

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Génie Electrique
Département d'Electrotechnique

Thèse présentée par :

BENABBOUN Adel

Pour l'obtention du diplôme de :

**Doctorat 3^{ème} Cycle : Réseaux électriques/Commande des
actionneurs électrique**
Option : Réseaux électriques

Intitulé de la thèse :

***Contribution à l'étude de la séparation des particules fines pour
application dans l'industrie de recyclage***

Présentée devant le jury composé de :

Pr.BENDAOU Abdelber
Pr.TILMATINE Amar
Pr.SAYAH Houari
Pr.RIZOUGA Mohamed
Dr.ZELMAT Med Elmouloud

Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)
Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)
Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)
Professeur (U.S.T. Oran)
MC. A (U.S.T. Oran)

Président
Directeur de thèse
Examineur
Examineur
Examineur

Soutenue le : 26 / 06 / 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. «Louanges à DIEU, notre Créateur, notre Guide, notre Protecteur et notre Bienfaiteur».

En préambule à cette thèse, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à tous ceux qui m'ont apporté leur aide et m'ont permis de rédiger cette thèse avec plus de facilités.

Je tiens à exprimer ma gratitude à monsieur TILMATINE Amar qui, en tant que directeur de thèse, s'est toujours montré à l'écoute par sa disponibilité tout au long de la réalisation de cette thèse, ainsi pour son inspiration et son aide et sans lequel, ce travail n'aurait pu être élaboré; il a toujours été d'une extrême bienveillance à mon égard. J'ai été honoré de réaliser le travail qui m'a été confié et particulièrement encouragé par ses conseils éclairés.

En outre, j'adresse mes remerciements les plus sincères à monsieur BENDAOU Abdelber pour avoir accepté de présider le jury, tout comme j'adresse ma profonde reconnaissance à messieurs : SAYAH Houari, RIZOUGA Mohamed et ZELMAT Mohamed Elmouloud pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce modeste travail.

Par la même occasion, je voudrais également remercier monsieur MEDLES Karim.

Mes remerciements vont aussi à ma famille et mes amis. Merci à Mohamed, Said, Wessim, Abdelkader "R", Yacine, Youssouf, Amir, Nadjib, Kadirou, Hamada, Farouk, Habib, Houari, Sofiane.

Un merci tout particulier à ma femme, mes frères pour leurs soutiens qui m'ont été bien utile durant ma thèse.

Je ne pourrais terminer sans avoir à remercier particulièrement mes collègues du Laboratoire ainsi tous ceux ou celles qui m'ont apporté tout soutien et en particulier Aicha et Djilali.

Je dédie cette thèse à mes parents

SOMMAIRE

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	1
CHAPITRE I: ETAT DE L'ART	
<i>I.1. DEFINITION D'UN POLYMERE</i>	4
<i>I.1.1. Les thermoplastiques</i>	5
<i>I.1.2. Les thermodurcissables</i>	5
<i>I.1.3. Les origines des déchets plastiques</i>	6
<i>I.1.4. Propriétés diélectriques des polymères</i>	6
<i>I.2. MECANISME DE CHARGE DES PARTICULES</i>	8
<i>I.2.1. Charge «naturelle» par attachement des ions</i>	8
<i>I.2.2. Triboélectrisation</i>	8
<i>I.2.2.1. Electrification par frottement</i>	8
<i>I.2.2.2. Electrification par contacte</i>	9
<i>I.2.2.3. Principaux travaux sur la triboélectricité</i>	9
<i>I.2.3. Chargement par charge d'espace ionique</i>	11
<i>I.3. SERIE TRIBOELECTRIQUE</i>	12
<i>I.4. MESURES DE CHARGES ELECTRIQUES</i>	14
<i>I.4.1. Cylindre de Faraday</i>	14
<i>I.5. FORCES A L'ORIGINE DE L'ADHESION DES PARTICULES MICRONISEES ENTRE ELLES OU A DES SURFACES SOLIDES</i>	15
<i>I.5.1. Forces de London-Van der Waals (F_{vdw})</i>	15
<i>I.5.2. Forces capillaires (F_{cap})</i>	16
<i>I.5.3. Forces électrostatiques (F_{es})</i>	16
<i>I.5.4. Forces aérodynamiques</i>	18
<i>I.6. THEORIE DE LA SEPARATIONS ELECTROSTATIQUES</i>	19
<i>I.7. DISPOSITIFS D'ACQUISITION DE CHARGE TRIBOELECTRIQUE</i>	20
<i>I.7.1. Chargement par lit fluidisé</i>	20
<i>I.7.2. Chargement par chargeur statique</i>	21
<i>I.7.3. Chargement fluidostatique</i>	21
<i>I.7.4. Chargement par ventilateur</i>	22
<i>I.8. SEPARATEURS TRIBOELECTRIQUES A LIT FLUIDISE</i>	22

<i>I.8.1. Séparateur à électrodes cylindriques tournantes</i>	22
<i>I.8.2. Dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales</i>	23
<i>I.8.3. Séparateur électrostatique à chute libre à lit fluidisée</i>	24
<i>I.8.4. Séparateur tribo aéro électrostatique</i>	25
<i>I.9 CONCLUSION</i>	25

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

<i>II.1. DESCRIPTION SEPARATEUR A DEUX DISQUE ROTATIFS</i>	28
<i>a. Les électrodes</i>	30
<i>b. L'arbre</i>	30
<i>c. Chambre de séparation</i>	31
<i>d. Boite de répartition de l'air injecté</i>	32
<i>e. Bacs collecteurs</i>	33
<i>f. Moteur à courant continu</i>	33
<i>g. Alimentations haute tension</i>	34
<i>II.2. TYPES DE PARTICULES UTILISEES</i>	34
<i>II.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SEPARATEUR</i>	35
<i>II.4. PROCEDURE EXPERIMENTALE</i>	35
<i>II.4.1. Expérience de séparation</i>	35
<i>II.4.2. Mesure de la charge</i>	38
<i>II.5. METHODOLOGIE DES PLANS D'EXPERIENCES</i>	41
<i>II.5.1. Notion d'espace expérimental</i>	42
<i>II.5.1.1. Plans factoriels</i>	42
<i>II.5.1.2. Plans factoriels complets</i>	43
<i>II.5.2. Plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponse</i>	44
<i>II.5.3 Plan composite centré</i>	44
<i>II.5.4 Logiciels des plans d'expérience</i>	45
<i>II.6. CONCLUSION</i>	46

**CHAPITRE III: ETUDE EXPERIMENTAL PARMITRIQUE DU
SEPARATEUR A DEUX DISQUES ROTATIFS**

<i>III.1. CHARGEMENT DES PARTICULES FINES</i>	47
<i>III.2 TYPES DES COLLISIONS DANS LE SEPARATEUR A LIT FLUIDISE</i>	48
<i>a) Collision des particules de même matière</i>	49
<i>b) Collision des particules de matière différente</i>	49
<i>c) Collision entre les particules et les parois interne de la chambre de fluidisation</i>	50
<i>III.3 ETUDE EXPERIMENTALE</i>	51
<i>III.3.1 Analyse de l'efficacité de séparation</i>	51
<i>a) Etude de l'influence de la haute tension appliquée</i>	51
<i>b) Etude de l'influence de la vitesse de rotation des disques</i>	54
<i>c) Etude de l'influence de débit d'air injecté</i>	55
<i>d) Etudes l'influence de la masse introduite</i>	57
<i>III.3.2 Analyse de la charge acquise</i>	59
<i>a) Influence de la masse des particules sur la charge acquise</i>	59
<i>b) Influence de la vitesse de rotation des disques</i>	63
<i>c) Influence de débit d'air injecté sur la charge acquise</i>	65
<i>III.4 CONCLUSION</i>	66

**CHAPITRE IV: MODELISATION ET OPTIMISATION DU PROCEDE DE
SEPARATION**

<i>IV.1. ESSAIS PRELIMINAIRES POUR LA DETERMINATION DES DOMAINES D'ETUDE DES VARIABLES</i>	68
<i>IV.2. MODELISATION DU SEPARATEUR TRIBO-AERO ELECTROSTATIQUE A DEUX DISQUES ROTATIFS</i>	71
<i>IV.2.1. Choix des intervalles d'étude</i>	71

<i>a-Intervalle d'étude du champ électrique</i>	71
<i>b-Intervalle d'étude de la vitesse de rotation des disques</i>	71
<i>c-Intervalle d'étude du débit de l'injection d'air</i>	72
<i>IV.2.2. Plan d'expérience complet et modèle du premier degré</i>	72
<i>a) Résultats des expérimentations</i>	73
<i>b) Détermination des effets du modèle mathématique</i>	73
<i>c) Analyse de variance</i>	75
<i>IV.2.3. Plan d'expériences composite et modèle de deuxième degré</i>	77
<i>IV.2.4. Influence des facteurs choisis sur les réponses</i>	84
<i>IV.2.5. Détermination du point de fonctionnement optimale</i>	85
<i>IV.3. CONCLUSION</i>	87
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	88
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	90
<i>ANNEXES</i>	97

SOMMAIRE

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	1
CHAPITRE I: ETAT DE L'ART	
<i>I.1. DEFINITION D'UN POLYMERE</i>	4
<i>I.1.1. Les thermoplastiques</i>	5
<i>I.1.2. Les thermodurcissables</i>	5
<i>I.1.3. Les origines des déchets plastiques</i>	6
<i>I.1.4. Propriétés diélectriques des polymères</i>	6
<i>I.2. MECANISME DE CHARGE DES PARTICULES</i>	8
<i>I.2.1. Charge «naturelle» par attachement des ions</i>	8
<i>I.2.2. Triboélectrisation</i>	8
<i>I.2.2.1. Electrification par frottement</i>	8
<i>I.2.2.2. Electrification par contacte</i>	9
<i>I.2.2.3. Principaux travaux sur la triboélectricité</i>	9
<i>I.2.3. Chargement par charge d'espace ionique</i>	11
<i>I.3. SERIE TRIBOELECTRIQUE</i>	12
<i>I.4. MESURES DE CHARGES ELECTRIQUES</i>	14
<i>I.4.1. Cylindre de Faraday</i>	14
<i>I.5. FORCES A L'ORIGINE DE L'ADHESION DES PARTICULES MICRONISEES ENTRE ELLES OU A DES SURFACES SOLIDES</i>	15
<i>I.5.1. Forces de London-Van der Waals (F_{vdw})</i>	15
<i>I.5.2. Forces capillaires (F_{cap})</i>	16
<i>I.5.3. Forces électrostatiques (F_{es})</i>	16
<i>I.5.4. Forces aérodynamiques</i>	18
<i>I.6. THEORIE DE LA SEPARATIONS ELECTROSTATIQUES</i>	19
<i>I.7. DISPOSITIFS D'ACQUISITION DE CHARGE TRIBOELECTRIQUE</i>	20
<i>I.7.1. Chargement par lit fluidisé</i>	20
<i>I.7.2. Chargement par chargeur statique</i>	21
<i>I.7.3. Chargement fluidostatique</i>	21
<i>I.7.4. Chargement par ventilateur</i>	22
<i>I.8. SEPARATEURS TRIBOELECTRIQUES A LIT FLUIDISE</i>	22

<i>I.8.1. Séparateur à électrodes cylindriques tournantes</i>	22
<i>I.8.2. Dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales</i>	23
<i>I.8.3. Séparateur électrostatique à chute libre à lit fluidisée</i>	24
<i>I.8.4. Séparateur tribo aéro électrostatique</i>	25
<i>I.9 CONCLUSION</i>	25

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

<i>II.1. DESCRIPTION SEPARATEUR A DEUX DISQUE ROTATIFS</i>	28
<i>a. Les électrodes</i>	30
<i>b. L'arbre</i>	30
<i>c. Chambre de séparation</i>	31
<i>d. Boite de répartition de l'air injecté</i>	32
<i>e. Bacs collecteurs</i>	33
<i>f. Moteur à courant continu</i>	33
<i>g. Alimentations haute tension</i>	34
<i>II.2. TYPES DE PARTICULES UTILISEES</i>	34
<i>II.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SEPARATEUR</i>	35
<i>II.4. PROCEDURE EXPERIMENTALE</i>	35
<i>II.4.1. Expérience de séparation</i>	35
<i>II.4.2. Mesure de la charge</i>	38
<i>II.5. METHODOLOGIE DES PLANS D'EXPERIENCES</i>	41
<i>II.5.1. Notion d'espace expérimental</i>	42
<i>II.5.1.1. Plans factoriels</i>	42
<i>II.5.1.2. Plans factoriels complets</i>	43
<i>II.5.2. Plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponse</i>	44
<i>II.5.3 Plan composite centré</i>	44
<i>II.5.4 Logiciels des plans d'expérience</i>	45
<i>II.6. CONCLUSION</i>	46

**CHAPITRE III: ETUDE EXPERIMENTAL PARMITRIQUE DU
SEPARATEUR A DEUX DISQUES ROTATIFS**

<i>III.1. CHARGEMENT DES PARTICULES FINES</i>	47
<i>III.2 TYPES DES COLLISIONS DANS LE SEPARATEUR A LIT FLUIDISE</i>	48
<i>a) Collision des particules de même matière</i>	49
<i>b) Collision des particules de matière différente</i>	49
<i>c) Collision entre les particules et les parois interne de la chambre de fluidisation</i>	50
<i>III.3 ETUDE EXPERIMENTALE</i>	51
<i>III.3.1 Analyse de l'efficacité de séparation</i>	51
<i>a) Etude de l'influence de la haute tension appliquée</i>	51
<i>b) Etude de l'influence de la vitesse de rotation des disques</i>	54
<i>c) Etude de l'influence de débit d'air injecté</i>	55
<i>d) Etudes l'influence de la masse introduite</i>	57
<i>III.3.2 Analyse de la charge acquise</i>	59
<i>a) Influence de la masse des particules sur la charge acquise</i>	59
<i>b) Influence de la vitesse de rotation des disques</i>	63
<i>c) Influence de débit d'air injecté sur la charge acquise</i>	65
<i>III.4 CONCLUSION</i>	66

**CHAPITRE IV: MODELISATION ET OPTIMISATION DU PROCEDE DE
SEPARATION**

<i>IV.1. ESSAIS PRELIMINAIRES POUR LA DETERMINATION DES DOMAINES D'ETUDE DES VARIABLES</i>	68
<i>IV.2. MODELISATION DU SEPARATEUR TRIBO-AERO ELECTROSTATIQUE A DEUX DISQUES ROTATIFS</i>	71
<i>IV.2.1. Choix des intervalles d'étude</i>	71

<i>a-Intervalle d'étude du champ électrique</i>	71
<i>b-Intervalle d'étude de la vitesse de rotation des disques</i>	71
<i>c-Intervalle d'étude du débit de l'injection d'air</i>	72
<i>IV.2.2. Plan d'expérience complet et modèle du premier degré</i>	72
<i>a) Résultats des expérimentations</i>	73
<i>b) Détermination des effets du modèle mathématique</i>	73
<i>c) Analyse de variance</i>	75
<i>IV.2.3. Plan d'expériences composite et modèle de deuxième degré</i>	77
<i>IV.2.4. Influence des facteurs choisis sur les réponses</i>	84
<i>IV.2.5. Détermination du point de fonctionnement optimale</i>	85
<i>IV.3. CONCLUSION</i>	87
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	88
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	90
<i>ANNEXES</i>	97

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Les séparateurs tribo-électrostatiques permettent de séparer des mélanges de plastique par un processus économique à sec, indépendamment de la densité, de la couleur et de la forme, par un procédé basé sur les constants diélectriques des différents matériaux.

Le secteur de la séparation des déchets de matières plastiques connaît un essor important depuis une vingtaine d'années. Cette évolution est directement liée, d'une part, à la prise de conscience de préoccupations environnementales graves (dues aux développements industriels anarchiques et risqués qui s'étaient opérés), et d'autre part, à l'ampleur grandissante des déchets divers qui ne trouvaient pas d'autres issues que la mise en décharge.

Les plastiques sont omniprésents dans notre vie. Au-delà de leurs atouts, une fois consommés, ils génèrent des déchets volumineux par rapport à leur poids. Ces déchets occupent un volume important dans les points de collecte et autres installations de gestion de déchets dont les centres d'enfouissements techniques. Leur dissémination dans la nature est durable et inesthétique car leur biodégradabilité est, dans la plupart des cas, faible. Il y a donc lieu d'encourager leur recyclage. Malheureusement, la multiplicité des types de matière plastique et de composition d'une même matière plastique, l'incompatibilité de certains polymères entre eux et la difficulté de reconnaître et de séparer les différents polymères induisent de nombreux problèmes au niveau, notamment, du tri sélectif, en particulier pour les déchets plastiques de post-consommation.

La diversité des installations et des technologies de séparation électrostatique des particules granuleuses, utilisant l'effet triboélectrique pour la charge des granules plastiques dans l'industrie de recyclage des plastiques est impressionnante. Le tri des particules ayant des caractéristiques électriques différentes est produit par des forces qui agissent sur les objets chargés ou polarisés dans un champ électrique assez intense.

L'objectif de cette thèse de doctorat 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.

Malgré les efforts de recherche visant à la réalisation et l'optimisation de divers types de séparateurs électrostatiques, l'application industrielle d'une telle technologie reste problématique pour des particules micronisées. Des rendements élevés sont obtenus pour les mélanges granulaires de taille millimétrique, par contre les procédés de séparation des particules de taille micrométrique sont moins efficaces, en raison des forces aérodynamiques qui affectent leurs trajectoires. Cette thèse s'inscrit dans ce cadre et tend à proposer une nouvelle solution pour les particules micronisées.

La séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants est basée sur deux opérations successives qui consistent d'abord à charger le produit granulaire en employant un dispositif de triboélectrisation (lit fluidisé, tube tournant, tribo-cyclone, plan vibrant, etc..). Ensuite, le mélange chargé est séparé dans un champ électrique intense en utilisant un séparateur à chute libre ou à cylindre tournant. Cependant quand il s'agit de particules fines, une quantité significative du produit est perdue en raison de la force aérodynamique qui donne à de telles particules des trajectoires aléatoires.

Après des généralités sur l'électrostatique nous avons présenté les notions de base sur la triboélectricité et les différents séparateurs existants. Nous avons réalisé un dispositif au laboratoire APELEC, en collaboration avec le laboratoire IRECOM et de l'équipe « Electrostatique » de l'IUT d'Angoulême, avec comme objectif de produire un meilleur séparateur à deux disques rotatifs, destiné particulièrement aux particules micronisées de taille de l'ordre de 10 μm .

Ce dispositif, de part la multiplicité de ses paramètres de réglage offrant ainsi la possibilité d'étudier l'influence de chacun d'eux sur le processus de séparation, est un appareil de laboratoire destiné pour des travaux de recherche scientifique, mais aussi comme un moyen préalable pour passer à un modèle industriel.

Le contenu de la thèse est réparti en quatre chapitres :

Dans le **1er chapitre**, quelques définitions sur les polymères sont passées en revue et quelques concepts sur les phénomènes physiques qui régissent les charges triboélectriques des granules isolants. Nous avons présenté quelques dispositifs de chargement

triboélectrique conçus et réalisés au sein du laboratoire, qui ont constitué un grand atout pour l'ensemble des chercheurs pour mieux comprendre et cerner les phénomènes de chargement triboélectrique. Quelques notions générales sur l'électrostatique et les principes de fonctionnement de certains dispositifs de séparation électrostatique par l'effet triboélectrique à lit fluidisé sont également décrits.

Le **second chapitre**, traite la conception et la réalisation du séparateur triboélectrique à deux disques rotatifs à lit fluidisé, ainsi que le matériel et les méthodes utilisées. Une des grandes difficultés de la séparation électrostatique est le choix les 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 disques rotatifs. Cette étude concerne les expériences préliminaires de la récupération, ainsi que l'étude de la charge massique acquise par les particules après séparation. D'un autre côté, plusieurs expériences de séparation ont été effectuées sur des échantillons de mélanges granulaires de particules micronisées de PVC blanc et PVC gris.

Le **quatrième chapitre** est consacré à la modélisation puis l'optimisation de ce procédé de séparation en utilisant la méthodologie des plans d'expériences, afin de modéliser et d'optimiser l'efficacité de la séparation du séparateur à deux disques rotatifs, et ce après l'étude des expériences préliminaires.

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

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

Chapitre I

ETAT DE L'ART

La séparation électrostatique est un terme générique donné à une importante classe de technologies de traitement des déchets industriels, largement utilisée pour le triage des mélanges granulaires grâce à des forces électriques agissant sur les granules chargées ou polarisées; Elle deviennent de plus en plus une préoccupation mondiale a cause de l'augmentation des déchets d'équipements électriques et électroniques d'une façon très progressive. [1]

I.1 Définition d'un polymère

Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelées motifs) et préparée à partir de molécules appelées monomère [2].

Le nombre moyen de ces unités de base (monomères) dans les molécules finales (polymères) représente le degré de polymérisation. Si ce degré est élevé, on parle de hauts polymères par contre s'il est faible, le composé est une oligomère [3]. Le nom des polymères est généralement dérivé de celui du monomère en ajoutant le préfixe poly Exemple : polyéthylène, poly(acide glycolique), polytétrafluoroéthylène, polyimideetc. Une macromolécule est caractérisée par sa masse molaire M qui est en rapport avec le degré de polymérisation x représentant le nombre d'unités de la répétition dans la macromolécule par la relation simple [4].

$$M = x \cdot M_0 \quad (I-1)$$

Où M_0 est la masse molaire de l'unité de la répétition [5].

On modifie les propriétés des polymères en leur mélangeant des charges minérales thermiquement stables et pratiquement insensibles à la température. On cherche par exemple à augmenter le module de rigidité et, pour les semi-cristallins, à retarder aussi la chute du module en approchant la zone de fusion. L'étirage macroscopique rapide d'un polymère

fondu entraîne une orientation partielle des chaînes individuelles qui, bien qu'encore enchevêtrées, présentent une anisotropie macroscopique de leurs propriétés [6].

D'une façon générale, un polymère est un mélange de macromolécules de différentes tailles et de compositions variées si l'on a différents monomères. Ainsi, on peut caractériser un polymère par [3] :

- sa composition chimique moyenne
- sa masse moléculaire moyenne
- son degré de polymérisation
- sa structure (amorphe ou semi-cristallin).

Les polymères peuvent être divisés en polymères thermoplastiques, polymères thermodurcissables ou polymère élastomères.

I.1.1 Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des polymères qui se déforment et sont façonnables sous l'action de la chaleur. Cette propriété permet leur recyclage [7,8]. On trouve aujourd'hui de nombreux types de thermoplastiques offrant une vaste gamme de propriétés intéressantes. On peut les rendre aussi souples que le caoutchouc, aussi rigides que le métal et le béton, ou aussi transparents que le verre, pour un usage dans de nombreux produits de tuyauterie et autres composants. Certains d'entre eux peuvent supporter des températures atteignant 315 °C. D'autres conservent leurs propriétés jusqu'à -73 °C. Ils ne s'oxydent pas, ont une haute résistance à la corrosion et sont d'excellents isolants thermiques et électriques. De par leur légèreté, leur haute résistance mécanique et leur résistance aux effets de l'environnement, les thermoplastiques constituent un matériau idéal pour les installations de tuyauteries industrielles, commerciales et d'habitations [9]. Les thermodurcissables

I.1.2 Les thermodurcissables

Les polymères thermodurcissables prennent leur forme définitive au premier refroidissement, la réversibilité est impossible [7].

I.1.3 Les origines des déchets plastiques

Les déchets plastiques ont différentes origines :

- Les déchets de l'industrie du plastique (rebus et ratés de production et de transformation).
- Les plastiques contenus dans les ordures ménagères (bouteilles, flacons, gobelets, films...).
- Les déchets de démolition du bâtiment.
- Les emballages industriels et commerciaux.
- Les résidus de broyage automobiles.
- Les plastiques agricoles (films, paillages...).
- Les plastiques issus des déchets d'équipements électriques et électroniques [3].

I.1.4 Propriétés diélectriques des polymères

Un diélectrique est le siège de deux types de charges (figure I.1) : les charges liées, qui font partie de la structure même du matériau, et les charges libres, qui peuvent être surfaciques ou injectées de la surface ou encore qui peuvent apparaître suite à la dissociation des chaînes moléculaires à cause du vieillissement.

De ce fait, lorsqu'un diélectrique est soumis à un champ électrique extérieur, il y a apparition des phénomènes de conduction et de polarisation. Le premier est la résultante de l'action du champ sur les charges libres, tandis que le second résulte de l'action du champ sur les charges liées. Il est à noter que toute matière est composée d'atomes qui contiennent à leur tour des charges positives et négatives d'égale quantité.

Lorsqu'un matériau est soumis à un champ extérieur, ses molécules internes, composées de charges liées, se trouvent sous l'action d'une force électrique qui tend à les orienter dans la direction du champ. Ainsi, les charges négatives sont pausées dans le sens inverse au champ et les charges positives dans le même sens du champ de sorte que le matériau devient chargé positivement sur une face et négativement sur l'autre.

Supposons que le diélectrique est mis entre deux armatures alimentées à partir d'une source de tension continue, l'orientation des charges liées entraîne l'apparition d'une densité de charge de polarisation ρ_p à la surface du matériau qui annule une partie des charges portées par les armatures. Puisque la tension doit demeurer constante, la source compense la partie des charges neutralisées, ce qui se traduit par un courant dans le circuit extérieur [10]. D'autre part, si le diélectrique est chargé en surface sa polarisation entraîne l'annulation progressive des charges surfaciques et donc leur déclin au cours du temps.

Le phénomène de polarisation est fonction de la structure interne des matériaux, qui peuvent être généralement séparés en matériaux polaires et apolaires [11-12].

Dans les matériaux polaires, tels que le polyamide, le polychlorure de vinyle ou la résine époxy, des dipôles existent même en absence de champ.

Ces dipôles résultent de la déformation du nuage électronique le long d'une liaison chimique dissymétrique. En l'absence de champ, ces dipôles sont en règle générale orientés aléatoirement, et par conséquent, la polarisation macroscopique est nulle. Sous l'effet d'un champ électrique appliqué, ces dipôles sont soumis à un couple qui tend à les orienter dans sa direction. La polarisation produite par l'orientation dipolaire étant importante, la permittivité des matériaux polaires est supérieure aux matériaux apolaires.

Dans les matériaux apolaires, tels que le polyéthylène ou le polycarbonate, il y a absence de dipôles lorsque le champ est nul. Les dipôles se forment suite à un champ appliqué.

Le tableau I.1 donne la permittivité relative de certains polymères à 50 Hz.

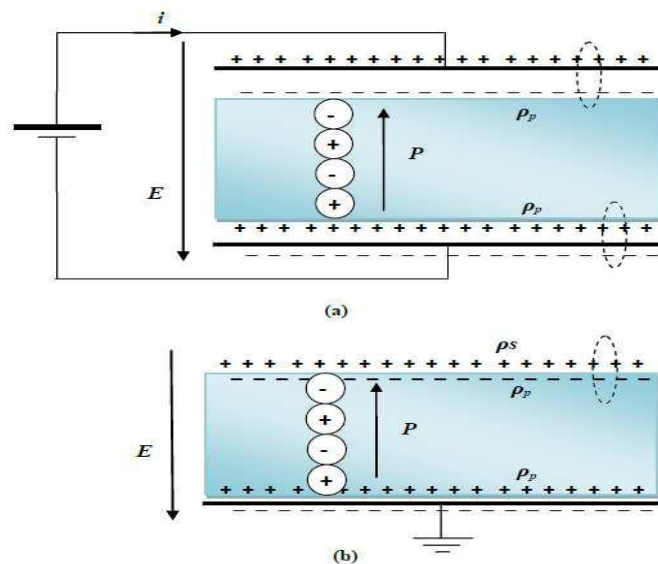


Figure I.1 : Phénomène de polarisation : (a) diélectrique sous tension, (b) diélectrique chargé en surface seulement.

Tableau I.1 : permittivité relative de certains polymères à 50 Hz [12].

Polymères	Permittivité relative ϵ_r
Polyéthylène	2,3
Polycarbonate	2,97
Polyamide 6-6	3,6 à 2,5
ABS	2,6 à 2,5

I.2 Mécanisme de charge des particules

Les fines particules en suspension dans l'air peuvent recueillir des charges électriques grâce à plusieurs mécanismes qui sont : la charge « naturelle » par attachement des ions existant dans l'atmosphère, la triboélectrisation (regroupant la charge par contact et la charge par frottement) et la charge par charge d'espace ionique (regroupant la charge par champ et la charge par diffusion; les ions gazeux étant produit dans ce cas principalement à l'aide d'une source radioactive ou d'une décharge électrique). La densité d'ions peut être unipolaire (positive ou négative utilisée pour la charge des particules) ou bipolaire (utilisée pour la neutralisation).

I.2.1 Charge «naturelle» par attachement des ions

Dans l'atmosphère terrestre, il existe des ions positifs et négatifs générés sans interruption par l'action des radiations cosmiques et des gaz radioactifs émanant du sol. Comme présenté par Hinds [13], l'air contient environ 1000 ions/cm^3 avec en première approximation un nombre égal d'ions positifs et négatifs. Les particules fines qui sont initialement neutres, peuvent acquérir une charge par collision (due à leur mouvement thermique aléatoire) avec des ions. Les particules chargées vont avoir tendance à perdre leur charge lentement en attirant des ions de signe opposée. Donc, ce processus tend vers un état d'équilibre appelé « distribution de charge en équilibre de Boltzmann ». Cet équilibre de Boltzmann représente la distribution de charge d'une particule fine en présence d'ions bipolaires.

I.2.2 Triboélectrisation

La triboélectrisation regroupe deux causes d'électrisation : le frottement et le contact.

I.2.2.1 Electrification par frottement

a) Tous les corps frottés attirent les corps légers: les forces ainsi mises en jeu sont attribuées à *l'électrisation*, c'est-à-dire à l'apparition d'électricité à la surface du corps frotté. Cette électrisation est plus ou moins facile suivant le matériau dont le corps est constitué : les matériaux sont dits plus ou moins «électrophores».

b) Pour certaines substances (verre, plexiglas...) l'électrisation ne se manifeste que sur la partie frottée, autrement dit l'électricité reste localisé là où elle s'est développée ; pour cette raison, ces substances sont dites **isolantes** de l'électricité. Signalons encore que les corps constitués de ces substances peuvent être tenu à la main au cours le leurs électrisation : le phénomène n'est pas modifié.

Pour d'autres substances (cuivre, aluminium...), l'électrisation n'apparaît que si le corps

frotté est tenu par l'intermédiaire d'un manche isolant ; après électrisation, le pouvoir attractif se manifeste sur tout le corps et non plus seulement sur la région frottée : l'électricité se répend sur toute la surface du corps ; pour cela, ces substances sont dites conductrices de l'électricité. Il existe deux espèces d'électricité et deux seulement. On leur a donné les noms de charge positive et de charge négative ;

Deux charges de mêmes noms se repoussent ;

Deux charges de noms contraires s'attirent.

Cela conduit :

À attribuer respectivement aux charges positive et négative les signes (+) et (-).

À considérer ces charges comme des grandeurs algébriques.

Un corps électriquement neutre porte une quantité d'électricité algébriquement nulle. On dit que ce corps est électriquement neutre par compensation.

I.2.2.2 Electrification par contacte

L'électrification par frottement, qui donne naissance à la *triboélectricité*, est connue depuis plusieurs millénaires. Le contact entre deux matériaux est, en fait, suffisant pour produire un phénomène d'électrification [14].

La charge par contact se produit pendant la séparation de particules sèches et non-conductrices de surfaces solides [13][15][16]. Dans ce processus, quand une particule touche une surface, des charges sont transférées, si bien que la particule acquiert une charge nette positive ou négative quand elle se sépare de la surface. La polarité de la particule chargée et le nombre de charges sur celle-ci dépendent des matériaux et de leurs positions relatives dans les séries triboélectriques [13], Il s'agit d'une table dans laquelle les matériaux sont classés dans un ordre tel que tout élément de la série devrait se charger positivement par rapport à tout élément classé au-dessus de lui dans la série et négativement par rapport à tout élément classé au-dessous.

I.2.2.3 Principaux travaux sur la triboélectricité

En 1834, *Péclet* montre grâce à son étude quantitative que l'énergie électrique maximum obtenue ne dépend pas de la pression du frottement [17].

Une théorie a été proposée par *Helmholtz* (1879) [18] ; il admet qu'au contact de deux substances quelconques, il existe une double couche électrique de très faible épaisseur; quand on sépare les deux surfaces, on sépare les charges positives et négatives; la tension croît en raison inverse de la capacité, d'où les forts potentiels obtenus. *Lichtenberg*, et plusieurs

chercheurs ont réussi à électriser positivement et négativement deux morceaux du même isolant frottés l'un contre l'autre, expérience inexplicable dans les idées de *Helmholtz*.

Les différences de potentiel au contact reparaissent dans la «loi de *Coehn* » [19]. Elle s'énonce: les substances de grande constante diélectrique se chargent positivement au contact des substances à faible constante diélectrique, En effet, dans ce cas l'isolant se polarise plus facilement et cède des électrons à l'autre corps contre lequel il est frotté. *Coehn* et *Raydt* démontrent que la différence de potentiel est proportionnelle à la différence des constantes diélectriques [20].

Le phénomène de frottement n'intéresse que les couches très superficielles. Comme beaucoup de métaux usuels sont recouverts d'une couche d'oxyde ou d'hydrocarbonate, le métal se charge positivement au contact d'un isolant. C'est le cas dans les expériences de *Gill* et *Alfrey* [21]; on fait rouler des grains d'ébonite dans une gouttière métallique; l'ébonite se charge négativement. Les chercheurs placent alors parallèlement à la gouttière une plaque métallique qui permet de produire un champ au voisinage de l'ébonite; si la plaque est positive, la charge négative augmente; si elle est négative la charge diminue et peut s'inverser. Il s'agit de champs qui ne dépassent pas quelques centaines de volts par centimètre. Un tel champ pourrait donc modifier l'émission d'électrons par la couche d'oxyde.

Jones (1915) mesure à la fois le travail de frottement et la charge acquise; les courbes montrent comme *Péclet* l'avait déjà vu que Q atteint un maximum constant [22].

Richards étudie l'électrisation par choc; il constate que le contact simple n'électrise pas [23]. Le frottement est donc nécessaire pour l'électrisation, L'auteur l'attribue à l'inertie des électrons.

D'après tout ce qui précède, A fin de charger un matériau, le frottement apparaît comme absolument indispensable ; on ne peut pas créer des électrons. *M. E. Darmois* admet ce résultat et il suppose que, dans le frottement de deux solides, l'un au moins subit une abrasion, c'est-à-dire une destruction de la pellicule superficielle [24]. Dans cette pellicule existaient des liaisons assurées par des charges électriques : électrons, protons, ions; l'abrasion met ces charges en liberté; elles se portent sur celui des deux corps qui a pour elles une affinité suffisante, la matière en se rompant libère des électrons. Il faut donc distinguer dans les séries triboélectriques deux choses différentes :

- la libération des charges due à la rupture de certaines liaisons.
- le partage des charges positives et négatives ainsi apparues.

Bernal et *Fowler*, démontrent qu'une charge importante tiendrait à la fois à la perte d'électrons et à la fixation de protons [25].

Lowell et *Rose-Innes* ont conclu que le transfert des électrons est extrêmement indispensable pour le chargement d'un isolant par la triboélectricité [26].

La majorité des chercheurs ont supposé que la tribo-charge des isolants implique le transfert d'électrons [27,28]. En revanche, *H. Longchambon* a signalé d'après tous les cas examinés, que lorsque deux matériaux différents sont mis en contact triboélectrique, ils acquièrent des charges électriques dû aux libérations d'ions, et on peut conclure qu'il est nécessaire qu'un individu cristallin soit rompu [29].

Touchard admet ce modèle « modèle de conduction ionique », qui considère le transfert d'ions comme un mécanisme de transfert de charge pour les isolants [30]. Défauts du réseau cristallin, l'absorption de l'eau, des additifs dans les polymères, etc. peuvent être des sources d'ions, si ce mécanisme compte dans le processus d'échange de charge.

Whitesides et *Mc Carthy* ont utilisé une série des ions mobiles, dans le but de démontrer que la perte d'ions est une explication véritable pour la tribo-électrisation des matériaux isolants [31].

Harper a conclu que le transfert des charges électriques par la tribo-électrisation des isolants implique le transfert d'ions et non pas d'électrons [32].

Ce qui est évident, la triboélectricité est un phénomène multifactoriel, difficilement définissable, la tribo-électrification des isolants implique le transfert d'électrons ou bien d'ion reste une question sans réponse, malgré qu'elle constitue l'un des principaux éléments de caractérisation de ce mécanisme compliqué qui représente la branche de l'électricité avec la plus longue histoire.

I.2.3 Chargement par charge d'espace ionique

Nous présentons dans cette section la phénoménologie de la charge des particules dans un champ électrique affecté par une charge d'espace ionique. Les mécanismes de charge sont expliqués et on présente, d'une manière critique, les modèles théoriques de charge les plus souvent utilisés dans l'étude de la précipitation électrostatique.

Précédemment, nous avons dit que la force de Coulomb qui s'exerce principalement sur les particules chargées, est la principale cause de mise en mouvement des particules dans les filtres électrostatiques. Une augmentation de la charge des particules est donc nécessaire afin de produire leur migration vers les électrodes collectrices du précipitateur. Cela peut être provoqué par une forte densité d'ions due à une décharge couronne dans l'espace inter-électrodes.

Ce mécanisme de décharge sera décrit par la suite. Le processus de charge dépend alors de plusieurs facteurs parmi lesquels les plus importants sont la densité de charge ionique,

l'intensité du champ électrique local, ainsi que la taille des particules. De nombreuses études [13][5][33][34] ont montré que le procédé de charge peut être principalement attribué à deux mécanismes :

- la charge par champ
- la charge par diffusion

Quel que soit le mécanisme, la charge électrique acquise par une particule est le résultat des interactions entre celle-ci et les ions résultant de la décharge couronne. Les deux mécanismes de charge interviennent ensemble et leur importance relative est déterminée principalement par les dimensions des particules et l'intensité du champ électrique.

I.3 Série triboélectrique

Deux corps frottés l'un sur l'autre s'électrisent l'un positivement et l'autre négativement [35]. On appelle série triboélectrique un classement des divers matières dans un ordre tel que, de deux matières qui se suivent, la première est positive. Plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée. Certains de telles séries sont proposées par des anciens auteurs. *Wilcke* (1759), *Faraday* (1840), *Jamin* et *Bouty* donnent à peu près la même série [36]. Une série beaucoup plus étendue a été donnée par *Shaw* (1917) qui a pris la peine de définir un peu mieux les échantillons employés [37]; il a aussi étudié l'influence de la température qui peut produire des inversions, etc. Les séries triboélectriques varient en tout cas d'un chercheur à l'autre et chaque série reflète la culture matérielle de son moment historique. En effet une différence dans le frottement, des facteurs externes peuvent inverser les signes obtenus, il semble donc impossible de réaliser une liste avec un ordre fiable; le fait que les signes peuvent s'inverser de manière si facile, est très surprenant.

La série suivante (tableau I.2) a été réalisée par *Bill Lee* en (2009), c'est un tableau qui peut être utilisé pour sélectionner des matériaux qui permettront de réduire la charge statique, et peut également être utilisé pour prédire les forces statiques qui surgiront entre les surfaces des matériaux [38].

Tableau I.2 : Série triboélectrique

Nom d'isolant	Rapport de la charge [nC/J]	Charge acquise si frotté avec du métal (F: faible, N: normal)	Remarques
Mousse de polyuréthane	+60	+N	Tous les matériaux sont des bons isolants
Cheveux, la peau grasse	+45	+N	peau conductrice
Polyuréthane solide, remplie	+40	+N	Un peu conducteur
Nylon, peau sèche	+30	+N	peau conductrice
Huile pour machine	+29	+N	/
Verre (soude)	+25	+N	Un peu conducteur (Dépend de l'humidité)
Papier (copie non couché)	+10	-F	Un peu conducteur
Bois (pin)	+7	-F	/
Coton	+5	+N	légèrement conducteur
Laine	0	-F	/
Polycarbonate	-5	-F	/
ABS	-5	-N	/
Côté acrylique (polyméthacrylate de méthyle)	-10	-N	/
PET (mylar) chiffon	-40	-F	/
PET (mylar) solide	-40	+F	/
Gomme de caoutchouc	-60	-N	A peine conductrice
Polystyrène	-70	-N	/
Polyamide	-70	-N	/
Silicones	-72	-N	/
Vinyle: flexible (tuyau transparent)	-75	-N	/
Le nitrate de cellulose	-93	-N	/
PVC (vinyle rigide)	-100	-N	/
Teflon	-190	-N	Très électronégatif

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...etc. En définitive ce diagramme n'est qu'un outil de comparaisons relatives entre les différents corps plutôt qu'une référence absolue.

En fait, 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 [39,40].

Le frottement augmente le nombre de charges acquises. Parce qu'il requiert des surfaces sèches, le phénomène de charge par contact devient inefficace en conditions d'humidité relative plus grande que 65% environ. L'humidité et la contamination des surfaces peuvent modifier fortement les résultats. En particulier, l'humidité superficielle augmente la densité superficielle d'états en permettant le transfert de charges ioniques. Mais elle augmente simultanément la conduction de surface qui permet la recombinaison des charges. Certains auteurs ont montré que la teneur en eau d'un polymère pouvait donner des variations de la charge en fonction du temps, voire des changements de polarité [41].

I.4 Mesures de charges électriques

I.4.1 Cylindre de Faraday

La mesure directe de la charge électrique est établie sur un même principe de base : un capteur relié à un appareil de mesure dont la base est un voltmètre. L'impédance d'entrée de ce voltmètre doit être la plus grande possible, afin d'éviter toute consommation de la part de ce dernier.

Le cylindre de Faraday se présente comme un récipient métallique (d'ailleurs pas forcément cylindrique) à l'intérieur duquel on introduit les échantillons chargés (figure I.2). Ce récipient est placé dans un autre, métallique lui aussi, mais isolés l'un de l'autre. Le récipient extérieur est relié à la terre et fait office de blindage contre les parasites extérieurs. Pour mesurer la charge électrique d'un échantillon, il suffit de l'introduire dans le cylindre intérieur, 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 :

$$Q = CV \tag{I.2}$$

L'intérêt est que l'on obtient une estimation précise de la charge nette de l'échantillon puisque pratiquement toutes ses lignes de champs se ferment dans le cylindre. Cependant, il est impossible de faire la distinction entre un échantillon ne portant pas de charges électriques

d'un échantillon qui présenterait des zones chargées positivement et négativement mais qui se compenseraient exactement. Dans ce dernier cas de figure, les zones chargées restent potentiellement dangereuses même si la mesure au cylindre de Faraday donne une charge nulle.

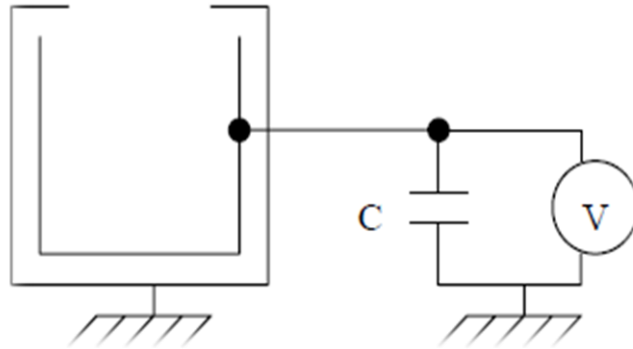


Figure I.2 : Schéma de principe de cylindre de Faraday

I.5 Forces à l'origine de l'adhésion des particules micronisées entre elles ou à des surfaces solides

I.5.1 Forces de London-Van der Waals (F_{vdw})

Les interactions entre molécules, ont été introduites par Lord Van der Waals pour décrire le comportement des molécules d'un gaz. Ces interactions portent le nom des "forces de Van der Waals (F_{vdw})". Elles consistent en trois principaux types : force d'orientation de Keesom, force d'induction de Debye et force de dispersion [42]. Après la découverte de la structure de base des atomes et de la théorie issue de la mécanique quantique, London (1930, 1937) a décrit la force d'attraction agissant entre deux molécules par une loi de variation en $1/z^6$ (z étant la distance qui sépare les centres de deux molécules) [43]. Toutefois cette théorie n'est pas valide lorsque la distance z entre les molécules est très petite, c'est à dire, pas plus d'un ou deux fois le diamètre des molécules ou très grandes, c'est à dire, plus de 1 nm. Pour des distances supérieures à 100 nm, Casimir et Polder (1948) ont proposé une loi de variation en $1/z^7$.

Pour deux solides macroscopiques, Hamaker (1937) a supposé que la force totale d'interaction est la résultante de toutes les interactions moléculaires relatives aux surfaces des deux solides en contact [44]. Ainsi si on considère deux sphères identiques (lisses, même nature et non déformable) de diamètre d_1 et d_2 (avec $d_1 = d_2 = d$) et distantes de z , la force de Van der Waals peut s'écrire sous la forme suivante:

$$F_{vdw} = \frac{A_H d}{24z^2} \quad (I.3)$$

A_H est la constante de Hamaker [44].

L'équation (I.3) reste applicable pour tous types de particules sphériques et lisses tant que d et d est largement plus grands que z . ces interactions inter particulaires sont supposées uniquement induites à courte portée.

Dans le cas de deux sphères de rayons R_1 et R_2 , avec $R_1 \neq R_2$, l'équation (I.1) s'écrit:

$$F_{vdw} = \frac{A_H}{6Z^2} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (I.4)$$

I.5.2 Forces capillaires (F_{cap})

Les forces capillaires résultent de la condensation d'un liquide (très souvent l'eau) présent dans l'espace entre deux corps contigus. Ces forces dépendent de la géométrie de l'espace séparant les deux solides et des propriétés des matériaux en contact (énergie libre de surface, rugosité) [45].

Quand la surface des particules est mouillée par une certaine quantité de liquide, des ponts liquides apparaissent sous forme de ménisques concaves (Figure I. 3).

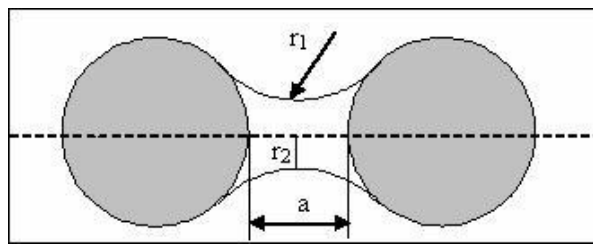


Figure I.3 : Pont liquide entre deux particules sphériques identiques

Quand les particules sont séparées par une distance a , la force d'adhésion du pont liquide est plus faible et est proportionnelle à cette distance et à la quantité de liquide disponible.

I.5.3 Forces électrostatiques (F_{es})

La plupart des particules isolantes portent des charges électriques qui peuvent s'accumuler accidentellement ou délibérément. Pour de plus grosses particules, les changements électrostatiques se produisent fréquemment durant le transport ou la manipulation (Seville, 1997). Trois types de forces électrostatiques peuvent être distingués:

➤ **Forces de Coulomb** : C'est en 1785, le physicien français Charles-Augustin de Coulomb découvre expérimentalement l'expression décrivant le module de la force électrique que s'exercent deux charges électriques immobiles disposées sur des sphères (Figure I.4).

La loi de Coulomb est une méthode de définition et de mesure des charges ponctuelles par la mesure de la force de répulsion et de leur distance qui nous permet de mesurer leur charge commune.

La force agissant entre deux particules chargées s'écrit [46] :

$$F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (I.5)$$

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, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ et ϵ_0 étant la permittivité du vide.

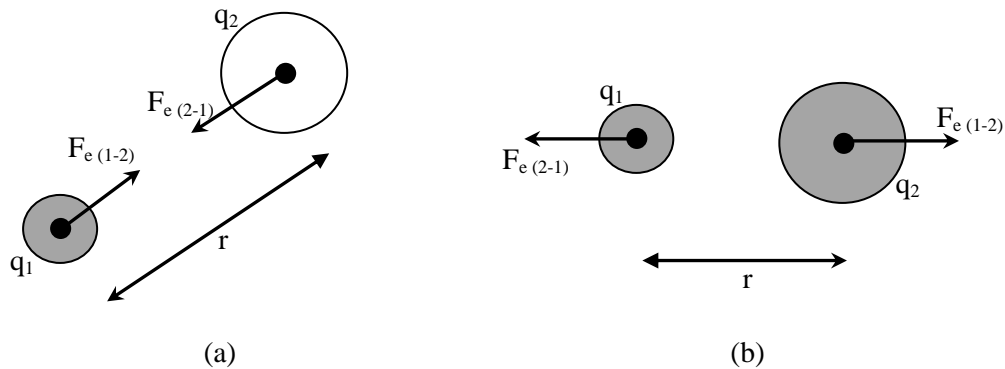


Figure I.4 : Force de coulomb entre deux sphères chargées

(a) : attraction, charges signes contraires ($q_1 q_2 < 0$)

(b) : répulsion, charges signes semblables ($q_1 q_2 > 0$)

- **Forces de charge dans l'espace :** chaque particule dans un nuage de particules chargées est affectée par ces interactions avec toute autre particule.
- **Forces par image de charge :** lorsqu'une particule chargée approche d'une surface, elle induit une charge d'image sur la surface.

La force d'adhésion totale (F_{ad}) est la somme de ces différentes forces d'interactions : F_{vdw} , F_{cap} et F_{es} .

$$F_{ad} = F_{vdw} + F_{cap} + F_{es} \quad (I.6)$$

Cependant, en absence d'un champ à haute tension et pour des distances étroites entre deux

solides contigus, les forces de Van der Waals sont au moins 10 fois plus grandes que les forces électrostatiques. Ceci reste valide si les forces capillaires sont présentes (Podczeck, 1997) [42].

Dans son ouvrage, Podczeck (1997) développe d'une manière détaillée les facteurs pouvant influencer l'adhésion entre les particules et les surfaces [42], en particulier, la rugosité, le travail d'adhésion et l'énergie libre de surface, les propriétés des matériaux (dureté, élasticité,..), la taille et la forme des particules.

I.5.4 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 :

$$F_i = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad (I.7)$$

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 :

$$F_i = W(\rho_s - K\rho) \frac{dv}{dt} \quad (I.8)$$

Où :

v : la vitesse de particule

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

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

ρ : densité de l'air.

La force aérodynamique s'écrit :

$$F_a = \frac{C_d \pi R^2 \rho v_r^2}{2} \quad (I.9)$$

Ca étant en fonction du nombre du Reynolds : $Re = \frac{v.L}{\nu_i}$

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.6 Théorie de la séparation électrostatique

En tout état de séparateur, les particules en suspension dans un milieu et en les soumettant à une force de séparation qui agit sur une certaine propriété de particules provoque la séparation.

Dans tous les cas de séparations électrostatiques, la force de séparation primaire est donné par:

$$F = Q \times E \quad (\text{I.10})$$

Où F est la somme vectorielle de toutes les forces, Q est la charge totale et E est l'intensité de champ électrique à un point dans l'espace. En réalité, les forces secondaires comme la gravitation, la force du courant d'air, etc., doivent également être considérés. Toutefois, les deux paramètres E et Q sont essentiels à la compréhension de séparations électrostatiques. Cependant, si oui ou non une particule a une charge à son entrée dans un champ électrique dépend fortement de sa conductivité, et par conséquent la connaissance de la conductivité relative des particules est également importante. Dans le cas où un tribocharger est utilisé, la charge développée sur les particules est la force d'attraction entre les particules chargées et une surface d'électrode peut être donnée par la relation suivante:

$$F \propto dE/dH$$

Où E est l'intensité du champ et dE / dH représente le gradient de champ. H indique la distance de séparation entre les surfaces d'électrode, dans l'équation. Dans séparateurs électrostatiques classiques de type plaque, le gradient de champ est uniforme et que la force ne change pas avec la position. Dans un non-uniforme ou un gradient de champ ouvert setup, la force d'attraction varie en fonction de la position de la particule chargée dans la zone d'influence. L'intensité du champ lui-même est une fonction du potentiel appliqué à la surface d'électrode. Donc, plus le potentiel appliqué, plus grande est l'intensité du champ électrique. En tout cas, il ya une distance minimale de séparation des électrodes qui doit être maintenu afin que le champ ne pas arc.

I.7 Dispositifs d'acquisition de charge triboélectrique

Dans un corps neutre, il y a autant de charges positives que négatives. Il peut arriver qu'un objet neutre à l'origine perde ou gagne des charges négatives. Il suffit pour cela qu'il soit frotté contre un autre objet.

Si on suppose que chaque matière est composée d'atomes (il s'agit de la plus petite partie d'un corps), de la manière suivante :

- Un noyau, solide, qui contient des charges positives (protons) et des charges neutres (neutrons).
- Autour du noyau, se trouvent différents électrons (chargés négativement) qui équilibrent la charge de l'atome : à la base, il y a autant de protons que d'électrons, afin que le corps soit neutre.

Lorsqu'un atome, électriquement neutre, perd ou gagne des électrons, on l'appelle alors ion. S'il gagne des électrons, il se charge négativement (-) : c'est un anion. En revanche, s'il perd des électrons, il se charge positivement (+) : c'est un cation.

Il existe plusieurs procédés d'acquisition de charge triboélectrique pour permettre aux granules d'acquérir la charge électrique. Parmi les procédés les plus utilisés on cite.

I.7.1 Chargement par lit fluidisé

Ce procédé est celui qui est le plus utilisé pour l'acquisition de charge par effet triboélectrique. Le mélange de particules déposé sur un support en tamis est ensuite mis en agitation en soufflant de l'air (figure I.5). Les particules qui sont ainsi en agitation dans un lit fluidisé acquièrent des charges électriques de signes opposés grâce aux collisions entre elles. Il y a dans ce cas peu de charge acquise par collisions avec la paroi du dispositif [47].

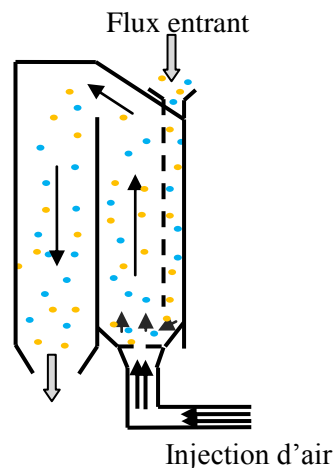


Figure I.5 : Représentation schématique de dispositif d'acquisition de charge électrique par lit fluidisé

I.7.2 Chargement par chargeur statique

Les particules de plastique tombent verticalement dans le chargeur et glissent à l'intérieur suivant leurs forces de gravitation sur les parois de plexiglas, chaque un de ces parois est incliné par un angle de 60° (figure I.6). La charge acquise est un résultat d'un frottement entre les granules et les parois [47].

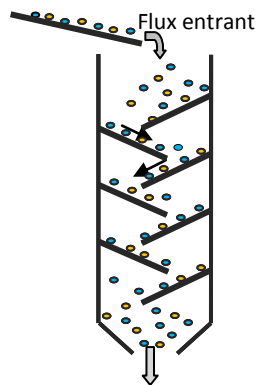


Figure I.6 : Représentation schématique du dispositif d'acquisition de charge par chargeur statique

I.7.3 Chargement fluidostatique

C'est une combinaison de deux modes de chargement en cascade, le procédé est une chambre parallélépipédique isolante comprend deux partie (figure I.7) : la première pour le chargement aéro-triboélectrique (à lit fluidisé), après avoir mit les particules en agitation dans un lit fluidisé, elles sont dirigés vers la deuxième partie du dispositif destiné au chargement statique par des parois inclinées, dont le but de pouvoir mieux contrôler la charge acquise, multipliant les paramètres de chargement [48-49].

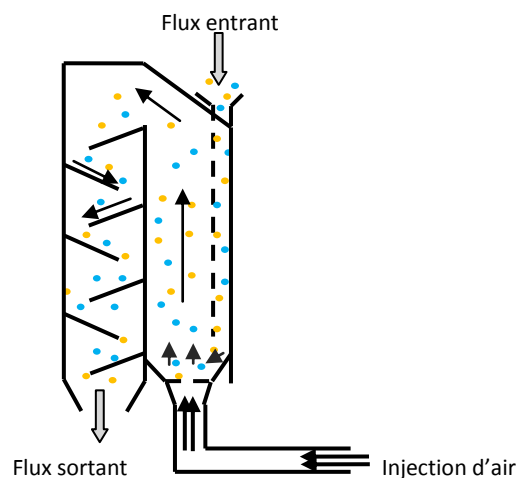


Figure I.7 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique

I.7.4 Chargement par ventilateur

La rotation de l'hélice crée un courant d'air descendant donnant naissance à des turbulences aérodynamique multipliant les collisions des particules granulaires à l'intérieur de cylindre. Les particules granulaires isolantes sont placés dans le dispositif de chargement triboélectrique, puis le moteur à courant continu est mis en marche pendant une durée déterminée et à une vitesse désirée. Les particules isolantes se mettent en mouvement et deux types de collisions se produisent l'une des particules contre les parois du cylindre, la seconde les particules entre elles (figure I.8) [48].

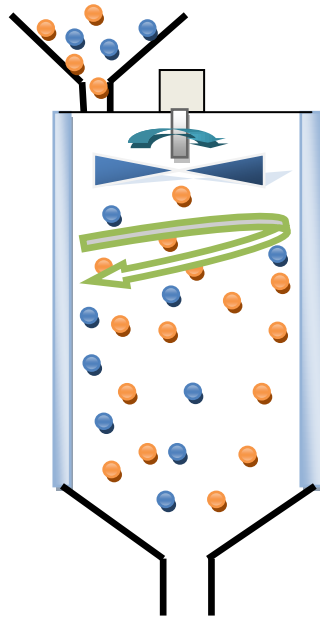


Figure I.8: Représentation schématique de dispositif d'acquisition de charge par ventilo

I.8 Séparateurs triboélectriques à lit fluidisé

Lorsque l'on soumet deux matériaux de nature différente soit à un simple contact soit à une épreuve de frottement, ils échangent des charges électriques. Ce phénomène est connu sous le nom de *triboélectricité*. La charge électrique acquise par les différentes particules est nécessaire pour le tri des granules dans un champ électrique intense. La séparation triboélectrique est une technologie propre utilisée pour le recyclage des matières plastiques contenues dans les déchets [50].

I.8.1 Séparateur à électrodes cylindriques tournantes

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

utilise des tambours conducteurs reliés à des arbres entrainés par des moteurs (figure I.9) dont le but est de diminuer la traversée des particules, et de réduire le coût du séparateur ainsi qu'augmenter sa robustesse [51,52].

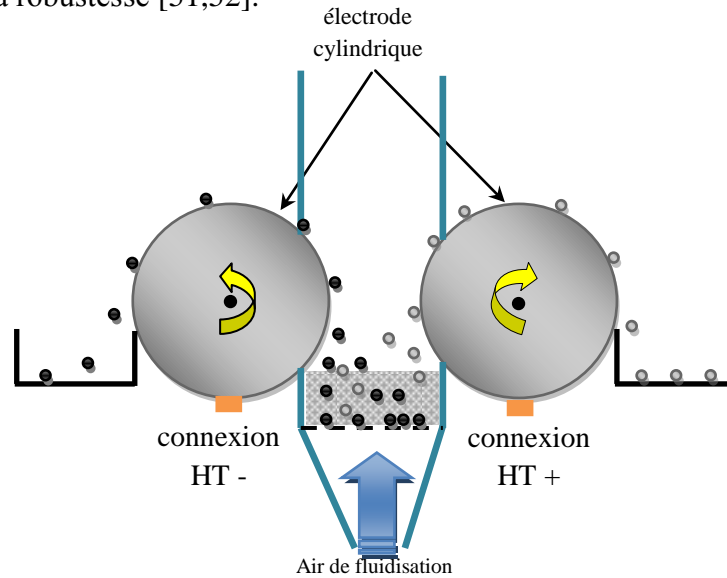


Figure I.9 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à cylindres tournant

I.8.2 Dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales

Ce dispositif à lit fluidisé est constitué de deux parties : d'un prisme rectangulaire (115 mm x 85 mm x 400 mm), avec deux parois verticales opposées en polycarbonate, les deux autres plaques d'aluminium alimentées par deux sources de haute tension continues de polarités inverses la seconde partie forme la chambre d'air en forme de cube en PMMA dont le rôle principale est de diffuser et uniformiser l'air [53-54].

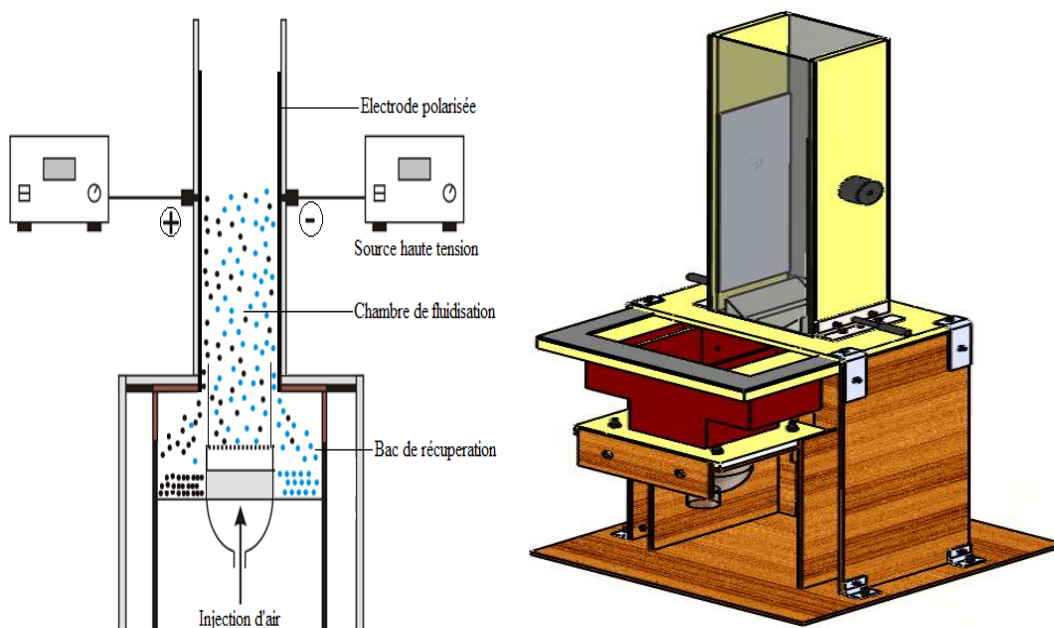


Figure I.10 : Dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales

Le mélange granulaire est déposé à partir d'une goulotte oscillante vers la chambre de fluidisation dont le débit d'air est contrôlé par un variateur de fréquence. Les granules chargés sont attirés par les électrodes de polarité opposées et récupérés dans les deux trémies de collecte. [53].

I.8.3 Séparateur électrostatique à chute libre à lit fluidisé

Le séparateur électrostatique à chute libre à lit fluidisé TESS (Séparateur triboélectrostatique) a été conçu pour la recherche fondamentale et applicative dans le domaine de la triboélectrisation de la séparation des matériaux granulaires plastiques et de la purification des minerais [55] ; il est constitué de deux parties distinctes [56,57] :

- ❖ **Chambre de fluidisation** : les mélanges granulaires sont mis à l'intérieur de cette chambre ou ils subissent un chargement triboélectrique grâce à l'injection d'air ; une fois chargés, les particules sortent vers le séparateur à chute libre à travers un clapet commandé.

- ❖ **Le séparateur à chute libre (à plaque)** : il est constitué de deux plaques conductrices soumises à des hautes tensions continues de polarités opposées et des bacs de récupération des produits. L'ensemble est enveloppé dans une enceinte en plexiglas transparente permettant de visualiser le processus de séparation.

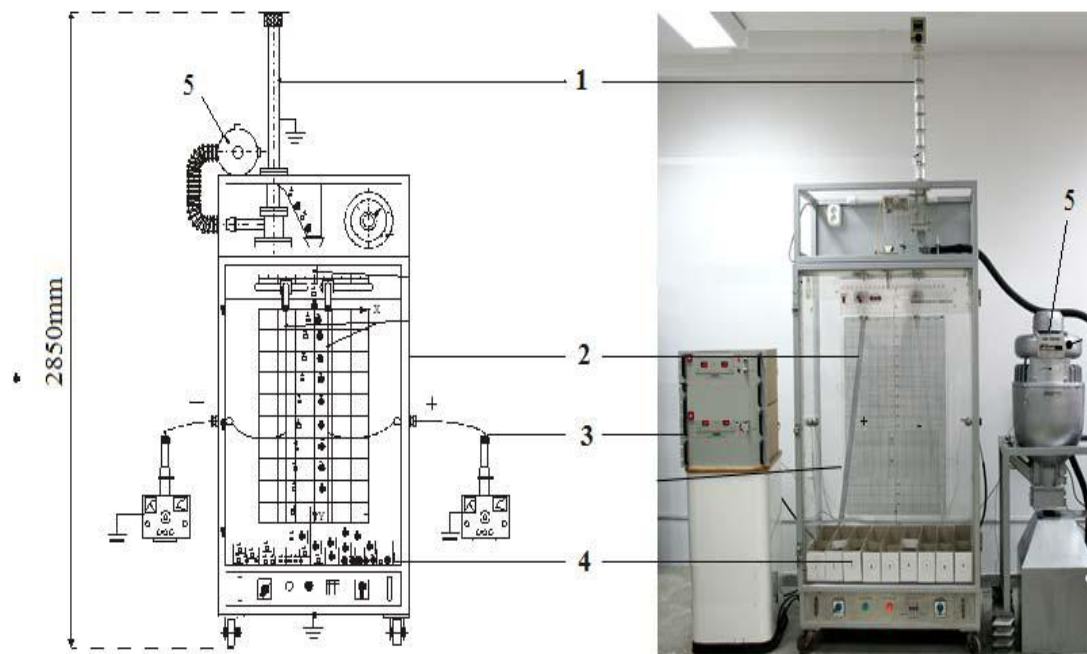


Figure 1.11 : Installation expérimentale de séparation électrostatique à lit fluidisé : 1 : chambre de fluidisation, 2 : Electrode sous haute tension, 3 : Source haute tension, 4 : Bacs de récupération, 5 : soufflante à débit réglable.

I.8.4 Séparateur tribo aéro électrostatique

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.12) et s'appuient à des tambours isolants. Leur entrainement est assuré par des moteurs triphasés alternatifs, commandés par des variateurs de fréquence. Les particules chargées collent sur la surface des bandes transporteuses contrairement polarisées, pour être transporté vers la zone de récupération [58,59].

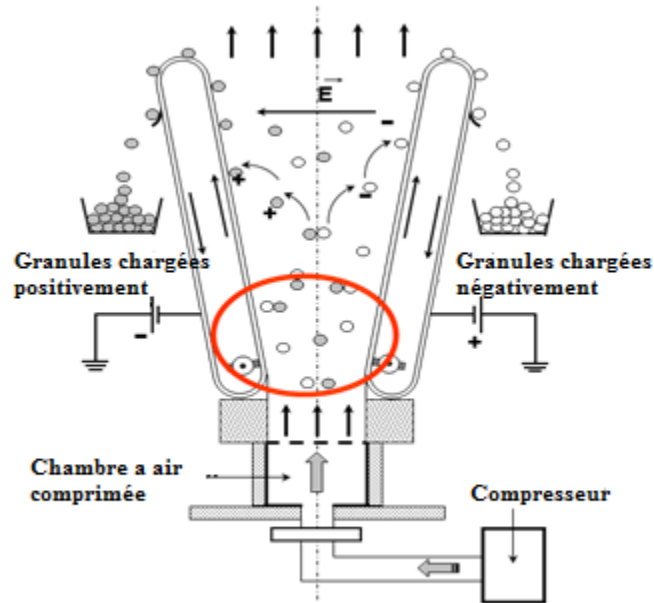


Figure I.12: Principe de fonctionnement d'un séparateur tribo-aéro électrostatique

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une synthèse bibliographique relative aux différents forces et phénomènes agissent sur les particules fines en mettant l'accent sur les notions générales afin de faciliter la compréhension du chargement par triboélectricité et le processus de séparation triboélectrique.

Les séparateurs triboélectriques à lit fluidisé apportent d'irremplaçables avantages à la séparation électrostatiques des mélanges granulaires isolants. Ce type d'installation est spécifique, le fait qu'il combine le chargement des particules et leur séparation en régime continu.

En finalité, on a fait une projection sur les séparateurs électrostatiques de laboratoire qui ont été développés dans les deux laboratoires IRECOM et APELEC de l'université de Sidi-Bel-Abbes.

Ce chapitre sera utile pour la compréhension des chapitres suivants.

CHAPITRE II

MATERIEL ET METHODES

Chapitre II

MATERIEL ET METHODES

L'industrie du recyclage en croissance rapide, stimulée par une réglementation plus stricte de protection de l'environnement, nécessite le développement de nouvelles technologies et/ou l'amélioration de celles déjà existantes. La séparation des matériaux granulaires mixtes à l'aide des forces électriques est l'une des applications les plus anciennes de l'électrostatique [60-61]. La séparation électrostatique, qui a été largement utilisée dans l'industrie minière [62-63], est une technologie très prometteuse pour le traitement des déchets granulaires, issus par exemple des câbles électriques ou des circuits imprimés [64-65].

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 [66-67]. 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 [68].

De nos jours, de bons rendements en termes de récupération et de pureté souvent supérieurs à 90% sont actuellement obtenus pour les séparateurs électrostatiques de mélanges granulaires de particules millimétriques [69-70]. En dépit des efforts continus de recherche pour l'optimisation de la performance des différents types de séparateurs électrostatiques [71-72], l'application de cette technologie dans l'industrie est toujours confrontée à une difficulté majeure : les procédés de séparation des mélanges granulaires de particules fines de taille micrométrique, poudres et produits pulvérulents, posent encore des problèmes et ne sont pas aussi efficaces, à cause de la force aérodynamique qui peut l'emporter sur la force

électrostatique. En effet, cette contrainte cause des problèmes pour maintenir les trajectoires souhaitées pour la récupération de produits de pureté élevée.

La plupart des technologies existantes pour la séparation électrostatiques des mélanges granulaires de particules isolantes sont basées sur deux opérations successives différentes : d'abord, le produit granulaire est tribo-chargé l'aide d'un dispositif de chargement électrique tel que le lit fluidisé, le tube tournant, le tribo- cyclone, le dispositif d'alimentation vibrant, etc ... Ensuite, le mélange chargé est introduit et est séparé lors de sa chute libre dans un champ électrique intense. Toutefois, pour les produits de particules fines, lorsque la séparation se produit après le chargement triboélectrique, une masse importante du produit est perdue à cause de la forte influence de la force aérodynamique qui donne à ces granulés des trajectoires aléatoires [37].

Le but de ce chapitre est de présenter le nouveau séparateur Tribo-électrostatique breveté, en utilisant deux disques rotatifs à haute tension de polarités opposées, immergées dans un lit fluidisé qui contient le matériau granulaire à séparer. Pour cet appareil, les opérations de tribo-chargement et de séparation se produisent dans la même zone. Aussi, nous présentons non pas la totalité de la méthode des plans d'expériences mais uniquement les fondements de base et l'importance de cette méthode dans la recherche scientifique. Cette technique intéressante sera particulièrement développée et utilisée dans le quatrième chapitre.

II.1 Description séparateur à deux disques rotatifs

Ce dispositif de séparation à lit fluidisé "séparateur à deux disques" a été conçu au sein du laboratoire *APELEC*, en collaboration avec le laboratoire *IRECOM* de l'université de Sidi Bel Abbés. et l'équipe d'électrostatique d'Angoulême, France.

Comme le montrent le schéma descriptif global de l'appareil représenté à la figure II.1.a et la photographie de la figure II.1.b, l'appareil comprend dans sa conception des éléments importants tel que les deux disques et l'arbre d'entraînement.

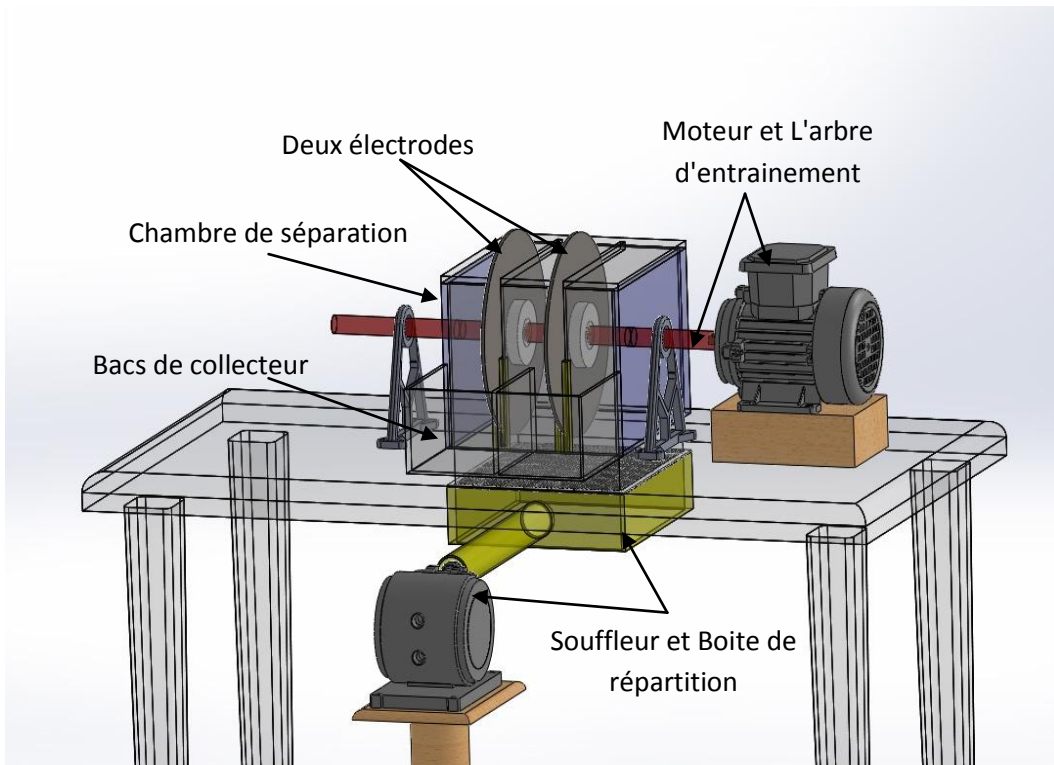


Figure II.1.a : schéma descriptif global de sépareur à deux disques rotatifs [73]

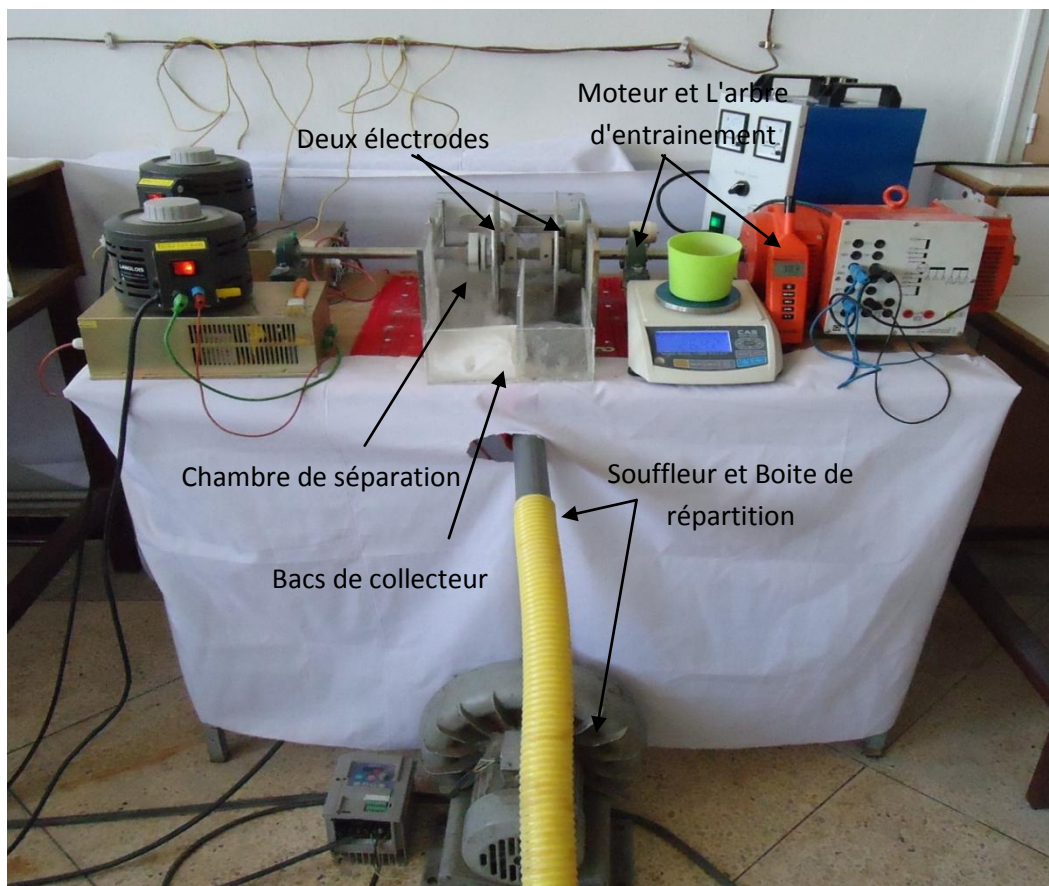


Figure II.1.b : photographie du sépareur à deux disques rotatifs [73]

Le séparateur à deux disques est constitué des éléments suivants :

- Deux électrodes rotatives (deux disques métalliques en acier).
- Arbre d'entraînement.
- Chambre de séparation.
- Boîte de répartition de l'air injecté.
- Bacs collecteurs.

a) Les électrodes

Les électrodes représentent la partie la plus importante de ce dispositif (Figure II.2). Cette partie se compose de deux disques en acier, d'un diamètre de 220 mm et d'une épaisseur de 4 mm.



Figure II.2 : disque rotatif (électrode)

b) L'arbre

Les deux électrodes sont fixées à l'arbre grâce à deux supports qui peuvent glisser sur la longueur de l'arbre pour varier la distance inter électrodes (Figure II.3.a). Par ailleurs, l'arbre d'un diamètre de 22 mm et d'une longueur de 0,5 m, est tenu par deux paliers pour bien assurer la rotation. La vitesse de rotation de l'ensemble (Figure II.3.b) est produite par un moteur électrique de courant continu à excitation séparée.

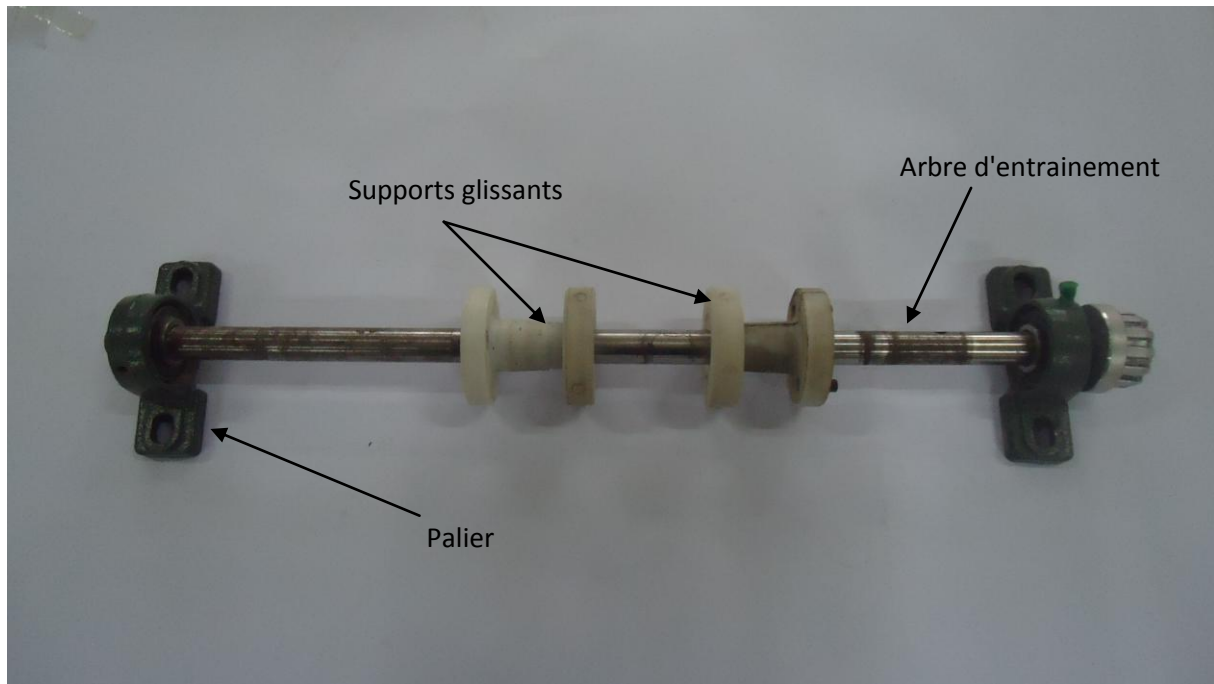


Figure II.3.a : l'arbre d'entraînement

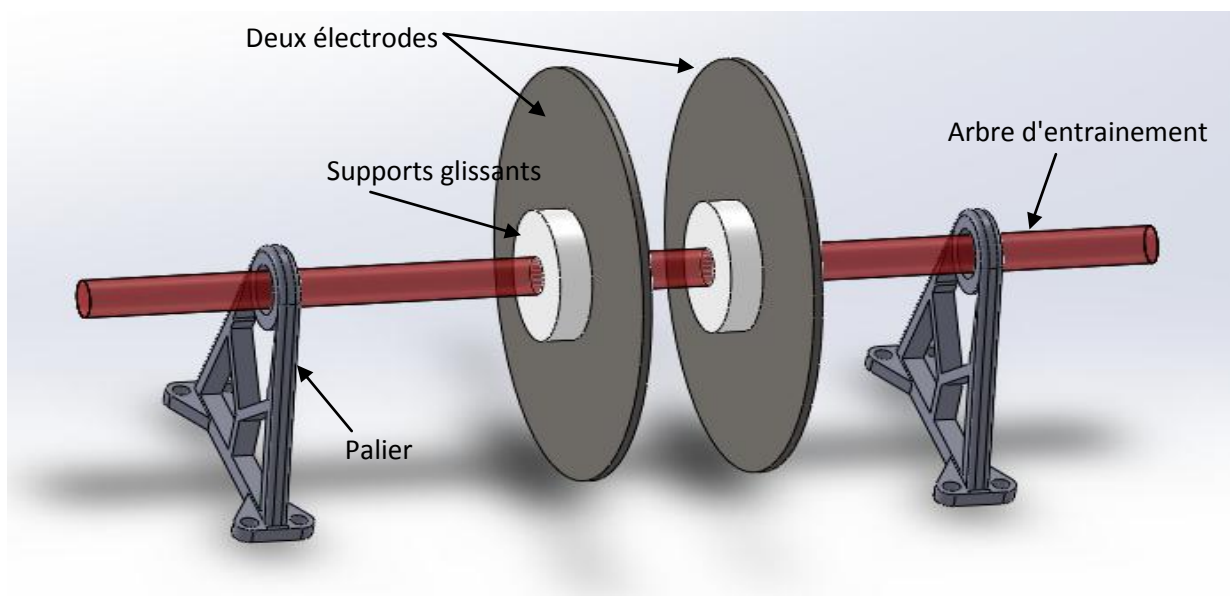


Figure II.3.b : l'assemblage des disques et l'arbre d'entraînement

c) Chambre de séparation

La chambre de séparation est réalisée en paroi de plexiglas d'une forme parallélépipédique de dimensions 250 x 220 mm pour une hauteur de 220 mm (Figure II.4). La chambre contient deux bornes de contact en bronze isolé par le téflon. Ces contacts en bronze frottent avec les disques et assurent la liaison HT des électrodes. Il ya deux fentes

dans la paroi plexiglas de face de la chambre, qui contient aussi des balais pour permettre la rotation des deux disques et récupérer le produit séparé. Le dépôt du mélange est effectué sur un support qui est un tamis à mailles très fines, les disques vont faire sortir les particules fines de l'intérieur de la chambre vers les bacs de collecteur qui se trouve en dehors de la chambre.

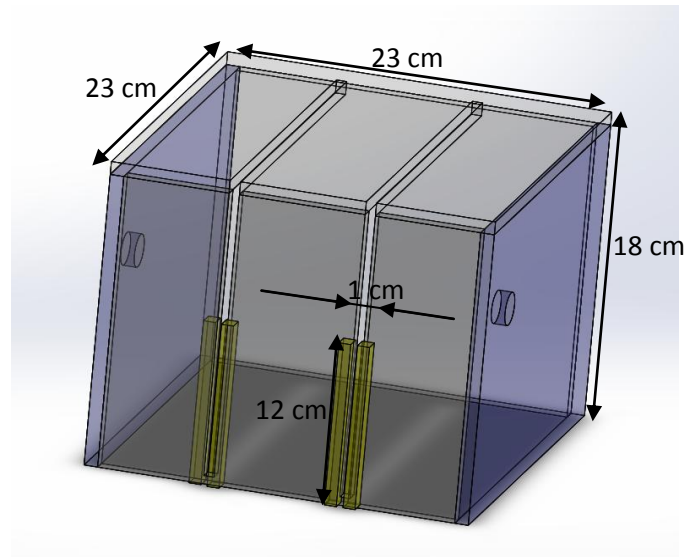


Figure II.4 : schéma descriptif de la chambre de la séparation

d) Boîte de répartition de l'air injecté

La boîte de répartition est réalisée avec des parois en bois d'une forme parallélépipédique de dimensions 250 x 220 mm pour une hauteur de 20 mm (Figure II.5). Son rôle est de répartir l'air injecté à l'aide d'un compresseur sur toute la surface de la chambre de séparation pour bien assurer la fluidisation et l'agitation des particules fines.

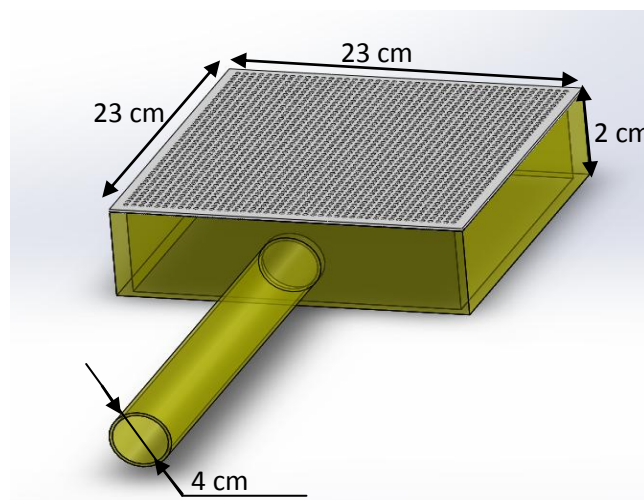


Figure II.5 : Boîte de répartition de l'air injecté

e) Bacs collecteurs

Un collecteur à deux bacs de récupération amovibles est disposé en face de la chambre de séparation (Figure II.6), il est placé de façon à faciliter leur retrait libre et rapide, pour permettre après séparation la collecte du produit séparé.

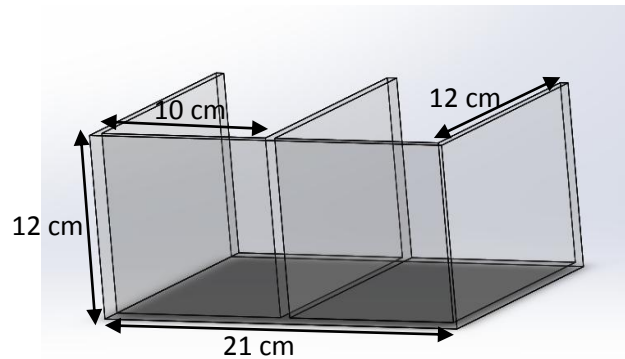


Figure II.6 : Bacs collecteurs

f) Moteur à courant continu

Le moteur utilisé à courant continu utilisé est alimenté en excitation séparée. L'inducteur est constamment alimenté avec une tension continue constante de 220 V, tandis que l'induit est alimenté avec une source de tension à courant continu réglable. Le réglage de la tension de l'induit permet d'obtenir la vitesse de rotation désirée. Les caractéristiques techniques du moteur sont les suivantes :

- Tension inducteur = 220 V
- Courant Induit = 5.2A
- Puissance moteur = 0,75 kW
- Vitesse max = 2000 tr/min



Figure II.7 : Moteur à courant continue

g) Alimentations haute tension

Les deux électrodes disques sont toutes deux reliées à deux sources de haute tension, le champ généré par les deux sources est d'une grande importance, d'où la nécessité de disposer de grandes valeurs de la tension. L'alimentation utilisée ($U_{\max}=40\text{kV}$, $I_{\max}=7.5\text{mA}$) est montrée à la (figure II.8).



Figure II.8 : Photographie du générateur de haute tension utilisé.

II.2 Types de particules utilisées

- **Chlorure de polyvinyle (PVC) :**

C'est un polymère thermoplastique amorphe dont les propriétés varient en fonction du degré de polymérisation. Le PVC est un matériau souple, tenace, polyvalent et très résistant. Ce matériau possède une grande stabilité dimensionnelle due à une absorption d'eau minime. Il est recyclable et peut se fabriquer dans de multiples finitions et couleurs.



Figure II.9 : Photographie du type de particules utilisées

Le PVC ou connu aussi sous le terme technique de polychlorure de vinyle est un polymère thermoplastique de grande consommation, amorphe ou faiblement cristallin, connu généralement sous le sigle PVC (de l'Anglais polyvinyle Chloride), il est préparé à partir de deux matières : à 57% de sel et à 43% de pétrole.

Le PVC est un des matériaux plastiques les plus extensibles et utilisés du monde. Ses excellentes caractéristiques standards, améliorables et adaptables par l'intermédiaire de divers additifs, le rendent approprié pour de multiples secteurs : les pièces de haute technologie, les produits de construction et d'assainissement, les carcasses de produits électriques, électroniques et informatiques, ...etc.

II.3 Principe de fonctionnement du séparateur

Deux disques métalliques sont montés sur un même arbre, celui-ci étant fixé à l'arbre d'un moteur électrique tournant à une vitesse modérée de quelques dizaines de tours par minutes. L'arbre étant maintenu par deux paliers. Les deux disques sont plongés en partie dans un lit fluidisé de mélange de particules issus de matériaux différents ; le mélange de particules est déposé sur un support qui est un tamis à mailles très fines, ne laissant passer que l'air et empêchant le mélange de tomber. Un flux d'air généré par un compresseur et entrant à travers la boîte de répartition située en dessous du lit fluidisé provoque la fluidisation. Le flux d'air est délivré avec un débit déterminé et réglable. Les disques qui sont reliés à deux alimentations de haute tension de polarités opposées, soulèvent lors de leur rotation les particules chargées. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques. Un collecteur comprenant deux compartiments, un pour chaque type de matériau, permet de collecter les produits après leur séparation.

II.4 Procédure expérimentale

II.4.1 Expériences de séparation

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

1000 g constitués de 50% de PVC blanc et 50% de PVC gris, à l'exception de la dernière expérience où la masse du produit a été modifiée.

Dans chaque expérience, le compresseur est mis en marche et les matériaux sont pré-chargés dans le lit fluidisé. Ensuite, les disques rotatifs et la haute tension sont activés et le processus de séparation est maintenu et n'est arrêté que lorsque la pureté des produits séparés commence juste à décroître. Il a été constaté que la pureté de ces deux matières plastiques récupérées est d'abord élevée et commence à diminuer après une certaine durée de la séparation.

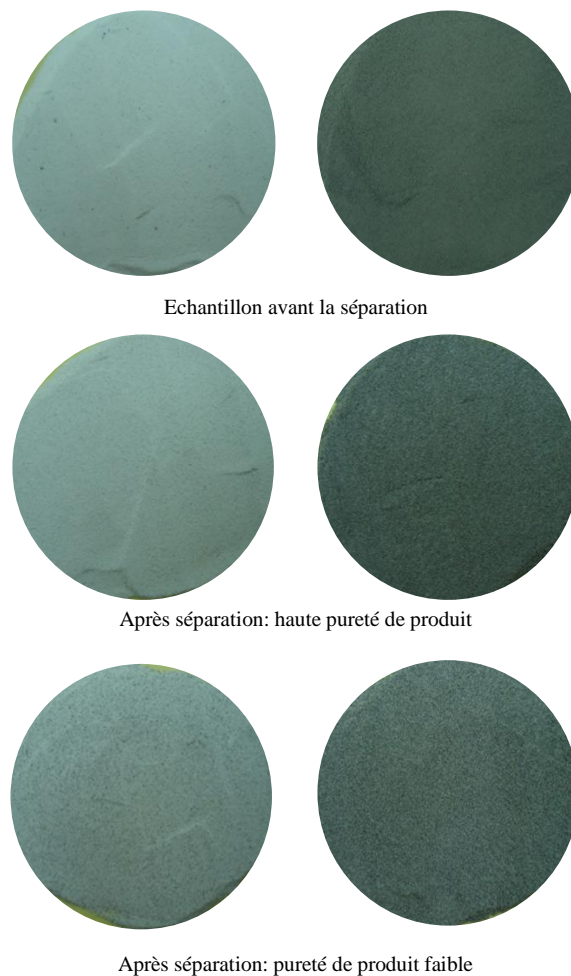


Figure II.10 : Photos des produits avant et après la séparation.

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) (figure II.11) qui présente les caractéristiques principales suivantes :

- Un double fonctionnement : mesure de l'humidité et de la température simultanément;
- La sonde est intégrée à l'appareil ;

- Une commutation des mesures entre degrés Celsius et Fahrenheit ;
- Une mémoire de mesure intégrée (maintien des données MIN et MAX) ;



Figure II.11 : Thermo hygromètre numérique

Après chaque expérience, la masse de produit récupéré dans chaque compartiment a été pesé à l'aide d'une balance électronique de précision de 0,1 g. Pour chaque expérience, deux tests ont été effectués et la valeur moyenne a été retenue pour le traçage des graphes.

En suite on change le produit initial de la chambre de séparation et nous mettons un nouveau produit neutre et vierge de charge nulle.

Le processus est multifactoriel et l'analyse expérimentale a été effectuée en tenant compte de tous les facteurs possibles:

Niveau appliqué à haute tension U (kV).

Distance Inter-électrode d (cm).

Débit d'air d'injection D (L / min).

Vitesse de rotation des disques n (tr / min).

Masse initiale de produit à séparer m (g).

Les essais ont été effectués à la température ambiante et l'humidité relative à l'intérieur du lit, variait de 40 à 60% d'humidité relative.

Le réglage de la position et de la valeur de chaque paramètre influe de façon significative sur le rendement de la séparation, et vu l'interdépendance de tous ces éléments entre eux, il est nécessaire de trouver le réglage optimal afin d'assurer une efficacité maximale.

Dans le cas de notre échantillon PVCb/PVCg, les particules de PVCg seront chargées négativement et se déposent dans le compartiment **A** (situé près de l'électrode positive). Les particules de PVCb seront chargées positivement et se déposent dans le compartiment **B** (situé près de l'électrode négative). Les particules moins chargées ne vont pas adhérer aux électrodes, et restent dans la chambre de séparation. (figure II.12).

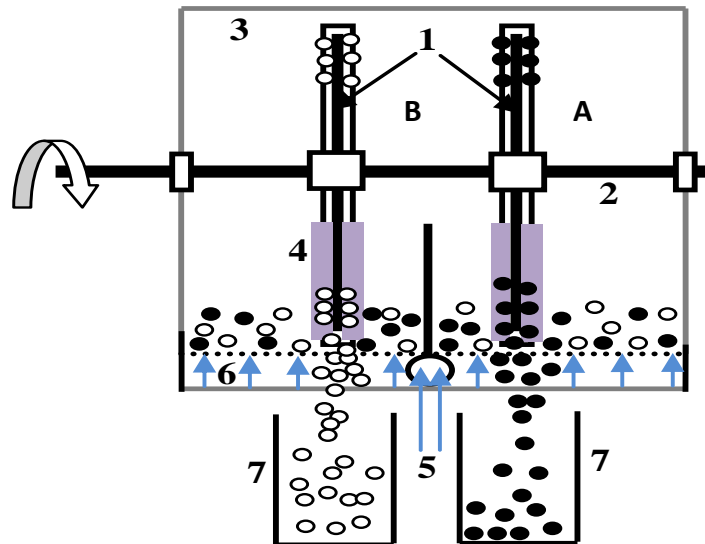


Figure II.12 : Représentation 2D du séparateur tribo-électrostatique (vue de face) et des deux compartiments du collecteur

1. Disques rotatifs; 2. Arbre de rotation; 3. Enceinte en plexiglas ; 4.Eponge ; 5. Injection d'air; 6. Chambre de fluidisation; 7. Compartiments du collecteur

II.4.2 Mesure de la charge

Dans notre cas, un échantillon de PVCb/PVCg, de ratio 50% 50% est placé dans le dispositif de chargement. Les particules de PVCb seront chargées positivement et se déposent dans le compartiment **A** (adhérent à l'électrode négative). Les particules de PVCg seront chargées négativement et se déposent dans le compartiment **B** (adhérent à l'électrode positive). Les particules moins chargées ne vont pas être adhérentes par les électrodes, et restent dans la chambre de séparation.

Toutes les expériences sont chronométrées par la même durée de séparation de 20 secondes.

La mesure de la charge a été faite on mesurant la charge du PVCb et la charge du PVCg. La cage de Faraday se présente comme deux récipients métallique l'un à l'intérieur de l'autre isolé électriquement entre eux. Le récipient extérieur, relié à la terre, fait office de blindage contre les parasites extérieurs.



Figure II.13 : Balance électronique de laboratoire.

a) Procédure de déroulement des expériences de séparation

Un type d'échantillon des particules fines est préparé sous forme de mélange binaire avec un ratio 50% PVCb – 50% PVCg.

La procédure expérimentale se fait en trois étapes principales :

1. Préparation des échantillons et leur introduction dans le dispositif (séparateur à deux disques rotatifs) ;
2. Triboélectrisation et séparation électrostatique des particules;
3. Analyse des résultats.

Phase 1 : Préparer le mélange des particules neutres dans un récipient, en essayant de limiter la charge triboélectrique lors de la manipulation, et introduire le mélange dans le dispositif.

Phase 2 : Essai de séparation triboélectrique composé d'une suite d'opérations :

- mise en marche du générateur HT;
- mise en marche du moteur pour tourner les deux disques;
- mise sous tension de la soufflante et création du lit fluidisé;
- chronométrer la durée de triboélectrisation et observer les phénomènes, pour une durée de 20 secs;
- Après 20 s, on arrête le moteur, la soufflante et ensuite l'alimentation HT dans cet ordre;
- récupérer le produit dans un récipient.

Phase 3 : analyser les résultats en mesurant la quantité de charge électrique et évaluer le taux de récupération en pesant à l'aide d'une balance électronique.

- Pour chaque nouvelle expérience le mélange de PVC doit être changé pour éviter le pré-chargement.

b) Mesure de la charge électrique

La mesure de la charge électrique produite par les granules de plastique chargés triboélectriquement, a été faite par une cage de faraday et un électromètre de marque KEITHLEY, type 6514 (figure II.14).



Figure II.14 : Photographie de la cage faraday et l'électromètre 6514

L'ensemble des particules chargées par l'un des procédés est mis à l'intérieur de la cage de Faraday puis mesuré à l'aide de l'électromètre, les résultats sont exprimés en termes de charge massique (nC/g). La charge massique des échantillons mixtes est mesurée après la séparation du mélange.

Un électromètre est un *multimètre à courant continu* 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.

On citera également l'électromètre à lame vibrante dans lequel l'élément d'entrée est un condensateur de quelques picofarads dont une armature vibre à une fréquence de quelques centaines d'Hertz (figure II.15).

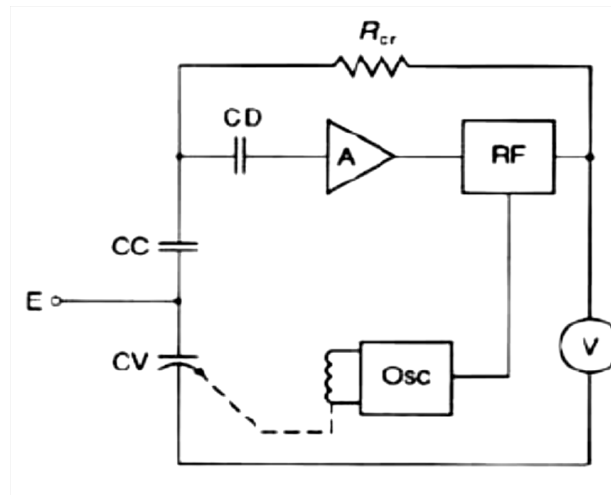


Figure II.15: *Électromètre à lame vibrante : Schéma de principe*

La tension continue à mesurer est ainsi convertie en tension alternative à la fréquence d'excitation. Une détection synchrone permet la mesure de cette tension alternative qui est proportionnelle à la charge collectée.

Remarque: Les résultats de l'étude expérimentale de la séparation et de la charge, sont représentés dans le troisième chapitre.

II.5 Méthodologie des plans d'expériences

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [74]. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche de lien qui existe entre une grandeur d'intérêt y et des variables x_i . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type:

$$y = f(x) \quad (\text{II-1})$$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expérience. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse [75]. Il existe de nombreux plan d'expériences adaptés à tous cas rencontrés par un expérimentateur.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées [76].

II.5.1 Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme "variable" on utilisera le mot "facteur". La réponse dépend donc d'un ou plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (figure II.16). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

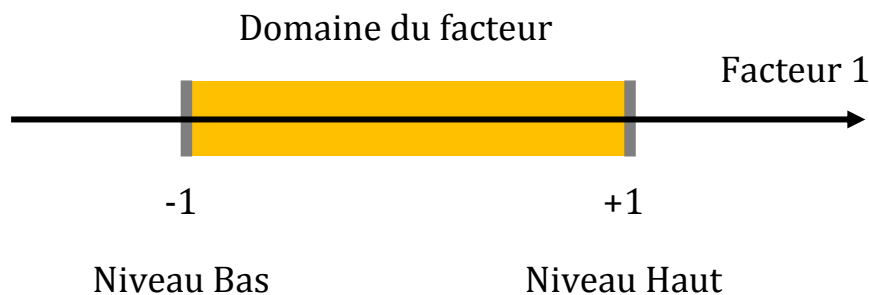


Figure II.16: Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par $+1$. Le domaine de variation du facteur est constitué des valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. L'axe représentant le second facteur est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions appelé l'espace expérimental.

II.5.1.1 Plans factoriels

L'étude d'un phénomène peut, le plus souvent, être schématisé de la manière suivante : On s'intéresse à une grandeur Y que nous appellerons par la suite *Réponse* qui dépend d'un grand nombre de variables, x_1, x_2, \dots, x_n , que nous appellerons *Facteurs*.

La modélisation mathématique consiste à trouver une fonction f telle que $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Une méthode classique d'étude consiste en la mesure de la réponse Y pour plusieurs valeurs de la variable x_i tout en laissant fixe la valeur des $(n - 1)$ autres variables. On itère

alors cette méthode pour chacune des variables. Ainsi, par exemple, si nous avons 4 variables et si l'on décide de donner 5 valeurs expérimentales à chacune d'elles, nous sommes conduits à effectuer $5^4 = 625$ expériences. Ce nombre élevé dépasse les limites de faisabilité tant en temps qu'en coût. Il faut donc réduire le nombre d'expériences à effectuer sans pour autant perdre la qualité des résultats recherchés. Le traitement de ces résultats se fait à l'aide du calcul statistique et de l'analyse de la variance.

II.5.1.2 Plans factoriels complets

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

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum a_{ij\dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (\text{II-2})$$

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

$$Y = Xa \quad (\text{II-3})$$

Avec :

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

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

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

II.5.2 Plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponse

Les plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses sont apparus dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Leur construction permet de minimiser les incertitudes affectant les prédictions d'une réponse au sein d'un domaine expérimental.

Le nombre d'essais d'un plan d'expériences pour l'étude des surfaces de réponse croît rapidement en fonction du nombre de facteurs. Pour qu'un plan d'expériences constitue une stratégie efficace et économique, il convient donc de limiter le nombre de facteurs mise en œuvre. Ce constat conduit fréquemment à fixer à un niveau constant un nombre important de paramètres de réglage. Ce choix ne doit en aucun cas être fait au hasard. C'est pourquoi, les plans pour l'étude des surfaces de réponse succèdent généralement à une étape de criblage des facteurs, pour laquelle le recours à un dispositif expérimental présenté dans le paragraphe précédent.

Si la construction de la majorité des plans pour l'étude des surface de réponse peut s'effectuer à partir de règles simples, trouvant le plus souvent une justification géométrique, l'analyse des résultats d'essais requiert l'utilisation d'outil informatique, à la fois pour l'estimation des coefficients du modèle polynomial, ainsi une pour l'exploitation de ce dernier.

II.5.3 Plan composite centré

Les plans composites se prêtent bien au déroulement séquentiel d'une étude. La première partie de l'étude est un plan factoriel complet ou fractionnaire complété par des points au centre pour vérifier la validité du modèle (termes du premier degré et termes d'interactions). Si les tests de validation sont positifs (la réponse mesurée au centre du domaine est statistiquement égale à la réponse calculée au même point), l'étude s'achève le plus souvent, mais s'ils sont négatifs, on entreprend de essais supplémentaires pour établir un modèle du second degré. Les essais supplémentaires sont représentés par des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées sont appelés les points étoile. Les plans composites présentent donc trois parties (figure II.17):

- Le plan factoriel: c'est un plan factoriel complet ou fractionnaire à deux niveaux par facteurs. Les oints expérimentaux sont aux sommets du domaine 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.
- Les points au centre du domaine d'études, on prévoit toujours des points expérimentaux situés au centre du domaine d'études, et cela aussi bien pour les plans factoriels que pour les plans en étoile.

Le nombre total n d'essais à réaliser est la somme des essais du plan factoriel (n_f), des essais du plan en étoile (n_α) et des essais du centre (n_0). Le nombre n des essais d'un plan composite est donné par la relation : $n = n_f + n_\alpha + n_0$

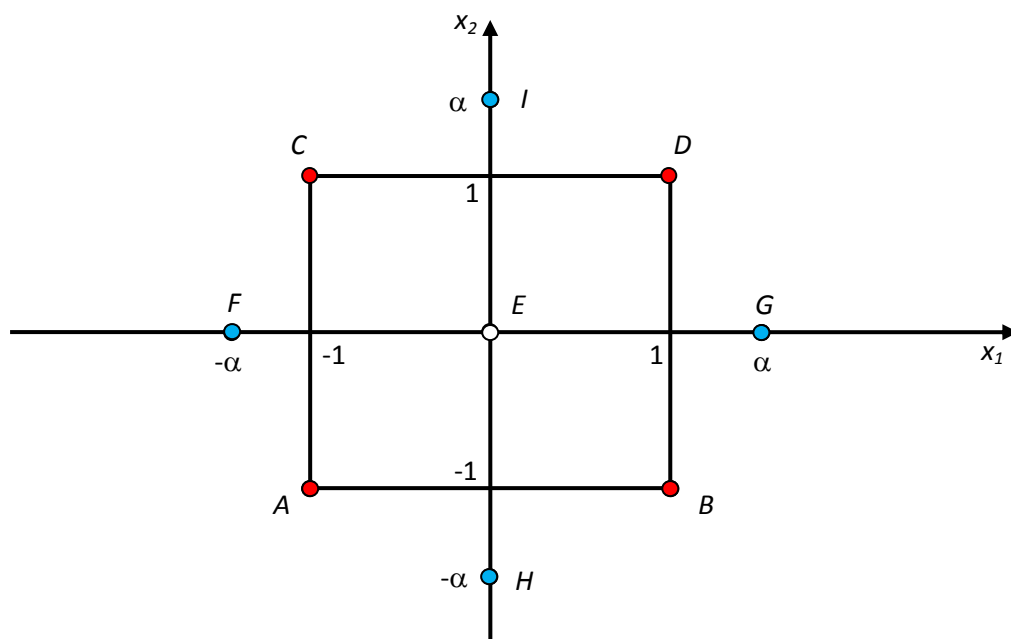


Figure II.17 : Représentation d'un plan composite pour l'établissement d'un modèle du second degré

II.5.4 Logiciels des plans d'expérience

Les logiciels de plan d'expériences [77,78] possèdent des bibliothèques de plans classiques et ils permettent aussi de construire le plan le mieux adapté à l'étude, ces logiciels sont encore très marqués par leur origine statistique et peuvent rebuter certains utilisateurs.

On peut réaliser le calcul des coefficients avec un tableur, mais cela nécessite de la programmation et du temps. Il est donc préférable d'utiliser un logiciel qui effectue non seulement le calcul des coefficients mais aussi tous les calculs statistiques permettant d'évaluer la qualité du modèle mathématique.

Les logiciels de plans d'expériences sont aussi programmés pour calculer des réponses dans tout le domaine d'étude, pour effectuer les analyses de variance, pour tracer des courbes d'isoreponses, pour construire les surfaces de réponse et pour déterminer les zones d'intérêt.

Cet ensemble de possibilités permet d'effectuer rapidement de multiples analyses et de regarder ses données sous tous les angles. On arrive ainsi à extraire, en peu de temps, toute l'information présente dans les résultats d'un plan d'expérience. Les logiciels de plans d'expériences sont devenus des outils d'un absolument indispensables pour la construction de plan complexes et l'interprétation approfondie des résultats des résultats du plan. Néanmoins, ces logiciels nécessitent tous une bonne connaissance de la méthode des plans d'expériences et ne peuvent pas être utilisés sans une formation solide aux plans d'expériences.

Parmi ces logiciels on peut citer le logiciel MODDE de la société Umetrics, qui est un logiciel spécialisé pour la construction et l'analyse de plan d'expérience. Il permet de bâtir et d'analyser des plans criblage, des plans pour la surface de réponse, Taguchi de mélanges, etc. pour estimer les modèles, il utilise soit la méthode des moindres carrés usuelle soit la méthode des moindres carrés partiels.

II.6 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.

CHAPITRE III

ETUDE

EXPERIMENTALE

PARAMETRIQUE DU

SEPARATEUR A DEUX

DISQUES ROTATIFS

Chapitre III

ETUDE EXPERIMENTALE PARAMETRIQUE DU SEPARATEUR A DEUX DISQUES ROTATIFS

Le résultat de tout processus de séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules. Le but de ce chapitre est d'évaluer les effets de plusieurs facteurs qui pourraient influencer sur la charge triboélectrique et l'efficacité de séparation de séparateur à deux disques rotatifs.

Les études qui ont porté sur le chargement triboélectrique et la séparation des particules isolantes fines, à été fait sur le séparateur à deux disques rotatifs qui utilisent le mode aérodynamique de fluidisation comme moyen de triboélectrisation.

Le dispositif de séparation triboélectrique à lit fluidisé qui du séparateur à deux disques rotatifs a été conçu et réalisé au sein du laboratoire APELEC de l'université de Sidi Bel Abbes, en collaborations avec le laboratoire IRECOM et l'équipe d'électrostatique d'Angoulême Ce dispositif est basé sur l'injection d'air comprimé et ces disques rotatifs.

Le dispositif utilise la force aérodynamique pour le chargement des particules fines, la charge provenant principalement à la suite des contacts entre particules.

III.1 Chargement des particules fines

Cette partie du dispositif de la chambre de séparation représentée à la figure III.1 assure le chargement triboélectrique des particules fines à lit fluidisé. Elle est composée de deux parties, la chambre de fluidisation et un système d'injection d'air à l'aide d'une soufflante.

Le dispositif représenté à la figure III.1 est destiné à l'analyse expérimentale de l'acquisition de charge triboélectrique et séparation sur des petites quantités de particules micronisées isolants. Il est composé de deux parties, la chambre de fluidisation et un système d'injection d'air à l'aide d'une soufflante.

La chambre de fluidisation de section rectangulaire fixée sur la table comprend quatre parois transparentes en plexiglas pour permettre l'observation des particules. La partie inférieure de la chambre est pourvue d'un tamis qui empêche les particules fines de tomber vers le système de fluidisation et la partie supérieure contient une ouverture pour permettre l'introduction du mélange à séparer.

Le système d'injection d'air assure la répartition de l'air injecté sur toute la surface de la chambre de fluidisation à l'aide d'une soufflante à travers la boîte de répartition de l'air fixé au dessous de la chambre de fluidisation.

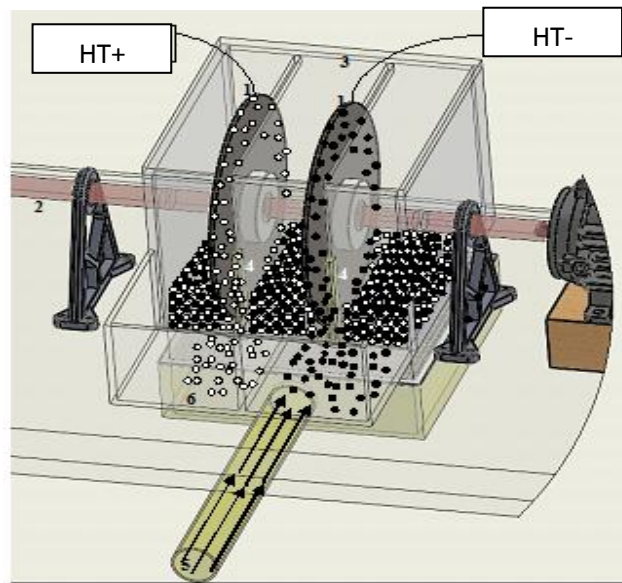


Figure III.1: Représentation 3D du séparateur tribo-électrostatique (vue globale)
 1. Disques rotatifs; 2. Arbre de rotation 3. Enceinte en plexiglas ; 4. Eponge ; 5. Injection d'air; 6. Chambre de fluidisation; 7. Compartiments du collecteur

Une fois les particules de plastique chargées par effet triboélectrique, la séparation du mélange des particules fines est effectuée dans la même chambre de séparation à l'aide de deux disques rotatifs.

Les deux électrodes sont reliées à deux alimentations de Haute Tension réglable, entre 0 et ± 12 kV et de distance inter électrodes 4 cm. On peut donc obtenir un champ électrique de 3 kV/cm.

III.2 Types des collisions dans le séparateur à lit fluidisé

L'acquisition de charge par effet triboélectrique se produit entre deux granules, leur contact est indispensable. Des charges électriques passent de l'une à l'autre, modifiant ainsi le nombre de charges contenues dans chacune des granules, ce qui les rend contrairement polarisées [79].

Le mouvement des particules isolantes dans les dispositifs à lit fluidisé implique trois types de collision: collision des particules de même matière, collision des particules de matière différente

et collision entre les particules et les parois internes de la chambre de fluidisation [80]. Le phénomène de fluidisation commence par des collisions majoritairement type particule-particule, et finit par des collisions quasiment particule-paroi.

a) Collision des particules de même matière :

Helmholtz dans son modèle éloigne la possibilité du transfert de charge entre deux corps de la même matière tribo-électriquement. En contrepartie, beaucoup d'auteurs ont réussi à électriser positivement et négativement deux morceaux du même isolant frottés l'un contre l'autre, mode inexplicable dans les idées de *Helmholtz* [81].

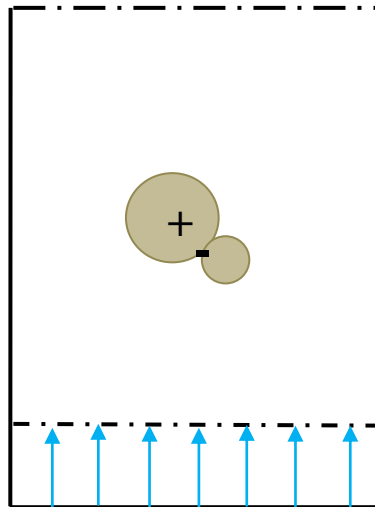


Figure III.2: Transfert de charge par collision entre deux particules de même nature

b) Collision des particules de matière différente :

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

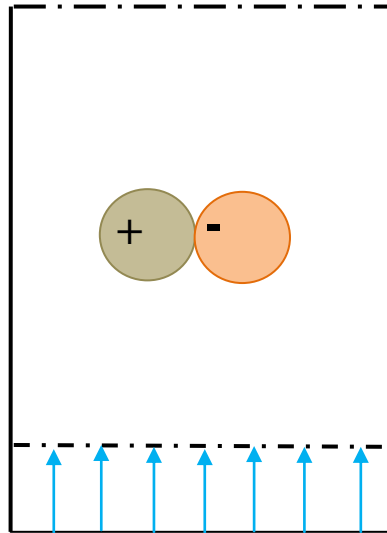


Figure III.3: Transfert de charge par collision entre deux particules de différente nature

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

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

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

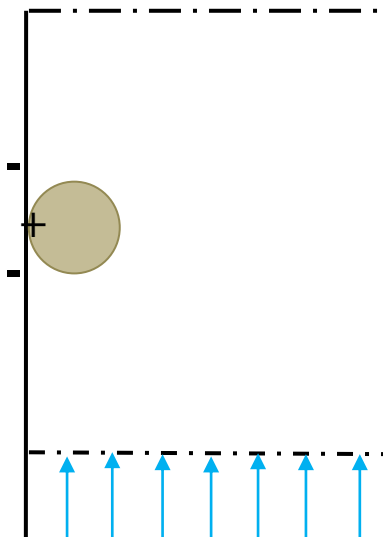


Figure III.4: Transfert de charge par collision entre une particule et la paroi de fluidisation

III.3 Etude expérimentale

III.3.1 Analyse de l'efficacité de séparation

Nous avons effectué dans cette partie une série d'expériences en analysant la quasi-totalité des facteurs qui peuvent influencer le rendement de la séparation. Nous nous sommes basés sur la mesure de la masse collectée, c'est à dire le taux de récupération, la pureté étant pratiquement impossible à déterminer avec des moyens simples.

a) Etude de l'influence de la haute tension appliquée

Les deux disques électrodes doivent être obligatoirement alimentées en haute tension, créant un champ électrostatique intense pour attirer les particules de charge opposée. La haute tension qui est donc un élément indispensable pour le fonctionnement de ce dispositif, constitue un paramètre important à prendre en considération. En fait, par le biais de la haute tension, c'est le champ électrique qu'on est entrain d'analyser.

Une série d'expériences de trois intervalles de la distance inter électrodes $d = 4-8-12$ cm a été effectuée. Pour chaque expérience, on a fait varier la tension appliquée aux bornes des deux électrodes entre 4 kV et 36 kV tandis que les autres ont été maintenues constantes, comme suit:

- Débit d'air injecté $D = 26$ L / min
- Vitesse de rotation $n = 80$ tr / min
- Masse $m = 1000$ g.

Les résultats obtenus dans les trois cas de distance étudiés, représentant la masse collectée en fonction de la tension appliquée, sont illustrés par les courbes des figures III.5, III.6 et III.7. En plus des masses de PVCb et PVCg, nous avons également tracé la masse totale des deux produits récupérés PVCT, qui représente leur somme.

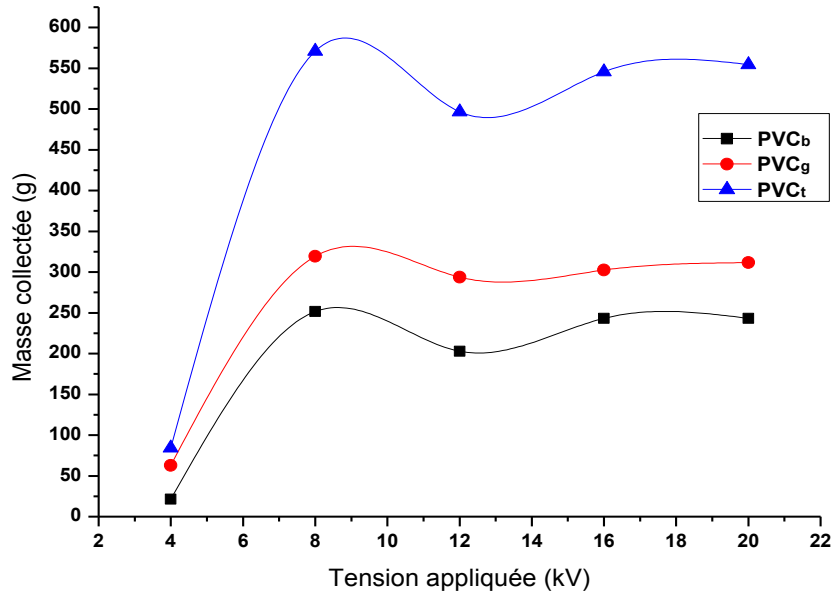


Figure III.5: Variation de la masse collectée de PVCb et PVCg en fonction de la tension appliquée, pour $d=4$ cm

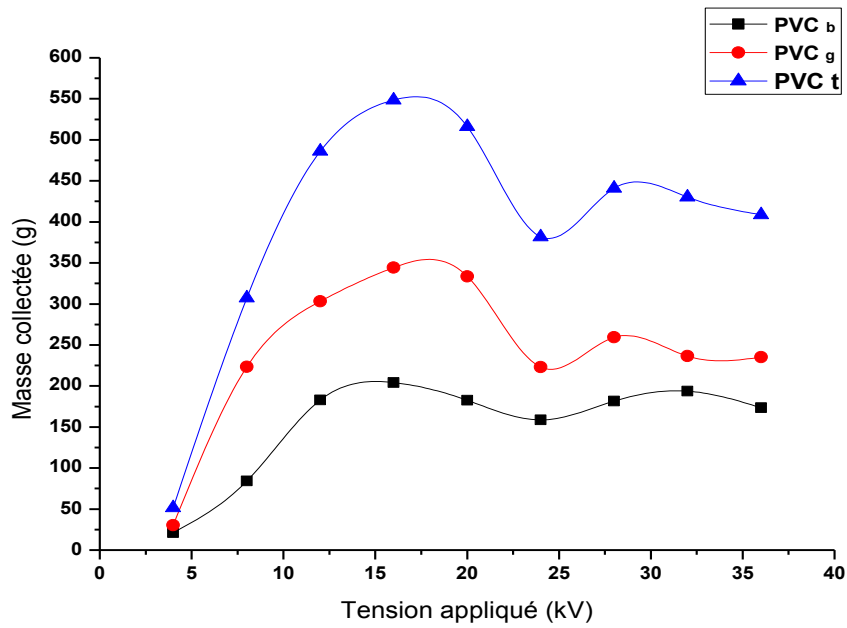


Figure III.6: Variation de la masse collectée de PVCb et PVCg en fonction de la tension appliquée, pour $d=8$ cm

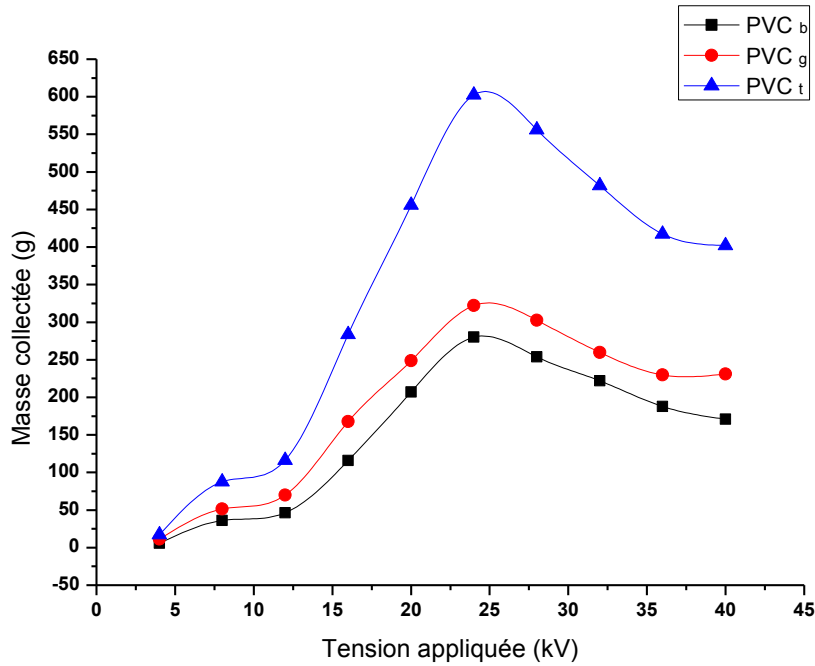


Figure III.7: Variation de la masse collectée de PVCb et PVCg en fonction de la tension appliquée, pour $d=12\text{cm}$

Interprétation et discussion

Le taux de recouvrement des deux produits de PVC augmente avec la tension appliquée, jusqu'à 8 kV pour $d = 4\text{ cm}$, 16 kV pour $d = 8\text{ cm}$ et 24 kV pour $d = 12\text{ cm}$, ce qui correspond pour chaque distance à un champ électrique moyen de 2 kV/cm (figures III.5, III.6 et III.7). Pour des valeurs supérieures de la tension, c'est à dire du champ électrique, le taux de récupération devient plus faible. Dans ce cas, la force électrique de l'image est plus élevée et donc une grande quantité de produit est rapidement recueillie sur les disques, ce qui provoque l'ensemble du revêtement de l'électrode et donc sa polarité est inversée. En conséquence, le produit de charge opposée se joint à l'électrode et provoque la diminution de l'efficacité de séparation. En fait, il a été constaté que la durée de traitement est inversement proportionnelle par rapport à la tension, c'est-à-dire que le procédé de séparation est plus rapide pour les grandes valeurs de la tension, comme indiqué dans le tableau III.1.

Tableau III.1: Durée de l'expérience selon la tension appliquée $d=8$ cm (répété deux fois). ($D=26$ L/min, $n=80$ tr/min, $M=1000$ g).

Tension (kV)	Temps (s) Expérience 1	Temps (s) Expérience 2
4	109	112
8	121	98
12	90	85
16	62	56
20	36	39
24	14	19

b) Etude de l'influence de la vitesse de rotation des disques

Les disques rotatifs sont mis en mouvement par un moteur à courant continu à excitation séparée de puissance 0,75 kW, qui permet de délivrer une vitesse réglable en variant simplement la tension aux bornes de l'induit. Les résultats obtenus représentant l'influence de la vitesse de rotation des disques électrodes en fonction de la masse de la récupérée sont illustrés par la courbe de la figure III.8.

Les résultats de la variation de la vitesse de rotation n sont donnés entre 40 tr/min et 140 tr/min pour une différence de potentiel $U = 8$ kV, débit d'air $D = 26$ L/min, masse $m = 1000$ g et une distance inter électrodes $d = 4$ cm.

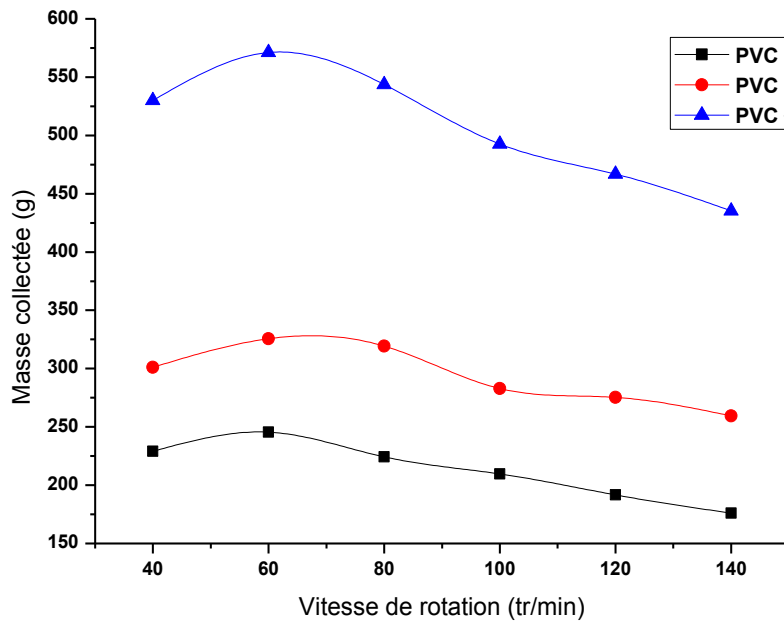


Figure III.8: Variation de masse collectée de PVCb et PVCg et PVCt en fonction de la vitesse de rotation

Interprétation et discussion

En plus de la force électrique d'image, ce qui provoque l'attachement de granules sur le disque, une autre force mécanique qui est à prendre en considération est la force centrifuge. Lors de l'augmentation de la force, la force de celle-ci, qui est proportionnelle à la vitesse de rotation n , provoque le détachement des granules et la diminution de l'efficacité de séparation. Selon la figure III.8, $n = 60$ tr / min est la valeur optimale de la vitesse de rotation des disques. D'un autre côté, pour des valeurs plus faibles de n , les granules ont suffisamment de temps pour couvrir la totalité de la surface du disque provoquant la fixation de particules de charge électrique opposée, provoquant ainsi la diminution des taux de récupération. Il y a donc une valeur optimale de la vitesse qui sera déterminée dans le chapitre suivant par la méthode des plans d'expériences.

c) Etude de l'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 charge électrique des granules par le lit fluidisé, afin de permettre à toutes les particules isolantes d'acquérir une charge électrique leur permettant d'adhérer à la surface des électrodes disques rotatif 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 III.9 montre l'influence du débit d'air injecté sur la récupération de la masse des particules fines, variant le débit d'air D entre 21 L/min à 34 L/min. Les paramètres constants sont:

- Tension appliquée $U = 8 \text{ kV}$.
- Vitesse de rotation $n = 80 \text{ tr / min}$.
- Masse $m = 1000 \text{ g}$.
- Distance inter électrodes $d = 4 \text{ cm}$.

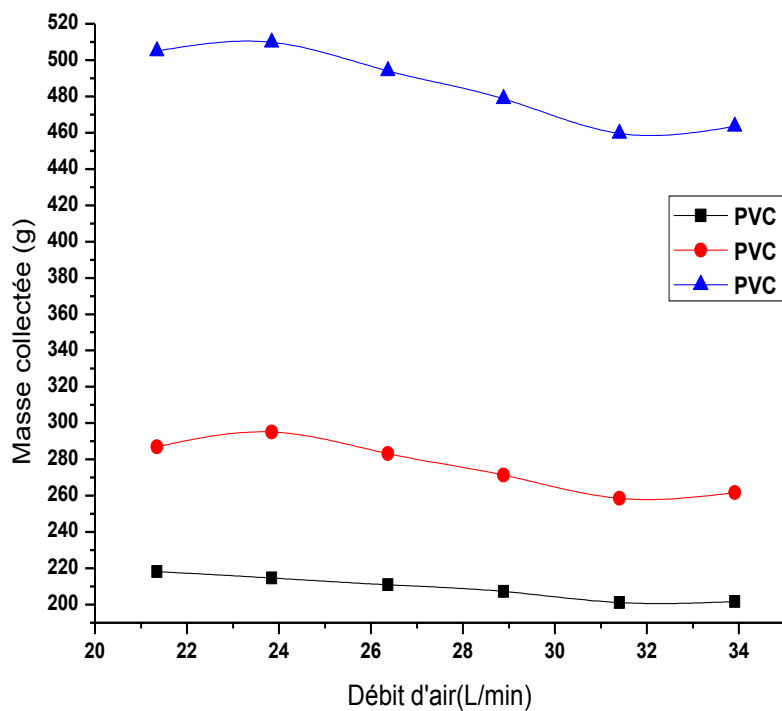


Figure III.9: Variation de masse collectée de PVCb et PVCg en fonction de débit d'air injecté

Interprétation et discussion

La variation du taux de récupération en fonction de la fluidisation, illustrée à la figure III.9, indique qu'il n'y a pas nécessité d'augmenter beaucoup débit d'air D des particules. Lorsque D est fortement augmenté, les granules acquièrent une charge triboélectrique supérieure et ainsi l'attraction entre les deux types de PVC en se déposant sur les électrodes, provoque une

diminution de l'efficacité de séparation. Lorsque le disque est entièrement recouvert d'un type de PVC qui provoque la formation d'une couche de produit, l'autre type de PVC commencera à s'attacher. Selon notre étude de cas, la valeur optimale de l'injection d'air est de 23 L/min.

d) Etudes l'influence de la masse introduite

Afin d'étudier ce paramètre, nous avons analysé l'influence de la masse déposée dans le lit fluidisé m entre 400 g et 1200 g pour une différence de potentielle $U = 8$ kV, débit d'air $D = 23$ L/min, vitesse de rotation $n = 80$ tr / min et une distance inter électrodes $d = 4$ cm.

Les résultats obtenus de la variation de la masse collectée en fonction de la masse introduite dans la chambre de séparation sont illustrés par les courbes des figures III.10. Par ailleurs, nous avons estimé la masse de produit récupérée sur les deux faces de chaque électrode. Pour cette raison, nous avons utilisé un collecteur à 4 compartiments pour estimer la masse collectée sur chaque face (Figure III.11). Les résultats obtenus sont représentés à la figure III.12.

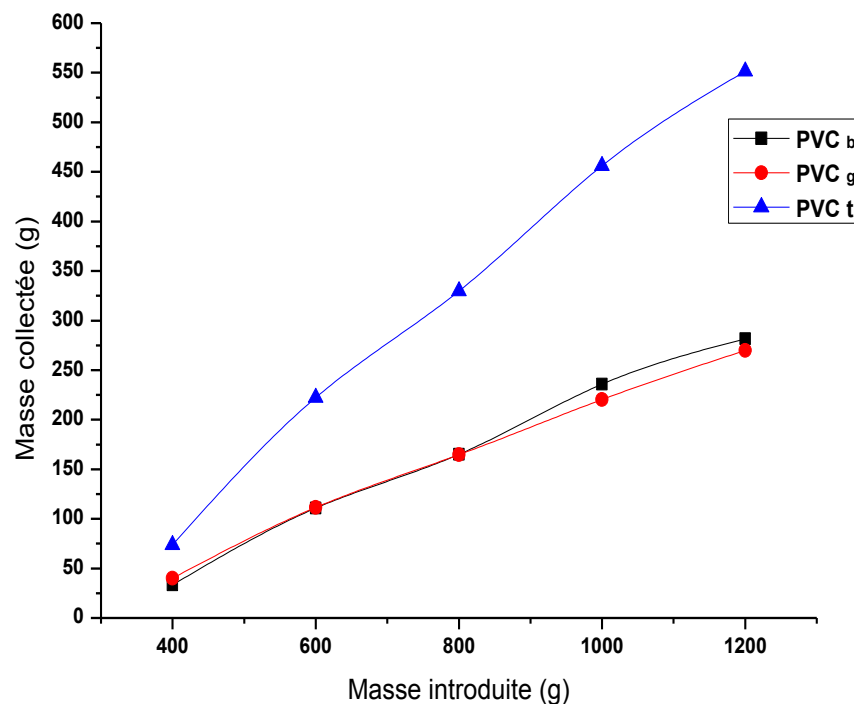


Figure III.10: Variation de masse collectée de PVCb et PVCg en fonction de la masse introduite

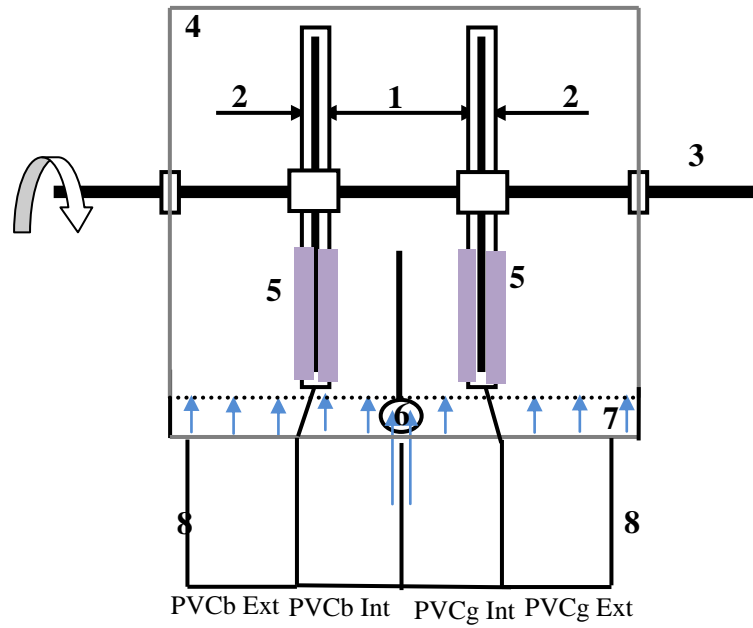


Figure III.11: Représentation 2D du séparateur tribo-électrostatique (vue de face) et des quatre compartiments du collecteur

1. Disques rotatifs coté intérieure; 2. Disques rotatifs coté extérieure; 3. Arbre de rotation; 4. Enceinte en plexiglas ; 5.Eponge ; 6. Injection d'air; 7. Chambre de fluidisation; 8. Compartiments du collecteur.

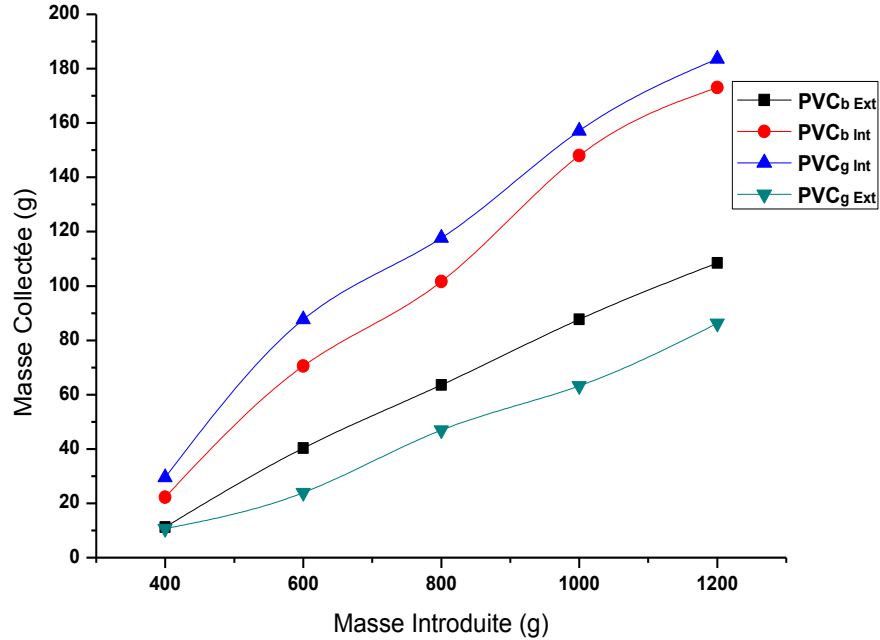


Figure III.12: Variation de masse collectée de PVCb et PVCg en fonction de la masse introduite

Interprétation et discussion

D'après les résultats obtenus de la variation du taux de récupération total en fonction de la masse totale m du lit fluidisé, nous remarquons que la masse m ne doit pas être inférieure à une quantité minimale, qui est de l'ordre de 600 g dans le cas de notre banc expérimental (figure III.10). Pour $m = 1,000$ g, plus de 50% sont récupérés et on a observé que le procédé de séparation continue jusqu'à ce que la masse m diminue à 600 g. En outre, on a remarqué que la masse récupérée entre les électrodes est plus grande comparée à celle récupérée sur les côtés extérieurs des disques (figure III.12). Pour les expériences de la figure III.11, le collecteur de chaque produit était constitué de deux boîtes pour les produits prélevés respectivement sur la face intérieure et extérieure des électrodes. La masse du produit collecté sur le côté intérieur des électrodes était significativement plus élevée, jusqu'à quatre fois par rapport à celui recueillie sur la face extérieure. Ceci s'explique par les valeurs plus élevées de champ électrique entre les électrodes. Ainsi, l'efficacité du procédé devrait être plus élevée dans le cas d'une conception modifiée, comprenant l'utilisation de deux électrodes mises à la terre supplémentaire, située à l'opposé sur les côtés extérieurs des deux électrodes à disque.

III.3.2 Analyse de la charge acquise

a) Influence de la masse des particules sur la charge acquise

Les résultats obtenus concernant la mesure de la charge électrique, produit par les deux matériaux PVCb et PVCg, en fonction de la configuration des électrodes sont illustrés par les figures (III.14, III.16, III.18). Ces expériences ont été effectuées avec des paramètres constants suivants:

- Champ électrique $E=3$ kV/cm;
- Distance inter électrodes $d=4$ cm;
- Vitesse de rotation des disques $n= 80$ t/min;
- Débit d'air injecté $D= 23$ L/min

Pour chaque masse analysée (600, 1000 et 1400g) nous avons étudié trois configurations en gardant le champ électrique constant, et pour cela nous avons changé la polarité des électrodes 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 et de la charge massique pour trois valeurs différentes de la masse du lit fluidisé sont représentés aux figures III.13 à III.18.

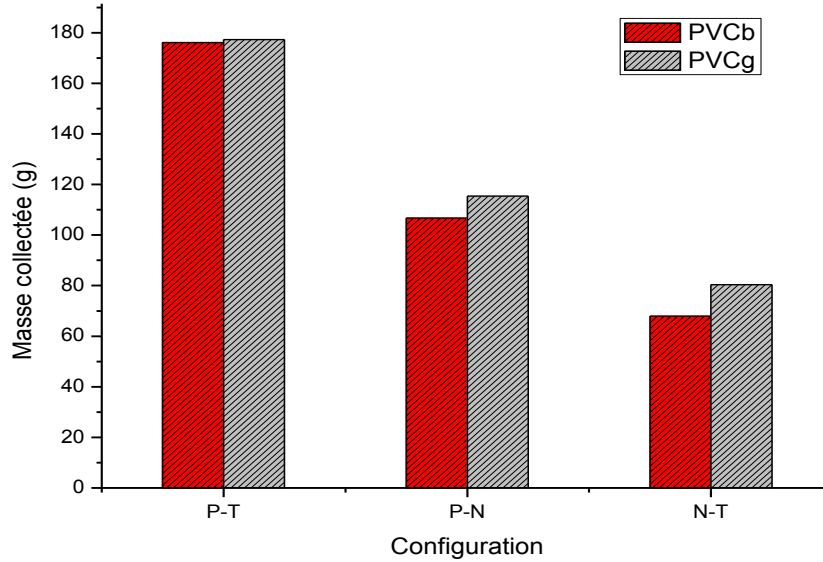


Figure III.13: Variation de masse collectée de PVCb et PVCg en fonction de la configuration des électrodes, pour la masse introduite 600g

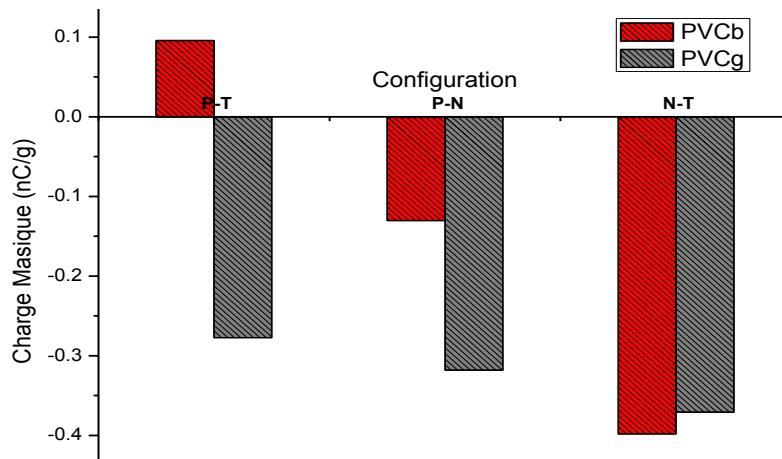


Figure III.14: Variation de la charge massique PVCb et PVCg en fonction de la configuration des électrodes, pour la masse introduite 600g

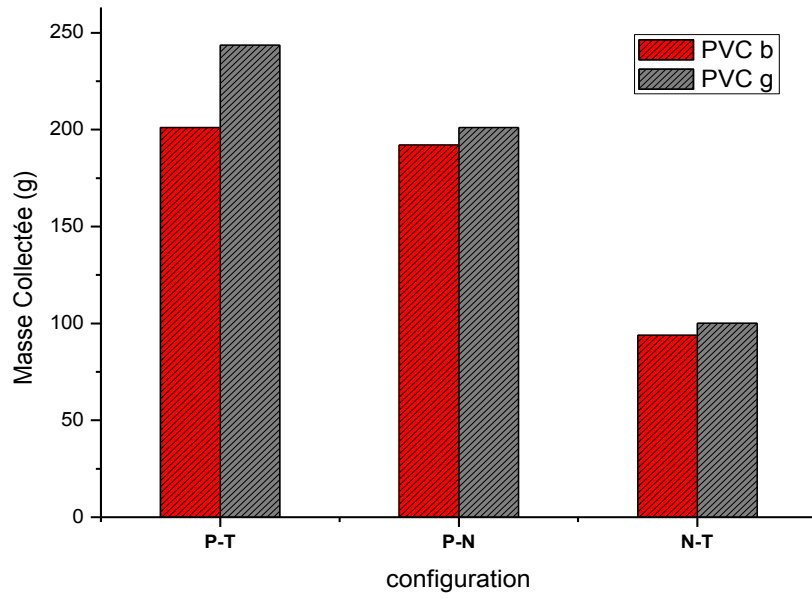


Figure III.15: Variation de masse collectée de PVCb et PVCg en fonction de la configuration des électrodes, pour la masse introduite 1000g

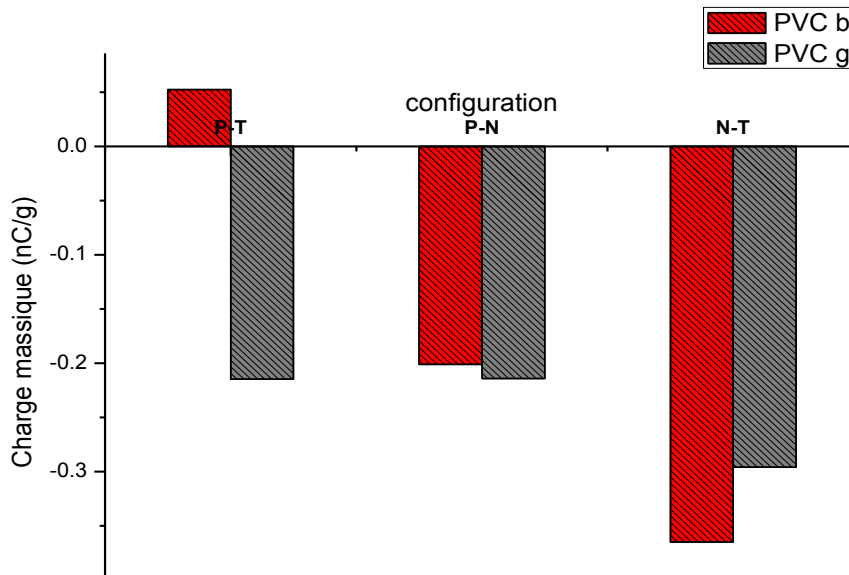


Figure III.16: Variation de la charge massique de PVCb et PVCg en fonction de la configuration des électrodes, pour la masse introduite 1000g

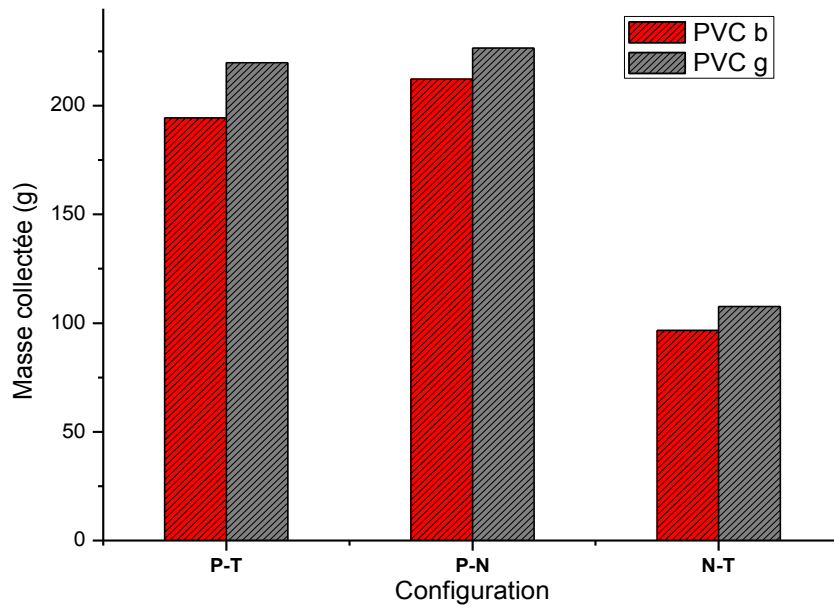


Figure III.17: Variation de masse collectée de PVCb et PVCg en fonction de la configuration des électrodes, pour la masse introduite 1400g

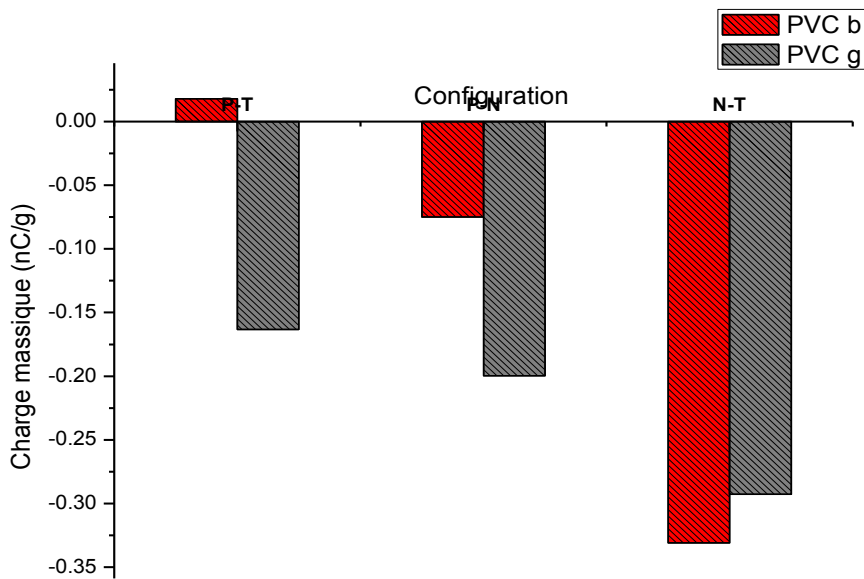


Figure III.18: Variation de la charge massique de PVCb et PVCg en fonction de la configuration des électrodes, pour la masse introduite 1400g

Interprétation et discussion

D'après ces résultats obtenus, on remarque que la masse et le type de configuration de champs électrique influent beaucoup sur l'efficacité de la charge et la masse collectée. On obtient un meilleur rendement de récupération pour la configuration "positif-terre" et une masse de produit égale à 1000g. Ceci est justifié par le fait que plus la quantité de granules augmente plus le nombre des collisions diminuent et par conséquent, le chargement des particules est mauvais. On remarque aussi que le PVCg se charge négativement et mieux par rapport au PVCb qui se charge positivement, dans ce cas le résultat le plus remarquable PVCb qui se charge normalement positivement il accise une charge négative dans les deux cas "positive-négative" et "négative-masse", donc il change sa charge dans le moment où il est collé à l'électrode.

Pour toutes les expériences qui vont suivre, c'est la configuration « Positive-Terre » qui a été choisie.

b) Influence de la vitesse de rotation des disques

L'influence de la vitesse de rotation des disques sur la charge massique et le taux de récupération a été analysée en faisant varier la vitesse de 40 à 120 tr/min. Les résultats obtenus sont illustrés par les figures III.19 et III.20, Les masses des échantillons des granulés de PVCb et, le PVCg sont maintenues constantes ($m=500g$ pour chaque produit). Les autres paramètres maintenus constants sont les suivants:

- Champ électrique $E=3kV/cm$;
- Distance inter électrodes $d=4cm$;
- Débit d'air injecté $D= 23L/min$
- Configuration P-T
- Masse totale du produit 1000g (50% PVCb-50% PVCg).

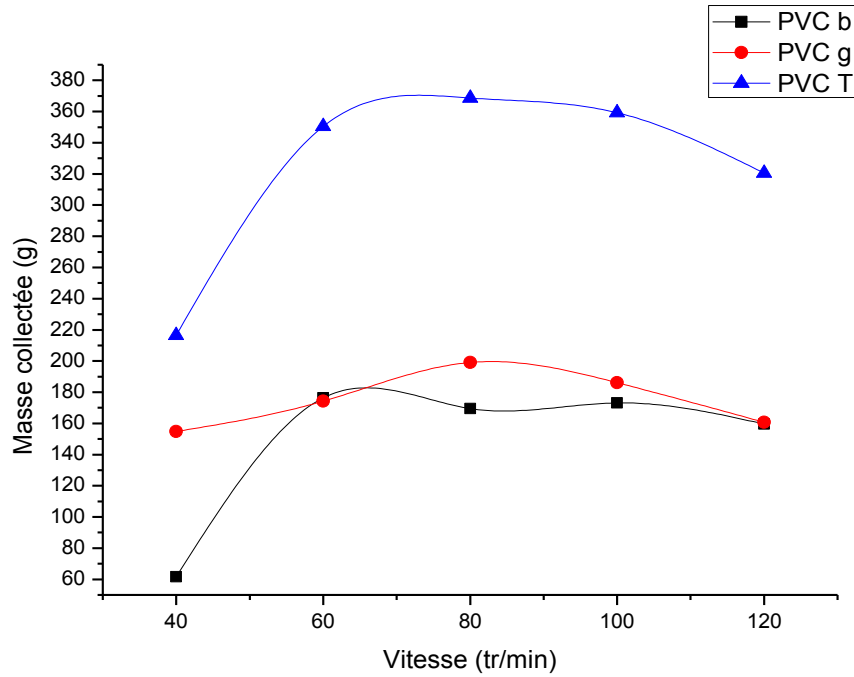


Figure III.19: Variation de la masse collectée de PVCb, PVCg et PVC T en fonction de la vitesse de rotation

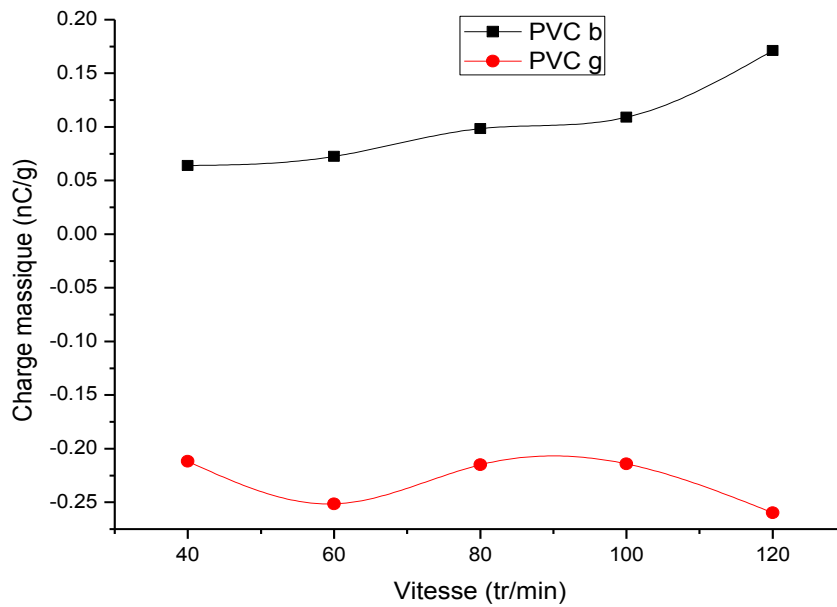


Figure III.20: Variation de la charge massique de PVCb et PVCg en fonction de la vitesse de rotation

Interprétation et discussion

Les résultats expérimentaux menés sur les deux matériaux PVCb et PVCg montrent que la charge massique des particules croît légèrement avec l'augmentation de la vitesse de rotation des disques. On remarque que le taux de chargement devient élevé à partir de 120 tr/min et le meilleur rendement de récupération entre 60 tr/min et 100 tr/min. Cela peut être expliqué la force centrifuge est proportionnel à la vitesse de rotation des disques donc cette force devient plus élevé, donc la récupération est inversement proportionnel à partir de vitesse 80 tr/min.

c) Influence de débit d'air injecté sur la charge acquise

Les figures III.21 et III.22, représentent l'influence du débit d'air injecté sur la charge massique et le taux de récupération. La masse du mélange des particules ainsi que la vitesse de rotation des disques sont maintenues constantes ($M=1000g$, $n=80tr/min$). Ces résultats ont été obtenus en utilisant les paramètres constants suivants:

- Champ électrique $E=3kV/cm$;
- Distance inter électrodes $d=4cm$;
- Vitesse de rotation des disques $n= 80t/min$;
- Configuration P-T;
- Masse 1000g

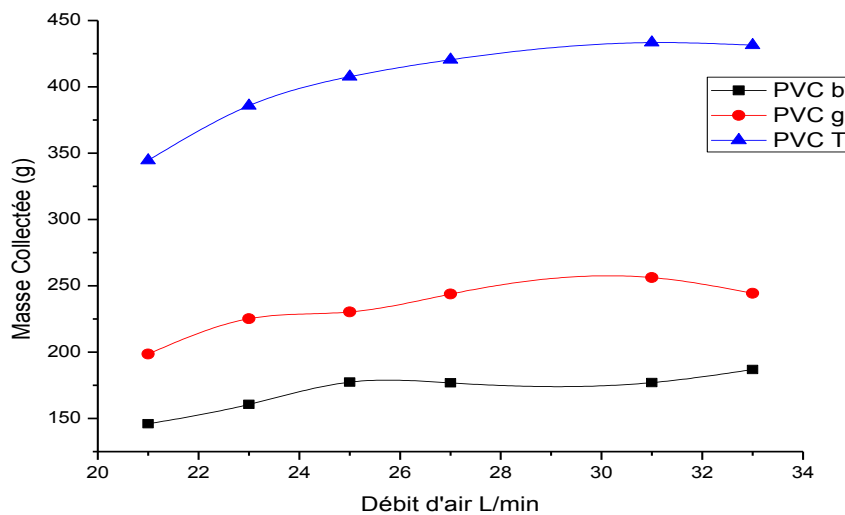


Figure III.21: Variation de masse collectée de PVCb, PVCg et PVC T en fonction de débit d'air

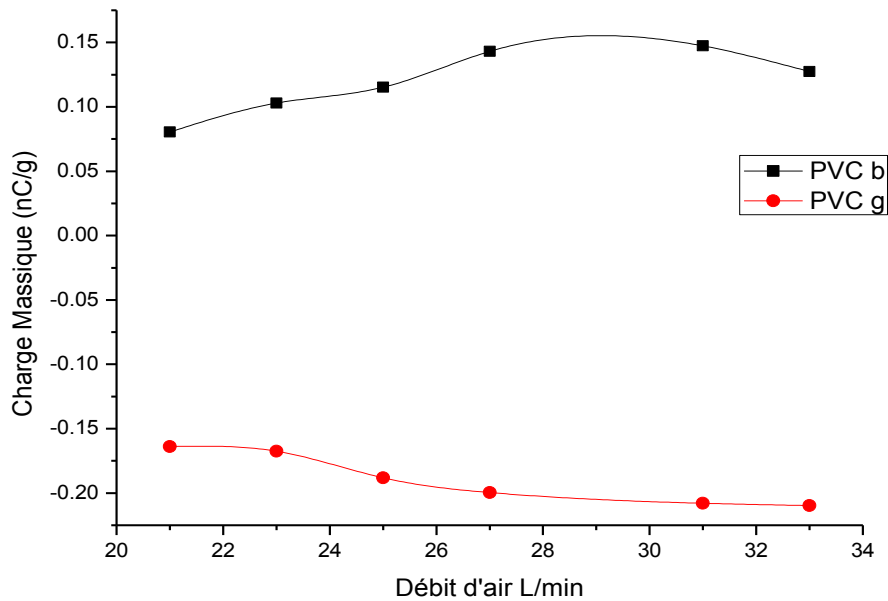


Figure III.22: Variation de la charge massique de PVCb et PVCg en fonction de débit d'air

Interprétation et discussion

Les figures III.21 et III.22 représentent la variation de la masse collectée et la charge massique en fonction du débit d'air injecté, et montrent que le débit n'influe pas beaucoup sur la charge massique et la masse collectée. Après une certaine valeur de débit égale à environ 25 L/min, il n'est pas nécessaire d'augmenter plus le débit d'air D.

III.4 CONCLUSION

Les résultats obtenus avec ce nouveau séparateur à disques ont montré que ce dispositif est efficace pour la séparation des particules micronisées. D'un autre côté, nous avons montré que le produit qui se charge plus est mieux séparé par rapport à l'autre.

Par ailleurs, il a été vérifié que la tension appliquée « U » entre les deux électrodes, donc le champ électrique, influe beaucoup sur les performances de la séparation. Le rendement du séparateur triboélectrique à deux disques rotatifs devient plus élevé pour une valeur de champ électrique autour de 2kV/cm.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de ce procédé par la méthode des plans d'expériences.

CHAPITRE IV

MODELISATION ET OPTIMISATION DU PROCEDE DE SEPARATION

Chapitre IV

MODELISATION ET OPTIMISATION DU PROCEDE DE SEPARATION

La croissance rapide de l'industrie de recyclage, stimulée par des réglementations de plus en plus strictes concernant la protection de l'environnement, s'accompagne d'une amplification des efforts de recherche et de développement dans ce domaine. La séparation des mélanges granulaires solides à l'aide de forces électriques [82–83] est une technologie prometteuse pour traiter les déchets d'équipements électriques et électroniques, par exemple [84-85].

Ces dernières années, divers dispositifs utilisant l'effet triboélectrique ont été conçus et réalisés comme moyens de charger les granules en vue de leur séparation en champ électrique, suivant la polarité de l'électrode et le signe de la charge acquise [86-87].

Malgré les efforts de recherche visant à la réalisation et l'optimisation de divers types de séparateurs électrostatiques, l'application industrielle d'une telle technologie reste problématique pour des particules micronisées [88]. Des rendements élevés sont obtenus pour les mélanges granulaires de taille millimétrique, par contre les procédés de séparation des particules de taille micrométrique sont moins efficaces, en raison des forces aérodynamiques qui affectent leurs trajectoires.

Le but de ce chapitre est l'identification des conditions de fonctionnement optimal pour l'amélioration de la récupération du produit en utilisant le séparateur tribo-aéro électrostatique à deux disques rotatifs. Afin de réaliser, nous avons suivi une stratégie basée sur les trois étapes suivantes :

- Détermination des domaines d'étude des variables de contrôle du processus de séparation.
- Modélisation du nouveau électro-séparateur en utilisant la méthodologie des plans d'expériences.

- Optimisation des conditions de fonctionnement optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0

L'étude expérimentale a été effectuée en considérant trois facteurs: le champ électrique E (kV/cm), le débit d'injection de l'air D (L/min) et la vitesse de rotation des disques n (tr/min). Les essais ont été effectués à la température ambiante (19°C à 24°C), l'humidité relative de l'air étant comprise entre 40 à 60%.

IV.1 Essais préliminaires pour la détermination des domaines d'étude des variables

Un ensemble de 3 expériences préliminaires a été effectué. Pour chaque expérience, un facteur a été varié tandis que les autres étaient maintenus constants. Le but de ces premières expériences est de déterminer l'intervalle de variation pour chaque facteur, en préparation d'un plan factoriel composite à faces centrées, qui devrait permettre la modélisation et l'optimisation du processus de séparation.

Les trois expériences préliminaires ont été réalisées dans les conditions suivantes :

Expérience 1 : Varier le champ électrique E de 1 à 4 kV/cm pour des valeurs constantes de débit d'air $D = 21$ L/min et la vitesse de rotation $n = 80$ tr/min.

Expérience 2 : Varier la vitesse de rotation du disque n entre 40 et 140 tr/min, pour des valeurs constantes du champ $E = 3$ kV/cm et du débit d'air $D = 21$ l/min.

Expérience 3 : Varier le débit de l'air de fluidisation D entre 21 et 34 l/min, pour des valeurs constantes du champ $E = 3$ kV/cm et de la vitesse $n = 80$ tr/min.

Les résultats de ces expériences, en termes de masse récupérée de PVC blanc (PVC_b) et PVC gris (PVC_g), ainsi que la récupération totale (M_{total}), sont illustrés sur les figures IV.1 à IV.3. Les résultats de la Figure. IV.1, représentant la variation de la masse en fonction du champ, montrent que la masse des deux produits de PVC augmente avec le champ électrique jusqu'à 3 kV/cm, et diminue pour des valeurs plus élevées du champ.

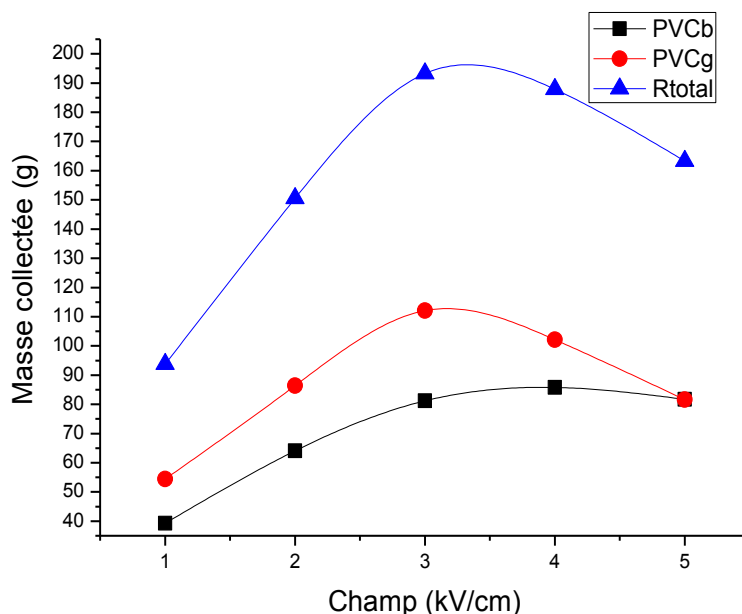


Figure IV.1 : Variation de la masse collectée de PVC_b , PVC_g et la masse totale en fonction du champ électrique

Dans ce cas-ci, la force électrique devient plus importante et une grande quantité de produit est collectée rapidement sur les deux disques, ce qui finit par recouvrir entièrement les électrodes. Par conséquent, l'autre produit ayant une charge de signe opposé s'attache à cette électrode causant ainsi la diminution de l'efficacité de séparation. En plus de l'attachement des granules de signe opposé, une fois saturée, la couche du produit repousse les particules de même signe. D'après ces résultats, nous avons opté pour $E_{\max} = 2$ kV/cm et $E_{\min} = 4$ kV/cm pour les limites de l'intervalle de variation du champ électrique.

Les résultats de la Figure IV.2, représentant la variation de la masse en fonction de la vitesse de rotation des disques, montrent que la masse des deux produits de PVC augmente avec la vitesse de rotation jusqu'à 80tr/min, et diminue pour des valeurs plus élevées de la vitesse.

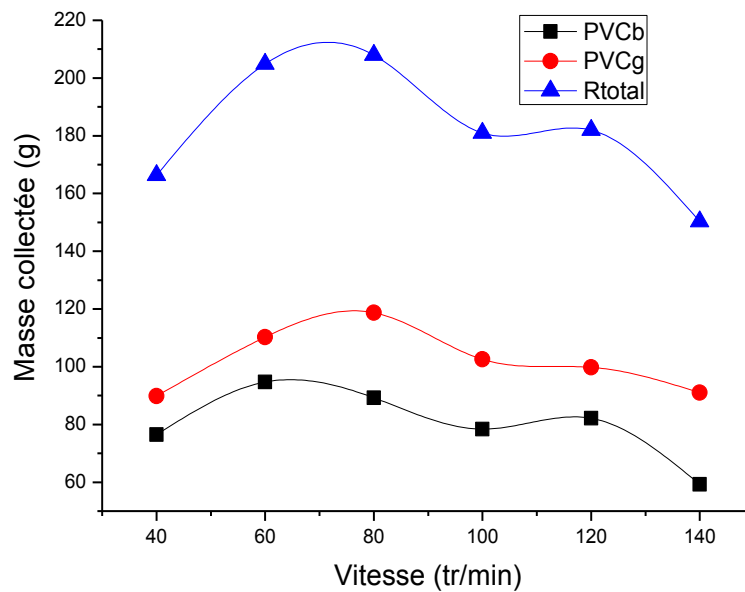


Figure IV.2 : Variation de la masse collectée de PVC_b , PVC_g et totale en fonction de la vitesse de rotation des disques

En plus de la force d'image électrique qui cause l'attachement des particules sur le disque, une autre force mécanique est à considérer : la force centrifuge, qui est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation n . En augmentant cette dernière, la force centrifuge cause le détachement des particules et la diminution de l'efficacité de séparation. D'autre part, pour des valeurs réduites de la vitesse n , les granules ont assez de temps pour recouvrir rapidement toute la surface du disque causant l'attachement des particules de charge électrique de signe opposé, entraînant de ce fait la diminution du taux de récupération. Selon les résultats représentés sur la figure IV.2, l'intervalle de variation de la vitesse a été choisie comme suit : $n_{\min} = 60$ tr/min et $n_{\max} = 100$ tr/min.

Par ailleurs, la variation de la masse collectée en fonction du débit d'air est représentée sur la figure IV.3, et montre qu'il n'est pas nécessaire de trop augmenter le taux de fluidisation. En effet, quand le débit d'air augmente, les particules acquièrent une charge triboélectrique plus élevée et le phénomène d'attraction entre les deux types de PVC sur le disque causera ainsi une diminution de l'efficacité de séparation. Par conséquent, lorsque le disque est entièrement recouvert d'un type de PVC causant la formation d'une couche d'environ 1 mm d'épaisseur, l'autre type de PVC commencera à s'attacher à lui. Selon notre cas d'étude, la valeur optimale d'injection de l'air est environ de 24 l/min. Les limites de l'intervalle de variation pour ce facteur sont $D_{\text{mix}} = 21$ l/min et $D_{\text{max}} = 26$ l/min.

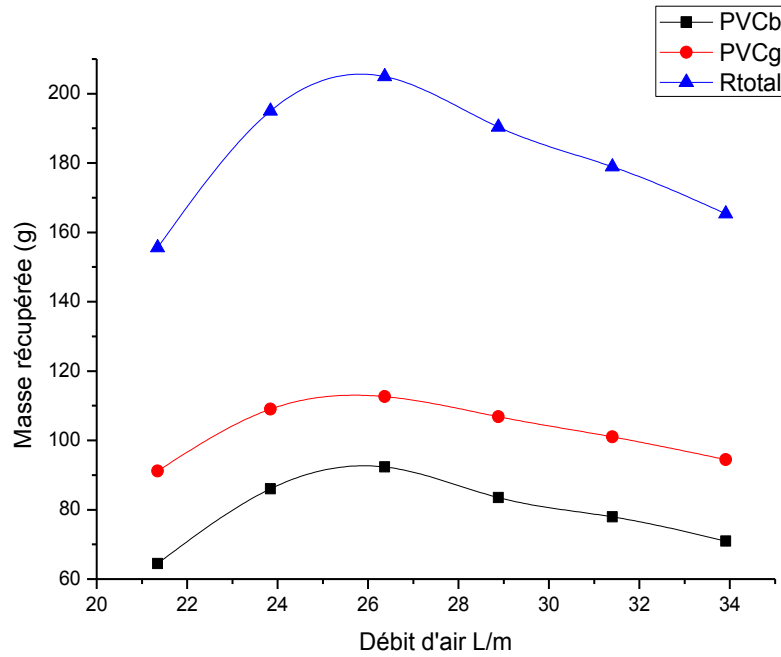


Figure. IV.3 : Variation de la masse collectée de PVC_b, PVC_n et totale en fonction du débit d'injection d'air.

IV.2 Modélisation du séparateur tribo-aéro électrostatique à deux disques rotatifs

IV.2.1 Choix des intervalles d'étude

On a défini les intervalles d'étude d'après les résultats des essais préliminaires

a-Intervalle d'étude du champ électrique

L'intervalle d'étude du champ électrique est :

$$2 \text{ kV/cm} \leq E \leq 3 \text{ kV/cm}$$

La valeur centrale de l'intervalle d'étude du champ électrique est donnée par :

$$E_c = (E_{\max} + E_{\min}) / 2 \quad (\text{IV.1})$$

D'où : $E_c = 2,5 \text{ kV/cm}$

b-Intervalle d'étude de la vitesse de rotation des disques

L'intervalle d'étude de la vitesse de rotation est :

$$60 \text{ tr/min} \leq n \leq 100 \text{ tr/min}$$

La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la vitesse de rotation est donnée par :

$$n_c = (n_{\max} + n_{\min}) / 2 \quad (\text{IV.2})$$

D'où : $n_c = 80$ tr/min

c-Intervalle d'étude du débit de l'injection d'air

L'intervalle d'étude du débit d'air est :

$$21 \text{ L/min} \leq D \leq 26 \text{ L/min}$$

La valeur centrale de l'intervalle d'étude du débit d'air est donnée par :

$$D_c = (D_{\max} + D_{\min}) / 2 \quad (\text{IV.3})$$

D'où : $D_c = 23,5$ L/min

IV.2.2 Plan d'expérience complet et modèle du premier degré

Après une première étude des différents facteurs qui ont une influence sur les critères de l'électro-séparateur, on va maintenant essayer d'établir une relation entre les grandeurs d'entrée (Champ-vitesse de rotation-débit) et les grandeurs de sortie (Masse du PVC_b, PVC_g et totale). Pour cela nous proposons en premier lieu le plan du premier degré et on va établir le test de signification, s'il n'est pas valide on passe par la suite au plan du deuxième degré appelé « plan composite à faces centrées » qui offre en plus du modèle mathématique une modélisation par des surfaces de réponse (RSM).

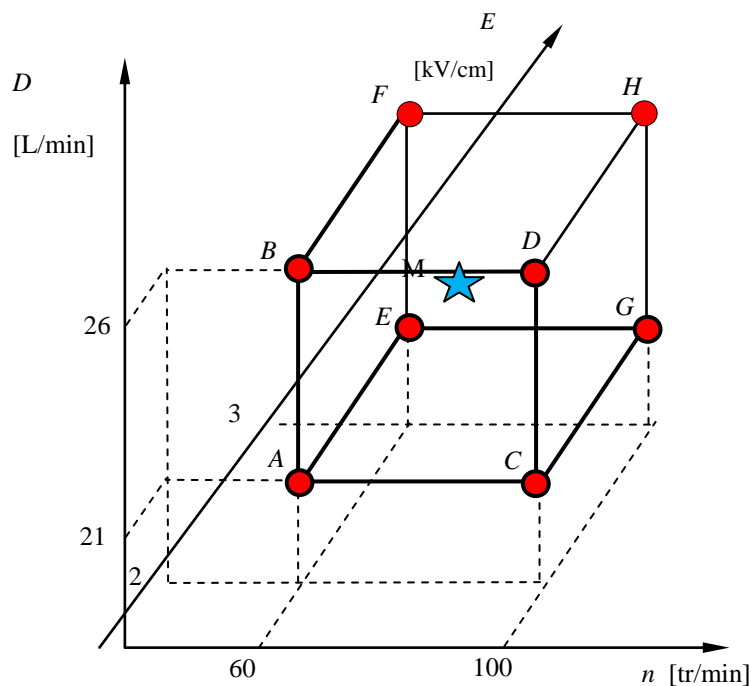


Figure IV.4: Diagramme d'un plan factoriel des essais réalisés.

Les coefficients peuvent être calculés à partir des données expérimentales du plan d'expérience complet *figure IV.4* en utilisant le logiciel MODDE 5.0.

a) Résultats des expérimentations

Les résultats des 11 expériences sont présentés dans le tableau IV.1. Dans ce tableau, les valeurs de REC_b , REC_g et REC_{total} affichées en pourcentage (%), sont calculés comme suit :

- $REC_b = \frac{\text{masse collectée de PVC}_b}{\text{masse initiale de PVC}_b} \times 100$
- $REC_g = \frac{\text{masse collectée de PVC}_g}{\text{masse initiale de PVC}_g} \times 100$
- $REC_{totale} = \frac{\text{masse collectée totale}}{\text{masse initiale totale}} \times 100$

Tableau IV.1: Résultats des expériences du plan factoriel

E (kV/cm)	n (tr/min)	D (L/min)	REC_b (%)	REC_g (%)	REC_{total} (%)
2	60	21	35,8	38,6	37,2
3	60	21	46,6	52,0	49,3
2	100	21	34,7	30,6	32,6
3	100	21	45,9	48,7	47,3
2	60	26	35,4	34,6	35,0
3	60	26	50,5	48,6	49,5
2	100	26	38,7	41,8	40,2
3	100	26	51,3	61,8	56,5
2,5	80	23,5	42,5	46,9	44,7
2,5	80	23,5	42,1	46,1	44,1
2,5	80	23,5	48,4	53,2	50,8

b) Détermination des effets du modèle mathématique [89]

On va s'intéresser en premier lieu à la récupération de PVC_b. La matrice d'expériences des effets est décrite dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2: Matrice d'expériences du plan factoriel pour la récupération de PVC_b.

Essais à réaliser								
N° Essai	A	E	n	D	E*n	E*D	n*D	REC _b (%)
1 (A)	1	-1	-1	-1	1	1	1	35,8
2 (B)	1	1	-1	-1	-1	-1	1	46,6
3 (C)	1	-1	1	-1	-1	1	-1	34,7
4 (D)	1	1	1	-1	1	-1	-1	45,9
5 (E)	1	-1	-1	1	1	-1	-1	35,4
6 (F)	1	1	-1	1	-1	1	-1	50,5
7 (G)	1	-1	1	1	-1	-1	1	38,7
8 (H)	1	1	1	1	1	1	1	51,3
9 (M)	1	0	0	0	0	0	0	42,5
10 (M)	1	0	0	0	0	0	0	42,1
11 (M)	1	0	0	0	0	0	0	48,4
Domaine d'étude								
	Champ électrique		Vitesse de rotation			Débit d'air		
Niveau -1	2 kV/cm		60tr/min			20L/min		
Niveau +1	3 kV/cm		100tr/min			26L/min		

On a procédé à l'estimation des erreurs et des effets significatifs sur les trois réponses obtenues après séparation.

Un effet sera significatif au risque de 5% avec $v=n-p=11-7=4$ $t_{crit}(0.05 ;4)=2.776$ (voir l'annexe), si son test statistique « t_i » est supérieur à 2.776. On obtient le tableau IV.3 pour la récupération de PVC_b.

Tableau IV.3: Analyse de chaque effet du modèle pour la récupération de PVC_b.

Variables	Effets	t _i	Résultats
Constant	41,76		
E	6,21	3,69	Significatif
N	0,28	0,17	Non significatif
D	1,62	0,96	Non significatif
E*n	-0,28	0,17	Non significatif
E*D	0,71	0,42	Non significatif
n*D	0,75	0,45	Non significatif

c) Analyse de variance [90]

L'analyse de la variance consiste à comparer à l'aide d'un test, appelé test de *Fisher*, la somme des carrés des écarts due uniquement à la régression, avec la somme des carrés des résidus, on obtient le tableau d'analyse de variance suivants :

Tableau IV.4: Analyse de la variance pour la récupération de PVC_{blanc}.

Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
Liaison	339,308	6	56,551	1,813
Résidus	124,784	4	31,196	
Totale	464,092	10		

La table de *Fisher-Snédecor* (voir l'annexe) donne pour $v_1=6$ et $v_2=4$, $F(\text{crit})=6.16$, pour un risque de 5%.

On a : $(F_{\text{obs}}=1.813) < (F_{\text{crit}}=6.16)$ donc on rejette l'hypothèse de linéarité du modèle.

En faisant le même calcul pour les autres réponses (récupération de PVC_{gris}, la récupération totale), on trouve les tableaux suivant :

Tableau IV.5: Analyse de chaque effet du modèle pour la récupération de PVC_{gris}.

Variables	Effets	t _i	Résultats
Constant	45,71		
E	8,18	6,61	Significatif
N	1,12	0,90	Non significatif
D	2,11	1,71	Non significatif
E*n	1,33	1,07	Non significatif
E*D	0,31	0,25	Non significatif
n*D	3,98	3,21	Significatif

Tableau IV.6: Analyse de la variance pour la récupération de PVC_{gris}.

Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
Liaison	722,573	6	120,429	7,144
Résidus	67,433	4	16,858	
Totale	790,006	10		

Tableau IV.7: Analyse de chaque effet du modèle pour la récupération totale.

Variables	Effets	t _i	Résultats
Constant	44,30		
E	7,20	6,92	Significatif
N	0,70	0,67	Non significatif
D	1,86	1,79	Non significatif
E*n	0,52	0,50	Non significatif
E*D	0,51	0,49	Non significatif
n*D	2,36	2,27	Non significatif

Tableau IV.8: Analyse de la variance pour la récupération totale.

Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
Liaison	495,022	6	82,504	6,928
Résidus	47,633	4	11,908	
Totale	542,655	10		

On a dans le cas de la réponse de la récupération du PVC_{blanc} : $F_{\text{obs}} < F_{\text{crit}} = 6.16$, donc on rejette l'hypothèse de linéarité du modèle.

La conclusion de cette étude est que l'on doit rejeter le modèle linéaire pour exprimer la récupération de produit PVC_{blanc} et PVC_{gris}. Il faudrait refaire l'étude en utilisant un modèle polynomiale du second degré, et par conséquent un autre plan d'expériences appelé plan composite à facteur centrés.

IV.2.3 Plan d'expériences composite et modèle de deuxième degré

Le plan composite centré fait partie des plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses. Leur usage est particulièrement destiné à la modélisation de la surface de réponse expérimentale, c'est-à-dire l'évolution du critère de performance sur un univers des variables bornées. Ce sont les plans les plus utilisés car ils présentent l'avantage de la facilité de construction. Ces plans sont construits en ajoutant des points de mesures à un plan factoriel complet.

Les plans pour l'étude d'une surface de réponse étant souvent utilisés après une étude des effets des facteurs ; il suffit alors de réaliser seulement quelques expériences supplémentaires pour estimer la surface de réponse du critère étudié.

Un plan composite centré est défini par :

- 1) Un plan factoriel complet des 2^k expériences ;
- 2) n_0 répétitions au centre du domaine expérimental, dédiées à l'analyse statistique ;
- 3) $2k$ points en étoile positionnés sur les axes de chaque paramètre. Ces points contribuent à l'évaluation des termes quadratiques du modèle polynomial, c'est-à-dire qu'ils donnent des informations sur la courbure de la surface de réponse.

Donc le nombre total d'essais devront être menés est :

$$N = 2^k + 2.k + n_0 \quad (\text{IV.4})$$

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 qui correspondent aux points en étoile et de faire les calculs sur l'ensemble des expériences. Dans ce plan on doit faire 17 expériences composites données sur la figure IV.5

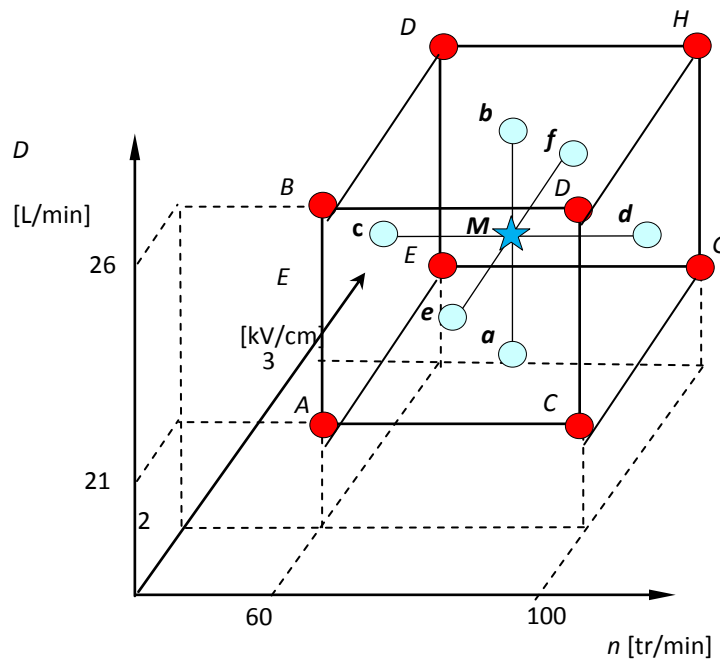


Figure IV.5: Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite.

b) Résultats des expérimentations

Les résultats des 17 expériences effectuées selon le plan d'expérience composite à faces centrées sont reportés au tableau IV.9

Tableau IV.9 Résultats du plan composite pour les différentes récupérations.

E (kV/cm)	n (tr/min)	D (L/min)	REC _b (%)	REC _g (%)	REC _{total} (%)
2	60	21	35,8	38,6	37,2
3	60	21	46,6	52	49,3
2	100	21	34,7	30,6	32,6
3	100	21	45,9	48,7	47,3
2	60	26	35,4	34,6	35
3	60	26	50,5	48,6	49,5
2	100	26	38,7	41,8	40,2
3	100	26	51,3	61,8	56,5

2	80	23,5	31,5	33,9	32,7
3	80	23,5	45,2	50	47,6
2,5	60	23,5	43,8	46,1	45
2,5	100	23,5	43,1	48,2	45,6
2,5	80	21	44,2	47,1	45,7
2,5	80	26	48,5	51,2	49,9
2,5	80	23,5	42,5	46,9	44,7
2,5	80	23,5	42,1	46,1	44,1
2,5	80	23,5	48,4	53,2	50,8

On a procédé à l'estimation des erreurs et des effets significatifs sur les trois réponses obtenues après séparation.

Un effet sera significatif au risque de 5% avec $v=n-p=17-10=7$ $t_{crit}(0.05 ; 7)=2.365$ (voir l'annexe), si son test statistique « t_i » est supérieur à 2.365. On obtient le tableau IV.10 pour la récupération de PVC_{blanc}.

Tableau IV.10: Analyse de chaque effet du modèle pour la récupération de PVC_{blanc}

Variabes	Effets	t_i	Résultats
Constant	43,685		
E	6,338	12,60432	Significatif
N	0,152	0,302669	Non significatif
D	1,719	3,41845	Significatif
E*E	-4,839	9,622911	Significatif
n*n	0,221	0,439543	Non Significatif
D*D	3,161	6,286107	Significatif
E*n	-0,278	0,552838	Non Significatif
E*D	0,707	1,405959	Non Significatif
n*D	0,751	1,494453	Non Significatif

Et pour l'analyse de la variance de la récupération de PVC_{blanc} on trouve :

Tableau IV.11: Analyse de la variance pour la récupération de PVC_{blanc}

Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré Moyen	F(obs)
Liaison	512,052	9	56,895	13,235
Résidus	30,091	7	4,299	
Totale	542,144	16		

En faisant le même calcul pour les autres réponses (récupération de PVC_{gris} , et la récupération totale), on trouve les tableaux suivants :

Tableau IV.12: Analyse de chaque effet du modèle pour la récupération de PVC_{gris}

Variables	Effets	t_i	Résultats
Constant	47,879		
E	8,150	15,08529	Significatif
N	1,102	2,040593	Non significatif
D	2,099	3,885716	Significatif
E*E	-5,278	9,770134	Significatif
n*n	-0,090	0,166907	Non Significatif
D*D	1,910	3,535185	Significatif
E*n	1,327	2,455413	Significatif
E*D	0,306	0,565495	Non Significatif
n*D	3,977	7,360685	Significatif

Tableau IV.13: Analyse de la variance pour la récupération de PVC_{gris}

Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
Liaison	950,062	9	105,562	21,276
Résidus	34,731	7	4,962	
Totale	984,793	16		

Tableau IV.14: Analyse de chaque effet du modèle pour la récupération totale

Variabiles	Effets	t_i	Résultats
Constant	45,783		
E	7,244	14,14206	Significatif
N	0,627	1,22466	Non significatif
D	1,909	3,727081	Significatif
E*E	-5,059	9,87639	Significatif
n*n	0,065	0,127049	Non Significatif
D*D	2,535	4,949159	Significatif
E*n	0,524	1,023478	Non Significatif
E*D	0,506	0,988337	Non Significatif
n*D	2,364	4,615169	Significatif

Tableau IV.15: Analyse de la variance pour la récupération totale

Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
Liaison	690,929	9	76,77	17,212
Résidus	31,222	7	4,46	
Totale	722,151	16		

La table de *Fisher-Snédecor* (voir l'annexe) donne pour $v_1=9$ et $v_2=7$, $F(\text{crit})=3.68$, pour un risque de 5%.

On a dans les quatre réponses : $F_{\text{obs}} > (F_{\text{crit}}=3.68)$, donc on accepte l'hypothèse H_1 de linéarité du modèle.

On élimine les effets non significatifs, on obtient ainsi, les modèles mathématiques suivants :

1-Pour la récupération de $\text{PVC}_{\text{blanc}}$:

$$REC_b = 43.69 + 6.34E + 1.72D - 4.84E^2 + 3.16D^2 \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$$R^2 = 94.45\%$$

$$Q^2 = 83.85\%$$

2-Pour la récupération de PVC_{gris} :

$$REC_g = 47.88 + 8.15E + 2.1D - 5.28E^2 + 1.91D^2 + 1.33E \times n + 3.98n \times D \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

$$R^2=96.47\%$$

$$Q^2=93.08\%$$

3-Pour la récupération totale :

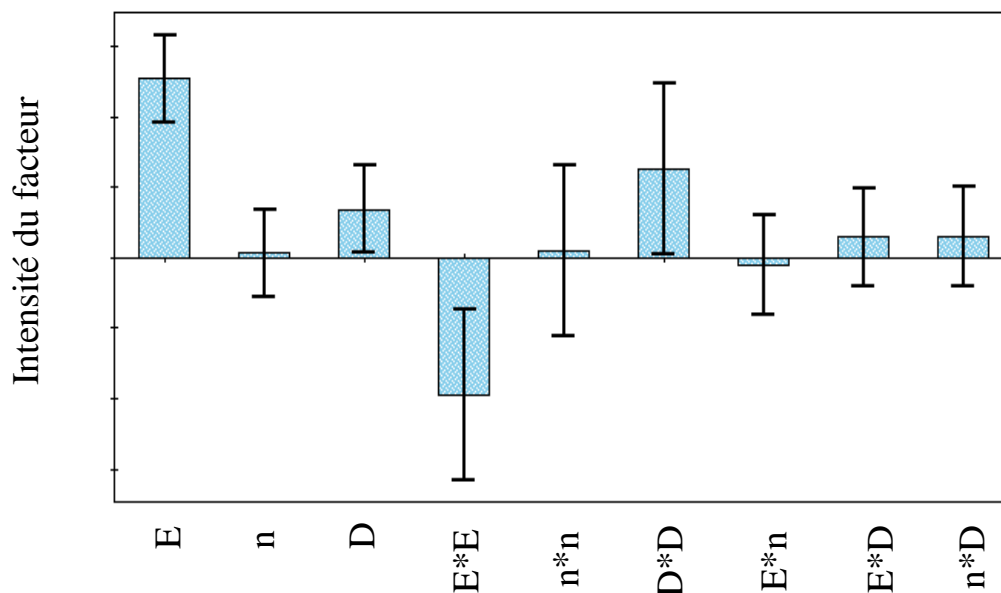
$$REC_{total}=45.78+7.24E+1.91D-5.06E^2+2.54D^2+2.36n \times D \quad (IV.6)$$

Avec :

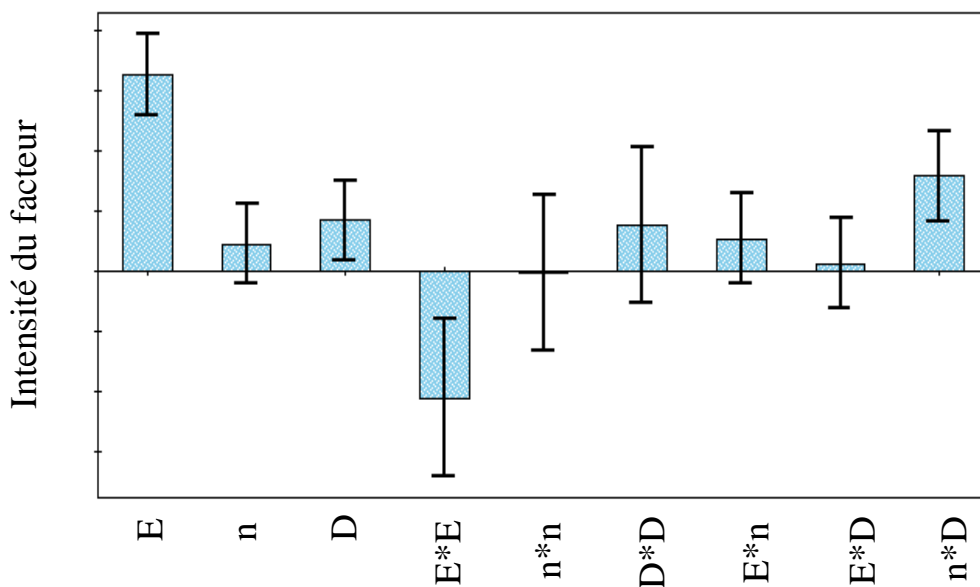
$$R^2=95.68\%$$

$$Q^2=91.69\%$$

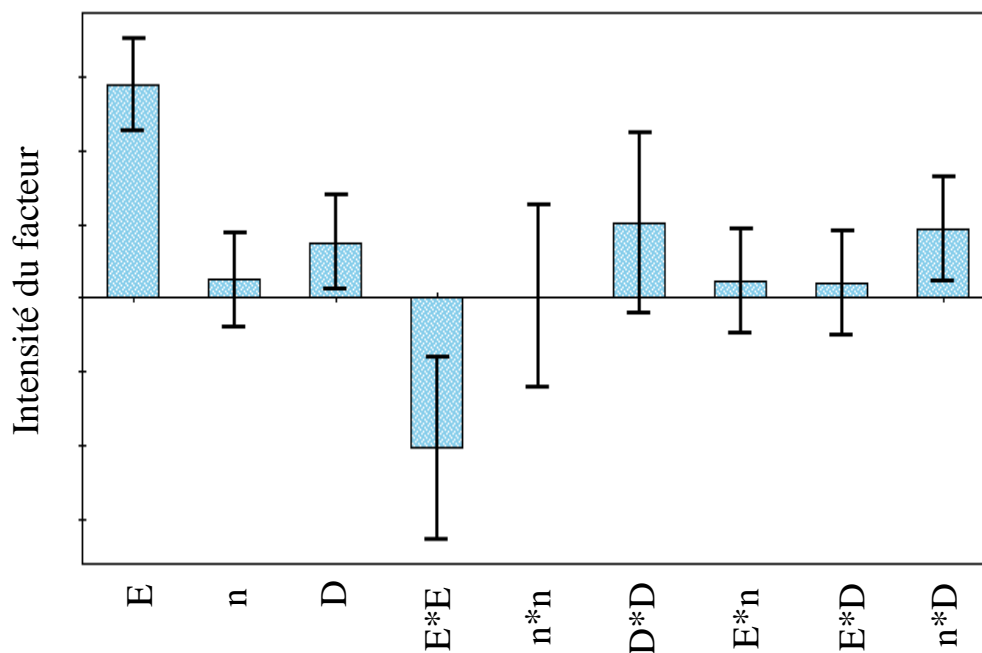
Les valeurs des coefficients associées aux facteurs dans le modèle mathématique montrent le degré d'influence de chaque facteur. Les tracés représentés à la (figure IV.6) découlent du modèle mathématique proposé dans les limites de la variation des intervalles choisis. On conclue que le champ électrique est le facteur le plus influent, et la vitesse de rotation a un effet pratiquement non significatif qui a peu d'influence en comparaison avec les autres facteurs. Les effets de champ électrique et le débit d'air sont positifs, ce qui signifie que la masse collectée est proportionnelle avec ces deux facteurs. Parmi les différentes interactions entre les facteurs, il existe une interaction entre le débit d'air et la vitesse de rotation, et il est notable de constater qu'il n'existe pas d'interaction entre les facteurs pour le PVC_{blanc}.



a. PVC blanc



b. PVC gris



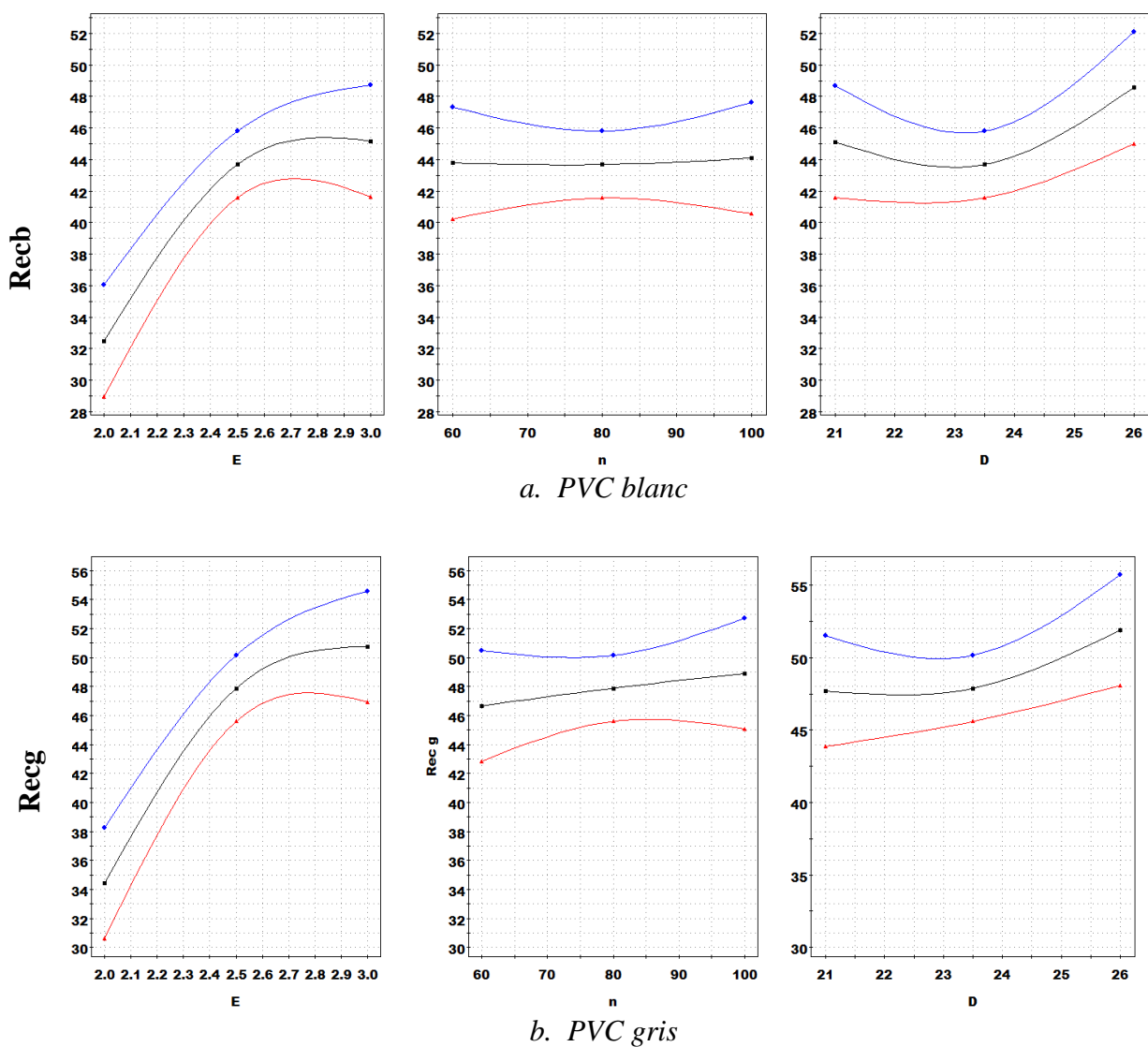
c. Récupération totale

Figure IV.6 : Histogramme montrant l'influence des différents facteurs pour la récupération.

A partir de la (figure IV.6), il devient évident que le champ électrique E , le débit d'air D ont une influence significative sur le phénomène de séparation. Seuls ces deux facteurs et les deux interactions significatives devront être utilisés pour l'optimisation du phénomène, pour augmenter ou bien diminuer la récupération du PVC_{blan} , PVC_{gris} et PVC_{total} , car ils ont des effets significatifs importants.

IV.2.4 Influence des facteurs sur les réponses

A partir des modèles mathématiques obtenus, on peut déterminer l'influence de chaque facteur sur chacune des réponses, en traçant la variation des réponses en fonction de ces facteurs choisis. Si on veut par exemple déterminer l'influence d'un facteur (E) sur la récupération de PVC_{blanc}, PVC_{gris} et Totale, on représente sa variation pour les trois niveaux du facteur choisi. En procédant de la même manière, on peut démontrer facilement que le facteur le plus influent sur les récupérations de PVC (blanc et gris) est le champ électrique (figure IV.7)



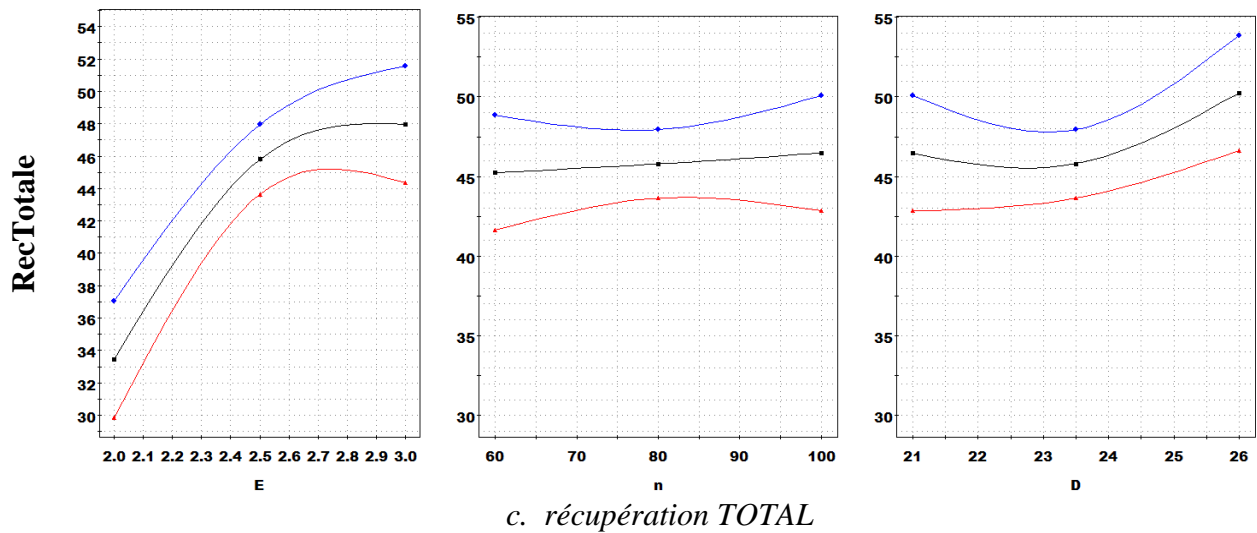


Figure IV.7: Effet de chaque facteur sur les réponses

Les courbes prédictives montrées à la (figure IV.7), représentent les valeurs prédites, tracées en trait noir (courbe centrale) qui sont comprises statistiquement, dans l'intervalle situé entre les courbes bleue et rouge, avec un intervalle de tolérance généralement égal à 5%. On peut également noter que dans les limites des intervalles choisis, pour chaque facteur, le champ électrique E et le débit d'air D sont les plus influents.

IV.2.5 Détermination du point de fonctionnement optimale

Nous avons utilisé le logiciel MODDE 5.0 (**MO**DEling and **DE**sign) qui est un programme exécutable sous Windows (réalisé par Umetrics AB, Umea, Suède) [91-92] pour la création et l'évolution statistique des plans d'expériences. Dans le plan défini par la variation de la masse en fonction des paramètres physiques (champ électrique, débit d'air), les courbes iso-réponses permettent de délimiter les différentes régions du plan qui correspondent aux différentes classes de la récupération. Les surfaces de réponses en fonction des deux paramètres : champ électrique E , et débit d'air D , sont montrées à la figure IV.8

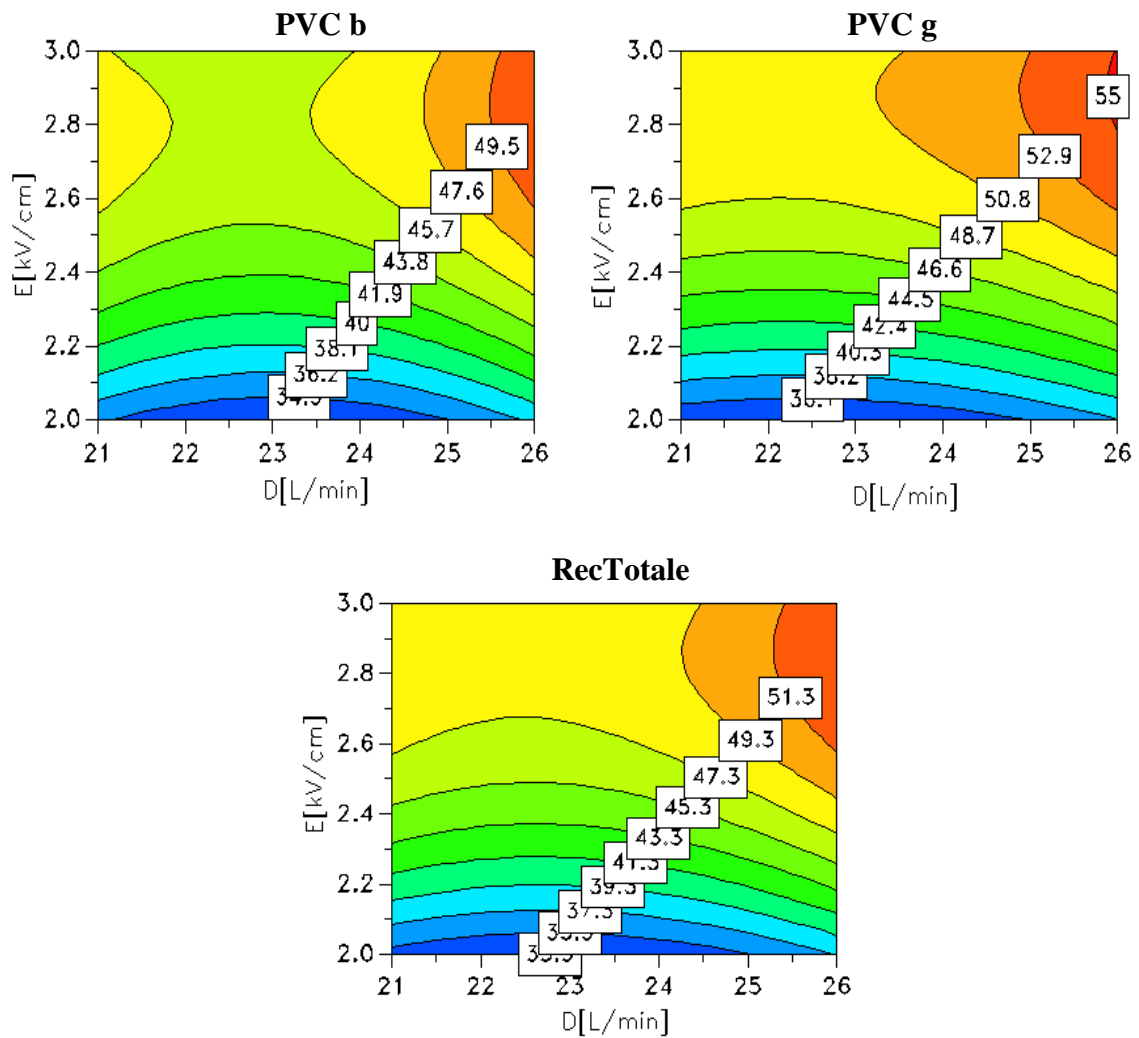


Figure IV.8: Modélisation par les surfaces de réponses de la récupération

Selon le logiciel MODDE 5.0, la meilleure séparation électrostatique des particules fines correspond aux valeurs optimales suivantes (figure IV.9):

- ✓ Champ électrique $E = 2.88$ kV/cm
- ✓ Vitesse de rotation $n = 100$ tr/min
- ✓ Débit d'air injecté $D = 24$ L/min.

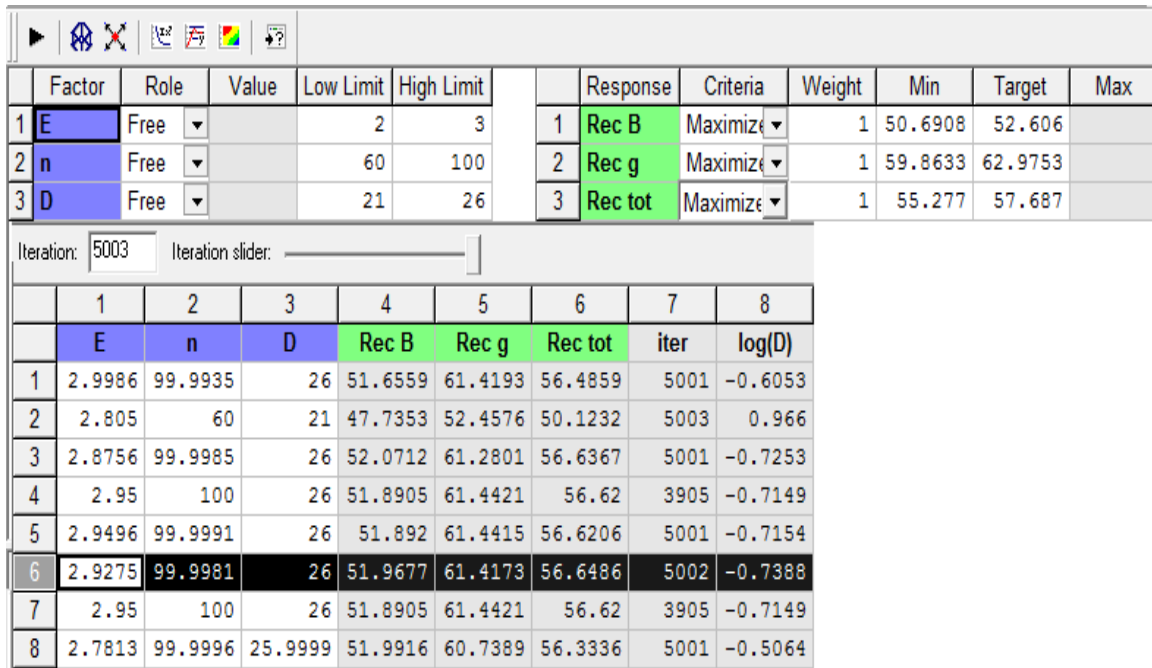


Figure IV.9: Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0

Afin de vérifier la précision du modèle, nous avons fait une expérience avec ces valeurs optimales, dont les résultats expérimentaux sont comparés aux résultats estimés avec le modèle mathématique.

Tableau IV.16 : comparaison entre les résultats estimés par le modèle et expérimentaux

	Champ E	Vitesse n	Débit D	PVC b %	PVC g %	Masse Total %
Résultats calculés	2.92	100	26	51,96	61.41	56.64
Résultats expérimentaux	2.92	100	26	55.36	62.83	59.10

IV.3 Conclusion

Le nouveau séparateur triboélectrique, pour lequel une demande de brevet d'invention a été déposée et acceptée, a été spécialement conçu pour la séparation des particules fines. L'efficacité du processus de séparation réalisé avec ce dispositif est due fait qu'il comporte comme éléments spécifiques deux disques rotatifs reliés à la haute tension de signe opposés, immergés dans un lit fluidisé.

La méthode des plans d'expériences, permet de délimiter les intervalles de variation des facteurs variables et ensuite de modéliser le rendement du séparateur électrostatique en proposant un modèle mathématique qui est validé en vérifiant des critères bien définis. Les modèles obtenus ont été ensuite utilisés pour déterminer les valeurs optimales des différents

facteurs et pour prédire le rendement du séparateur qui serait obtenu pour n'importe quelles valeurs de ces facteurs.

Les performances du séparateur dépendent de plusieurs facteurs : le niveau du champ électrique appliqué E (kV/cm), la vitesse de rotation des disques n (tr/min) et le débit d'injection de l'air D (l/min). Les résultats obtenus sont prometteurs puisque les mélanges de différents plastiques de taille micrométrique ont été séparés avec succès, avec des niveaux de pureté élevés.

Les recherches doivent se poursuivre pour optimiser le processus et pour évaluer la possibilité de l'appliquer à la séparation des particules très fines dans d'autres domaines de l'industrie.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La séparation des matériaux granulaires représente aujourd'hui un important domaine d'application industrielle de l'électrostatique. Historiquement, elle a d'abord été principalement développée pour la purification de substances minérales et de produits agricoles. Par la suite, l'étude théorique, l'analyse numérique par ordinateur et surtout l'expérimentation ont tracé le chemin pour plusieurs autres applications industrielles, notamment dans le domaine du recyclage des matériaux.

Dans la première partie, nous avons jugé nécessaire de présenter l'état de l'art sur l'effet tribo-électrique et pour éclairer cette présentation 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.

La conception et la réalisation du séparateur à deux disques rotatifs a été le travail le plus important dans ce projet de doctorat. Malgré les difficultés rencontrées au cours de la conception, et surtout dans la réalisation, nous avons pu aboutir à un dispositif expérimental de séparation qui fonctionne bien. Ce dispositif réalisé au niveau du laboratoire APELEC de l'université DJILALI LIABES de Sidi Bel Abbes, en collaboration avec le laboratoire IRECOM et de l'équipe « Electrostatique » de l'IUT d'Angoulême, a été breveté à l'Institut National de la Protection Industrielle INAPI

Nous avons pu voir et confirmer par des résultats expérimentaux que cette technologie est très utile et peut très bien être utilisée pour le traitement des déchets plastiques, sous forme des particules micronisées. Les résultats obtenus montrent que le champ électrique est le facteur le plus influent sur le séparateur à deux disques rotatifs. En outre, ces résultats sont prometteurs puisque les mélanges de différents plastiques de taille de μm ont été séparés avec succès, avec de hauts niveaux de pureté. D'un autre côté, le processus de séparation semble à priori ne pas être très insensible au changement du taux d'humidité.

Le but de cette étude est donc de mettre en œuvre un moyen d'améliorer le rendement d'un séparateur à lit fluidisé, en augmentant la récupération. Les résultats expérimentaux nécessitent une interprétation liée aux comportements électriques des particules micronisées utilisées. Même si cette installation semble présenter beaucoup d'avantages (possibilité de séparation continue, pureté élevée, récupération importante), il reste encore à établir le modèle mathématique de ces résultats ; il faut rechercher le point optimal de l'installation pour aboutir à un meilleur rendement. C'est pourquoi la dernière 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.

Nous espérons que dans un proche avenir, notre travail soit amélioré et soit la base pour d'autres études dans le domaine de la recherche sur les modes de séparation électrostatique.

Perspectives de recherche :

La thèse ouvre des perspectives sur des nouveaux problèmes de recherche dans le domaine de la séparation tribo-électrostatique 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 disques rotatifs.

Elargir l'exploitation du nouveau dispositif (séparateur à deux disques rotatifs) dans l'industrie de recyclage, dans les usines de traitement de minerais et la purification des produits alimentaires.

**REFERENCE
BIBLIOGRAPHIQUES**

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] 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.
- [2] A.BELLEL, "Traitement de surface de polymères par décharge couronne et plasma", Thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine (2004).
- [3] C. Zhong, Y. Jiang, F. Guo, P. Liu, W. Wu, J. Liao, "Effect of Humidity on Transport Mechanism in Ag/7,7,8,8-Tetracyanoquinodimethane Bilayer Films" Japanese Journal of Applied Physics Vol. 45, No. 4A, P. 2722–2725, (2006).
- [4] R. Coelho, L. Levy, D. Sarraïl, "Charge decay measurements and injection in insulators" J. Phy. D: Appl. Phys. 22, P. 1406-1409, (1989).
- [5] White H. J., "Industrial electrostatic precipitation", Wesley Publishing Company, Inc., 1963.
- [6] T.J.Sonnonstine and M.M. Perlman "Surface-potential decay in insulators with field- dependent mobility and injection efficiency", journal of applied physics, vol. 46, n°. 9, P.3975-3981, (1975).
- [7] P. W. Chdleigh, "Charge transport though a polymer foil", journal of applied physics, vol. 48, n°. 11, P. 4591-4596, (1977).
- [8] G.M. Sessler, "Models of charge Transport in electron-beam irradiated insulators", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.11, P. 192-212, (2004).
- [9] S. Sahli, A. Bellel, Z. Zairi, A. Kahlouche, Y. Segui, "Measure and analysis of potential decay in polypropylene films after negative corona charge deposition", Journal of Electrostatics, P. 1-10, (2002).
- [10] R. Fournie, Les isolants en électrotechnique, concepts et théories. Paris: Editions Eyrolles, 1986.
- [11] C.Menguy. Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides. Technique de l'ingénieur D 2310.
- [12] J.-C. Dubois. Propriétés diélectriques desplastiques. Techniques de l'ingénieur AM 3140.
- [13] W.C. Hinds, Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles, 2nd Edition, New York, 1999 (Wiley-Interscience).
- [14] Université de Liège. « Appendices du cours de physique générale». <http://www.labset.ulg.ac.be:8903/SCRIPT/physique/scripts/student/node1.htm>
l. Université de Liège.

- [15] Masuda and Y. Matsumoto, "Contact-type Electric Curtain for Electrodynamical Control of Charged Dust Particles", Proc. 2nd Int. Conf. on Static Electricity, Frankfurt, 1973, Dechema-Monogr. No. 72, Nr. 1370-1409, Verlag Chemie, 1974, pp. 293-301.
- [16] Zoltán Sternovsky, Amanda Sickafoose, Joshua Colwell, Scott Robertson and Mihály Horányi, "Contact charging of Lunar and Martian dust simulants", Journal of Geophysical Research, Vol. 107, No. E11, p. 5105, 2002.
- [17] Pécelet, "Ann. Chim. Phys", N° 02, p 337, 1834.
- [18] Helmholtz, "Gesammelte Abhandl", N° 01, p 855, 1879.
- [19] Coehn A, "Wied. Ann", N° 17, p 217, 1898.
- [20] Coehn et Raydt, "Ann. Physik", N° 30, p 777, 1909.
- [21] Gill, E.W.B et Al frey, G. F, "Nature", N° 163, p 172, 1949.
- [22] Morris-Jones, "Phil. Mag", N° 29, p 261, 1915.
- [23] Richards, "Phys. Rev", N° 16, p 290, 1920 et, 22, p 122, 1923.
- [24] Darmois E, "C. R. Acad. Sc", N° 226, p 882, 1948.
- [25] Bernal I. et Fowler "J. Chem. Phys", N° 1, p 515, 1933.
- [26] Lowell J, Rose-Innes A.C, "Contact electrification". In: *Advances in Physics*, N° 29, 947-1023, 1980.
- [27] Mazumder K. M, "Electrostatic Processes". In: *Wiley Encyclopedia of Electrical Electronics Engineering*. Volume 7. John Wiley&Sons, Inc., pp. 15-39, 1999.
- [28] Schein L.B, Castle G.S.P, "Triboelectricity". In: *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. John G. Webster (Editor). 22, 574-585.
- [29] Longchambon H. "Bull. Soc. Fr. Minéralogie" ,48, p 130, 1925.
- [30] Escalante S.L, Touchard G, Dominguez G, "Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes". In: *2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, p-p: 694-697, 2002.
- [31] 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.
- [32] Harper W.R, "Contact and Frictional Electrification". Morgan Hill, California, *Laplacian Press*, 1998.
- [33] Parker K. R., "Electrostatic precipitation", Chapman & Hall, pp. 1-24, 1997.

- [34] Oglesby S. & Nichols G. B., “Electrostatic precipitation”, Marcel Dekker Inc., 1978.
- [35] I. Holme, J.E. McIntyre, and Z.J. SHEN “Electrostatic charging of textiles” *The Textile Institute*, 1, p 28, 1998.
- [36] Sanford. “Phys. Rev”, N° 12, p 130, 1918.
- [37] Shaw. “Proc. Roy. Soc”, N° 94, p 16, 1917.
- [38] 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.
- [39] Atten, P., Denat, A. (Editors). 2nd International Workshop on Electrical Conduction, Convection and Breakdown in fluids. Grenoble France, 4-5 May 2000. Laboratoire d’Electrostatique et de Matériaux Diélectriques-CNRS and Université Joseph Fourier.
- [40] Bailey, A.G. “The charging of insulator surfaces”. In: *Journal of Electrostatics*. 51-52, 82-90 (2001).
- [41] COSTE (J.). – « Idées actuelles sur l’origine des charges électrostatiques : phénomènes de contact et de frottement ». Journées d’études SEE Electrostatique, sept. 1984.
- [42] F. Podczek Particle-particle adhesion in pharmaceutical Powder Handling, Imperial College Press, 1997.
- [43] F. London, Z. Physik, “Intermolecular Interactions”, N° 245, p 63, 1930.
- [44] Hamaker H.C, “The London-van der Waals attraction between spherical particles ”, *Physica*, 4, p 1058, 1937.
- [45] L. Massimilla & G. Donsi Cohesive forces between particles of fluid-bed catalysts, *Powder Technology*, 15, 253-260, 1976.
- [46] Marc Séguin , Julie Descheneau , Benjamin Tardif, “Ondes et physique moderne” *Physique XXI*, Tome C, 2010.
- [47] **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.
- [48] **A.Benabboun**, M.Rezoug, Y.Brahami, Tilmatine.A, M.Zelmat, Miloudi.M,A. Bendaoued "etude comparative des dispositifs d'acquisition de charge triboélectrique pour les séparateurs de particules plastique"5th fourth international conference on electrotechnics ICEL 2013, Decembre 03-04.

- [49] **Adel Benabboun**¹, Mouloud Med Zelmat¹, Amar Tilmatine¹, Abdelber Bendaoud², Mohamed Miloudi², Karim Medles², « Etude expérimentale d'un nouveau dispositif d'acquisition de charge triboélectrique pour les séparateurs de particules de plastique », *Ajot Algerian journal of technologie*, 9^{ème} conférence nationale sur la haute tension, P 297-301, CNHT 2013.
- [50] M.Rezoug, «*Contribution à l'étude de la neutralisation des charges électriques dans les particules isolantes*», Thèse Doctorat, Univ.SBA, 2015.
- [51] Boukhoulida M.F, 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.
- [52] Boukhoulida M. F, Medles K, Miloudi M, Tilmatine A, Bendaoud A, Dascalescu L, “Effect of Ambient Humidity on the Outcome of electrostatic Separation Process for Mixed Granular Polymers”, *IEEE/IAS annual meeting*, October 6-10, 2013 Orlando, FL USA.
- [53] Bilici, M. Dascalescu, L. ; Barna, V. ; Gyorgy, T. ; Rahou, F. ; Samuila, A. “Experimental modeling of the tribo-aero-electrostatic separation of mixed granular plastics” *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 2011 IEEE.
- [54] Ciprian Dragan, Ovidiu Fati, Mirela Radu, Laur Calin, Adrian Samuila, Lucian Dascalescu, “Tribocharging of Mixed Granular Plastics in a Fluidized-Bed Device” *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, Octobre 2010 IEEE.
- [55] Carpco Inc., Jacksonville, USA. “Carpco application sheet. Rejection of PVC from PET flake using the Carpco V-STAT separator”. In: *Bulletin No. 97713*.
- [56] Matsushita Y, Mori N and Sometani T, “Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary drum blades”, *Electrical Engineering in Japan*, 127 33–40, 1999.
- [57] Bendimerad S, Tilmatine A, Ziane M, Dascalescu L, “Plastic wastes recovery using freefall triboelectric separator”, *Int. J. Environ. Studies*, vol. 66, p. 529 – 538. 2009.
- [58] Miloudi M, Medles K, Tilmatine A, Bendaoud A, Dascalescu L "Optimization of Belt-Type Electrostatic Separation of Triboaerodynamically Charged Granular Plastic Mixtures", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Volume: 49 , Issue: 4 , Publication, , Page(s): 1781 – 1786, 2013.
- [59] Miloudi M, Medles K, Bendaoud A, Tilmatine A, Dascalescu L, “Improvement of the Industrial Pilot of a Tribo-aero- electrostatic Separator for Binary Mixtures of Granular Insulating Materials”, *IEEE/IAS annual meeting*, October 6-10, 2013 Orlando, FL USA.

- [60] A. Tilmatine, S. Flazi, K. Medles, Y. Ramdani, L. Dascalescu., "Séparation électrostatique : complément des procédés mécaniques de recyclage des déchets industriels," *Journal of Electrostatics. Elsevier*. 61 (2004) 21-30.
- [61] A. Tilmatine, S. Bendimered, F. Boukhoulda, K. Medles, and L. Dascalescu, "Electrostatic separators of particles. Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures," *Waste Management*, vol. 29, pp. 228–232, 2009.
- [62] S. Mazuda, M. Toragushi, T. Takahashi, and K. Haga, "Electrostatic beneficiation of coal, using a cyclone-tribocharger," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 19, p. 789-793, 1983.
- [63] D. H. Finseth, T. Newby and R. Elstrodt, "Dry electrostatic separation of fine coal," *5th Int. Conf. Proc. and Util. of High Sulfur Coals*. Lexington, Kentucky, USA. 1993.
- [64] Jia Li, Zhenming Xu, Yaohe Zhou, "Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards," *Journal of Electrostatics*, Volume 65, Issue 4, April 2007, Pages 233–238.
- [65] 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*, Volume 153, Issues 1–2, 1 May 2008, Pages 269–275.
- [66] Bailey, A.G., 1993. "Charging of solids and powders," *Journal of Electrostatics*. 30, 167–180.
- [67] Bailey, A.G., 1998. "The science and technology of electrostatic powder spraying, transport and coating," *Journal of Electrostatics* 45, 85–120.
- [68] JS. Chang, AJ. Kelly, JM. Crowley, *Handbook of electrostatic processes-1995 -CRC Press*.
- [69] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami and L .Dascalescu. "Optimisation of belt-type electrostatic separation of granular plastic mixtures tribocharged in a propeller-type device," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 301 Number 1, 2011.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] 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.

- [73] BrahamiYoussouf, **Benabboune Adel**, Tilmatine Amar, «Facteurs Influençant L'efficacité d'un Séparateur à Disques Rotatifs Destiné aux Particules Fines», 5th fourth international conference on electrotechnics ICEL 2013, Decembre 03-04.
- [74] Goupy J., Creighton L. "Introoduction aux Plans d'xpériences", 3^e édition, Dunod. Paris, 2006.
- [75] Box E.P., Hunter W.G., Hunter J.S., "Statistics for Experimenters", 2^e édition, John Wiley and Sons. New-York, 2005.
- [76] Goupy J., "les plans d'expériences", Revue Modulad, No.34, pp.74-116, 2006.
- [77] Goupy J. " Plans d'xpériences" Techniques de L'ingénieur. Traité Analyse Chimique et Caractérisation, P230, pp.1-20, 1992.
- [78] Goupy J. "Pratiquer les plans d'expériences, Dunod. Paris, 2005.
- [79] Jonathan Ferreira, Cours d'Electrostatique-Electrocinétique, université Joseph Fourier, P 23, 2001-2002.
- [80] Miloudi M, Medles K, Aksa W, Tilmatine A, Brahami M et Dascaluscu L, « Association et optimisation de deux nouveaux procédés de chargement tribo-électrique et de séparation électrostatique pour les particules isolantes », *Ajot Algerian journal of technologie*, 8^{ème} conférence nationale sur la haute tension CNHT, P 276-281, 2011.
- [81] Jen Lang, Hu Shuanshui, and Sheng Kemin. "Separation of the helmholtz equation in prolate spheroidal coordinates". *Journal of applied physics*, 56(5) : P1532–1535, 1984.
- [82] W. Strunk, Jr. and E.B. White, *The Elements of Style*, New York, NY, USA: The Mcmillan Cy, 1959. E. G. Kelly, and D. J .Spottiswood, "The theory of electrostatic separation: a review," part II. *Particle Charging. Miner Eng*, vol. 2, p. 193-205, 1989.
- [83] V. Gente, F.L. Marca, F. Lucci and P. Massacci, "Electrical separation of plastics coming from special waste," *Waste Manag* 23, 951–958, 2003.
- [84] I.I. Inculet, G.S.P. Castle and J.D. Brown, "Electrostatic separation of plastics for recycling," *Part Sci. & Technol.*, pp. 1691–100, 1998.
- [85] 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.
- [86] 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.

- [87] Tennal, K.B., Lindquist, D., Mazumder, M.K., Rajan, R., Guo, W., 1999. Efficiency of electrostatic separation of minerals from coal as a function of size and charge distribution of coal particles. IEEE 2137–2142.
- [88] Tilmatine, A., Benabboun, A., Brahmi, Y., Bendaoud, A., Miloudi, M., & Dascalescu, L. (2014). Experimental Investigation of a New Triboelectrostatic Separation Process for Mixed Fine Granular Plastics. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 50(6), 4245-4250.
- [89] K.Medles, «*Modélisation et optimisation des procédés de séparation électrostatique des mélanges granulaires plastiques*», Thèse Doctorat, Univ.SBA, 2006.
- [90] M.Miloudi, «*Application de la charge par effet triboélectrique des matériaux granulaires dans la séparation électrostatique*», Thèse Doctorat, Univ.SBA, Nov. 2012.
- [91] 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.
- [92] Umetrics AB; MODDE 5.0, User guide and tutorial, Umetrics, Umea, Sweden, 1999.

ANNEXE

ANNEXE 1

LOI DE STUDENT : $t(\alpha, \nu)$

V	α												
	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,00	1,37	1,963	3,078	6,31	12,70	31,82	63,65	636,61
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,76	0,97	1,250	1,638	2,35	3,182	4,541	5,841	12,941
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,74	0,94	1,190	1,533	2,13	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,72	0,92	1,156	1,476	2,01	2,571	3,365	4,032	6,859
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,71	0,90	1,134	1,440	1,94	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,71	0,89	1,119	1,415	1,89	2,365	2,298	3,499	5,405
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,10	0,88	1,108	1,397	1,86	2,306	2,896	3,335	5,041
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,70	0,88	1,100	1,383	1,83	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,70	0,87	1,093	1,372	1,81	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,69	0,87	1,088	1,363	1,79	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,69	0,87	1,083	1,356	1,78	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,69	0,87	1,079	1,350	1,77	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,69	0,86	1,076	1,345	1,76	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,69	0,86	1,074	1,341	1,75	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,69	0,86	1,071	1,337	1,74	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,68	0,86	1,069	1,333	1,74	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,68	0,86	1,067	1,330	1,73	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,68	0,86	1,066	1,328	1,72	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,68	0,86	1,064	1,325	1,72	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,68	0,85	1,063	1,323	1,72	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,68	0,85	1,061	1,321	1,71	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,68	0,85	1,060	1,319	1,71	2,069	2,500	2,807	3,767
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,68	0,85	1,059	1,318	1,71	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,68	0,85	1,058	1,316	1,70	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,68	0,85	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,68	0,85	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,68	0,85	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,68	0,85	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,68	0,85	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,68	0,85	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,126	0,254	0,387	0,527	0,67	0,84	1,046	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,126	0,254	0,386	0,526	0,67	0,84	1,041	1,289	1,658	1,960	2,358	2,617	3,373
∞	0,126	0,253	0,385	0,524	0,67	0,84	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

ANNEXE 2

Table de Fisher-Snedecor de $t(v_1, v_2)$, $\alpha=5\%$

V ₂	V ₁									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16
32	4,15	3,29	2,90	2,67	2,51	2,40	2,31	2,24	2,19	2,14
35	4,12	3,27	2,87	2,64	2,49	2,37	2,29	2,22	2,16	2,11
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08
50	4,03	3,18	2,79	2,56	2,40	2,29	2,20	2,13	2,07	2,03
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99
80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,13	2,06	2,00	1,95
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,31	2,19	2,10	2,03	1,97	1,93
150	3,90	3,06	2,66	2,43	2,27	2,16	2,07	2,00	1,94	1,89

ملخص

عندما تحتك مادتين مختلفتين ضد بعضها البعض، كل منهما تحصل على شحنة كهربائية من علامة معاكسة. هذا النوع من الاحتكاك لإكتساب الشحنات، معروف منذ العصور القديمة باسم تريبوالكتريك، يمثل مبدأ عمل جهاز الفصل بلاحتكاك بين مكونات مختلفة لخليط من المواد البلاستيكية. طالب الدكتوراه لديه مهمة جمع المعلومات العامة لأنظمة التشحين بتأثير الاحتكاك، بهدف تحسين آلية الشحن أو حتى تخيل نظام جديد لتشحين بالاحتكاك. المرشح سيصنع نموذج مخبري والذي سيتم استخدامه لآلية الشحن، حيث سيتم معالجة القياسات عن طريق الكمبيوتر ببرنامج خاص (لابفيو). الهدف الرئيسي من هذه الرسالة هو التشحين وفصل الجسيمات الدقيقة في الفاصل الكهربائي، فإن هذا التطبيق يستهدف قطاع صناعات إعادة التدوير.

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. Le doctorant aura comme tâche de faire une synthèse globale sur les systèmes d'acquisition de charge par effet triboélectrique, dont le but est d'améliorer ce mécanisme de charge, voire d'imaginer un nouveau système de triboélectrification. Le candidat réalisera ensuite un banc expérimental qui servira à l'étude de ce mécanisme de charge, où les mesures effectuées seront traitées par ordinateur avec un logiciel spécifique (Labview). L'objectif principal de cette thèse est de charger et séparer les particules fines dans un séparateur électrostatique, dont l'application ciblera l'industrie de recyclage.

Abstract

When two different materials are rubbed against each other, they acquire an electric charge of opposite sign; this type of charge acquisition, known since antique times and named triboelectricity, represents the principle function of triboelectric granular mixtures separators insulation / insulation particles. The PhD student will have the task to make an overall synthesis of the load acquisition systems by triboelectrification, which aims to improve this charging mechanism, and also imagine a new triboelectrification system. Then the candidate will perform an experimental bench which will be used to study this charging mechanism, where the carried measurements will be processed by computer with special software (LabView). The main objective of this thesis is to charge and separate the fine particles in an electrostatic separator, the application will target the recycling industry.