidisation est le facteur le plus important. Cependant, les valeurs les plus élevées de la vitesse des électrodes doivent être testées pour valider la possibilité d'augmenter les quantités de matières traitées dans une unité de temps donnée.

Les résultats obtenus sont prometteurs, et ont montré que plusieurs facteurs peuvent avoir une influence sur le rendement de la séparation. Le modèle présente néanmoins l'inconvénient d'imaginer un système de récupération des particules après séparation. Pour cette raison un autre dispositif similaire mais à mouvement horizontal va permettre de surmonter cette contrainte. Cette étude fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV : ETUDE EXPÉRIMENTALE PARAMÉTRIQUE DU SÉPARATEUR EN MOUVEMENT HORIZONTAL « VA-ET-VIENT »

Introduction

Le présent chapitre présente, l'étude expérimentale paramétrique du séparateur électrostatique à deux électrodes en mouvement horizontal. Le nouveau séparateur à deux électrodes plaques a été modifié du mouvement vertical en mouvement horizontal pour deux raisons:

- ✓ éliminer le renversement du produit collecté par les plaques dans le lit fluidisé à nouveau et perdre une quantité de masse séparée par l'influence de la force de pesanteur, parce que les plaques se situent directement au-dessus de la chambre de chargement.
- ✓ avoir la possibilité d'ajouter d'autres plaques de récupération s'il est nécessaire afin d'augmenter le taux de recouvrement et d'essayer de développer le processus de séparation par un système de récupération continue.

Pour cela il est nécessaire d'étudier à nouveau tous les expériences qui ont pour but de connaître l'influence des différents paramètres comme : la tension, la masse, le débit et l'intensité de champ électrique ...etc. permettant de déterminer les valeurs optimales pour une meilleure séparation, c'est-à-dire un taux de récupération maximale, ainsi qu'un bon rendement et une bonne pureté.

Ce dispositif offre le réglage des paramètres afin de permettre l'étude de l'influence de chacun d'eux à part sur le rendement de la séparation.

Une étude de la charge acquise par les particules est aussi nécessaire, tandis que la problématique dans les dispositifs de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique est de savoir à partir de quelle charge les mélanges granulaires peuvent être séparés. Trop chargés implique une surconsommation d'énergie ainsi qu'une diminution de la qualité de séparation c'est-à-dire la pureté surtout si ça concerne des matériaux micronisés, et moins chargés entraîne une mauvaise électro-séparation.

IV-1 Etude expérimentale

IV-1-1 Analyse de l'efficacité de séparation

Pour améliorer le taux de recouvrement, la pureté et trouver les valeurs optimales de chaque paramètre de ce séparateur, il faut passer par plusieurs expériences en variant tous les paramètres qui influent sur la séparation qui sont : la masse initiale, le champ électrique, la fréquence du variateur et la vitesse.

Chaque paramètre dans le processus de séparation a été varié et analysé séparément, c'est-à-dire à chaque fois on fait une série d'expériences en variant un seul paramètre et on fixe tous les autres.

IV-1-2 Expériences préliminaires

Des expériences préliminaires sont nécessaires pour la détermination et l'établissement des limites de variation des facteurs qui donnent les meilleurs résultats désirés par le dispositif.

a- Choix de la configuration d'électrodes

Le travail expérimental a débuté par la détermination de la configuration optimale du système d'électrodes. Des expériences ont été effectuées dans les trois cas en prenant le soin de garder par ailleurs les mêmes conditions expérimentales. Ces expériences ont été effectuées avec les paramètres constants suivants:

- Champ électrique $E=3,5$ kV/cm;
- Distance inter électrodes $d = 12$ cm;
- Vitesse de rotation des disques $n = 50$ tr/min;
- Fréquence du variateur $f = 28$ Hz

Nous avons étudié trois configurations possibles, comme suit:

- Cas 1: électrode de polarité positive et l'autre reliée à la terre "P-T".
- Cas 2: électrode de polarité positive et l'autre de polarité négative "P-N".
- Cas 3: électrode de polarité négative et l'autre reliée à la terre "N-T".

Les résultats obtenus de la masse collectée pour les trois types de configuration sont représentés à la figure IV-1.

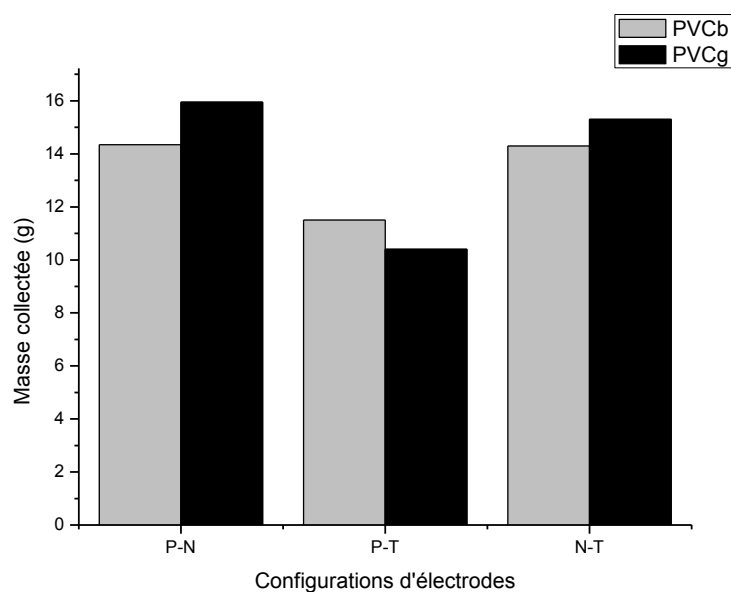


Figure IV-1 : Masse collectée de produit séparé pour les 3 configurations d'électrodes
 P-T : « positive-terre »; P-N: « positive-négative » ;
 N-T : « négative-terre »

On remarque que le type de configuration influe légèrement sur l'efficacité de la masse collectée. Néanmoins, à partir des histogrammes on obtient un meilleur rendement de récupération pour la configuration « électrode positive – électrode négative ».

Pour toutes les expériences suivantes, c'est la configuration « Positive-Négative » qui sera appliquée.

b- Influence de la masse totale

Dans cette section toutes les expériences ont été réalisées avec un pourcentage de la masse initiale de 50% pour le PVC blanc et 50% pour le PVC gris.

Comme il est bien établi que la charge triboélectrique dépend beaucoup de la masse et la composition du produit micronisé à séparer, un ensemble d'expériences a été réalisé pour deux valeurs de la masse totale du produit déposé sur le tamis du lit fluidisé ($m = 1200$ g et $m = 1600$ g), et plusieurs valeurs du pourcentage de la composition ont été effectuées pour $E = 3,5$ kV/cm, $n = 47$ tr/min et $f = 28$ Hz. Par exemple «20% B» signifie 20% de PVC_b et 80% des PVC_g, la composition en pourcentage de PVC_b seulement est présentée sur l'axe horizontal.

Les résultats obtenus sont montrées dans les figures IV-2, IV-3.

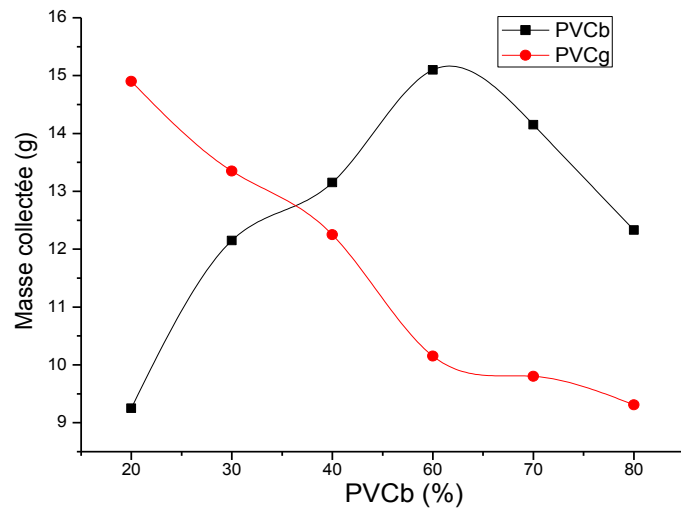


Figure IV-2 : Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g en fonction du pourcentage de la masse totale ($m_{tot} = 1200g$).

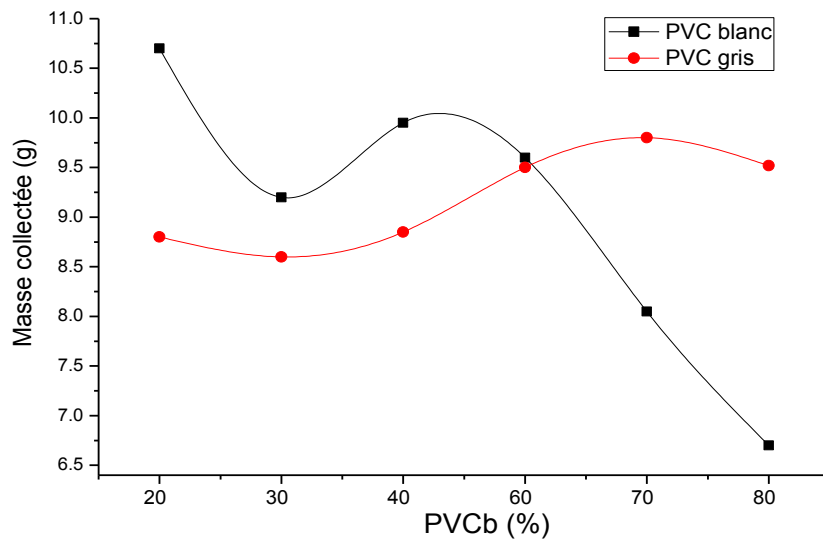


Figure IV-3 : Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g en fonction du pourcentage de la masse totale ($m_{tot} = 1600g$).

Les résultats obtenus montrent que, comme attendu, la masse collectée du produit prédominant est la plus grande. Cependant, en termes de pureté, on a remarqué que le produit minoritaire est récupéré avec une meilleure pureté, en raison du fait que les particules du produit minoritaire subissent plus de collisions avec les particules du produit majoritaire. En

outre, nous avons remarqué que les valeurs les plus élevées de la pureté pour les deux types de PVC ont été obtenues avec une composition de 50% -50%.

c- Influence de champ électrique

Le séparateur offre la possibilité de varier le champ électrique de 1 à 4,5 kV/cm avec le maintien de la distance inter-électrodes constante, qui correspond à une variation de la différence de potentiel entre les plaques,

Une série d'expériences pour plusieurs valeurs du champ électrique a été effectuée. Pour chaque expérience, on a fait varier la tension appliquée aux bornes des deux électrodes entre 4 kV et 54 kV, tandis que les autres paramètres ont été maintenus constants, comme suit:

- Distance $d = 12$ cm,
- Fréquence $f = 28$ Hz,
- Masse du mélange de PVC $m = 2000$ g,
- Vitesse $n = 50$ tr/min.

Les résultats obtenus concernant la mesure de la masse de PVC_b et PVC_g récupérée par les électrodes en fonction du champ électrique sont présentés dans la figure IV-4.

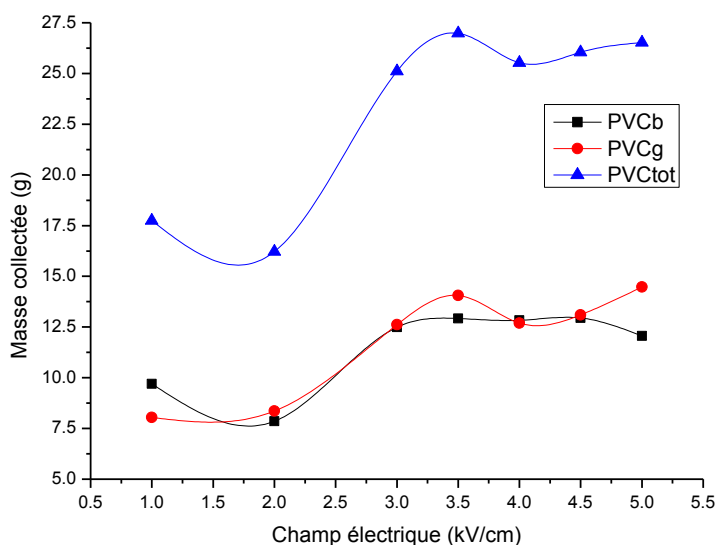


Figure IV-4 : Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g en fonction du champ électrique.

On observe que la récupération de PVC varie en fonction du champ électrique, à chaque fois que le champ croît la récupération augmente. Nous obtenons un meilleur rendement de séparation dans ces expériences correspondant à une valeur de 25 g pour un champ de 3,5 kV/cm. Si on dépasse cette valeur de champ, malgré que la masse ne croît pas, cela provoque par contre la diminution de la pureté de séparation, Par conséquent, le domaine de variation du champ électrique a été défini comme $E_{min} = 3$ kV/cm et $E_{max} = 4$ kV/cm avec une distance fixée à $d = 12$ cm. pour les expériences qui suivent.

d- Influence de la vitesse de rotation sur la récupération

Les électrodes sont mises en mouvement par un moteur triphasé de puissance 0.37 kW relié à un réducteur qui permet de varier la vitesse de 42 à 50 tr/min, qui met en mouvement le système « bielle-manivelle ». Ce dernier immergeant ainsi les électrodes à l'intérieur du lit fluidisé. Chaque vitesse correspond à une tension aux bornes du moteur. Les résultats de la variation de la vitesse de rotation n comprise entre 42 tr/min et 50 tr/min, pour un champ électrique $E = 3.5$ kV/cm, fréquence $f = 28$ Hz, masse $m = 2000$ g et une distance inter électrodes $d = 12$ cm (Fig IV-5).

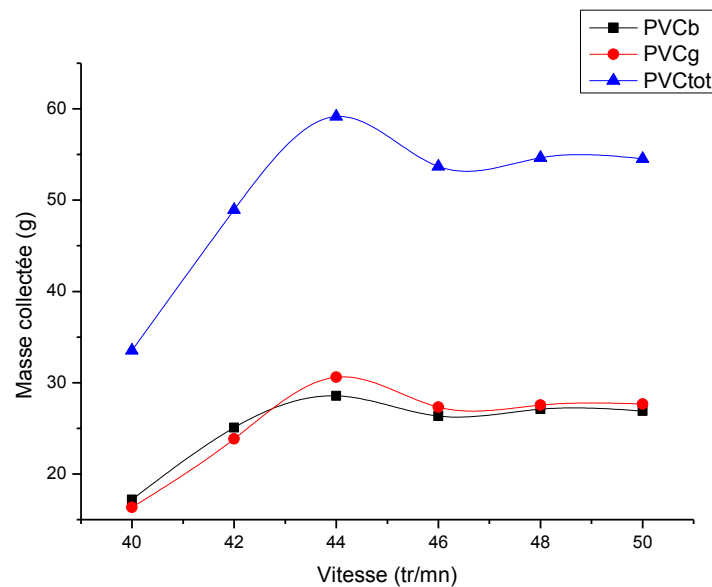


Figure IV-5: Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g en fonction de la vitesse.

La vitesse de déplacement des électrodes dépend de la vitesse du «système bielle-manivelle" entraînée par un moteur électrique à courant alternatif. Cette dernière étant munie d'un réducteur, la vitesse de rotation n se situe dans une plage comprise entre 42 et 50 tr / min. Les résultats représentés sur la figure IV-5 montrent que, lorsque la vitesse de rotation augmente le temps de séjour des électrodes diminuent dans le lit fluidisé, ainsi la masse récupérée des particules de PVC diminue avec l'augmentation de la vitesse. Par conséquent, les valeurs limites de la vitesse de rotation sont $n_{min} = 42$ tr/min et $n_{max} = 50$ tr/min.

e- influence de débit d'air injecté

Le débit d'air (c'est-à-dire la vitesse de l'air qui crée le mouvement des particules) est un des paramètres dont le contrôle est important pour l'optimisation du processus. Ceci dans le but d'assurer les meilleures conditions de chargement électrique des granules par le lit fluidisé, afin de permettre à toutes les particules isolantes d'acquérir une charge électrique suffisante leur permettant d'adhérer à la surface des électrodes de signe opposé.

Le débit d'air est contrôlé par l'augmentation ou la diminution de la vitesse du souffleur grâce à l'utilisation d'un variateur électronique de vitesse par la variation de la fréquence.

La figure IV-6 montre l'influence de la fréquence sur la récupération de la masse des particules fines, en variant la fréquence f entre 18 Hz à 30 Hz. Les paramètres constants sont:

- Champ électrique $E = 3.5$ kV/cm.
- Vitesse $n = 47$ tr / min.
- Masse $m = 2000$ g.
- Distance inter électrodes $d = 12$ cm.

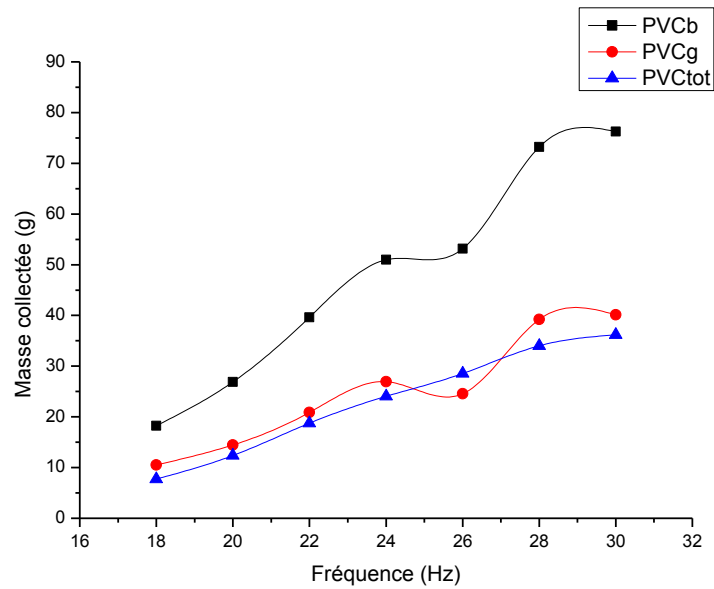


Figure IV-6: Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g en fonction de la fréquence.

La fréquence de la tension du souffleur est l'un des paramètres importants qui influent sur le processus de séparation de façon directe, il influe sur la charge acquise des particules produite par collision et le frottement de ces derniers. La variation de la masse collectée en fonction du taux de fluidisation, représenté sur la Fig IV-6, souligne que lorsque f augmente les particules acquièrent une charge triboélectrique plus élevée et donc permet d'améliorer l'efficacité de la séparation. L'augmentation de la masse collectée est probablement due au fait qu'une fluidisation plus intense, en raison d'une fréquence plus élevée du moteur d'entraînement du ventilateur, accélère la vitesse d'acquisition de la charge et donc les particules sont attirées par les électrodes plus rapidement. Par conséquent, les valeurs limites de la fréquence sont $f_{min} = 22$ Hz et $f_{max} = 28$ Hz.

IV-2 Etude de la charge acquise

Il est connu que la distribution de charge des particules joue un rôle important sur le comportement de la séparation électrostatique. Donc il est nécessaire et très important de la compréhension de l'interaction entre les particules micronisées et leur charge.

Le séparateur à électrodes plaques horizontales est muni d'un système de chargement à base du lit fluidisé considéré parmi les meilleures méthodes de chargement des poudres.

Cette partie du chapitre a pour but de mesurer et d'étudier l'acquisition de charge des particules du PVC gris et PVC blanc directement après la séparation par la variation de plusieurs paramètres.

IV-3 Méthode de mesure de la charge électrique

La mesure de la charge électrostatique produite par les collisions entre les particules de PVC blanc et PVC gris chargées triboélectriquement par la méthode du lit fluidisé, a été effectuée par un électromètre et une cage de Faraday, avec une humidité variant de 40% à 50%.

Les deux produits sont mis à l'intérieur de la cage de Faraday l'un après l'autre tous juste après les avoir séparé et récupéré manuellement, puis on mesure à l'aide d'un électromètre la charge électrique.

a- Influence de la configuration des électrodes

Les résultats obtenus concernant la mesure de la charge électrique, acquise par les deux matériaux PVC_b et PVC_g, en fonction de la configuration des électrodes ont été obtenus avec des paramètres constants suivants:

- Champ électrique $E = 3,5$ kV/cm;
- Distance inter électrodes $d = 12$ cm;
- Vitesse $n = 47$ tr/min;
- Fréquence $f = 28$ Hz

Nous avons étudié les trois configurations précédentes, à savoir :

- Cas 1: électrode de polarité positive et l'autre reliée à la terre "P-T".
- Cas 2: électrode de polarité positive et l'autre de polarité négative "P-N".
- Cas 3: électrode de polarité négative et l'autre reliée à la terre "N-T".

Les résultats obtenus de la masse collectée et de la charge massique pour trois les types de configuration possible sont représentés aux figures IV-7 IV-8.

Après avoir choisi la meilleure configuration, on a mesuré le taux de récupération et la charge massique pour trois masses différentes (1200, 1600 et 2000 g).

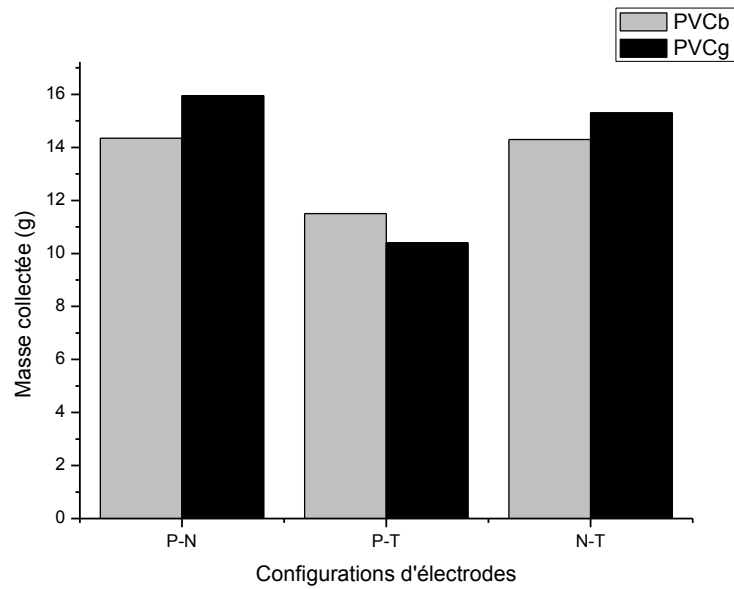


Figure IV-7: Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g en fonction de la configuration des électrodes.

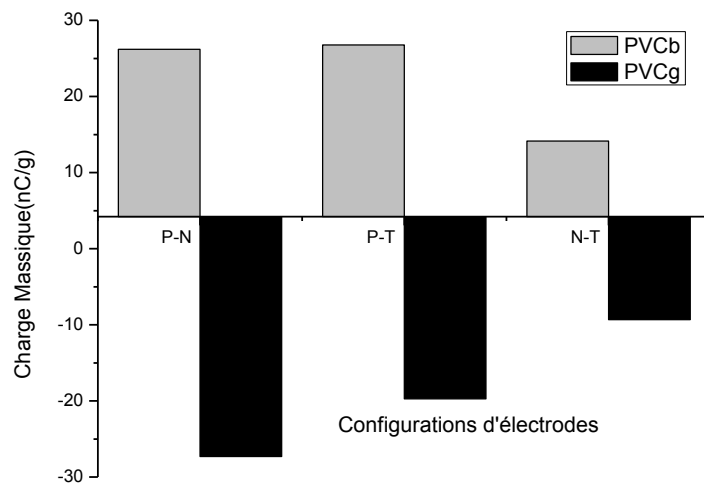


Figure IV-8: Variation de la charge massique de PVC_b et PVC_g en fonction de la configuration des électrodes

D'après les résultats obtenus, on remarque que la masse totale et le type de configuration influent légèrement sur l'efficacité de la charge massique et de la masse collectée.

A partir des histogrammes, le meilleur rendement de récupération est obtenu avec la configuration "positive-négative" et que chaque variation de type de tension provoque une

variation de la quantité de charge massique acquise par les particules. On trouve ainsi une grande quantité de charge pour PVC blanc positive (+20nC) pour une configuration de type P-N, tandis qu'une grande quantité de charge de PVC gris négative (-28nC) pour une configuration P-N.

Pour toutes les expériences qui vont suivre, c'est la configuration « Positive-Négative » qui sera utilisé.

b- Influence de la masse totale

Les expériences sont faites avec une variation de trois quantités différentes de la masse initiale 1200 g, 1600 g, 2000 g. Après chaque expérience on mesure la valeur de la charge massique et la masse collectée du PVC_b et PVC_g.

Les résultats obtenus de la masse collectée et de la charge massique pour trois valeurs différentes de la masse du lit fluidisé sont représentés aux figures IV-9 et IV-10.

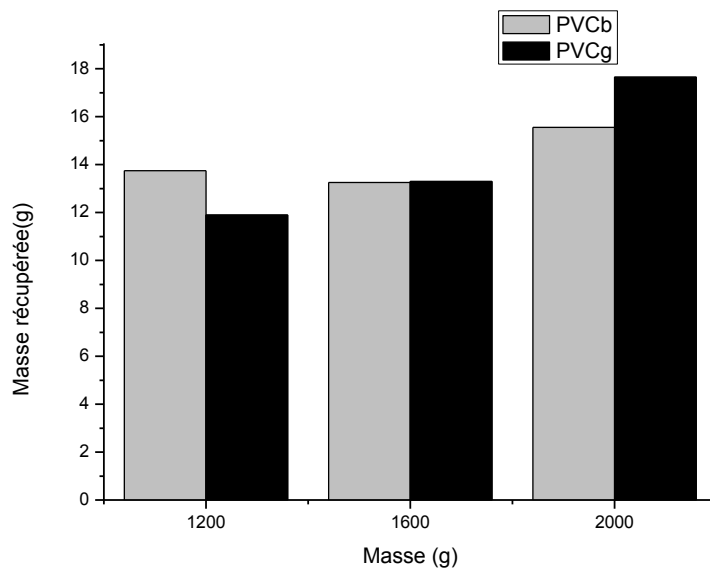


Figure IV-9: Variation de la masse collectée de PVC_b et PVC_g pour trois valeurs.

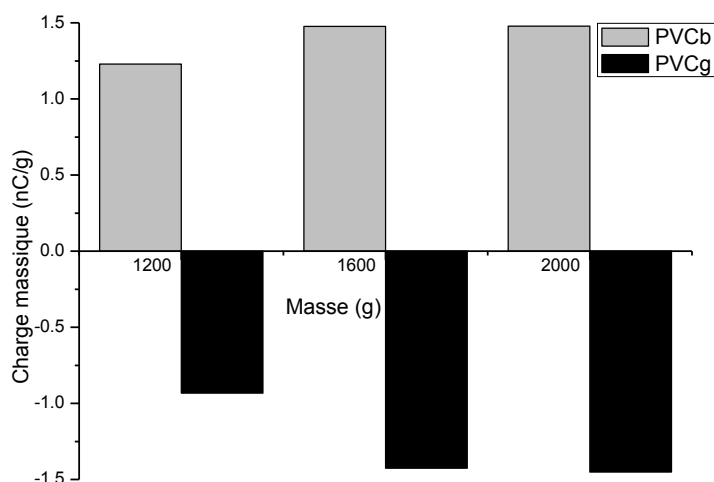


Figure IV-10: Variation de la charge massique de PVC_b et PVC_g pour trois valeurs.

Dans les expériences de tribo-électrisation, comme l'acquisition de charge est le résultat des collisions entre particules, l'influence de la masse totale du produit à séparer a été analysée en effectuant des expériences similaires pour 3 masses m différentes (1200, 1600 et 2000 g) (FigIV-9). D'après ces résultats, il apparaît qu'il est recommandé d'utiliser une valeur minimale de la masse de produit total, dans notre cas qui est de 1600 g. En effet, plus il y a de particules plus la charge triboélectrique est meilleure à cause du nombre plus élevé des collisions entre les particules. Ces résultats sont encore confirmés par la charge électrique acquise en fonction de la masse, présentés à la figure IV-10.

Nous remarquons qu'il y a la même valeur de charge à une masse de 2000g et 1600g et un bon rendement pour les deux valeurs massiques initiales 1600 g et 2000 g.

c- Influence du champ électrique

Les résultats obtenus concernant la mesure de la charge massique, acquise par les deux matériaux PVC_b et PVC_g, en fonction du champ électrique qui varie de 1- 4,5 kV/cm, sont illustrés par les figures IV-11 IV-12. Ces expériences ont été effectuées avec les paramètres constants suivants:

- Masse initiale $m = 2000\text{g}$;
- Distance inter électrodes $d = 12\text{ cm}$;
- Vitesse $n = 47\text{ tr/min}$;
- Fréquence $f = 28\text{ Hz}$.

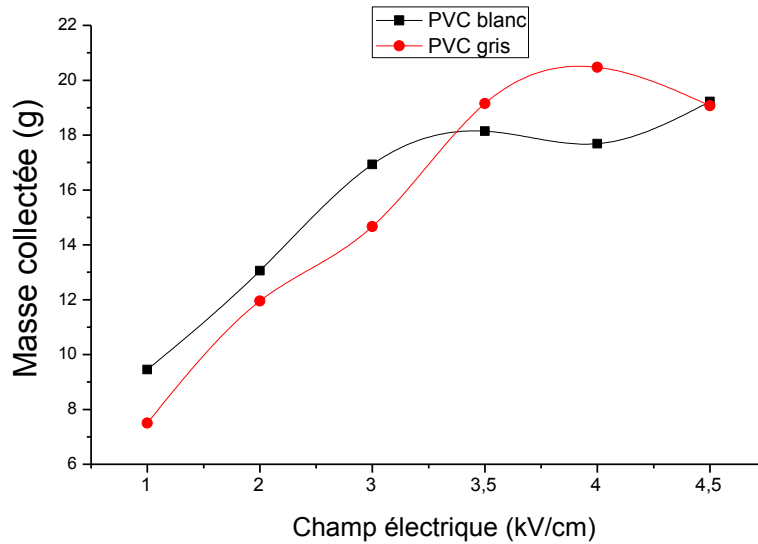


Figure IV-11: Variation de la masse collectée $m = 2000\text{g}$ en fonction du champ électrique.

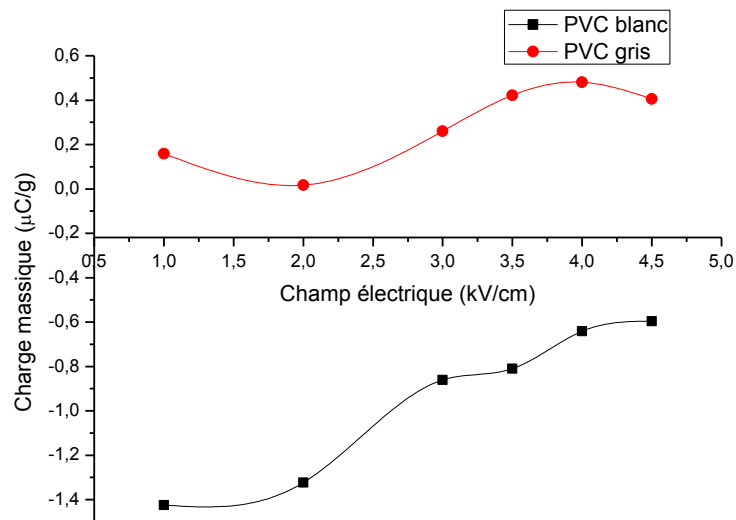


Figure IV-12: Variation de la charge massique en fonction du champ électrique.

La masse de produit collectée augmente avec le champ électrique E jusqu'à $3,5\text{ kV/cm}$ grâce à la force d'image électrique qui permet l'attachement des particules qui croît avec E ,

ensuite elle diminue. Ce renversement est dû au fait que lorsque l'une des électrodes est entièrement recouverte par une couche de l'un des deux produits, l'autre produit de charge opposée commence à son tour à s'attacher à cette électrode causant ainsi la diminution du rendement.

Comme on pouvait s'y attendre, le champ électrique n'a pas d'influence sur la valeur de la charge triboélectrique acquise, à l'exception des petites valeurs de E pour lesquelles la quantité collectée est faible ce qui donne une valeur de charge massique élevée (Fig IV-12).

d- Influence de la fréquence

L'influence de la fréquence sur la charge massique et la masse collectée a été analysée en faisant varier la fréquence du souffleur de 20 à 30 Hz. Les résultats obtenus sont illustrés par les figures IV-13 et IV-14. Les masses des échantillons des particules micronisées de PVC_b et, PVC_g sont maintenues constantes ($m= 1000g$ pour chaque produit). Les autres paramètres maintenus constants sont les suivant:

- Champ électrique $E = 3,5$ kV/cm;
- Distance inter électrodes $d = 12$ cm;
- Vitesse $V = 47$ tr/min ;
- Configuration « Positive-Négative » P-N ;
- Masse totale du produit 2000g (50% PVC_b-50% PVC_g).

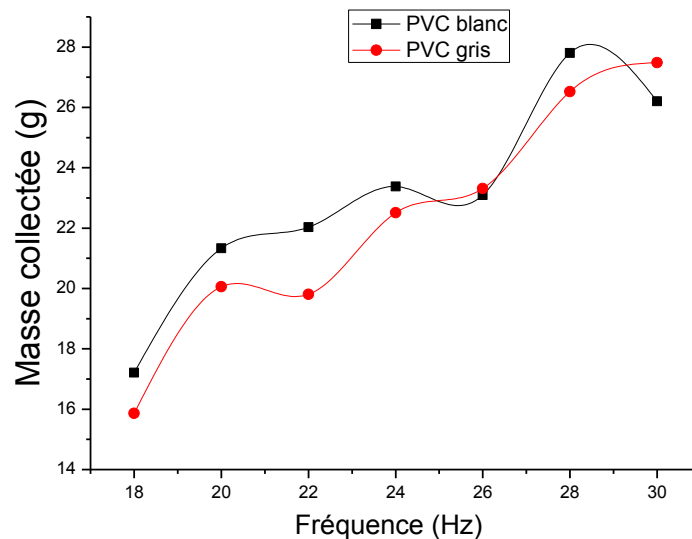


Figure IV-13: Variation de la masse récupérée en fonction de la fréquence du variateur.

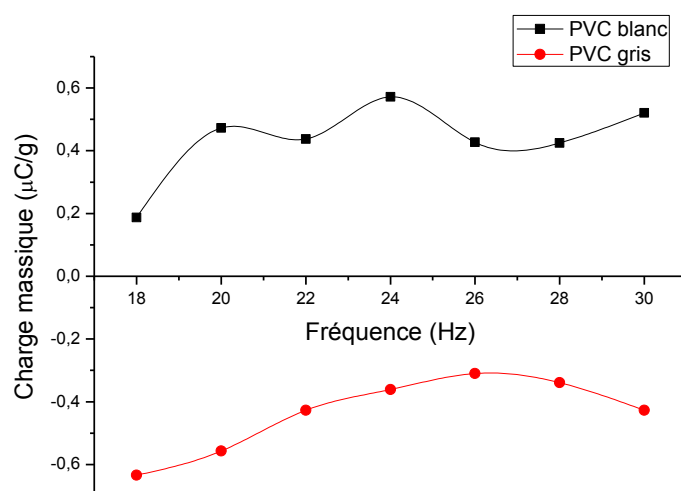


Figure IV-14: Variation de la charge massique en fonction de la fréquence du variateur.

En analysant la variation de la masse collectée en fonction du débit d'air de fluidisation (Fig IV-13), il apparaît à première vue que le rendement de la séparation augmente avec l'intensité de la fluidisation dû à l'accroissement de la charge triboélectrique. D'un autre côté en estimant la valeur de la charge en fonction de la fréquence f du variateur de vitesse qui commande le compresseur d'air, comme montré à la (Fig IV-14), nous avons remarqué qu'au contraire la charge se stabilise avec f pour le PVC_g et que même elle diminue pour le PVC_b. Cette augmentation de la masse collectée serait probablement due au fait qu'une plus grande quantité de produit est fluidisée.

IV-4 Etude expérimentale et comparaison entre deux processus de chargement des particules isolantes

Le résultat de tout processus de séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité du chargement des particules. L'objectif de cette partie est de mesurer la charge de particules et connaître les effets des différents facteurs influençant l'efficacité du processus de chargement en lit fluidisé. C'est pour cela que l'étude de la charge est nécessaire pour les granules ou les particules fines.

Le cas des poudres est particulièrement important. La charge totale portée par une particule est proportionnelle à sa surface et par conséquent, la charge massique q/m d'un échantillon de poudre augmente lorsque la granulométrie de la poudre diminue. On constate

expérimentalement que la charge produite au cours des processus industriels est essentiellement liée à la taille des particules et au type de traitement effectué.

Les expériences de charge triboélectrique ont été effectuées sur des mélanges binaires de particules fines en plastique de PVC. Notons que le PVC blanc acquiert une charge positive et le PVC gris une charge négative.

IV-4-1 Dispositifs de chargement tribo-électrique à lit fluidisé

Deux dispositifs de chargement tribo-électrique à lit fluidisé sont utilisés pour mieux comprendre le processus de charge. Un lit fluidisé est un ensemble d'éléments qui nous permet d'effectuer des expériences de chargement des particules isolantes avec une certaine aisance. Le dispositif de chargement comprend (Fig IV-15):

- Une chambre de tribo-électrification avec parois conductrice en aluminium et une autre transparente isolante en plexiglas qui a pour rôle :
 - ✓ Permettre l'étude visuelle du processus de chargement et observer le mouvement des particules dans le dispositif.
 - ✓ Bien contrôler le débit d'air injecté par le souffleur.
- Un tamis isolant faisant office de support des produits à séparer.
- Un répartiteur d'air injecté : c'est dans cette partie où le début du processus du lit fluidisé y est créé donnant la position longitudinale de ce dernier.
- Un souffleur à débit réglable par un variateur de fréquence, permet de réaliser une multitude d'expériences en modifiant les régimes de lit fluidisé.

Les deux dispositifs à différentes parois utilisées pour la comparaison, de dimensions 10 x 11x 23,5 cm, sont représentés dans la figure IV-15. Les dessins au-dessous le même système utilisé dans le séparateur à une échelle réduite. Il permet l'étude des phénomènes de fluidisation et de tribo-électrisation des matériaux plastiques et poudre, ayant les parois transparentes en plexiglas pour l'étude visuelle du processus de fluidisation et le mouvement des particules dans la chambre de tribo-électrisation.

Le second dispositif de chargement triboélectrique à air comprimé (figure IV-16), dont les parois sont en Aluminium, a pour but l'étude des phénomènes de tribo-électrisation des particules et voir l'influence des parois en les comparant avec le premier dispositif.

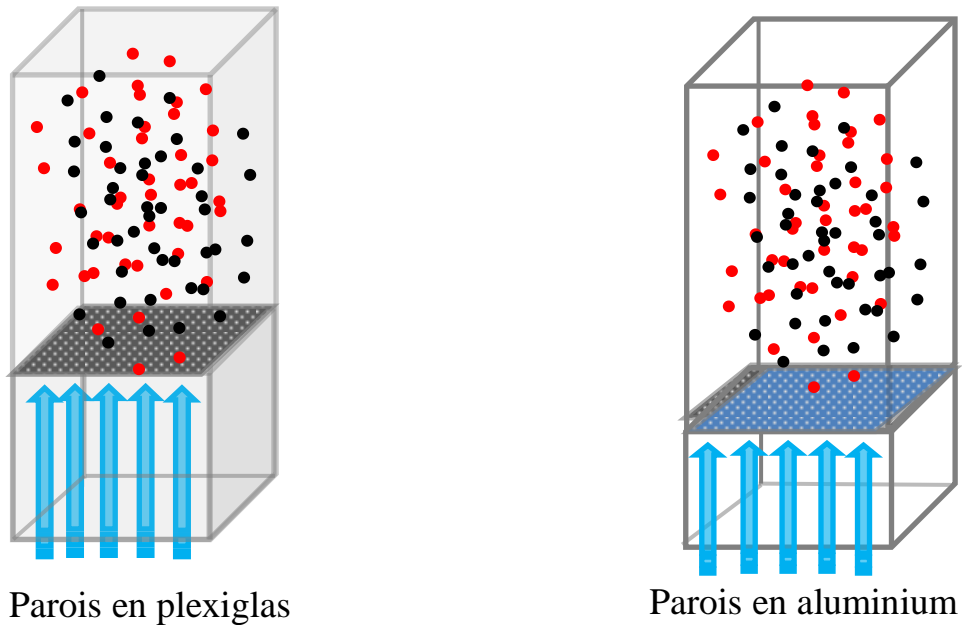


Figure IV-15: Dispositifs de chargement utilisés pour la comparaison

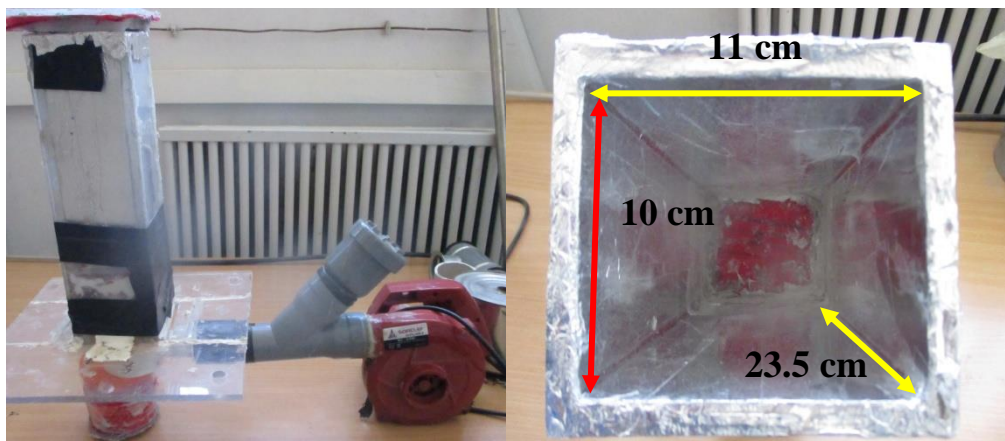


Figure IV-16: Dispositif de chargement avec parois en Aluminium

IV-5 Procédure expérimentale

IV-5-1 Préparation des échantillons

Les mélanges composés de poudre sont préparés avant chaque expérience. Chaque mélange comprend deux matériaux de PVC blanc et PVC gris, il s'agit d'échantillons de masse totale de 50 grammes.

IV-5-2 Déroulement des expériences

Les masses des deux produits sont mesurées par une balance électronique. Après avoir introduit le mélange de produit dans le dispositif de chargement, il est mis sous l'action de l'air dans un lit fluidisé. Cet air est propulsé à une vitesse variable par une soufflante située

à la base de la chambre de chargement. Les particules sont fluidisées pendant différents durés temps, à des intervalles déterminés pour que l'effet triboélectrique lié aux collisions particule-particule se manifeste.

Après chargement des particules par l'un des dispositifs, la charge est déterminée en versant le produit dans une cage de Faraday, reliée à un instrument de mesure (capteur de charge) (PASCO). Ce dernier est relié à un ordinateur PC pour donner directement le signe et la valeur de la charge acquise par le mélange. Notons que le PVC blanc acquiert une charge positive et le PVC gris une charge négative.

IV-6 Etude des paramètres de contrôle

La grande difficulté de réglage et de contrôle d'un processus de charge réside dans le fait, qu'il existe plusieurs facteurs à contrôler. Il est donc important de formuler l'ensemble des paramètres influents sur le chargement des particules avant et après séparation. En effet le processus va dépendre de nombreux paramètres tels que: le débit de fluidisation, le temps de chargement, la masse du produit, etc...

IV-6-1 Influence du temps de chargement sur la charge acquise

L'efficacité de la charge dépend considérablement du temps de chargement des particules traitées. On contrôle la durée par un chronomètre durant le processus de charge.

Nous avons étudié l'influence du temps de chargement du produit en le faisant varier de 0 seconde à 50 secondes tableau IV-1, pour :

- Masse initiale totale de 50 g dont la composition est de (50% PVCb, 50% PVCg);
- Une tension d'alimentation du souffleur $V = 70V$.

Durée (s)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Charge nc/g	-11,02	-13,29	-16,56	-18,2	-19,15	-19,16	-19,51	-19,1	-18,95

Tableau IV-1: Charge des particules en fonction de temps.

Les résultats obtenus sont représentés dans la Figure IV-17.

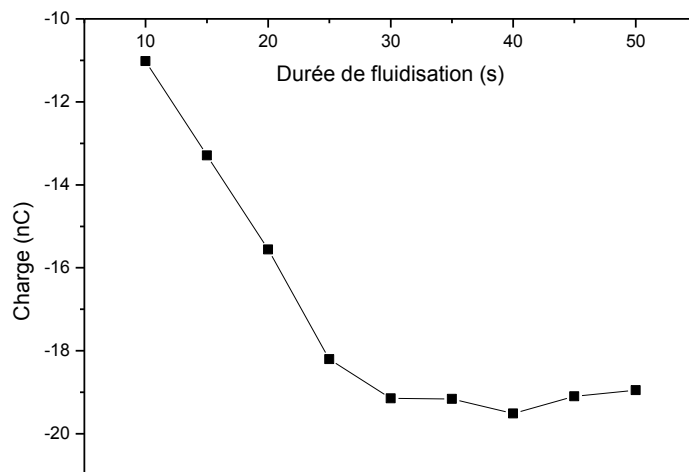


Figure IV-17: Représentation graphique de la variation de la charge en fonction de la durée de fluidisation.

On remarque que la durée n'a pas une grande influence sur le chargement, la grande charge est atteinte pour le mélange de deux particules dans l'intervalle de 20 à 30s.

Notons que les particules PVC blanc se chargent positivement et les particules PVC gris se chargent négativement. Suite à ces résultats, on fixe la durée de fluidisation entre 20s et 30s pour la suite des expériences.

IV-6-2 Influence du débit sur la charge acquise

L'influence du débit de lit fluidisé sur la charge acquise a été étudiée expérimentalement en utilisant 50g des échantillons de PVC. Pour voir l'influence du débit d'air injecté, on fait varier la tension d'alimentation du souffleur via un générateur réglable, et par conséquent le débit varie. Les résultats obtenus concernant la mesure de la charge acquise du produit en fonction de la tension d'alimentation sont représentés dans le (tableau IV-2), et illustrés par la (figure IV-18) pour :

- Masse totale de 50 g (50% PVC_b, 50% PVC_g);
- durée est fixé à 20 s.

Débit (tension V)	30	35	40	45	50	60	65	70
Charge nc/g	-8,1	-7,6	-8,1	-8,2	-7,8	-7,9	-8,4	-8,6

Tableau IV-2: Charge du mélange en fonction de débit.

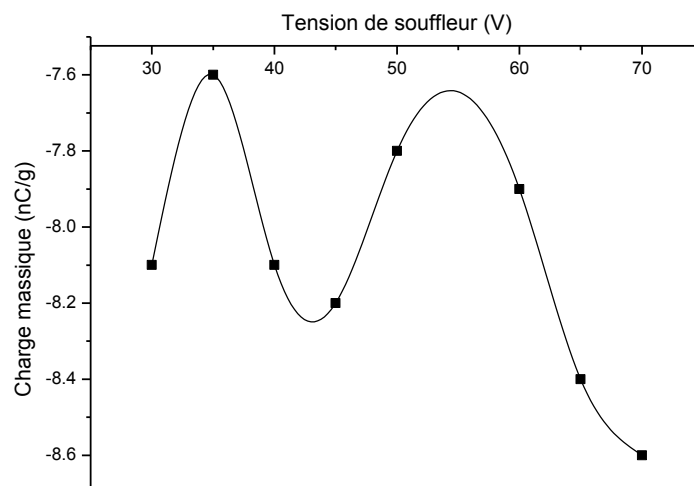


Figure IV-18: Représentation graphique de la charge massique en fonction de la tension du souffleur.

L'influence du débit du souffleur (associée à une tension appliquée au souffleur) n'est pas considérable et on remarque que le chargement des particules est plus au moins stable dans l'intervalle d'alimentation de 40V à 70V.

On a estimé la tension d'alimentation du souffleur à 70V pour la suite des expériences parce qu'elle est suffisante pour mettre les particules en collision.

IV-6-3 Influence de la composition du mélange

Pour étudier la charge acquise par le mélange des particules du PVC blanc et PVC gris on fait varier la composition de la masse des échantillons introduite dans le lit fluidisé pour différents pourcentages avec un mélange total de 50g, un débit (associé à une alimentation de 70 V) et un temps de chargement de 30s. Notons que la charge initiale du mélange est prise avant chaque expérience. Ces expériences sont effectuées sur les deux dispositifs de chargement pour voir l'influence des parois. À chaque fois on fait varier la composition du mélange. Dans le graphe on a indiqué seulement la composition du PVC Blanc.

Les résultats sont montrés dans le tableau IV-3 et dans la figure IV-19.

Tableau IV-3: Charge du mélange dans les deux dispositifs en fonction de la composition

	masse B/N (%)	10/90	20/80	30/70	40/60	45/55	50/50	55/45	60/40	70/30	80/20	90/10
Charge initial	Q0 T (nC)	-9,34	-10	-13,1	-15,74	-14,25	-14,3	-12	-14,18	-15,08	-16,12	-6,02
1 ^{er} dispositif	QT (nC)	-40,53	-41,6	-32,1	-30,1	-21	-21,7	-20,44	-19,05	-14,65	-13,8	-12,81
2 ^{em} dispositif	QT (nC)	-29,62	-25	-12,92	-11,02	-6,6	-6,26	-7,5	-7,4	-2,27	4,23	6,07

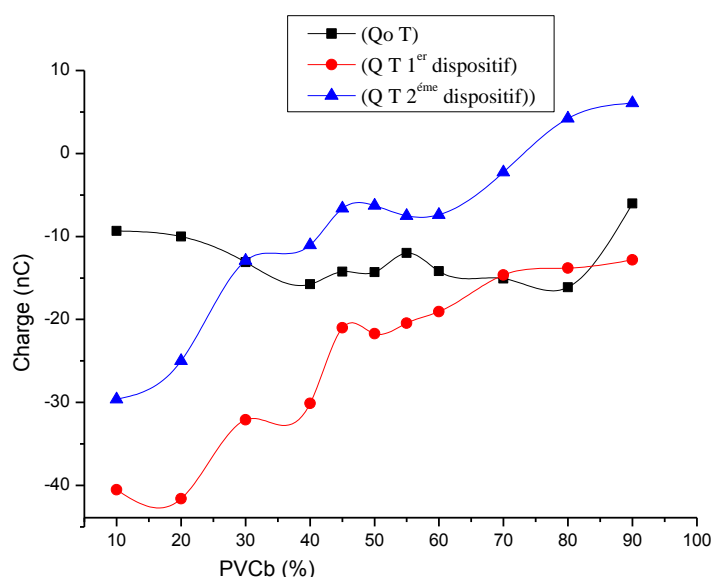


Figure IV-19: Représentation graphique de la charge du mélange dans les deux dispositifs de chargement.

On voit du tableau IV-3 que la charge acquise par le mélange porte un signe négatif ce qui justifie la grande charge acquise par les particules grises par rapport aux particules blanches.

On remarque ici que la diminution du pourcentage des particules grises (augmentation du pourcentage des particules blanches) s'accompagne par une diminution de la charge totale des mélanges de signe négatif vers un signe positif. Ceci est justifié par l'augmentation de la quantité des particules blanches dans le mélange. Par contre la charge acquise par le mélange dans le premier dispositif est toujours négative.

Conclusion

Dans ce chapitre on a fait une étude expérimentale paramétrique d'un nouveau dispositif de séparation tribo-électrostatique, à électrodes verticales et parallèles en mouvement de « va-et-vient » à l'intérieur d'un lit fluidisé de particules fines de PVC.

Les résultats obtenus sont prometteurs, et ont montré que plusieurs facteurs peuvent avoir une influence sur le rendement de la séparation. Le modèle présente toujours néanmoins l'inconvénient d'imaginer un système de récupération des particules après séparation.

Il existe plusieurs procédés d'acquisition de charge triboélectrique pour permettre aux granules et particules fines d'acquérir la charge électrique.

Le lit fluidisé, parmi les méthodes les plus utilisées, est un dispositif très efficace et couramment utilisé pour charger les particules fines (poudre).

La mesure de la charge électrique est un processus affecté par les conditions ambiantes et soumis à de nombreuses erreurs de manipulation. L'interprétation des résultats ne peut pas se faire sans bien comprendre la physique du processus de mesure et la méthode de travail ainsi que le comportement des particules. Cela nous mène à l'analyse de la pureté des produits qui fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE V ANALYSE DE LA PURETE PAR TRAITEMENT D'IMAGE

Introduction

Plusieurs types de séparateurs triboélectrostatique existent actuellement, dont certains sont industrialisés. Ils sont pratiquement destinés au tri des mélanges de particules de taille millimétrique.

L'objectif principal est d'obtenir une grande efficacité des dispositifs de séparation. On dit qu'un système de séparation est efficace s'il donne un rendement maximal et une bonne pureté. Donc l'étude et l'analyse et l'estimation de la pureté des produits séparés sont nécessaires pour avoir de bon rendement de séparation.

Dans ce chapitre nous essayons d'analyser la pureté de deux produits différents. L'étude se fait en utilisant plusieurs méthodes d'analyse, basées sur le traitement d'image qui représente les échantillons des mélanges de deux produits. Le but est de trouver la composition (pourcentage de chaque produit) dans le mélange à partir de leur image prise par un moyen d'acquisition (microscope, caméra,...).

V-1 Traitement d'images

A titre indicatif, notons que l'information reçue par l'homme est visuelle. La production d'images de qualité, de même que son traitement numérique (et si possible) automatique a donc une importance considérable.

Le traitement d'image est né de l'idée et de la nécessité de remplacer l'observateur humain par la machine. L'image ou les signaux provenant de capteurs ont alors été numérisés pour pouvoir être traités par l'ordinateur. Dans un deuxième temps, l'image a été codée et mémorisée sur différents supports [63].

V-2 Définition de l'image

L'image est une représentation d'une personne ou d'un objet par la peinture, la sculpture, le dessin, la photographie, le film,...etc. C'est aussi un ensemble structuré d'informations qui, après affichage sur écran, ont une signification pour l'œil humain. Elle peut être décrite sous la forme d'une fonction $I(x, y)$ de brillance analogique continue, définie dans un domaine borné, tel que x et y sont les coordonnées spatiales d'un point de l'image et I est une fonction d'intensité lumineuse et de couleur. Sous cet aspect, l'image est inexploitable par la machine, ce qui nécessite sa numérisation.

a- Image numérique

Contrairement aux images obtenues à l'aide d'un appareil photo (analogique), ou dessinées sur du papier, les images manipulées par un ordinateur sont numériques (représentées par une série de bits). L'image numérique est l'image dont la surface est divisée en éléments de tailles fixes appelés cellules ou pixels, ayant chacun comme caractéristique un niveau de gris ou de couleurs prélevées à l'emplacement correspondant dans l'image réelle, ou calculée à partir d'une description interne de la scène à représenter.

La numérisation d'une image est la conversion de celle-ci de son état analogique (distribution continue d'intensités lumineuses dans un plan $x O y$) en une image numérique représentée par une matrice bidimensionnelle de valeurs numériques $X(n, m)$ où : n, m sont les coordonnées cartésiennes d'un point de l'image et $X(n, m)$ le niveau de gris ou de couleur en ce point.

Une image numérique est composée d'unités élémentaires (appelées pixels) qui représentent chacun une portion de l'image. Une image est définie par :

- le nombre de pixels qui la compose en largeur et en hauteur (qui peut varier presque à l'infini).
- l'étendue des teintes de gris ou des couleurs que peut prendre chaque pixel (on parle de dynamique de l'image).

b- Caractéristiques d'une image numérique

L'image est un ensemble structuré d'informations caractérisé par les paramètres suivants:

• Pixel

Le pixel est la contraction de l'expression anglaise " Picture Elements". Le pixel, étant le plus petit point de l'image. C'est une entité calculable qui peut recevoir une structure et une quantification. Dans une image couleur rouge-vert-bleu (R.V.B.), un pixel peut être représenté sur trois octets : un octet pour chacune des couleurs : rouge (R), vert (V) et bleu (B).

• Dimension

C'est la taille de l'image. Cette dernière se présente sous forme de matrice dont les éléments sont des valeurs numériques représentatives des intensités lumineuses (pixels). Le nombre de lignes de cette matrice multiplié par le nombre de colonnes nous donne le nombre total de pixels dans une image [64].

• Images binaires (noir ou blanc)

Dans le cas d'images les plus simples, un pixel peut prendre uniquement les valeurs noire ou blanche. C'est typiquement le type d'image que l'on utilise pour scanner du texte quand celui-ci est composé d'une seule couleur.

• Images en teintes de gris

En général, les images en niveaux de gris renferment 256 teintes de gris, image à 256 couleurs. Simplement chacune de ces 256 couleurs est définie dans la gamme des gris. Par convention la valeur zéro

représente le noir (intensité lumineuse nulle) et la valeur 255 le blanc (intensité lumineuse maximale) [65].
Donc 256 niveaux de gris avec: 0 → noir...127 → gris moyen.....255 → blanc

• Images couleurs

Ces images sont en général codées en utilisant le codage des trois couleurs fondamentales (rouge, vert, bleu). On parle alors d'images RVB. (Cela correspond au codage des téléviseurs couleur en français). Ce sont donc des images tri-modales. Chaque couleur est codée sous forme d'un octet, d'où : composante rouge, intensité de 0 à 255, Image RVB composante verte, intensité de 0 à 255 et composante bleu, intensité de 0 à 255.

V-3 Seuillage et Segmentation

Une image «réelle » se transforme en une image numérique par différents outils de transformation (caméra, scanner. . .). Cette image numérique est constituée de pixels contenant chacun différentes informations (intensité lumineuse, couleur...). Ces informations seront codées dans une grille échelonnée, le niveau de gris, de 0 à n par exemple (généralement $n=250$). En fonction des formes recherchées (grains d'une certaine taille, zones de couleurs particulières), on va séparer les structures intéressantes des autres par l'opération de seuillage. C'est l'une des étapes les plus importantes en traitement d'images c'est la segmentation qui est souvent décrite comme séparation fond/objets. Elle consiste à diviser l'image en plusieurs régions disjointes présentant des caractéristiques uniformes.

L'opération de seuillage permet de traiter l'image et de définir des grandeurs mesurables car c'est un passage obligatoire pour toute analyse. Il permet de sélectionner les parties de l'image qui intéressent l'opérateur, par exemple 2 types de grains (blancs et sombres) dans un mélange de poudres. On peut donc, par exemple, attribuer la valeur 1 à tous les pixels de l'image numérique qui ont un niveau de gris compris entre deux valeurs i_1 et i_2 , choisis par l'opérateur [66].

V-4 Prélèvement des images

La plupart des appareils scientifiques fournissent des images (microscopes, télescopes, radiographies appareils photographiques, caméra,...) et de nombreux domaines d'applications utilisent l'image comme source d'information et /ou de visualisation.

Nos images à traiter sont prises par un microscope. Le microscope optique ou microscope photonique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (ce qui caractérise son grossissement) et de séparer les détails de cette image (et son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain.

Le Microscope optique (Fig V-1) utilisé pour l'observation de nos échantillons est de type OPTIKA. L'installation est munie d'un système d'éclairage assez puissant, composé de deux lampes

diffusant une lumière blanche et positionnée de haut et de bas de l'échantillon ce qui assure une grande surface d'éclairage et évite la formation de l'ombre.



Figure V-1: Microscope (OPTIKA), relié au micro-ordinateur.

Le dispositif est relié à une caméra (OPTIKA) pour capter les photos prélevées des éprouvettes, puis les images acquises par le microscope sont envoyées dans la mémoire du PC. Après cela on récupère les photos pour l'analyse et le traitement d'image.

L'échantillon observé doit remplir certaines conditions :

- Planéité de l'échantillon, pour que l'objectif en donne une image entière nette, faute de quoi on ne peut en observer qu'une portion restreinte.
- en transmission, il doit être de faible épaisseur pour que la lumière le traverse en réflexion, la surface doit être en général polie afin que les rayures ne masquent pas ce que l'on veut observer.

Il est important de signaler que la stabilité des conditions lumineuses est indispensable, car par exemple une particule grise plus éclairée peut être perçue comme une particule blanche, et inversement.

Dans les images obtenues par microscope optique, on peut distinguer et différencier les deux poudres par couleur dans le cas de leur mélange (photo colorée).

V-5 Méthodes d'analyse

Parmi les techniques analytiques, nous avons utilisé celle de l'analyse d'images. La composition d'un mélange binaire de PVC (Blanc et Gris) peut être définie grâce à l'analyse des couleurs des produits qui constituent ce mélange par analyse d'images. En pratique, une caméra est installée sur un microscope pour prélever les photos des échantillons à observer.

Le traitement d'images prélevées par le microscope optique a pour but d'analyser la pureté du mélange pour connaître le pourcentage en composition de chaque matériau dans un mélange composé de deux produits différents.

Chaque image prise par la caméra du microscope est composée de trois couleurs différentes. Le blanc et le gris, qui correspondent à la particule de PVC, et le noir qui est celle du vide. Grâce à la différence de couleur existant entre les deux produits, plusieurs échantillons de mélange (composition) seront prélevés et analysés par trois méthodes différentes, de manière à valider la méthode d'analyse d'image. Ces trois méthodes ci-après sont :- Analyse par un programme écrit sous MATLAB.

-Méthode de Classification Knn.

-Logiciel Image J.

V-5-1 Analyse par un programme écrit sous MATLAB

Comme première méthode, la composition de chaque échantillon est déterminée grâce à un programme de traitement d'images développé sous MATLAB qui nous permet de faire l'analyse suivant les couleurs des produits. Les signaux provenant de l'image reçue par la caméra sont traités par une unité centrale qui calcule les surfaces occupées par différents composés même avec un faible contraste de couleurs. En premier lieu le programme fait appel à l'image à traiter (Fig V-2). Dans cette image nous avons défini les deux seuils suivant les valeurs du niveau de gris (les valeurs des pixels qui permettent de partitionner l'image en trois classes). Ensuite l'image est convertie en type RVB (Rouge, Vert, Bleu), deux couleurs pour les deux matières et la troisième pour définir le vide qui existe entre ces deux produits dans l'image (Fig V-3). Enfin le pourcentage des deux produits est affiché directement dans la fenêtre de commande MATLAB (Fig V-4).

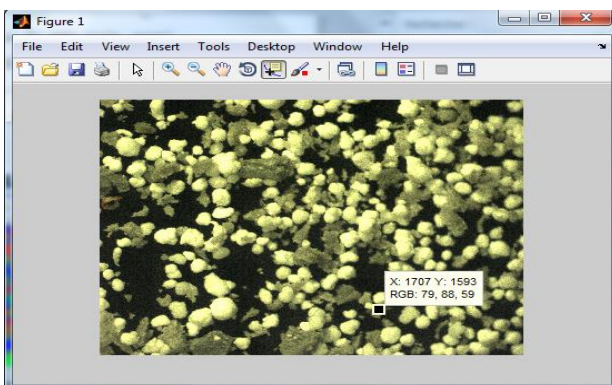


Figure V-2: Ouverture de l'image à traiter par Matlab

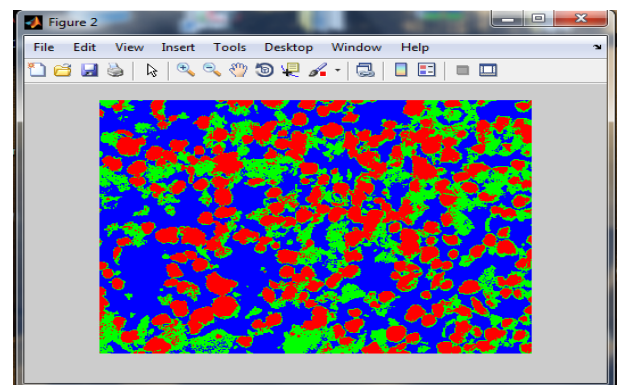


Figure V-3: Image convertie en système RVB.

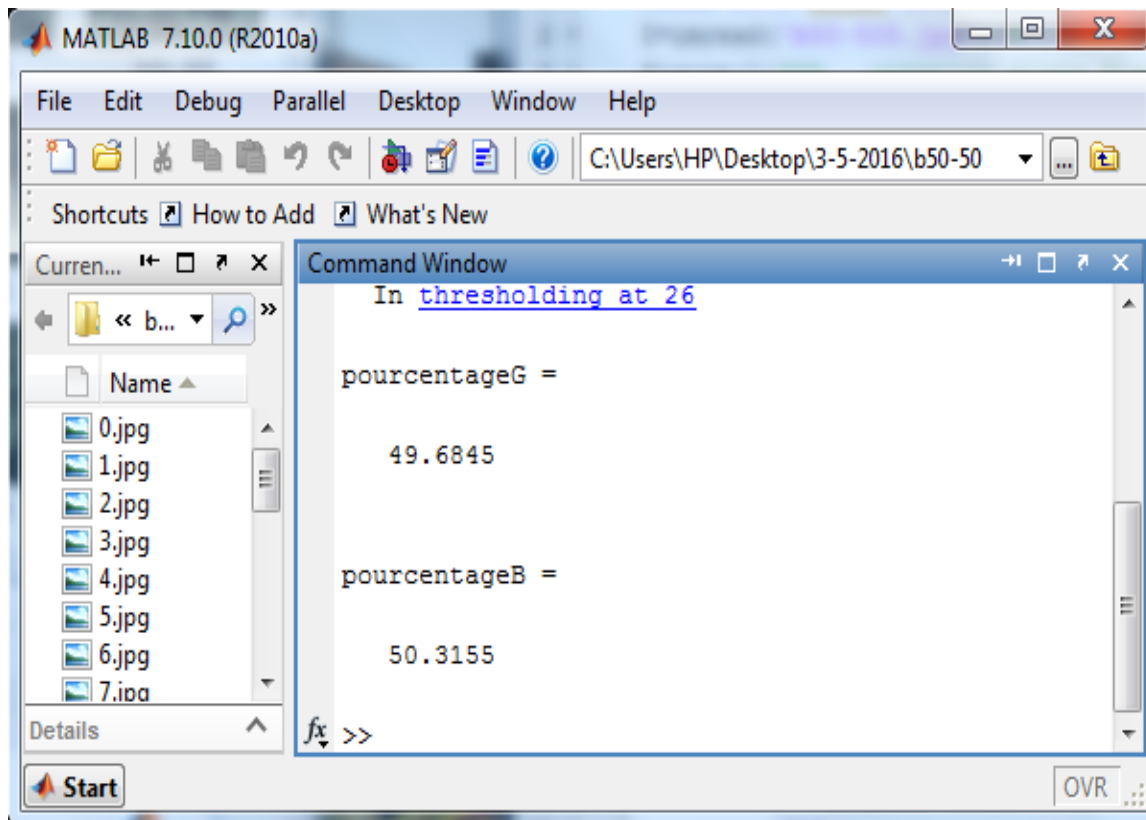


Figure V-4: Affichage des deux pourcentages après traitement

Le meilleur résultat est obtenu par la meilleure détermination du niveau de seuillage qui permet de compter par pixel les particules blanches d'un côté et les particules grises de l'autre côté.

- **Organigramme de la méthode**

Le programme utilisé est représenté par l'organigramme suivant :

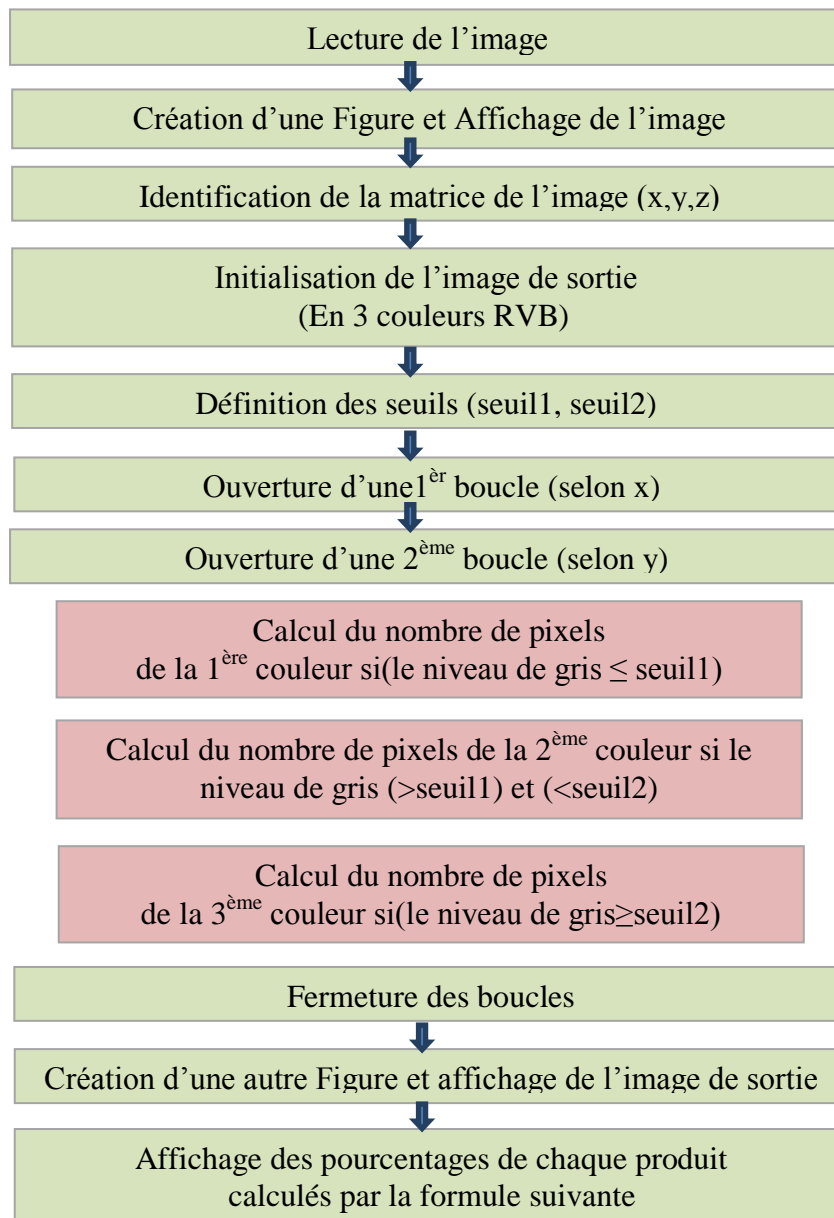


Figure V-5: Organigramme du traitement par MATLAB.

$$Xb = \frac{\text{Nombre (pixels blanc)}}{\text{Nombre (pixels gris+pixels blanc)}} \times 100 \quad (\text{V. 1})$$

$$Xg = \frac{\text{Nombre (pixels gris)}}{\text{Nombre (pixels gris+pixels blanc)}} \times 100 \quad (\text{V. 2})$$

V-5-2 Méthode de Classification Knn

On peut également faire une distinction plus générale parmi les méthodes de classification, en regardant le mode d'apprentissage utilisé. Il existe deux grandes méthodes d'apprentissage :

- l'apprentissage supervisé
- l'apprentissage non supervisé.

On parle de méthodes de classification supervisées lorsque les classes des échantillons de la base d'apprentissage sont connues. On trouve également dans la littérature le terme d'analyse discriminante [67].

En intelligence artificielle, la méthode des k plus proches voisins est une méthode d'apprentissage supervisé. En abrégé k -NN ou KNN, de l'anglais k -nearest-neighbor.

L'algorithme KNN figure parmi les plus simples algorithmes d'apprentissage artificiel. Dans un contexte de classification d'une nouvelle observation x , l'idée fondatrice simple est de faire pivoter les plus proches voisins de cette observation. La classe de x est déterminée en fonction de la classe majoritaire parmi les k plus proches voisins de l'observation x .

Le paramètre k doit être déterminé par l'utilisateur : $k \in \mathbb{N}$. En classification binaire, il est utile de choisir k impair pour éviter les votes égalitaires. Le meilleur choix de k dépend du jeu de données. En général, les grandes valeurs de k réduisent l'effet du bruit sur la classification.

La méthode du plus proche voisin est une méthode non paramétrique où une nouvelle observation est classée dans la classe d'appartenance de l'observation de l'échantillon d'apprentissage qui lui est la plus proche, au regard des Co-variables utilisées. La détermination de leur similarité est basée sur des mesures de distance entre les deux échantillons.

Nous décrivons ci-dessous le principe de cette technique analytique

On dispose de N échantillons dont on connaît la classe (bases d'apprentissage qui sont trois classes représentant les trois couleurs de l'image à traiter, le noir (le fond), le blanc (PVC blanc) le gris (PVC gris) (Fig V-6). Pour chaque nouvel grain dans l'image, on détermine la classe à laquelle il appartient. La méthode des KPPV va prendre en compte de manière identique les K échantillons de la base d'apprentissage les plus proches de l'échantillon à classer. On affecte à l'échantillon à classer la classe revenant majoritairement parmi les K plus proches échantillons d'apprentissage. (K données les plus proches).

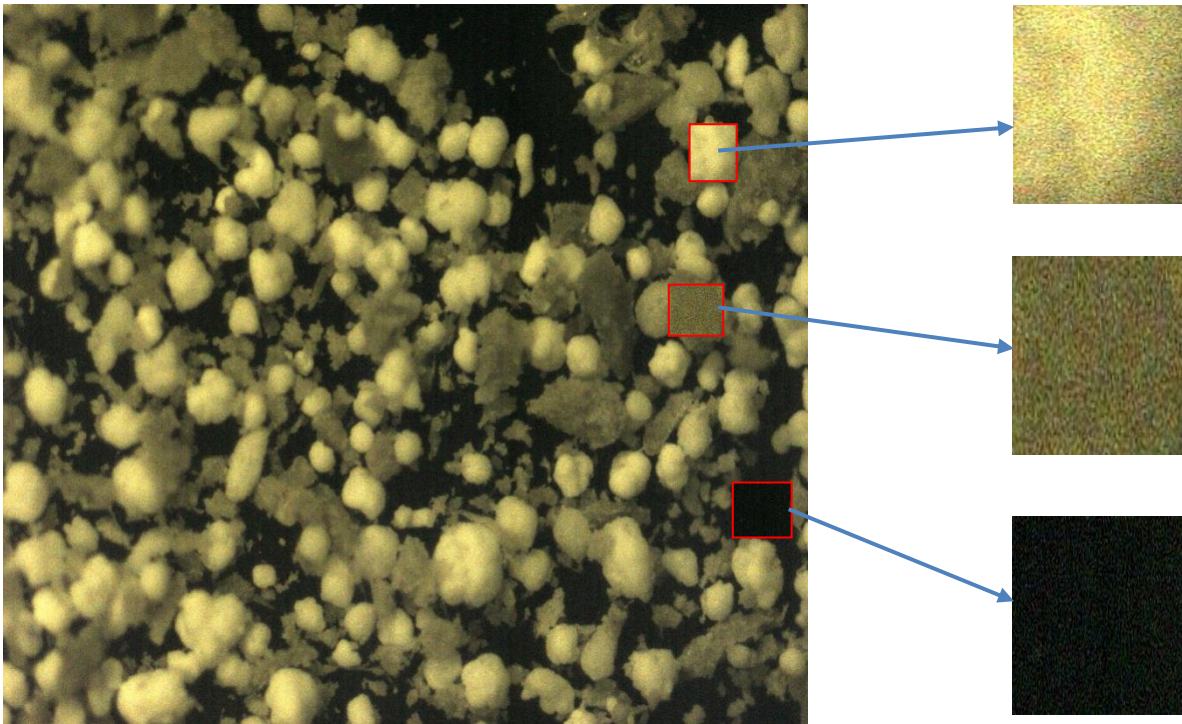


Figure V-6: Trois classes prélevées à partir de l'image à traiter

Un avantage principal de l'algorithme KNN est qu'il s'exécute bien avec multimodale parce que la base de sa décision est basée sur un petit voisinage d'objets semblables. Par conséquent, même si la classe de la cible est multimodale, l'algorithme peut encore mener à la bonne exactitude [68].

V-5-3 Logiciel Image J

Une troisième méthode a été utilisée pour la confirmation et la validation de la première méthode d'analyse par un logiciel appelé Image J. ImageJ est un des meilleurs logiciels Open Source pour le traitement d'image, développé par National Institutes of Health [68]. ImageJ est un des logiciels les plus utilisés pour le traitement d'images acquises par microscopie. Il est écrit en Java et permet l'ajout de nouvelles fonctionnalités via des plug-ins et macros. Pour le traitement et l'analyse d'images, il peut :

- afficher, éditer, traiter et analyser la plupart des formats de fichier existants ;
- proposer un grand nombre d'algorithmes pour l'analyse de l'image, de 8-bits, 16-bits, 32-bits et les images couleurs [69].

Image J se présente sous la forme d'une fenêtre principale flottante qui ouvre des fenêtres de données, elles aussi flottantes. La fenêtre principale contient les menus et les boutons des outils disponibles (sélection rectangulaire, ovale, main libre, etc.) (Fig V-7).

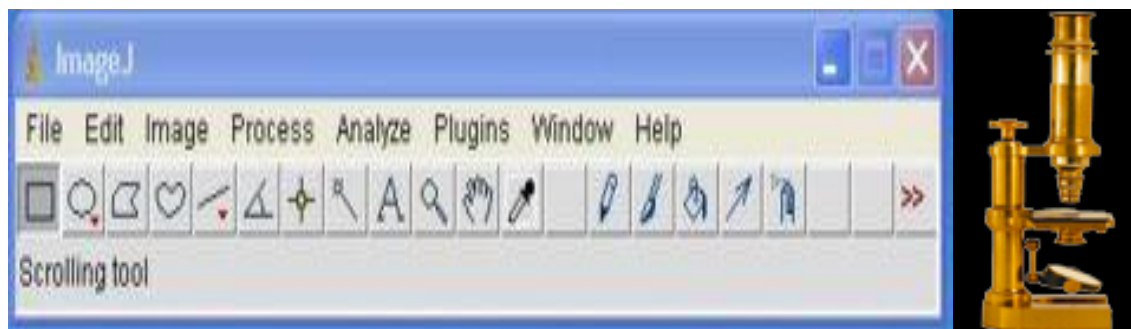


Figure V-7: Fenêtre principale d'Image J.

La plupart des opérations courantes de traitement d'images sont réalisables avec Image J : visualisation et ajustement de l'histogramme des niveaux de gris, de bruitage, correction d'éclairage, détection de contours, mesures de diverses grandeurs (distances, surfaces) transformation de Fourier directe et inverse, seuillage, opérations logiques et arithmétiques entre images[70].

Le principe d'analyse de l'image commence par l'identification des deux seuillages (Tricholding) (Fig V-8), nous utiliserons uniquement les images de résolution 8-bits pour gagner en temps de traitement (Fig V-9).

A partir du premier seuillage, nous pouvons déterminer directement le nombre de pixels blanc par image (Fig V-10). Ensuite, à partir du deuxième seuillage nous déterminons le nombre de pixels gris (Fig V-11). La différence entre le nombre total de pixels blanc ou gris dans une image et la somme totale des pixels gris et blancs permet de déduire le taux de surface "vide" dans chaque image. Finalement la proportion surfacique de chaque produit est calculée par la formule suivante :

$$X_b = \frac{\text{Nombre(pixels blancs)}}{\text{Nombre(pixelsgris + pixelsblancs)}} \times 100 \quad X_g = \frac{\text{Nombre(pixels gris)}}{\text{Nombre(pixels gris + pixels blancs)}} \times 100$$

Avec: X_b et X_g sont successivement les fractions du PVC blanc et du PVC gris

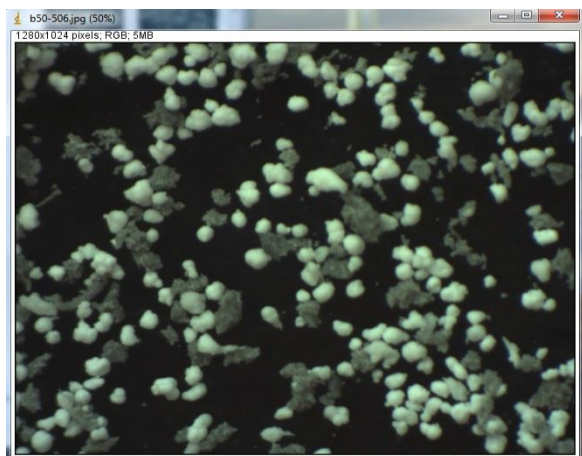


Figure V-8: Image réelle à traiter

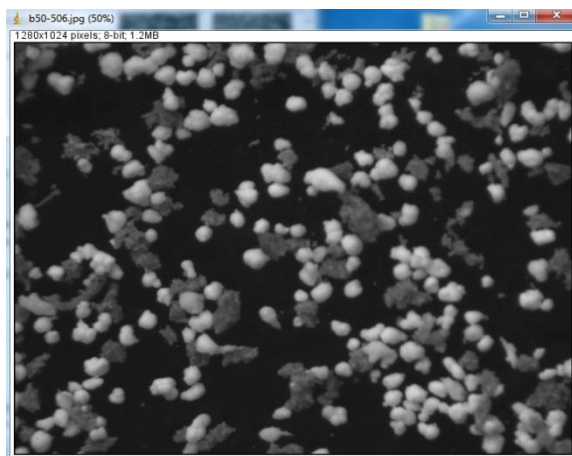


Figure V-9: Conversion de l'image en résolution 8-bits

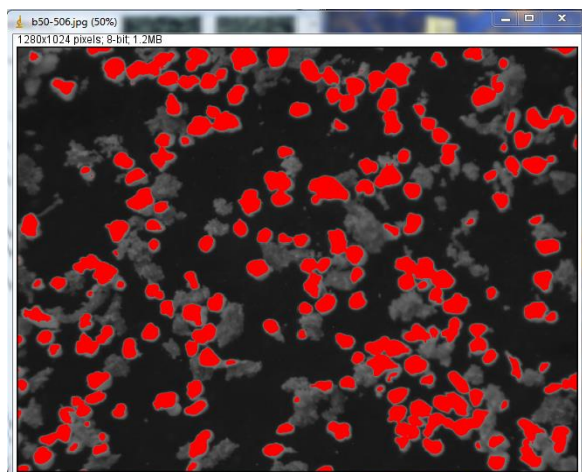


Figure V-10: Sélection des particules blanches

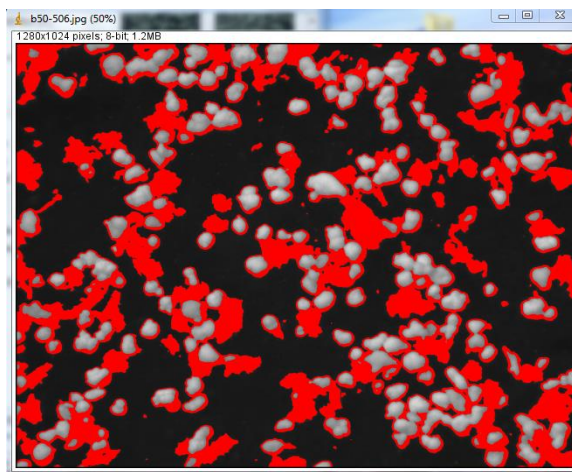


Figure V-11: Sélection des particules grises par Image J

Les résultats obtenus avec les trois méthodes ainsi que la discussion seront détaillés ci-après.

V-6 Résultats et discussions

V-6-1 Echantillons des particules de taille micronisées

Des mélanges avec des compositions prédéfinies connues ont été préparés à partir de PVC_b et PVC_g . Il s'agit des particules de PVC_g de couleur grise qui sont mélangées avec les particules de PVC_b de couleur blanche (Fig V-12). On prend les photos par un microscope. L'enregistrement est ensuite traité pour obtenir une série de photographies consécutives représentant toute la surface du mélange. Le traitement des images obtenues permet de connaître la composition surfacique de l'un des deux composants. Notons ici que la fraction surfacique est calculée à partir de la moyenne arithmétique sur toutes les images prises.

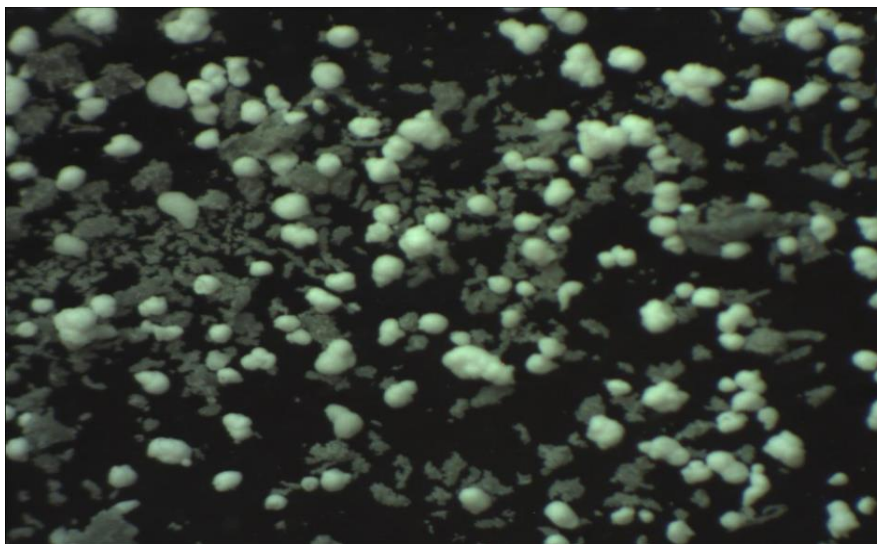


Figure V-12: Photo réelle du mélange du PVC prise par microscope optique

Après traitement les trois méthodes donnent à peu près les mêmes pourcentages pour chaque produit, ainsi elles valident les mélanges traités dont on connaît la composition auparavant.

Le problème qui se pose est la difficulté de la détermination des seuils, sous l'effet de la présence d'interférence de couleur entre les deux produits, ce qui nécessite un bon moyen d'acquisition des photos.

Vues du microscope les particules ont des tailles et des formes différentes. Alors pour résoudre ces deux problèmes, on considère que les mélanges à étudier sont très proches en termes de taille et de forme.

Une opération de coloration de particules a été faite. Il s'agit des particules de PVC colorées d'abord en noir (Fig V-13).

Les particules sont séchées puis mélangées avec les particules de PVC (pures) qui sont de couleur blanche. En utilisant un fond vert, le contraste entre les deux produits étant suffisamment important figures **V-13 - V-14**.



Figure V-13: Particules colorées

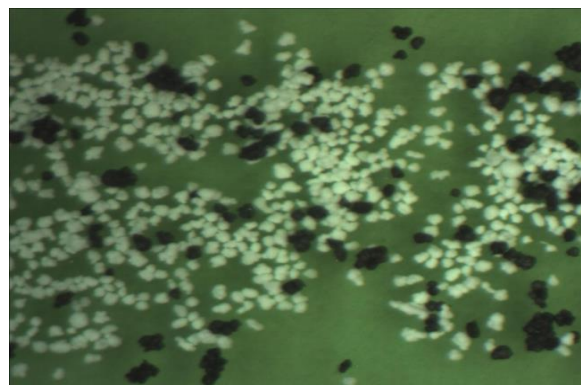


Figure V-14: Photo de mélange

La masse totale des produits est mesurée par une balance électronique de haute sensibilité.

En utilisant une masse de mélange de 0,2 g, nous avons préparé quatre échantillons de compositions suivantes :

- Composition de 50% PVC Blanc et 50% de PVC Noir.
- Composition de 60% PVC Blanc et 40% de PVC Noir
- Composition de 70% PVC Blanc et 30% de PVC Noir et l'inverse
- Composition de 80% PVC Blanc et 20% de PVC Noir et l'inverse

a/ 50% PVC Blanc et 50% de PVC Noir

Les résultats obtenus avec les deux méthodes (Programme Matlab, Logiciel ImageJ) sont représentés aux figures V-15 - 18, pour différents valeurs de la composition du mélange. Notons que les valeurs de pourcentage indiqués dans les figures sont les pourcentages de PVC Blanc.

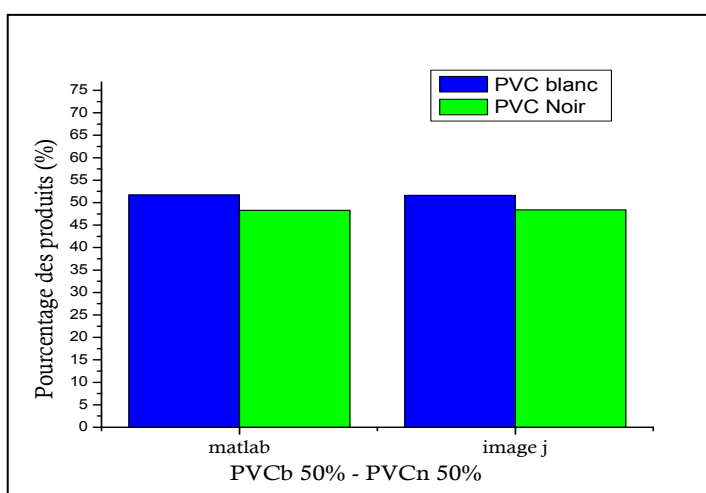


Figure V-15: Résultats de la pureté obtenus pour différentes compositions du mélange.

b/ 60% PVC Blanc et 40% de PVC Noir et l'inverse

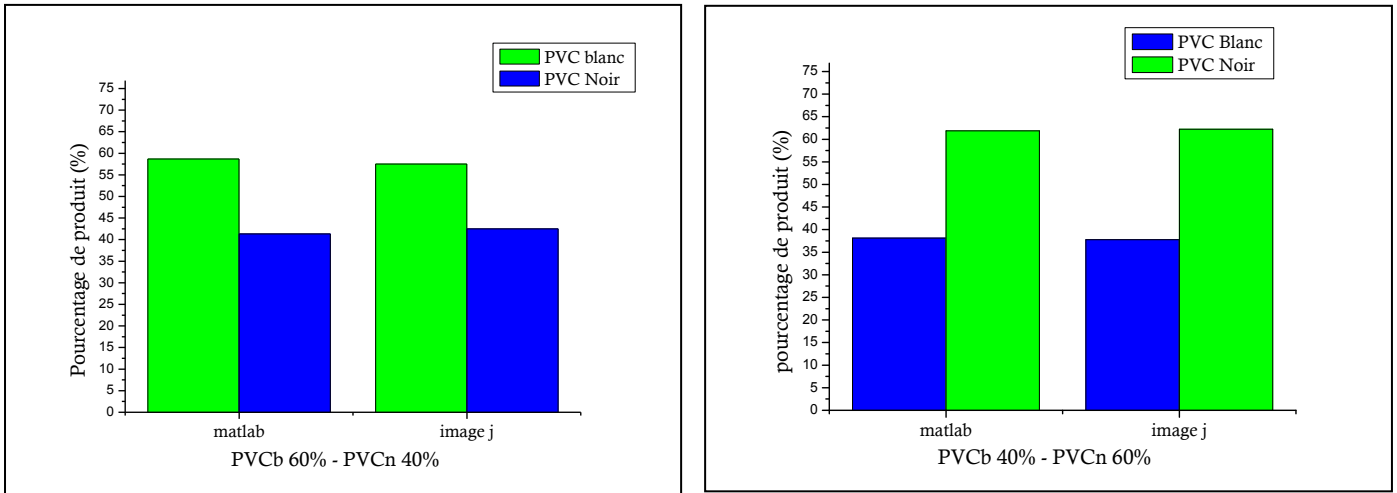


Figure V-16: Résultats de la pureté obtenus pour différentes compositions du mélange.

c/ 70% PVC Blanc et 30% de PVC Noir et l'inverse

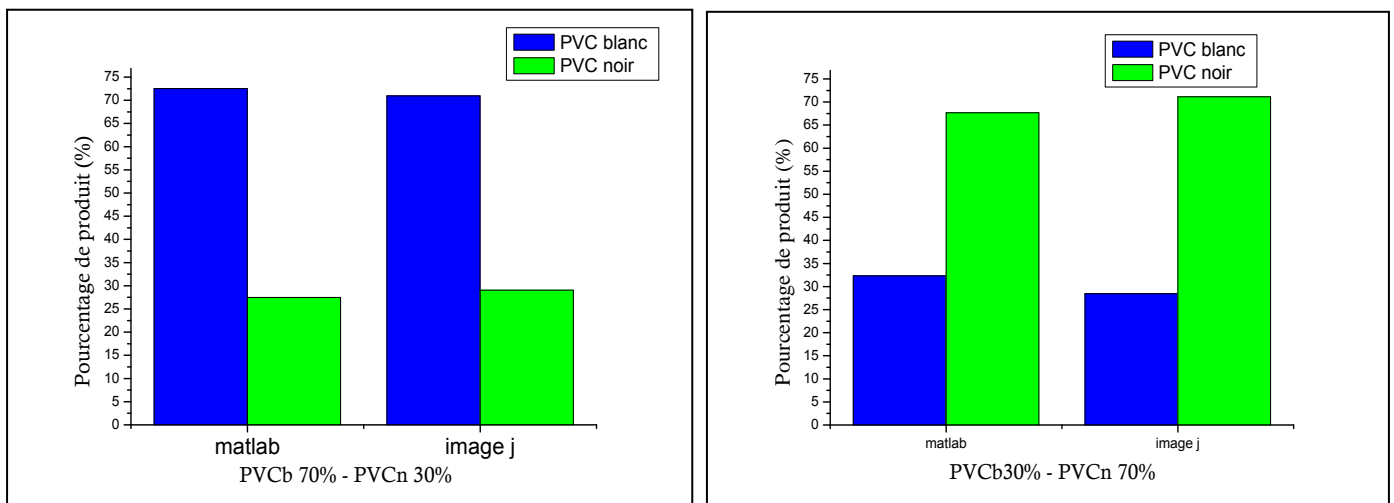


Figure V-17: Résultats de la pureté obtenus pour différentes compositions du mélange.

d/ 80% PVC Blanc et 20% de PVC Noir et l'inverse

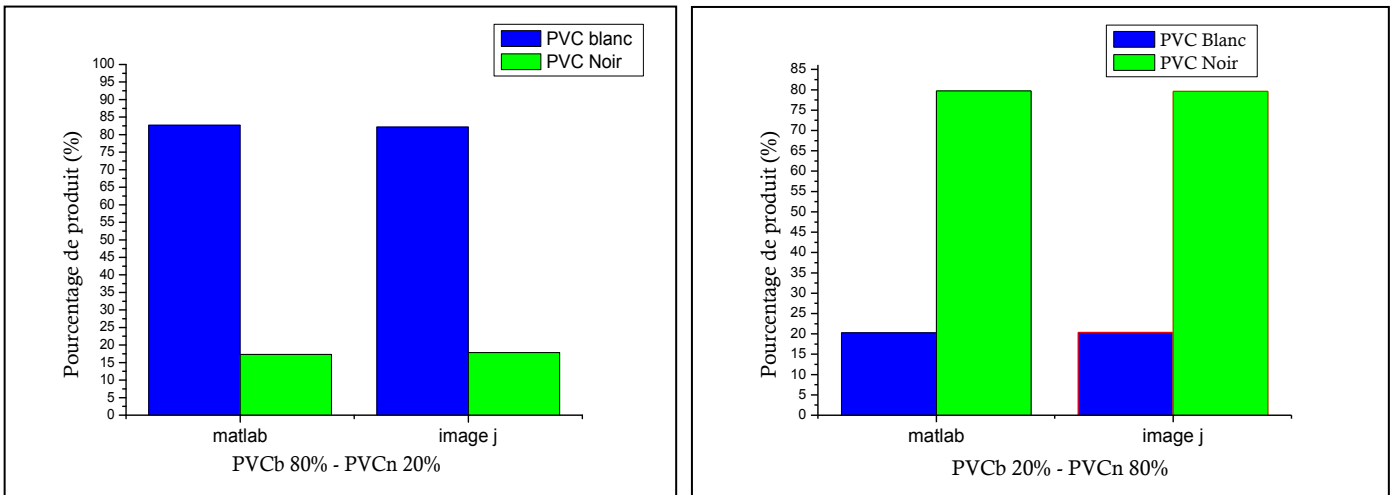


Figure V-18: Résultats de la pureté obtenus pour différentes compositions du mélange.

V-6-2Echantillon de particules granulaires

La validation de la méthode d'analyse d'images a fait l'objet de plusieurs expériences consistant à appliquer la technique sur des échantillons de mélange composé de produits granulaires de taille millimétrique. Nous avons utilisé les particules de PEHD de couleur noir ($PEHD_n$) et le PEHD de couleur blanche ($PEHD_b$). Les photos du mélange sont prises par une caméra de haute résolution.

Comme le montre la (Figure V-19) chaque image prise par la caméra de 8 méga pixels est composée de trois couleurs différentes. Le noir et le blanc, qui sont les couleurs de produit, et le vert qui est celle de la surface sur laquelle est posé le produit.

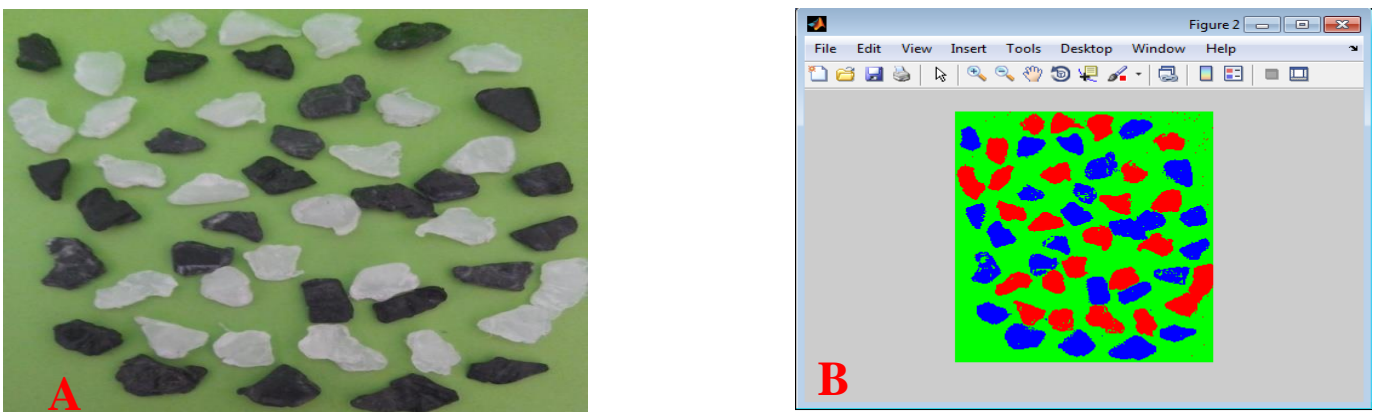


Figure V-19: a) Image de granule prise par caméra ; b) Sélection des particules par Matlab

Les résultats obtenus avec les deux méthodes (Programme Matlab, Logiciel ImageJ) sont représentés aux Figures V-20 - 23, pour différents valeurs de la composition du mélange. Notons que les valeurs de pourcentage indiqué dans les figures sont les pourcentages de PEHD Blanc.

a/ 50% PEHD Blanc et 50% de PEHD Noir

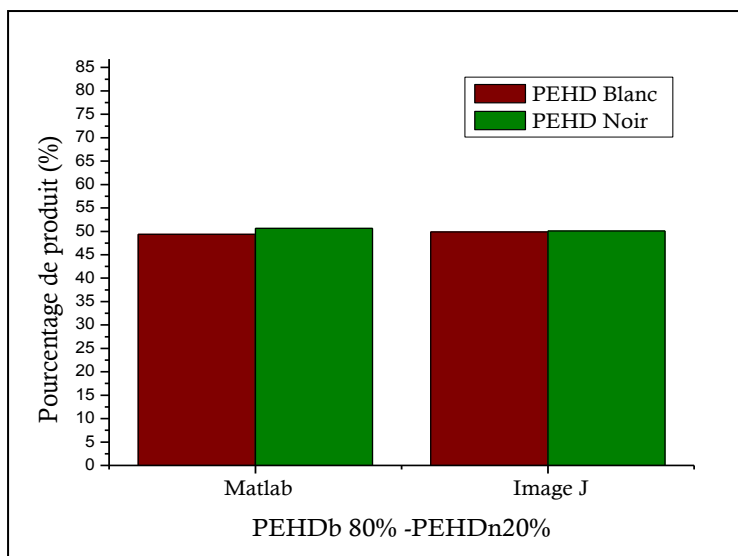


Figure V-20: Résultats de la pureté obtenus pour différents compositions du mélange.

b/60% PEHD-Blanc et 40% de PEHD-Noir et l'inverse

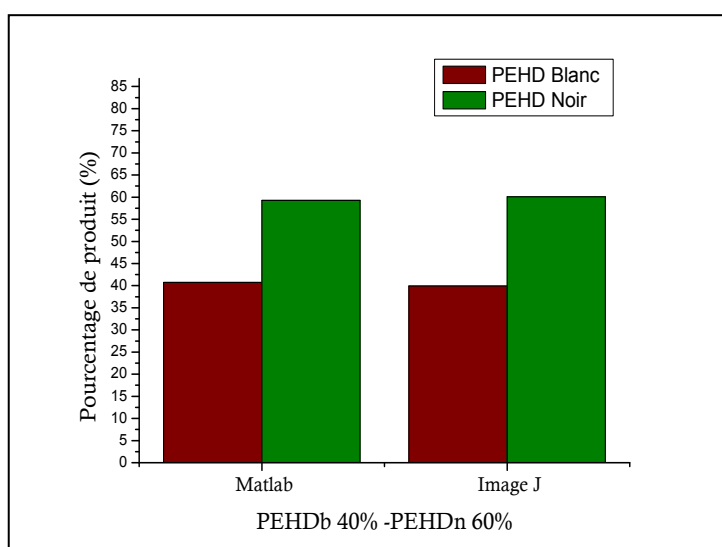
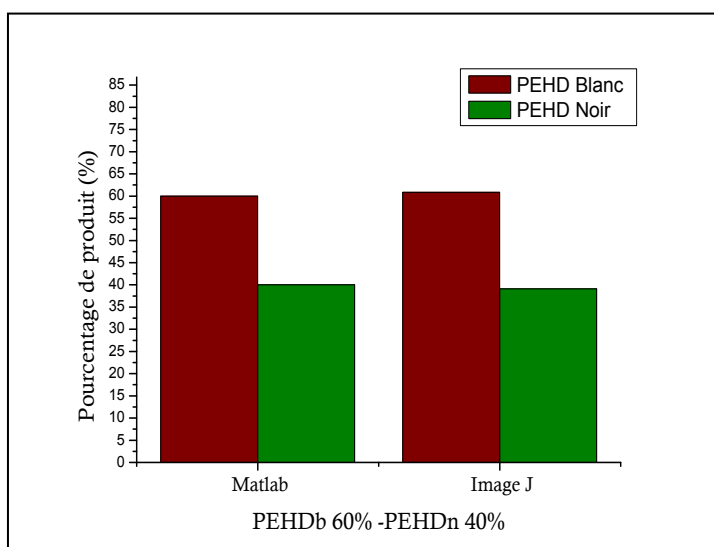


Figure V-21: Résultats de la pureté obtenus pour différents compositions du mélange.

c/ 70% PEHD Blanc et 30% de PEHD Noir et l'inverse

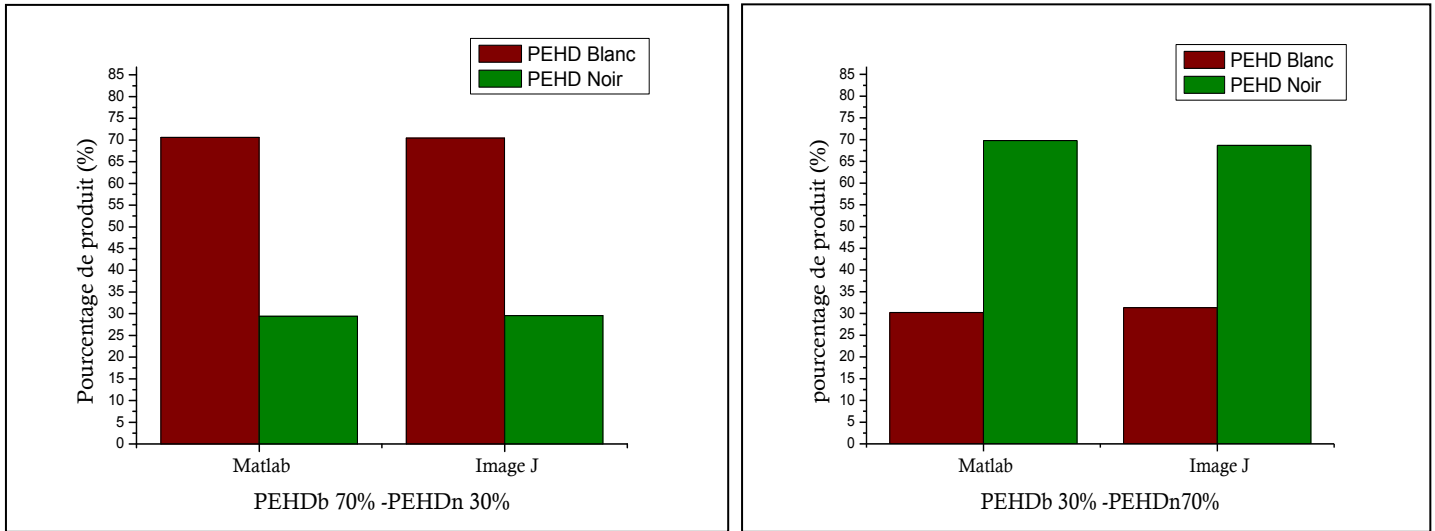


Figure V-22: Résultats de la pureté obtenus pour différents compositions du mélange.

d/ 80% PVC Blanc et 20% de PVC Noir et l'inverse

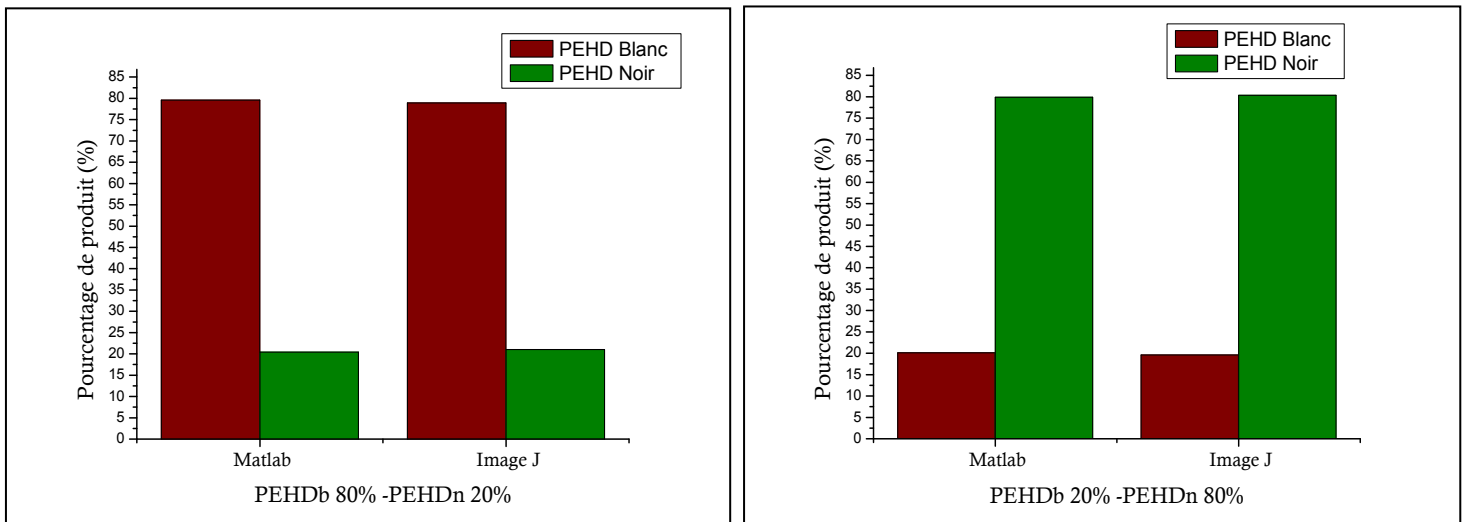


Figure V-23: Résultats de la pureté obtenus pour différentes compositions du mélange.

Discussion

Les deux méthodes donnent à peu près les mêmes pourcentages pour chaque produit. Ainsi elles valident les mélanges traités dont on connaît la composition. La comparaison des surfaces colorées (en %) obtenue par analyse d'image avec celles de composition qui sont connues, a permis d'assurer que les deux méthodes sont assez représentatives de la proportion surfacique occupée par chaque couleur. Mais seulement il y'a une petite incertitude qui dépend surtout de la qualité des photos puisque les images issues de l'imagerie de fluorescence, présentent un certain nombre de défauts qui peuvent affecter la qualité de ces

images et par conséquent les performances de l'analyse, aussi à cause de l'éclairage et la formation de l'ombre.

L'estimation de la pureté par traitement d'image pour les matériaux granulaires est beaucoup plus précise que dans le cas des particules micronisées.

Finalement l'inconvénient majeur de cette technique d'analyse est qu'elle ne permet d'observer le système qu'en surface, et ne fournit donc aucune information sur l'intérieur du lit des particules et que les meilleurs résultats ne sont obtenus que quand les particules forment une planéité (monocouche).

Une méthode semblable a été citée par [66]. La méthode est appliquée pour le traitement d'images qui sont pris par une caméra CCD de haute résolution pour filmer un mélange continu de particules de couscous fin (blanc et noir) convoyé par une bande transporteuse de couleur verte.

La composition d'un mélange en sortie d'un mélangeur continu peut être définie grâce à l'analyse des couleurs des produits qui constituent ce mélange par analyse d'images. En pratique, une caméra linéaire (CCD) est installée en sortie du mélangeur pour filmer le mélange convoyé par une bande transporteuse voir (FigureV-24).

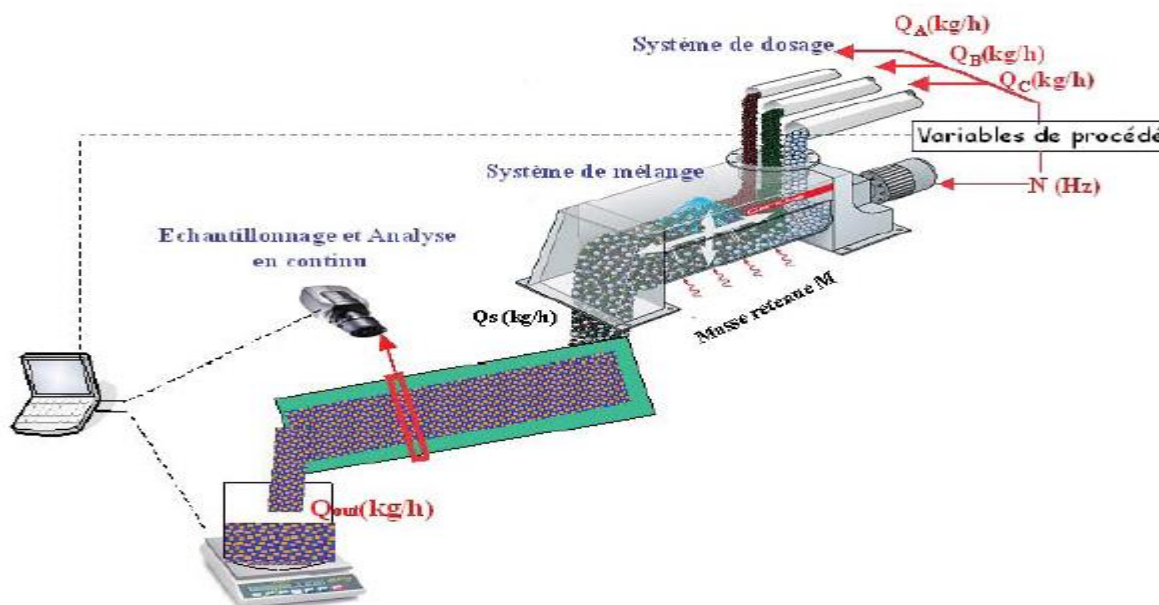


Figure V-24 : Analyse en ligne de la qualité du mélange [66].

Sachant que la totalité du mélange convoyé par la bande transporteuse est filmé en continu avec des images consécutives, il est possible de déterminer la masse des particules contenues dans chaque image. Pour cela, il suffit de connaître le débit de sortie du mélangeur. Pendant une seconde, la caméra réalise un certain nombre d'images représentant la totalité du mélange convoyé par la bande transporteuse, sous une forme monocouche. On en déduit donc que chaque image contient en moyenne le débit total de sortie sur le nombre d'image.

De plus, bien qu'il soit possible d'incorporer cette technique d'analyse d'images dans une installation de séparation électrostatique de mélanges en continu, elle nécessite que les particules utilisées soient de couleurs différentes. Excepté ces quelques inconvénients, la technique d'analyse d'images présente de nombreux avantages qui lui permettent d'être envisagée pour la surveillance et l'asservissement d'un procédé de mélange de poudres en continu [66].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et analysé la pureté des produits issus d'un séparateur de particules micronisées et millimétrique de plastique et aussi pour d'autres types de particules. L'analyse se fait en se basant sur le traitement d'images. Les images sont prises par un microscope optique, caméra ...

Pour l'analyse on a utilisé trois méthodes, la première est un programme écrit sous MATLAB. Pour que notre travail soit clair et approuvé, une autre méthode est utilisée avec un logiciel appelé (Image J). Cette méthode est utilisée pour la confirmation et permettant la validation.

Finalement le travail effectué permet de déterminer le pourcentage de deux produits dans un mélange millimétrique ou bien micrométrique, composé des particules homogènes (même taille) et dont les couleurs sont différentes pour augmenter l'efficacité des systèmes.

CONCLUSION GENERALE

Les déchets d'équipements plastiques issus de DEEE contiennent une grande diversité de matériaux dont le traitement et le recyclage nécessitent un développement de nouvelles technologies de séparation.

Nous avons présenté dans cette thèse un ensemble de travaux portant sur l'étude et la réalisation d'un nouveau séparateur triboélectrostatique à deux électrodes plaques en mouvement va-et-vient. Les essais expérimentaux effectués dans le laboratoire avec ce dispositif permettent de séparer des mélanges binaires de particules fines isolantes.

Dans la première partie, nous avons jugé nécessaire de présenter l'état de l'art sur l'effet triboélectrique, dans laquelle nous avons rappelé quelques dispositifs destinés à l'électro-séparation. Il en ressort que la compréhension théorique des phénomènes électrostatiques mis en jeu reste encore très lacunaire surtout en ce qui concerne les transferts de charges par frottement. C'est pourquoi depuis quelques années un effort particulier pour maîtriser les phénomènes triboélectriques n'a cessé de croître.

Le principal travail réalisé dans cette étude a été la conception d'un nouveau séparateur à électrodes en mouvement va-et-vient destiné aux particules fines et cela en dépit des différentes difficultés rencontrées lors de la conception des différentes pièces de la machine semi industrielle.

Le dispositif expérimental réalisé au niveau du laboratoire APELEC de l'université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes, a donné des résultats très probants pouvant être exploités à l'avenir et envisager l'utilisation de ce type de machine à l'échelle industrielle dans différents domaines tels que l'industrie de recyclage.

Le nouveau dispositif de séparation triboélectrostatique à électrodes verticales et horizontales parallèles en mouvement de « va-et-vient » à l'intérieur d'un lit fluidisé de particules fines de PVC, a fait l'objet d'une étude expérimentale paramétrique. Les résultats obtenus sont prometteurs, et ont montré que plusieurs facteurs peuvent avoir une influence sur le rendement de la séparation.

Il faut rechercher le point optimal de l'installation pour aboutir à un meilleur rendement. C'est pourquoi une partie de notre travail a été consacrée à la modélisation et l'optimisation du dispositif par la méthodologie des plans d'expériences, en utilisant le logiciel MODDE 5.0. Par ailleurs, ce logiciel permet de déterminer l'influence de chaque paramètre choisi sur les réponses du système séparément et de donner les réponses prédites en fonction de ces paramètres.

Parallèlement nous avons étudié et analysé la pureté des produits issus d'un séparateur des particules fines (PVC blanc et PVC gris) et aussi pour d'autres types de particules.

L'analyse se fait en se basant sur le traitement d'image. Les images sont prises par un microscope optique, caméra ...

Pour l'analyse on a utilisé deux méthodes, la première est un programme écrit sous MATLAB. Pour que notre travail soit clair et approuvé, une autre méthode est utilisée avec logiciel appelé (Image J). Les deux méthodes donnent à peu près les mêmes pourcentages pour chaque produit. Ainsi elles valident les mélanges traités dont on connaît la composition. L'estimation de la pureté par traitement d'image pour les matériaux granulaires est beaucoup plus précise que dans le cas des particules micromisées.

Finalement le travail effectué nous permet de déterminer le pourcentage de deux produits dans un mélange millimétrique ou bien micrométrique, composé des particules homogènes (même taille) et dont les couleurs sont différentes pour augmenter l'efficacité des systèmes.

Perspectives de recherche :

La thèse ouvre des perspectives sur de nouveaux problèmes de recherche dans le domaine de la séparation triboélectrostatique des mélanges de particules fines isolantes:

- ✓ Approfondir l'étude par l'utilisation d'autres matériaux isolants micronisés qui n'ont pas fait partie de notre étude. Ceci permettra d'améliorer les conclusions sur le séparateur à deux plaques parallèles en mouvement.
- ✓ Développer la conception du nouveau dispositif (séparateur à deux plaques parallèles en mouvement) avec un système de récupération automatique pour maintenir la continuité de la séparation.
- ✓ Elargir l'exploitation du système dans l'industrie de recyclage.
- ✓ Incorporer la technique d'analyse d'images dans le nouveau séparateur de mélange en continu, contenant des poudres de couleurs ou de tailles différentes.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] J.M, Crowley, “Fundamentals of Applied Electrostatics”, Morgan Hill, California, Laplacian Press, 1999.
- [2] H. Kama, Y. Kiyomura, N. Seki, “Method and apparatus for feeding and carrying ground plastic and electrostatic separator for ground plastic”, Matsushita Electric Co Ltd. Patent No: JP 2002 177 820, 2002.
- [3] Project founded by the European Community under the Industrial & Materials Technologies Programme. “Electrostatic recovery of paper and plastic packaging wastes”, Synthesis report. Project No. BE96 – 3243, 2001.
- [4] Wei, J., Realf, M.J. “Design and optimization of drum-type electrostatic separators for plastics recycle”. In: Industrial and Engineering Chemistry Research. 44 (10), 3503-3509 (2005).
- [5] Nicoara. S, Calin. L, Iuga. A, Serban. N” Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose”. In: Environment and Progress. 6, 341-346, (2006).
- [6] Ralston, O.C. Electrostatic Separation of Mixt Granular Solids. Amsterdam, Elsevier, 1961, pp.162-172.
- [7] Schmoutziguer, W.S., MCGovern, J.J. “Tribocharging in separating apparatus”. Outokumpu, Patent No: GB 2 351 928, 2001.
- [8] Stencil, J.M., Schaefer, J.L., Neathery, J.K., Ban, H., Finseth, D. “Electrostatic particle separation system, apparatus, and related method”. US Patent No: 6 498 313, 2002.
- [9] Taylor, D.M., Secker, P.E. Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements. New York, John Wiley&Sons, 1994, pp. 82-104.
- [10] Dascalescu. L, Dragan. C, Bilici. M, Beleca. R, Hemery. Y, Rouau. X, “Electrostatic Bases for Separation of Wheat Bran Tissues”. In: IE EE Transactions and Industry Applications, 659 – 665, 46 (2010).
- [11] Haga, K. “Applications of the electrostatic separation technique”. In: Handbook of Electrostatic Processes. Chang, J.S., Kelly, A.J., Crowley, J.M. (Editors). New York, Marcel Dekker, 1995, pp. 365-386.
- [12] Dragan C., “Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéro-électrostatique de matériaux plastiques granulaires”. Thèse de Doctorat Université de Poitiers, 2010.
- [13] Widmer. R, Oswald-Krap. H, Sinha-Khetriwal, D, Schnellmann, M, Böni, H, “Global perspectives on e-waste”. Environmental Impact Assessment Review, vol. 25 (5), pp. 436–458, 2005.
- [14] A.Tilmatine, Y.Benmimoun, S.Bendimered, K.Medles, L.Dascalescu, “Electrostatic separators of particles. Application to the recovery of industrial wastes” European Journal of Electrical Engineering, Article vol 13/3, 2010, pp.283-296.
- [15] Coelho.R, Levy.L, &Sarrail.D. (1989). Charge decay measurements and injection in insulators. Journal of Physics D: Applied Physics, 22(9), 1406.

Références Bibliographiques

- [16] White H. J., "Industrial electrostatic precipitation", Wesley Publishing Company, Inc., 1963.
- [17] P. W. Chdleigh, "Charge transport through a polymer foil", journal of applied physics, vol. 48, n°11, P. 4591-4596, (1977).
- [18] G.M. Sessler, "Models of charge Transport in electron-beam irradiated insulators", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.11, P. 192-212, (2004).
- [19] Zelmat.MEM "Etude Expérimentale sur les Dispositifs d'acquisition de Charge Triboélectrique des Particules de plastique en vue de la séparation électrostatique" Thèse Doctorat. Université. Sidi Bel Abbès.2013
- [20] A.Tilmatine,"Etude et réalisation d'un séparateur électrostatique des mélanges granulaires" Exploitation Industrielle" Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Sidi Bel Abbès, janvier 2004.
- [21] S.Das, K.Medles, M.Younes, L.Dascalescu,"Separation of Fine Granular Mixtures in S-Plate-Type Electrostatic Separators Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 43, Issue 5, Sept-Oct 2007.
- [22] R.-H. Yoon, G. H. Luttrell, E. S. Yan and A. D. Walters: « Poc-scale testing of a dry triboelectrostatic separator for fine coal cleaning » Report Period (September 27, 1995 to April 30, 2001)Center for Coal and Minerals Processing Virginia Polytechnic Institute & State University Blacksburg, Virginia 24061-0258.
- [23] McCarty L.S, Whitesides G.M, "Electrostatic charge due to separation of ions at interfaces: Contact electrification of ionic electrets". In: Angewandte Chemie International Edition, 47, 2188, 2008.
- [24] Hammi, T. (2005). Étude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles (Doctoral dissertation, Lille 1).
- [25] Iuga.A, Mihailescu.M.,Cocis.A., &Dascalescu.L (1997). Particle charge neutralization in roll-type electro-separators. Journal of electrostatics, 40, pp639-644.
- [26] Boukhoulda MF « Séparation Electrostatique Des Matériaux Plastiques Provenant Des Equipements Informatiques en Utilisant La Tribo-électrisation » Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Sidi Bel Abbès, 2014.
- [27] M.Miloudi, « Application de la charge par effet triboélectrique des matériaux granulaires dans la séparation électrostatique», Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel Abbès, Nov. 2012.
- [28] Reguieg.A et Yahia.SA «Etude expérimentale sur l'acquisition de charge électrique par effet triboélectrique» Mémoire de master. Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, juillet 2012.
- [29] Blajan.M, Beleca.R, Iuga.A, Dascalescu.L, "Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46 (4), pp. 1558-1563, 2010.

Références Bibliographiques

- [30] Park.C. H., Park.J. K., Jeon.H. S., &Chun.B.C.(2008).Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger. *Journal of Electrostatics*, 66(11), 578-583.
- [31] Atten. P, Denat. A, “Convection and Breakdown in fluids”2nd International Workshop on Electrical Conduction, Grenoble, France, 2000.
- [32] Tilmatine.A, Bendimerad.S, Medles.K, Bendaoud.A, Younes.M, Dascalescu.L, “Set point identification and robustness testing of a free-fall triboelectrostatic separation process” IEEE/Industry Applications Society Annual Meeting Edmonton, Canada, 5-9 Oct. 2008, DOI 10.1109/08IAS.2008.102 Page(s):1 - 7.
- [33] Escalante.S.L, Touchard.G, Dominguez.G, “Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 694-697, 2002.
- [34] 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.
- [35] Benabboun.A, Tilmatine.A, Brahami.Y, Bendimerad.S.E, Miloudi.M, & Medles.K. (2014). Experimental Investigation of Electrostatic Separators of Plastic Particles using Different Charging Devices. *Separation Science and Technology*, 49(3), 464-468.
- [36] A.Benabboun, M.Rezoug, Y.Brahami, Tilmatine.A, M.Zelmat, Miloudi.M, A.Bendaoud "Etude comparative des dispositifs d'acquisition de charge triboélectrique pour les séparateurs de particules plastique"5th fourth international conference on electrotechnics ICEL 2013, December 03-04.
- [37] A.Benabboun, ME.Zelmat, A.Tilmatine, A.Bendaoud, M.Miloudi, K.Medles, «Etude expérimentale d'un nouveau dispositif d'acquisition de charge triboélectrique pour les séparateurs de particules de plastique », Ajour Algerian journal of technologie, 9^{ème} conférence nationale sur la haute tension, pp 297-301, CNHT 2013.
- [38] Boukhoulda.MF, Miloudi.M, Medles.K, Rezoug.M, Tilmatine.A, Dascalescu.L "Experimental Modeling of a New Tribo-electrostatic Separation Process for Mixed Granular Polymers", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Volume: 50, Issue: 4 Publication Year: 2013 , Page(s): 1971 – 1976.
- [39] F.Boukhoulda, K.Medles., M.Miloudi., A.Tilmatine., A.Bendaoud., & L.Dascalescu, (2013, October). Effect of ambient humidity on the outcome of electrostatic separation process for mixed granular polymers. In *Industry Applications Society Annual Meeting*, 2013 IEEE (pp. 1-5).
- [40] Bilici.M, Dascalescu.L, Barna.V, György.T, Rahou.F, & Samuila.A, (2011, October). Experimental modeling of the tribo-aero-electrostatic separation of mixed granular plastics. In *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 2011 IEEE (pp. 1-6). IEEE.
- [41] Bendimerad.S, Tilmatine.A, Ziane.M, & Dascalescu.L, (2009). Plastic wastes recovery using free - fall triboelectric separator. *International Journal of Environmental Studies*, 66(5), 529-538.

Références Bibliographiques

- [42] Said.A et Haffaf.M encadreur : A.Tilmatine co-encadreur : Y.Brahami «Etude et analyse expérimentale de la pureté d'un séparateur de particules fines» Mémoire de master, université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, juin 2016.
- [43] A.Tilmatine, S.Bendimerad, M.Younes, and L.Dascalescu, "Experimental analysis and optimisation of a free-fall triboelectric separator of granular plastic particles," *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 2, pp. 184–191, 2009.
- [44] L.Dascalescu, A.Tilmatine, F.Aman and M.Mihailescu. "Optimisation of electrostatic separation processes using response surface modeling," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, VOL. 40, N°.1, JANUARY/FEBRUARY 2004.
- [45] K.Medles, A.Tilmatine, A.Bendaoud, M.Rahli, L.Dascalescu, "Set Point Identification and Robustness Testing of Electrostatic Separation Processes," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol.3, MAY/JUNE 2007. ISSN: 0197-2618.
- [46] **Y.Brahami, A.Tilmatine, MN.Brahami, A.Benabboun Facteurs Influençant L'efficacité d'un Séparateur à Disques Rotatifs Destiné aux Particules Fines. 5th fourth international conference on electrotechnics ICEL 2013, Oran December 03-04.**
- [47] **Benabboun.A, Brahami.Y, Tilmatine.A, Bendaoud.A, Miloudi.M, & Dascalescu.L, (2013, October). Experimental investigation of a new tribo-electrostatic separation process for mixed fine granular plastics. In Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE (pp. 1-5).**
- [48] **Benabboun.A, Tilmatine.A, Brahami.Y, Bendimerad.SE, Miloudi.M, &Medles.K, (2014). Experimental Investigation of Electrostatic Separators of Plastic Particles using Different Charging Devices. Separation Science and Technology, 49(3), pp 464-468.**
- [49] **Bendimerad.SE, Tilmatine.A, Medles.K, Miloudi.M, Brahami.Y, &Dascalescu.L, (2014). Robustness testing of a free-fall triboelectric separation process for plastic waste recovery. International Journal of Sustainable Engineering, 7(4), pp 284-292.**
- [50] **Tilmatine.A, Benabboun.A, Brahami.Y, Bendaoud.A, Miloudi.M, & Dascalescu.L, (2014). Experimental investigation of a new triboelectrostatic separation process for mixed fine granular plastics. IEEE Transactions on Industry Applications, 50(6), pp 4245-4250.**
- [51] **Brahmi.Y, Tilmatine.A, Ouiddir.R, Bendaoud.A, Medles.K, &Dascalescu.L.(2015). Experimental Modeling of a New Triboelectrostatic Separation Process for Micronized Plastics. IEEE Transactions on Industry Applications, 51(5), pp 4145-4150.**
- [52] **Brahmi.Y, Tilmatine.A, Bendimerad.SE, Miloudi.M, Zelmat.MEM, & Dascalescu.L (2016). Tribo-aero-electrostatic separation of micronized mixtures of insulating materials using "back-and-forth" moving vertical electrodes. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 23(2), pp 669-704.**

Références Bibliographiques

- [53] Y.Brahami, A.Tilmatine, SE.Bendimerad, M.Miloudi, L.Dascalescu, **Analyse expérimentale d'un nouveau dispositif de séparation tribo-électrostatique de particules micronisées à électrodes verticales en mouvement «va-et-vient» 9^{ème} conférence de la Société Française d'Electrostatique, 27-29 août 2014, Toulouse, France.**
- [54] K.Medles, «Modélisation et optimisation des procédés de séparation électrostatique des mélanges granulaires plastiques », Thèse Doctorat, Université de .Sidi Bel Abbès, 2006.
- [55] Umetrics AB; MODDE 5.0, User guide and tutorial, Umetrics, Umea, Sweden, 1999.
- [56] Medles.K, Dascalescu.L, Tilmatine.A, Bendaoud.A, and Younes.M « Experimental Modelling of the electrostatic separation of granular materials » Particulate science and thechnology, Volume 25, Issue 2 March 2007, Pages 163-171, ISSN :1548-0046.
- [57] V. Gente, F.L. Marca, F. Lucci and P. Massacci, "Electrical separation of plastics coming from special waste," Waste Manag 23, 951–958, 2003.
- [58] I.I. Inculet, G.S.P. Castle and J.D. Brown, "Electrostatic separation of plastics for recycling, » Part Sci. & Technol., pp. 1691–100, 1998.
- [59] Jia Li, Hongzhou Lu, Shushu Liu, Zhenming Xu, "Optimizing the operating parameters of corona electrostatic separation for recycling waste scraped printed circuit boards by computer simulation of electric field,"Journal of Hazardous Materials, vol. 153, Issues 1–2, pp. 269–275. 2008.
- [60] F.S. Ali, I.I. Inculet and A. Tedoldi, "Charging of polymer powder inside a metallic fluidized bed," J Electrostat; vol. 45, pp. 199–211, 1999.
- [61] Said.A et Haffaf.M encadreur : Y.Brahami «Etude expérimentale d'un nouveau séparateur électrostatique des particules fines à deux électrodes verticales» Mémoire de licence, université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, juin 2014.
- [62] Hallouche.B et Hamdaoui.FZ encadreur : Y.Brahami «Analyse expérimentale d'un dispositif de séparation tribo-électrostatique de particules micronisées à électrodes horizontales en mouvement» Mémoire de licence, université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, juin 2015.
- [63] M.Bergounioux «Quelques méthodes mathématiques pour le traitement d'image» Université D'orleans.2008-2009.
- [64] S.Mourad «Compression des images numériques par la technique des ondelettes» Mémoire de magister. Université UFAS (Algérie) .2011
- [65] S.Touhami «Classification non supervisée de pixels d'images couleur par analyse d'histogrammes tridimensionnels » Mémoire de DEA. UNIVERSITE ANGERS. 2005
- [66] M.Dupas «Algorithme des K plus proches voisins pondérés (WKNN) Et Application en diagnostic ». Unité Mixte de Recherche CNRS-BIO-RAD .34184 Montpellier Cedex 4.

Références Bibliographiques

- [67] T.Boulay «Développement d’algorithmes pour la fonction NCTR Application des calculs parallèles sur les processeurs GPU »Thèse de doctorat, UNIVERSITE PARIS-SUD.2013
- [68] C.Ammarcha «mélange des poudres en continu : modèles dynamiques et caractérisation des mélanges en ligne ».Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE TOULOUSE 2010.
- [69] Jinho. Kim,Byung.Soo Kim, and Silvio.Savarese «Comparing Image Classification Methods: K-Nearest-Neighbor and Support-Vector-Machines». UNIVERSITY OF MICHIGAN ANN ARBOR, MI 48109-2122.
- [70] F.Chandez, G.Montarou «Analyse avec le logiciel Image J d'un lot d'images en microscopie par immunofluorescence de cellules fibroblastes irradiées en X a l'E.S.R.F. » "HAL Id: in2p3-00530281" ; <http://hal.in2p3.fr/in2p3-00530281>.2010.
- [71] Benabboun.A “Contribution à l'étude de la séparation des particules fines pour application dans l'industrie de recyclage “ Thèse de Doctorat. Université. Sidi Bel Abbes. Juin 2016.

Réalisation et étude expérimentale d'un nouveau séparateur triboélectrique à électrodes plaques immergées dans le mélange de particules fines.

Résumé

Lorsque deux matériaux différents sont frottés l'un contre l'autre, ils acquièrent chacun une charge électrique de signes opposés ; ce type d'acquisition de charge, connu depuis l'antiquité et portant le nom de triboélectricité, représente la base du principe de fonctionnement des séparateurs triboélectriques des mélanges granulaires de particules isolant/isolant. La séparation des mélanges de particules fines reste de nos jours un défi non encore totalement maîtrisé. Une synthèse globale sur les systèmes d'acquisition de charge par effet triboélectrique a été faite, en mettant l'accent sur les particules fines, voire très fines. Un banc expérimental est réalisé qui comprend un nombre pair d'électrodes (positives et négatives alternées) plongées dans un mélange de particules fines pour séparation, en mouvement va-et-vient vertical et horizontal. L'objectif principal recherché est de charger et séparer les particules fines dans un séparateur électrostatique, dont l'application ciblera l'industrie.

Mots clés

Séparateur électrostatique, particules fines, haute tension, industrie agroalimentaire, industrie des mines.

انجاز و دراسة تجريبية جديدة لفاصل كهربائي تريبويكترىك ذو لوحات كهربائية تتحرك ذهابا وإيابا منغمسين في مميعة لجسيمات دقيقة

عندما يفرك اثنين من مواد مختلفة ضد بعضها البعض، كل منهما يكتسب شحنة كهربائية من علامة معاكسة، هذا النوع من اكتساب الشحنات معروف منذ العصور القديمة وأطلق عليه اسم تريبويكترىك، يظهر مبدأ عمل فواصل التريبويكترىك للجسيمات الدقيقة العازلة / العازلة. يبقى فصل مخاليط الجسيمات الدقيقة الى يومنا هذا من تحديات الذي لم يتقن تماما. تم إجراء موجزا شاملا لنظم اكتساب شحنات كهربائية من تأثير تريبويكترىك، بالتركيز على الجسيمات الدقيقة، حتى الميكرونية. تم انجاز نموذج تجريبي الذي يضم عددا زوجيا من الأقطاب الكهربائية (بالتناوب الإيجابية والسلبية) منغمسين في خليط من جسيمات دقيقة للفصل بينهما، في الحركة العمودية والأفقية للتنقل ذهابا وإيابا. الهدف الأساسي الذي نسعى اليه هو شحن وفصل الجسيمات الدقيقة في فاصل إلكتروستاتي، والتطبيق الذي يهدف الى صناعة الأدوية والمواد الغذائية.

الكلمات المفتاحية

فاصل إلكتروستاتي، الجسيمات الدقيقة، الجهد العالي، الصناعات الزراعية، صناعة التعدين.