

## THÈSE

Pour l'obtention du grade de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS  
UFR des sciences fondamentales et appliquées  
Pôle poitevin de recherche pour l'ingénieur en mécanique, matériaux et énergétique - PPRIMME  
(Poitiers)  
(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)

École doctorale : Sciences et ingénierie en matériaux, mécanique, énergétique et aéronautique -  
SIMMEA (Poitiers)  
Secteur de recherche : Génie électrique

Présentée par :  
Sara Messal

### **Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire**

Directeur(s) de Thèse :  
Lucian Dascalescu, Thami Zegloul

Soutenue le 05 décembre 2016 devant le jury

#### Jury :

Président	<b>Thierry Paillat</b>	Professeur des Universités, Université de Poitiers
Rapporteur	<b>Adrian Samuila</b>	Profesor, Universitatea tehnica din Cluj-Napoca, Romania
Rapporteur	<b>Khouira Senouci</b>	Maître de conférences, Université de Sidi-bel-Abbès, Algérie
Membre	<b>Lucian Dascalescu</b>	Professeur des Universités, Université de Poitiers
Membre	<b>Thami Zegloul</b>	Maître de conférences, Université de Poitiers
Membre	<b>Jean-Charles Laurentie</b>	Maître de conférences, Université de Montpellier 2
Membre	<b>Xavier Rouau</b>	Directeur de recherche, INRA de Montpellier
Membre	<b>Claire Mayer-Laigle</b>	Ingénieur de recherche, INRA de Montpellier

#### **Pour citer cette thèse :**

Sara Messal. *Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire* [En ligne]. Thèse Génie électrique. Poitiers : Université de Poitiers, 2016. Disponible sur Internet <<http://theses.univ-poitiers.fr>>

# THESE

Pour l'obtention du Grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS**

(Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées)  
(Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006)

Ecole Doctorale : Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Energétique et  
Aéronautique

Secteur de Recherche : Sciences pour l'ingénieur

Spécialité : Génie électrique

Présentée par :

**Sara MESSAL**

\*\*\*\*\*

## **PROCEDES DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE MATERIAUX PULVERULENTS. APPLICATIONS AU RECYCLAGE DES DECHETS ET DANS L'INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE**

\*\*\*\*\*

Directeur de thèse : **Lucien DASCALESCU**  
Co-encadreur de thèse : **Thami ZEGHLOUL**

\*\*\*\*\*

Soutenue le 5 décembre 2016

devant la Commission d'Examen

\*\*\*\*\*

### **JURY**

M.	<b>Adrian SAMUILA</b>	PU	Université Technique de Cluj-Napoca	Rapporteur
Mme	<b>Khouira SENOUCI</b>	MCU	Université de Sidi-bel-Abbès	Rapporteur
M.	<b>Xavier ROUAU</b>	DR	INRA Montpellier	Examineur
M.	<b>Jean-Charles LAURENTIE</b>	MCU	Université de Montpellier	Examineur
Mme	<b>Claire MAYER-LAIGLE</b>	IR	INRA Montpellier	Examineur
M.	<b>Thierry PAILLAT</b>	PU	Université de Poitiers	Examineur
M.	<b>Thami ZEGHLOUL</b>	MCU	Université de Poitiers	Examineur
M.	<b>Lucien DASCALESCU</b>	PU	Université de Poitiers	Examineur



À la mémoire de mon grand-père  
Mohamed TABOUT  
(1929-2015)



# REMERCIEMENTS

On dit souvent que l'itinéraire est aussi important que la destination. Ces trois années de doctorat m'ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase toute simple. En effet, ce parcours ne s'est pas réalisé sans défis et sans soulever de nombreuses questions pour lesquelles les réponses ont nécessité de longues heures de labeur.

Je tiens en premier lieu à remercier le Conseil Régional de la Charente qui a financé cette thèse, et qui m'a permis de poursuivre mon cursus universitaire.

Je voudrais exprimer mes sincères reconnaissances envers **M. Adrian SAMUILA** et **Mme. Khouira SENOUCI**, pour avoir manifesté un grand intérêt pour le sujet en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse. Mes remerciements s'adressent également à **M. Jean-Charles LAURENTIE** et à **M. Thierry PAILLAT** pour avoir accepté d'examiner la thèse.

Je tiens aussi à adresser mes vifs remerciements à **M. Xavier ROUAU** et à **Mme. Claire MAYER-LAIGLE**, de m'avoir accueillie si chaleureusement au sein de l'INRA de Montpellier et d'avoir accepté d'être également les examinateurs de cette thèse.

Je rends un majestueux hommage au travail d'encadrement et aux qualités humaines et scientifiques de mes directeurs de thèse **M. Lucien DASCALESCU** et **M. Thami ZEGHLOUL**, dont la disponibilité, le savoir-faire et le soutien ne m'ont jamais fait défaut.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers **M. Karim MEDLES**, pour ses qualités de chercheur, qu'il trouve ici l'expression de mes remerciements.

Je voudrais aussi remercier, et de façon très particulière, une personne qui m'a aidée et qui est à mes yeux inestimable. Que **M. Rafik MESSAL** trouve ici l'expression de ma gratitude pour son admirable esprit scientifique.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les membres de l'**Institut PPRIME**, de l'**IUT d'Angoulême** et de l'**Université de Sidi-Bel-Abbés**, qui ont été proches de moi ces trois dernières années.



# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>9</b>
<b>I. ETAT DE L'ART</b>	<b>15</b>
I-1. Mécanismes de charge électrique	16
I-1.1. Effet couronne	16
I-1.2. Induction électrostatique	20
I-1.3. Effet tribo-électrique	22
I-2. Séparation électrostatique des matériaux pulvérulents	32
I-2.1. Installations de laboratoire	32
I-2.2. Brevets d'inventions	42
I-2.3. Applications industrielles	45
<b>II. MATERIAUX ET METHODES</b>	<b>49</b>
II-1. Caractérisation des matériaux	50
II-1.1. Matériaux issus des DEEE	50
II-1.2. Matériaux végétaux	54
II-2. Installations de séparation électrostatique pour matériaux pulvérulents	59
II-2.1. Séparateur électrostatique à électrode-convoyeur multifonctions	59
II-2.2. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux disques métalliques	62
II-3. Techniques de mesure et procédures expérimentales	67
II-3.1. Mesure des charges et des masses des produits séparés	67
II-3.2. Mesure de potentiel de surface par voltmètre électrostatique	68
II-3.3. Analyse de la pureté des produits séparés	68
II-4. Méthode des plans d'expériences	71

<b>III. PROCEDES DE SEPARATION COURONNE – ELECTROSTATIQUES</b>	<b>75</b>
III-1. Modes de fonctionnement du séparateur électrostatique multifonctions	76
III-1.1. Séparation électrostatique	77
III-1.2. Séparation couronne-électrostatique	74
III-2. Applications de la séparation électrostatique	76
III-2.1. Séparation d'un mélange pulvérulent de ciment et de paille	76
III-2.2. Séparation d'un mélange d'Aluminium et d'ABS	81
III-3. Applications de la séparation couronne-électrostatique	84
III-3.1. Séparation couronne-électrostatique de matières végétales	84
III-3.2. Séparation couronne-électrostatique des DEEE micronisés	93
<b>IV. PROCEDES DE SEPARATION TRIBO-ELECTROSTATIQUES</b>	<b>107</b>
IV-1. Séparation tribo-vibro-électrostatique	108
IV-1.1. Application à la séparation d'un mélange d'ABS et de PC	109
IV-1.2. Application à la séparation d'un mélange d'ABS et de PS	118
IV-2. Séparation tribo-aéro-électrostatique d'un mélange d'ABS et de PS	122
IV-2.1. Matériaux et méthode	123
IV-2.2. Résultats et interprétations	125
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>135</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>139</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>153</b>

# INTRODUCTION GENERALE



**Charles-Augustin Coulomb**

(1736-1806)

« On graduating from school, a studious young man who would withstand the tedium and monotony of his duties has no choice but to lose himself in some branch of science or literature completely irrelevant to his assignment ».

L'épuisement des ressources naturelles, la raréfaction de la production pétrolière, la flambée de la demande en matières premières, et le dérèglement climatique, sont autant d'enjeux auxquels la planète doit aujourd'hui faire face. Près de sept milliards de personnes vivent dans un monde où la technologie occupe une place de plus en plus importante, cette croissance exponentielle de la consommation peut provoquer d'un moment à l'autre des crises économiques, sociétales et environnementales majeures. Il est donc indispensable de limiter son impact mais aussi de créer de nouvelles ressources et de l'énergie, afin d'assurer la transition vers un nouveau cadre énergétique où les énergies non carbonées (renouvelables) seront dominantes [1].

La séparation électrostatique [2], [3] est une technologie qui s'intègre pleinement à ce nouveau modèle énergétique. Caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien, elle représente une technologie économiquement viable pour le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques [4] ainsi que pour la purification des minerais [5] et des produits agro-alimentaires [6]. Son utilisation dans ces industries nécessite le développement de nouveaux procédés et de nouvelles installations afin d'améliorer les performances, tout en respectant une réglementation de plus en plus sévère respectueuse de l'environnement.

Afin de répondre aux besoins de l'industrie du recyclage, de multiples recherches ont été réalisées par l'Institut PPRIME de Poitiers en partenariat avec les sociétés APR2, de Bonnières sur Seine, et CITF, de Saint Cybardeaux, en Charente, pour la mise au point de procédés efficaces de séparation électrostatique de différents types de matériaux granulaires. Des séparateurs électrostatiques à chute libre sont déjà largement utilisés dans l'industrie pour le tri des mélanges granulaires de plastiques [7], [8]. La société APR2 a notamment déposé conjointement avec le CNRS un brevet d'invention concernant un séparateur tribo-aéro-électrostatique pour le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (**Figure 1**), capable de séparer des mélanges de matériaux plastiques granulaires dont la taille varie de 1 mm à 6 mm [9]. La séparation électrostatique est de plus en plus utilisée pour le recyclage des métaux, pour des raisons liées aux difficultés croissantes d'extraction, d'épuisement des ressources, mais aussi à la préservation de l'environnement [10], [11]. Dans ce domaine, l'Institut PPRIME a conçu et la société CITF a construit un séparateur couronne-électrostatique à électrode plaque et à tambour pour le tri des matières conductrices et non-conductrices des déchets de câbles électriques [12].



**Figure 1** : Séparateur tribo-aéro-électrostatique pour le recyclage des DEEE ;  
 1 : Goulotte oscillante ; 2 : Alimentations en haute tension ; 3 : Convoyeurs-électrodes ;  
 4 : Collecteurs de granules ; 5 : Lit fluidisé ;  
 6 : Boîte électrique de commande.

Brevet FR2943561/2009, WO2010109096/2010 [9].

Les recherches entreprises par l'Institut PPRIME ont été très fructueuses lorsqu'il s'agissait de la séparation des matériaux granulaires de tailles millimétrique. Cependant, peu de résultats ont été obtenus pour la séparation électrostatique des matériaux pulvérulents dont la taille est inférieure à 1 mm, comme ceux rencontrés dans l'industrie agro-alimentaire [13]. La bio-raffinerie consiste à déstructurer et fractionner de manière optimale des matières végétales en différents éléments valorisables appelés agro-ressources, s'intégrant dans les domaines des bio-énergies (bio-carburants), des bio-matériaux (fibres), ou encore des cosmétiques [14], [15]. La séparation électrostatique de ces matières végétales suscite un intérêt majeur puisqu'elle permet d'optimiser la production des agro-ressources, tout en limitant l'utilisation des réactifs chimiques, des solvants et ce sans générer d'effluents à traiter qui engendrent de forts coûts de traitement et de séchage. Une nouvelle installation inspirée du séparateur électrostatique industriel à chute libre a été développée et brevetée par les équipes de recherche de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) de Montpellier, pour le fractionnement par voie sèche de la biomasse végétale pour contribuer à produire du bio-carburant, des bio-matériaux et des bio-molécules dans une perspective d'éco-conception [16].

L'objectif de la thèse est de montrer la faisabilité de la séparation électrostatique d'une large gamme de mélanges de matériaux pulvérulents provenant de l'industrie agro-alimentaire ou du recyclage des déchets. Les recherches se sont focalisées sur des techniques faisant appel à trois mécanismes physiques différents pour la charge des matériaux : la décharge couronne, l'induction électrostatique et l'effet tribo-électrique. Deux nouvelles installations ont été conçues et réalisées. Elles contribuent à la compréhension des phénomènes physiques rencontrés lors de la séparation des particules sous-millimétriques, dont les trajectoires sont difficiles à contrôler, en raison de l'influence importante des forces aérodynamiques en jeu. La première installation, le séparateur électrostatique multifonctions à électrode-convoyeur, met en œuvre un ou plusieurs des trois mécanismes de charge, en rapport avec les propriétés électriques des matériaux à traiter. La seconde installation, le séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes-disques-tournantes, utilise seulement l'effet tribo-électrique pour la charge des matériaux isolants dans un lit fluidisé, en présence d'un champ électrique intense.

Dans le **chapitre I**, les trois mécanismes physiques utilisables pour la charge électrique des matériaux pulvérulents sont passés en revue, avant de présenter la construction et les principes de fonctionnement de certaines installations de séparation électrostatique. L'étude de l'état de l'art a permis de mieux cerner les problèmes qui restent à résoudre et de préciser les objectifs du travail.

Les différents matériaux qui font l'objet de l'étude, ainsi que les techniques expérimentales utilisées, sont décrits dans le **chapitre II**. Il s'agit des matériaux provenant de l'industrie agro-alimentaire (paille, ciment, liège, copeaux de bois de pin, semoule de blé) et du recyclage des déchets d'équipements électriques et informatiques (aluminium, acrylonitrile butadiène styrène, polycarbonate, polystyrène). Les expériences ont été réalisées sur deux séparateurs électrostatiques de conceptions originales, en utilisant des méthodes appropriées de mesure de charge et du déclin de potentiel électrique de surface. Celles-ci font appel à l'instrumentation virtuelle pour une meilleure quantification des phénomènes évoluant rapidement dans le temps, et à la méthodologie des plans d'expérience, permettant la modélisation des processus.

Les expériences présentées dans le cadre du **chapitre III** ont visé l'évaluation de la faisabilité de la séparation électrostatique des mélanges de matériaux pulvérulents par rapport à leur comportement dans un champ électrique intense. L'effet couronne ou/et l'induction électrostatiques ont été utilisés comme mécanismes de charge électrique de différents mélanges de matériaux (paille-ciment, semoule de blé-copeaux de bois de pin, aluminium-acrylonitrile butadiène styrène, et aluminium-polystyrène), dans un séparateur électrostatique multifonctions à électrode-convoyeur métallique. Les résultats des études menées en utilisant la méthodologie des plans d'expériences permettent de déterminer le point de fonctionnement optimal afin d'améliorer l'efficacité globale de la séparation électrostatique.

A l'aide du séparateur électrostatique multifonctions à électrode-convoyeur métallique et du séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes-disques-tournantes, il a été possible d'évaluer les effets de plusieurs facteurs qui pourraient influencer sur l'efficacité d'un processus de charge des mélanges de matériaux isolants pulvérulents en lit vibrant ou en lit fluidisé, en présence d'un champ électrique. Les données expérimentales présentées dans le **chapitre IV** prouvent l'efficacité de ces deux dispositifs à charger les mélanges binaires (acrylonitrile butadiène styrène-polystyrène et acrylonitrile butadiène styrène-polycarbonate) de classes granulométriques différentes par effet tribo-électrique, et à les séparer dans les deux types d'installations électrostatiques.

Les procédés de séparation tribo-vibro-électrostatique et tribo-aéro-électrostatique sont des solutions viables pour le tri des matériaux pulvérulents dans l'industrie agro-alimentaire ou dans les usines de traitement des plastiques provenant des déchets d'équipements électriques et électroniques. Cette **conclusion générale**, qui clôtur le mémoire, s'accompagne d'une synthèse des principales **contributions** que la thèse apporte dans le domaine étudié, ainsi que de l'énoncé des **perspectives** prometteuses ouvertes par ce travail.



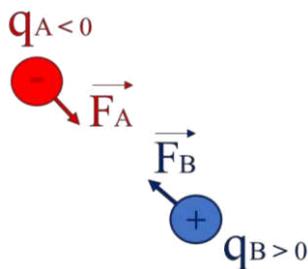
# Chapitre I

## ETAT DE L'ART

La séparation électrostatique des matériaux pulvérulents est produite par les forces électriques agissant sur les particules qui ont des caractéristiques physiques différentes, qui sont chargés ou polarisés, et qui se trouvent dans un champ électrique intense [17-20]. C'est Charles Coulomb qui a établi l'expression de la force  $F$  d'attraction ou de répulsion qui se manifeste entre deux corps ayant les charges  $Q_1$  et  $Q_2$ , situés à une distance  $d$  l'un par rapport à l'autre :

$$F = (Q_1 Q_2) / (4 \pi \varepsilon_0 d^2) \quad (\text{I-1})$$

où  $\varepsilon_0 = 1 / (4 \pi \cdot 9.10^9)$  [F/m] est une constante (la permittivité électrique du vide). Si les charges sont de la même polarité, la force (positive) est une force de répulsion. Si les charges sont de polarités contraires ( $Q_1 = q_A < 0$  et  $Q_2 = q_B > 0$ ), la force (négative) est une force d'attraction (**Figure I-1**) [21].



**Figure I.1** : Force d'attraction (interaction coulombienne) entre deux particules chargées de polarités opposées.

Les mécanismes physiques capables de conférer des charges électriques aux matériaux pulvérulents, dans le but de les séparer en présence un champ électrique intense, sont décrits dans le § I-1. Une synthèse bibliographique sur les équipements de séparation électrostatique, appliquée au recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques, au traitement des minerais et au conditionnement des semences est exposée dans le § I-2. Elle regroupe les informations essentielles concernant plusieurs procédés de séparation utilisés dans l'industrie, étudiés dans des laboratoires de recherche à travers le monde, ou décrites dans les brevets d'inventions publiés dans la base de données de l'Institut National de la Propriété Industrielle.

## I-1. Mécanismes de charge électrique

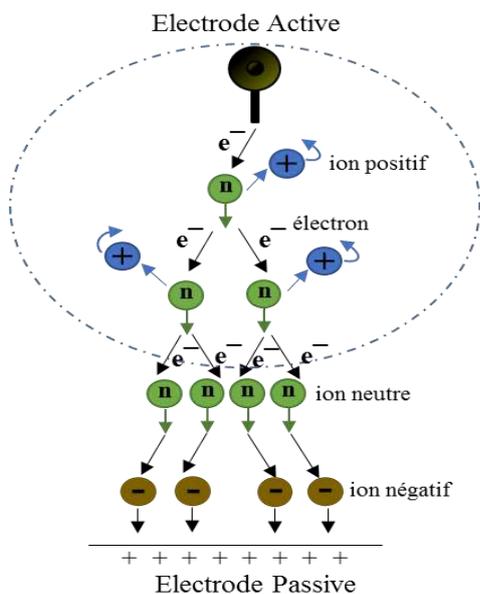
La séparation électrostatique d'un mélange de matériaux pulvérulents est possible si les constituants de celui-ci portent des charges électriques différentes. Ces charges peuvent être générées par un ou plusieurs des trois mécanismes physiques différents [22-25]. Il s'agit de l'effet couronne, de l'induction électrostatique et de l'effet tribo-électrique.

### I-1.1. Effet couronne

Longtemps observé lors des phénomènes météorologiques intenses, l'effet couronne a trouvé aujourd'hui des applications diverses dans le domaine de l'électrostatique et a fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques, il est utilisé pour la précipitation de poussières [26], et la fabrication des films plastiques et textiles [27], ainsi que dans les processus de l'électro-photographie [28] et la séparation des mélanges granulaires [29-30].

#### I-1.1.1. Description

L'effet couronne est lié à l'ionisation de l'air dans une zone de champ électrique très intense produite entre deux électrodes métalliques : l'une dite active, se présente généralement sous la forme d'une pointe ou d'un fil de petit diamètre, et est reliée à une source de haute tension de plusieurs kilovolts, et l'autre passive qui n'est autre qu'une plaque ou une grille métallique reliée à la terre. À proximité de l'électrode active la tension varie fortement sur une courte distance créant ainsi un fort champ électrique, responsable de l'accélération des quelques électrons issus de l'ionisation naturelle de l'air. L'avalanche électronique a lieu à proximité de l'électrode active quelle que soit la polarité qui lui est appliquée. (**Figure I-2**).

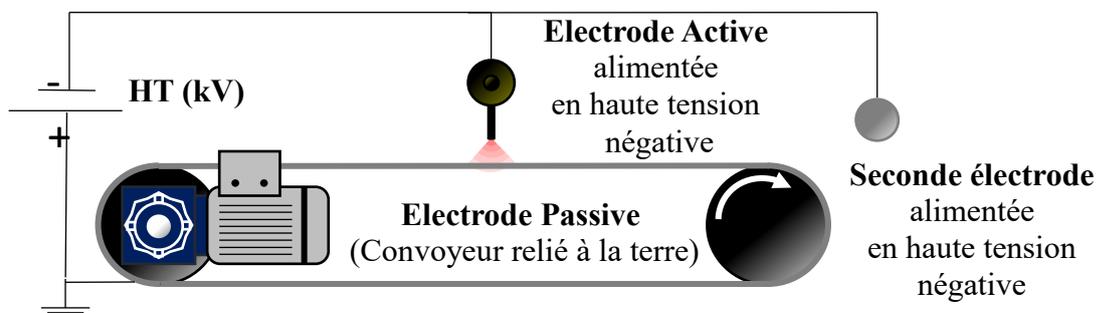


**Figure I-2** : Génération d'une avalanche électronique et de la décharge couronne.

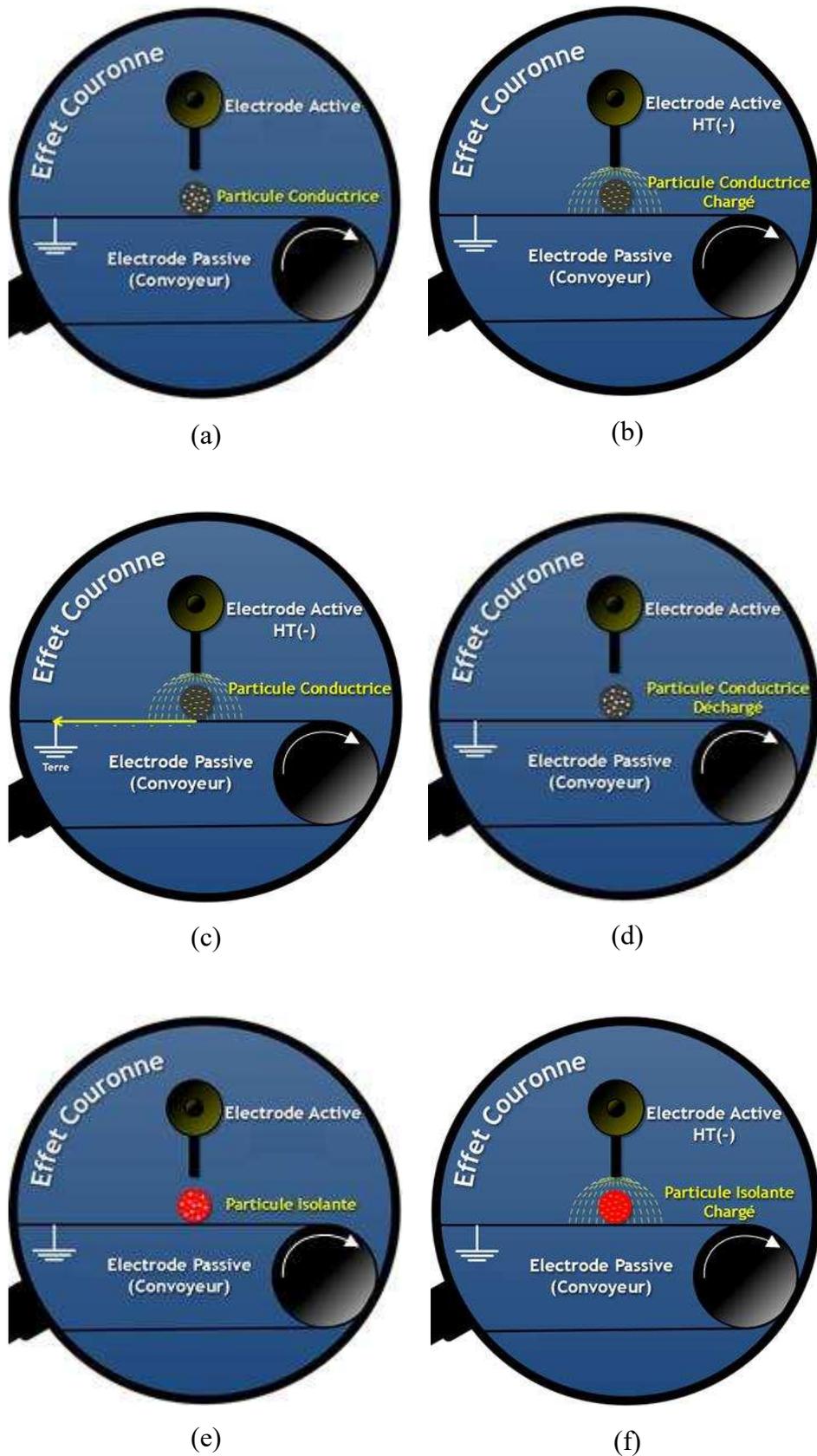
Les électrons libérés vont se heurter aux molécules d'air présentes dans l'espace. Ces électrons portent un haut niveau d'énergie et de cet impact résulte la libération d'un ou plusieurs électrons par ces molécules. Ces derniers vont continuer leur trajet vers l'électrode passive, de polarité opposée, vers laquelle ils sont attirés, tout en heurtant d'autres molécules de gaz et ainsi, en multipliant leur nombre. Les molécules ayant libéré des électrons sont devenues des ions positifs et sont donc attirés par l'électrode active. De cette façon, elles regagnent un électron et redeviennent neutres. Ce phénomène est délimité dans l'espace (quelques micromètres de l'électrode) dans une zone caractérisée par une forte intensité du champ électrique : la zone d'ionisation. Au-delà de cette dernière, le champ électrique n'est plus suffisamment fort pour que les électrons aient assez d'énergie pour heurter les molécules d'air de façon à ce qu'elles cèdent un autre électron. Ils vont alors s'associer aux molécules d'air et former des ions chargés négativement. Ces ions entrent en contact avec les particules et leurs durées de vie sont suffisamment longues pour que la séparation des matériaux ait lieu. Les particules, soumises au flux ionique, vont se charger négativement [31-34].

Lors de l'utilisation de l'effet couronne comme mécanisme de charge pour la séparation électrostatique des mélanges isolant/conducteur (**Figure I-3**) [35], [36] les particules sont positionnées sur la surface de l'électrode passive et acquièrent des charges positives ou négatives selon la polarité de l'électrode active qui produit un nuage ionique mono-polaire.

Les particules qui traversent ce nuage acquièrent une charge ionique, cependant les particules conductrices perdent cette charge aussitôt du fait de leur contact avec la terre et redeviennent neutres (**Figure I-4 a, b, c, d**) alors que les particules isolantes la gardent plus longtemps (**Figure I-4 e, f**). Ce phénomène permet donc la séparabilité du mélange isolant/conducteur, confirme l'efficacité de l'effet couronne en tant que mécanisme de charge des particules, et justifie son utilisation dans plusieurs installations électrostatiques [37-39].



**Figure I-3 :** Représentation schématique d'un procédé de séparation électrostatique qui utilise l'effet couronne pour la charge des particules isolantes.

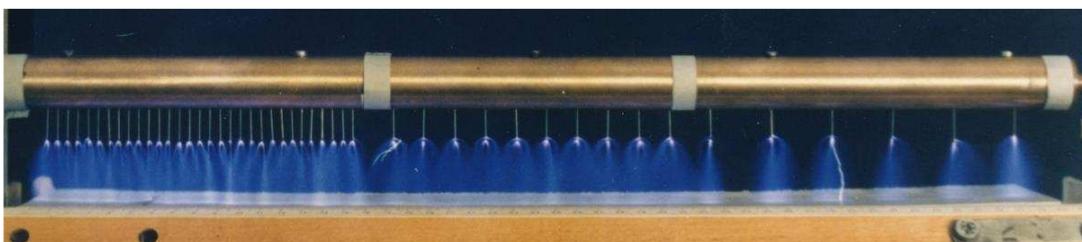


**Figure I-4** : Représentation schématique de l'effet couronne sur des particules conductrices (a, b, c, d) et isolantes (e, f).

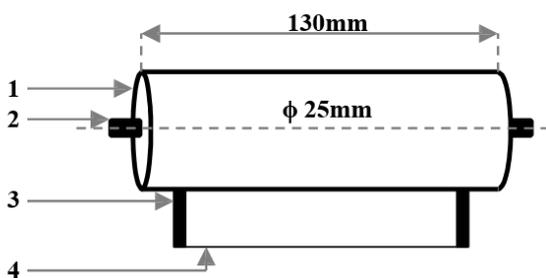
Cependant, les décharges couronne créent également un vent ionique du fait de l'accélération des ions qui, au cours de leur déplacement dans le champ électrique, entrent en collision avec des molécules de gaz, leur transmettant non seulement une énergie sous forme de chaleur mais aussi une énergie cinétique. De cette énergie cinétique découle un flux d'air, à qui on reconnaît certes plusieurs applications, dont notamment le contrôle des écoulements aérodynamiques sur les profils d'aile d'avion [40], mais qui reste néfaste au processus de séparation électrostatique, puisqu'il peut perturber le parcours des particules les plus fines et être à l'origine d'une dispersion voire d'une perte de matière.

### I-1.1.2. Dispositifs de charge

Au fil du temps plusieurs dispositifs ont été mis en place pour générer des décharges couronnes. Les plus utilisés sont les électrodes à fil et à aiguilles (**Figure 1-5**), et à moindre degré l'électrode à lame. Les électrodes couronnes à fil fin – par leur facilité de réalisation et leur faible coût de revient – sont les plus appréciées dans l'industrie. Mais même si elles répondent bien à des critères économiques importants, elles peinent cependant à répondre à des critères pratiques au cours du processus de séparation électrostatique d'un mélange isolant-conducteur [41-43].



(a)



(b)



(c)

**Figure I-5 :** Différents types de l'électrode couronne ; (a) : Photographie d'une décharge couronne avec une électrode à aiguilles ; (b) : Représentation schématique d'une électrode couronne à fil ; 1 : Support métallique tubulaire ; 2 : Porte-électrodes ; 3 : Tiges soudées au support ( $L = 20\text{mm}$ ,  $\phi = 5\text{mm}$ ) ; 4 : Fil fin tendu ( $L = 100\text{mm}$ ,  $\phi = 0.18\text{mm}$ ) ; (c) : Photographie d'une électrode couronne à fil.

En effet, la présence de particules conductrices réduit la rigidité diélectrique de l'espace inter-électrodes. Dans ces conditions, l'électrode la plus adéquate est celle qui est capable de bien charger les particules à des tensions qui ne sont pas excessivement grandes. De ce point de vue, les électrodes à aiguilles sont plus efficaces que l'électrode classique à fil.

## **I-1.2. Induction électrostatique**

### **I-1.2.1. Description**

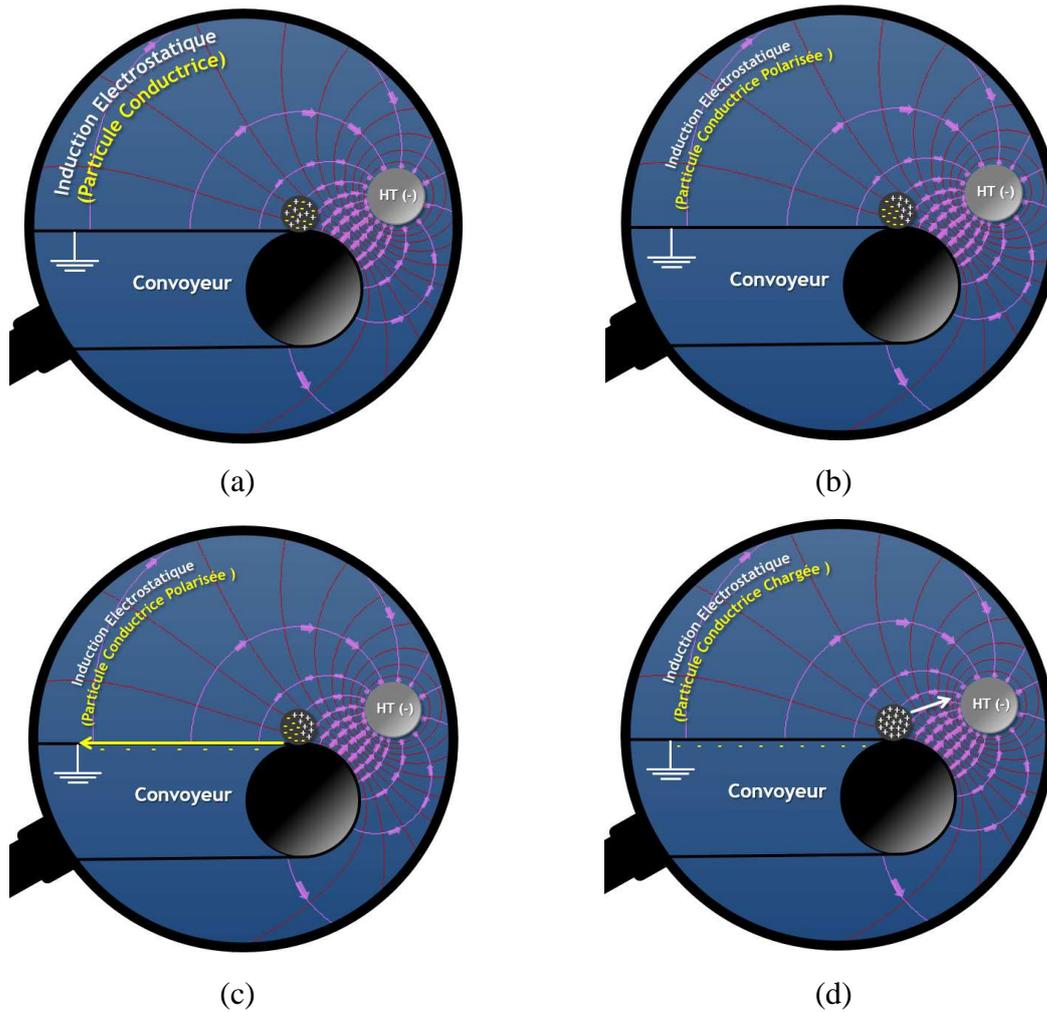
L'induction électrostatique peut se définir comme une méthode par laquelle un objet électriquement chargé est employé pour créer un déplacement de charges électriques dans un deuxième objet, neutre, sans être en contact avec celui-ci. L'objet chargé, qui génère un champ électrique, provoque la polarisation de l'objet neutre (les centres de gravité des charges positives et négatives présentes dans ce dernier se séparent). Si l'objet neutre est conducteur et temporairement en contact avec une électrode liée à la masse, les charges polaires situées au voisinage du point de contact vont s'écouler vers la terre. De ce fait, lorsque l'objet est déconnecté de la terre, il emporte une charge nette non nulle. Les charges ne s'écoulant pas dans un corps isolant, celui-ci n'est alors jamais chargé par induction électrostatique [44].

Ce mécanisme explique, par exemple, la charge d'une particule conductrice placée entre deux électrodes de polarités différentes. Dans la situation illustrée sur la **Figure I-6**, une particule conductrice, initialement neutre, déposée sur la surface d'une électrode (convoyeur métallique) liée à la terre, se polarise dans le champ électrique créé par une autre électrode (cylindre métallique) connectée à une haute tension de polarité négative. La particule étant conductrice, elle finit par acquérir une charge positive (de même signe que l'électrode avec laquelle elle est en contact).

Dans la séparation électrostatique des mélanges conducteur/isolant, les performances peuvent être améliorées en associant l'induction électrostatique et l'effet couronne par l'ajout d'une seconde électrode produisant un champ électrique étendu, intense et quasi-uniforme qui augmente la force électrique de décollement des particules conductrices déposées sur une surface métallique reliée à la terre [45].

### **I-1.2.2. Dispositifs de charge**

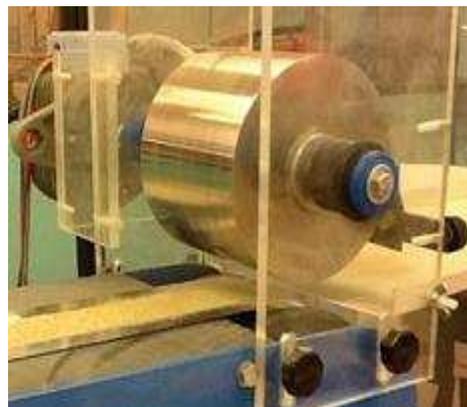
Les électrodes utilisées pour générer ce champ électrique sont souvent de forme tubulaire ou elliptique, cette forme est idéale pour étendre et uniformiser le champ généré que l'électrode soit tournante ou statique. La **Figure I-7** représente une électrode statique de forme elliptique utilisée dans le séparateur CARPCO pour des mélanges conducteur/isolant (cuivre, PVC) [46] et une électrode tournante de forme cylindrique utilisée dans le séparateur de l'INRA de Montpellier en laboratoire pour des mélanges végétaux [47].



**Figure I-6 :** Représentation schématique du mécanisme induction électrostatique sur des particules conductrices ; (a) : Particule conductrice neutre ; (b) : Particule conductrice polarisée ; (c) Ecoulement des charges vers la terre ; (d) : Attraction de la particule conductrice par la force électrostatique.



(a)



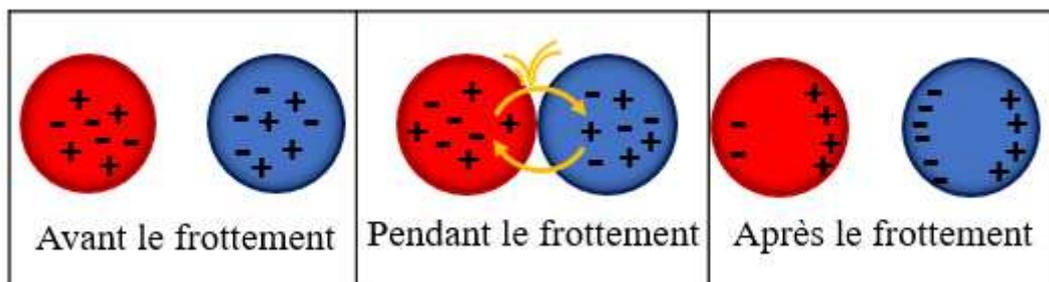
(b)

**Figure I-7 :** Différentes électrodes électrostatiques ; (a) : Electrode elliptique ; (b) : Electrode cylindrique tournante.

### I-1.3. Effet tribo-électrique

#### I-1.3.1. Description

La triboélectricité – du grec « *tribein* » qui signifie frotter – désigne le phénomène électrostatique par lequel un transfert de charges électriques est créé lorsque deux matériaux de nature différente sont mis en contact. Quand deux matériaux électriquement neutres se frottent l'un à l'autre, des charges électriques sont transférées au niveau surfacique de l'un vers l'autre, dans un même sens, il en résulte l'obtention de deux matériaux différemment chargés. La charge statique ainsi acquise se produit dans un système où généralement la conductivité du matériau est faible, elle persiste donc même après rupture du contact, et de nouveaux contacts auront pour effet de produire d'autres transferts [48-53], ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés (**Figure I-8**). C'est le mécanisme physique le plus utilisé pour charger des matériaux granulaires ou micronisées plastiques en vue de leur séparation dans un champ électrique intense [54-58].



**Figure I-8** : Transferts de charges électriques dus au frottement de deux corps ; l'un s'électrise positivement et l'autre négativement.

#### I-1.3.2. Série triboélectrique

La série triboélectrique est le classement de divers matériaux dans un ordre donné, de sorte qu'un frottement entre deux matériaux qui se suivent aboutit à charger le premier positivement et le second négativement. Plus ces matériaux sont éloignés dans la liste, plus les charges engendrées par leur frottement sont élevées.

Certaines de ces séries ont été proposées de longue date : Wilcke (1759), Faraday (1840), et Jamin et Bouty qui proposent à peu près la même série. Une autre série donnée par Shaw (1917), qui en plus d'être beaucoup plus étendue que les précédentes, donne une meilleure description des échantillons employés, celle-ci a également démontré l'effet de la température qui peut produire des inversions dans l'ordre établie.

Bill Lee [59] introduit aussi le concept d'« affinité » triboélectrique : le rapport entre la charge triboélectrique échangée et l'énergie dépensée dans le frottement (Tableau I-1).

**Tableau I-1** : Série triboélectrique réalisée par Bill Lee en 2009 [59].

Nom d'isolant	Affinité tribo-électrique [nC/J]	Charge acquise si frotté avec du métal (F : faible, N : normal)	Remarques
Polyuréthane solide	+40	+N	Un peu conducteur
Nylatron (nylon + MoS <sub>2</sub> )	+28	+N	/
Verre	+25	+N	Un peu conducteur
Papier	+10	-F	Un peu conducteur
Bois (pin)	+7	-F	/
Silicone	+6	+N	/
Coton	+5	+N	Un peu conducteur
Caoutchouc nitrile	+3	-F	/
Laine	0	-F	/
Polycarbonate	-5	-F	/
ABS	-5	-N	/
Poly méthacrylate de méthyle)	-10	-N	/
Époxy (circuit imprimé)	-32	-N	/
Caoutchouc en styrène-butadiène (SBR, Buna S)	-35	-N	/
PET (mylar) solide	-40	+F	/
Polystyrène	-70	-N	/
Polyamide	-70	-N	/
Silicone	-72	-N	/
Oléfines (alcènes) : LDPE, HDPE, PP	-90	-N	/
PVC (vinyle rigide)	-100	-N	/
Latex (naturel) en caoutchouc	-105	-N	/
Caoutchouc en EPDM, remplie	-140	-N	Un peu conducteur
Téflon	-190	-N	Très électronégatif

Quelques différences ont été constatées dans les séries triboélectriques d'un chercheur à un autre, ceci reflète principalement la culture matérielle de leurs époques respectives et souligne un certain facteur aléatoire de ces séries. En effet, il a été démontré que certains facteurs externes pouvaient inverser les polarités obtenues lors des frottements.

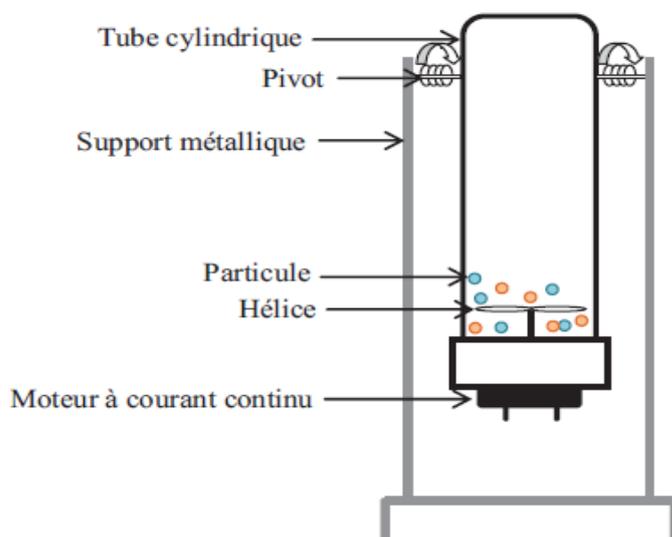
### I-1.3.3. Dispositifs de charge

Multiplés travaux ont été publiés sur les procédés de chargement triboélectrique, qui utilisent essentiellement : des ventilateurs, des tubes rotatifs, des lits fluidisés (créés par des soufflantes ou des compresseurs), des micro-cyclones, ou des chargeurs statiques [50], [60-63].

#### a. Dispositif de charge par ventilateur

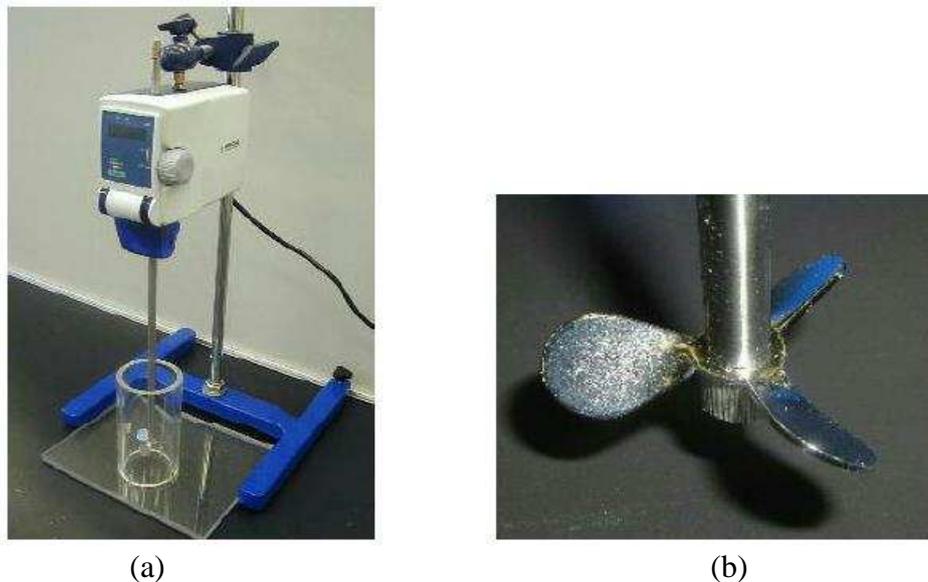
Les principaux éléments de cette installation sont (**Figure I-9**) : le tube cylindrique isolant en PVC, le moteur à courant continu qui entraîne l'hélice isolante et le support métallique. Le dispositif utilise l'air ascendant qui donne naissance à des turbulences dans le tube contenant le mélange de particules, provoquant ainsi leur tribo-électrification lorsque celles-ci entrent en collisions entre-elles ou avec les parois du tube [64].

Le mélange chargé est récupéré en pivotant le cylindre sans procéder à l'arrêt du moteur afin d'éviter l'adhérence des particules aux parois et permettre la récupération complète du contenu. Notons ici que le matériau du cylindre joue un rôle important dans ce mécanisme de charge et peut être choisi judicieusement en fonction du mélange à traiter, car le nombre de collisions entre particule-paroi est important à cause de la force centrifuge qui tente de projeter les particules entre les parois du dispositif.

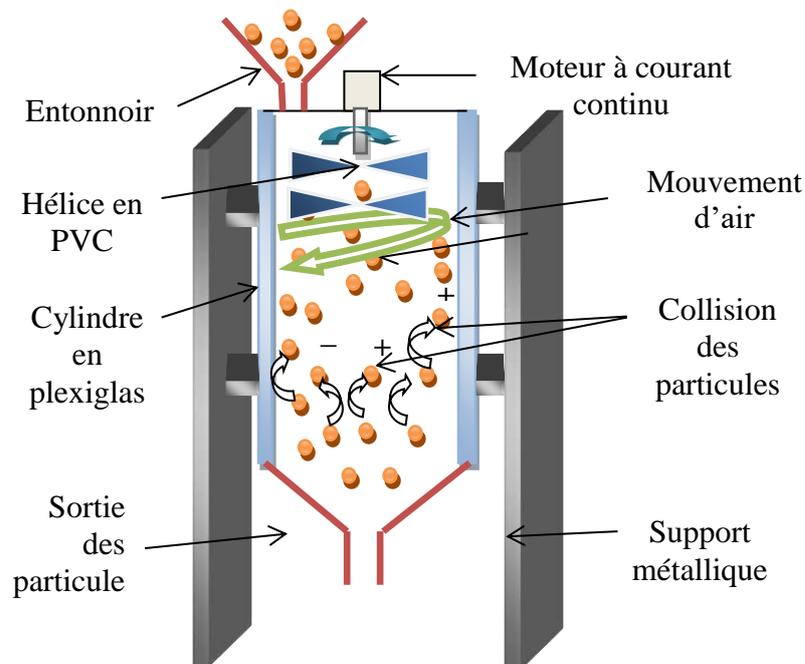


**Figure I-9** : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur [64].

La **Figure I-10** représente un dispositif similaire équipé d'une hélice d'un diamètre de 50 mm tournant dans un tube cylindrique en polyméthacrylate de méthyle (PMMA) d'un diamètre de 60 mm. Le mélange de particules déposé dans le tube acquiert une charge triboélectrique lors de la mise en marche de l'hélice [65]. Ce dispositif peut être adapté à un fonctionnement continu (**Figure I-11**) en introduisant les granules par sa partie supérieure, et en les récupérant chargés par sa partie inférieure.



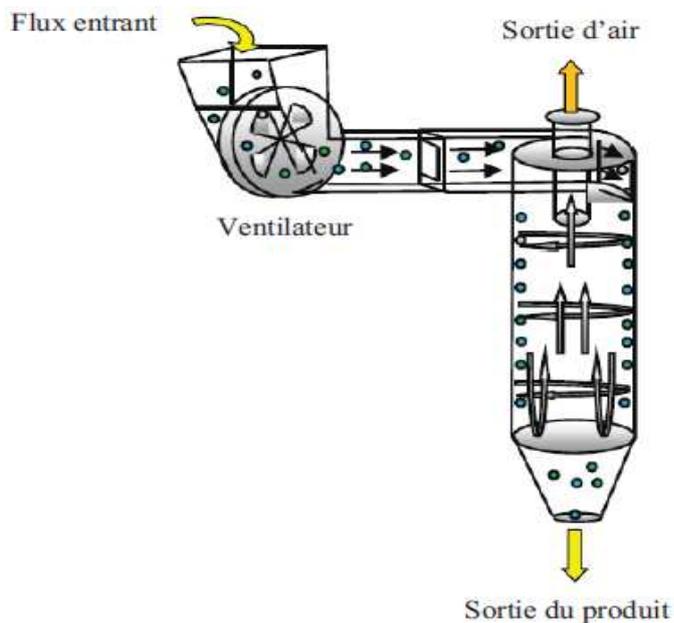
**Figure I-10** : Dispositif de charge tribo-électrique à hélice ; (a) : Chargeur ; (b) : Hélice [65].



**Figure I-11** : Dispositif de charge tribo-électrique à plusieurs hélices et à fonctionnement continu.

### b. Dispositif de charge par cyclone

Le dispositif est constitué d'un cylindre isolant (**Figure I-12**), disposé en position verticale. Les matériaux granulaires ou pulvérulents à charger sont introduits en direction horizontale, normale à la paroi intérieure du cylindre, par un ventilateur, dont la vitesse de rotation peut être modifiée. Le frottement continu entre les particules et la paroi génère la majorité de la charge acquise dans un dispositif de ce type [7], [66–69]. Le principe de fonctionnement de ce dispositif permet aussi une alimentation continue du séparateur tribo-aéro-électrostatique, mais son efficacité dans le cas des particules fines reste à tester.



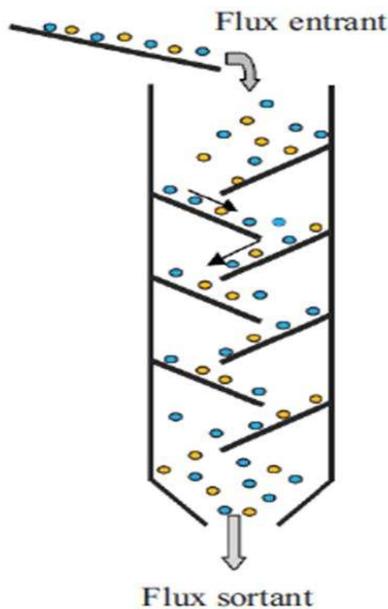
**Figure I-12** : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [7].

### c. Dispositif de charge de type statique

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique en matière isolante ou métallique (**Figure I-13**), à l'intérieur de laquelle sont disposées plusieurs plaques inclinées. Les particules glissent le long de ces plaques par gravitation et se chargent par frottement avec celles-ci (effet tribo-électrique) [65], [67].

La simplicité de la construction est remarquable. L'autre atout de ce dispositif : la possibilité de le doter de plusieurs sets de plaques, de matériaux différents, interchangeables. Ainsi, le dispositif peut être équipé des plaques assurant une charge positive pour un constituant du mélange à séparer et négative pour l'autre. La cinématique des particules à l'intérieur du dispositif favorise aussi les collisions entre particules.

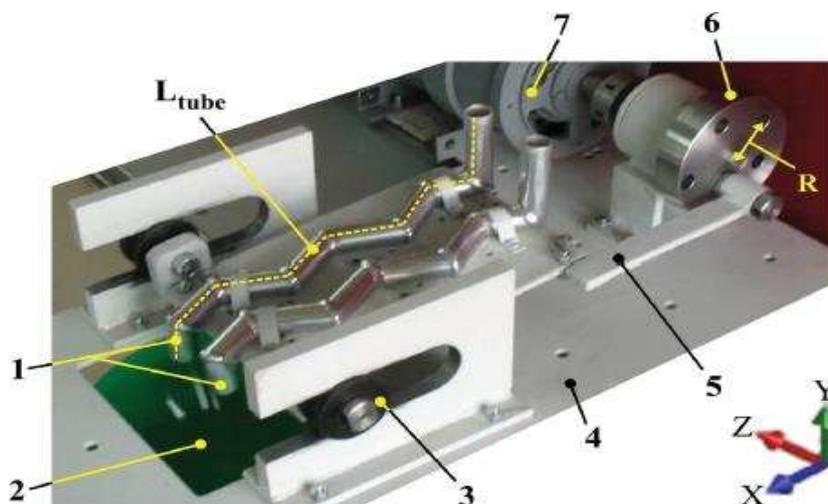
Pour une utilisation avec des mélanges pulvérulents, le dispositif doit être vibré, afin d'empêcher l'agglomération des particules et la strangulation du flux de matière.



**Figure I-13** : Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [65], [67].

#### d. Dispositif de charge par vibrations

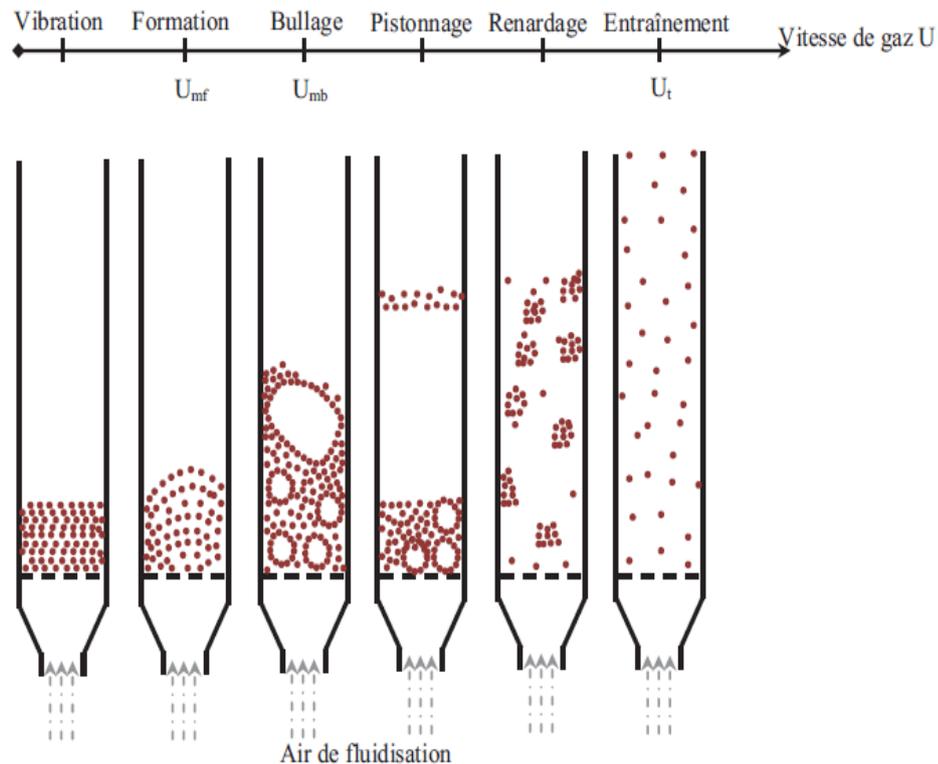
Une autre solution pour charger les particules est obtenue par le dispositif à vibrations. Une installation de ce type a été développée par Blajan et al [50] (**Figure I-14**). Le matériau à charger glisse dans des canaux en zigzag mis en mouvement vibratoire [70], [71] selon les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique et un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif.



**Figure I-14** : Dispositif à vibrations ; 1 : tubes de charge ; 2 : sortie des particules chargées ; 3 : glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ; R : rayon ; X, Y, Z : direction du mouvement ;  $L_{\text{tube}}$  : longueur du tube [70], [71].

### e. Dispositif de charge à lit fluidisé

C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (**Figure I-15**) [72], [73].

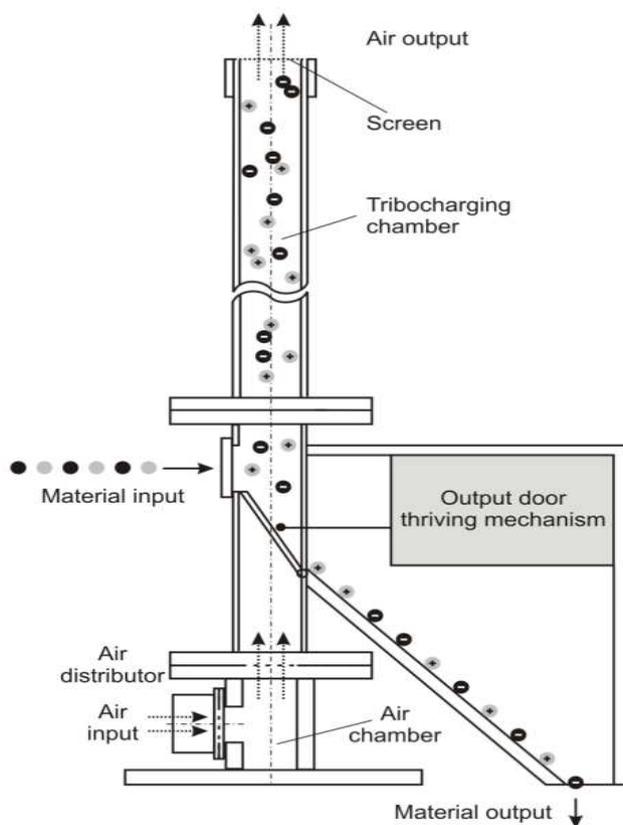


**Figure I-15** : Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation [72].

- La vibration : pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le disperseur sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.
- La formation : le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques des fluides : ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation  $U_{mf}$ , le lit montre une certaine expansion de la couche, on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules.
- Le bullage : à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage  $U_{mb}$ , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse de distribution de gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide en ébullition.

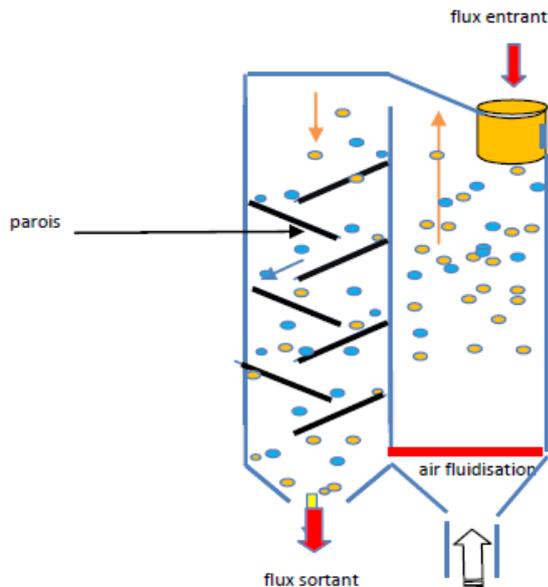
- Le pistonage : en excès au-delà de  $U_{mb}$ , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.
- Le renardage: les particules s'accolent et créent des passages préférentiels pour le gaz.
- L'entraînement : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos  $U_t$ , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation : c'est le phénomène d'entraînement.

Le dispositif de la **Figure I-16** a souvent la forme d'un tube cylindrique isolant, en position verticale. Le mélange de particules est déposé sur un support (un disperseur d'air, en tamis isolant), situé en bas du cylindre. L'air de fluidisation est produit par une soufflante connectée au bas du cylindre. Les particules fluidisées acquièrent des charges électriques de signe opposé grâce aux collisions entre elles. Le dispositif est particulièrement efficace pour les particules fines, car l'air de fluidisation empêche leur agglomération et favorisent le chargement par effet triboélectrique.



**Figure I-16** : Dispositif à lit fluidisé [62].

Un article récent [67] décrit une combinaison de deux modes de chargement en cascade (**Figure I-17**). La première section du dispositif assure le chargement triboélectrique en lit fluidisé. Les particules fines sont dirigées vers la deuxième partie du dispositif, destinée au chargement statique sur des plaques inclinées. Cette solution technique permet de mieux contrôler le processus, multipliant les mécanismes de charge employés.

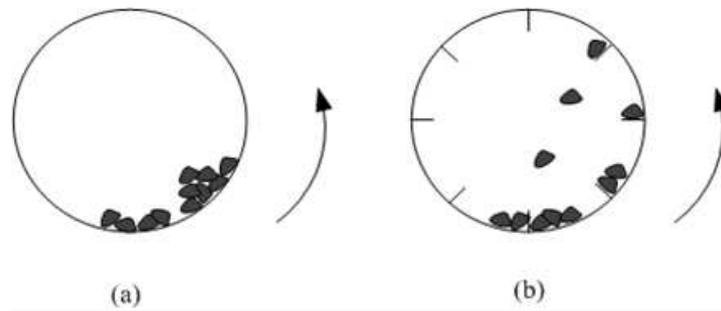


**Figure I-17** : Représentation schématique d'un dispositif composé d'un lit fluidisé et d'un chargeur statique [67].

#### f. Dispositif de charge à tambour tournant

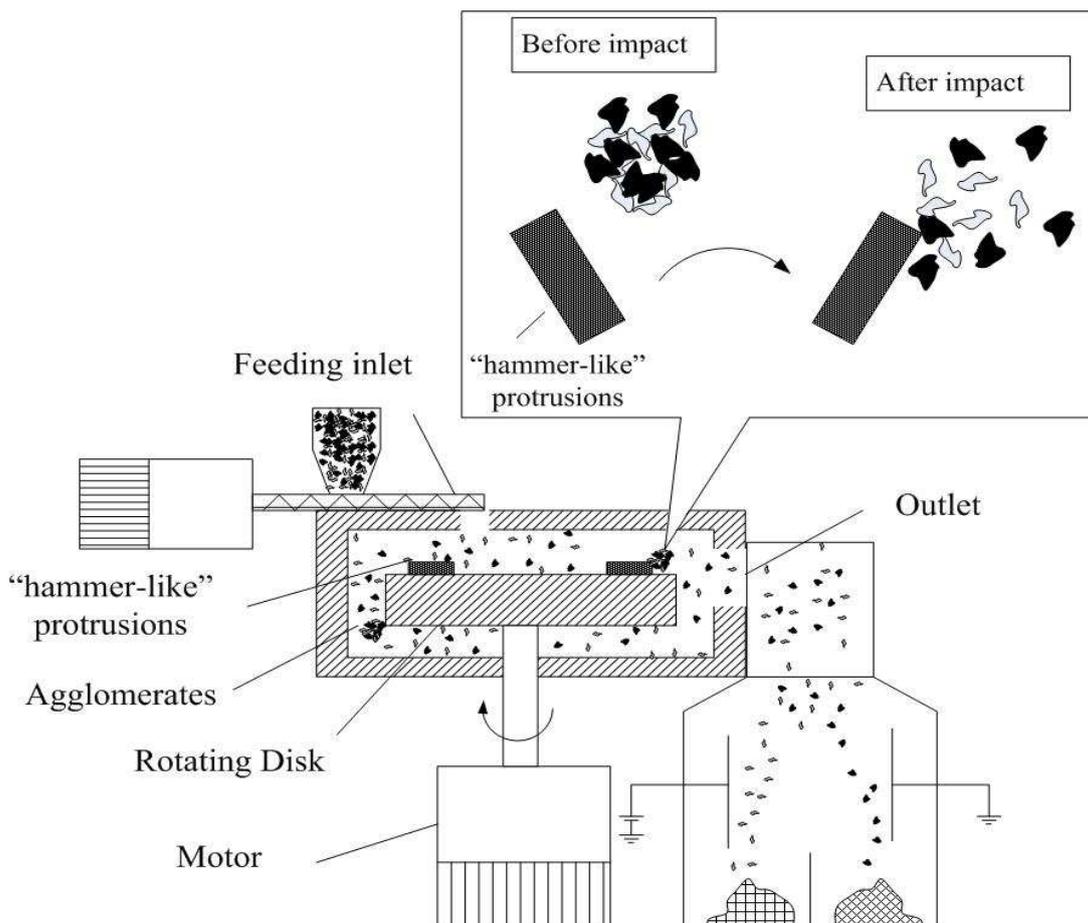
Les dispositifs de chargement cités précédemment (vibrations, cyclones, lit fluidisé etc.) peuvent avoir dans certains cas deux inconvénients majeurs : la non-homogénéité de la charge et la formation d'agglomérats de particules fines. Dans un champ électrique intense, les particules qui ne sont pas suffisamment chargées sont mal déviées, et au lieu de tomber dans le compartiment qui leur est destiné, elles se retrouvent dans le secteur médian du collecteur, réduisant ainsi le taux de récupération des produits. Dans le cas où les agglomérats sont composés d'un nombre équivalent de particules chargées positivement et négativement, ils sont quasi neutres et se comportent de façon similaire. La situation est pire lorsqu'ils ont une charge globale positive ou négative. Ces agglomérats sont attirés par une électrode et altèrent la pureté des produits collectés, car ils contiennent des particules de différents types.

Différents dispositifs ont été imaginés pour améliorer l'effet de la charge et éliminer les agglomérats. En faisant tourner un tambour équipé d'ailettes au niveau de sa surface intérieure [74] (**Figure I-18**), il pourra fournir non seulement une plus grande probabilité de collisions particule-particule, en raison de l'agitation, mais aussi une plus grande surface de contact pour les collisions particule-paroi par rapport au modèle à surface interne lisse.



**Figure I-18** : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par tambour tournant ; (a) Lisse, (b) à ailettes [74].

Un autre dispositif [75], illustré sur la **Figure I-19**, utilise un disque rotatif qui permet de mélanger les particules isolantes et de favoriser les collisions entre elles. Ce disque est conçu avec des bosses de type « marteau », capables non seulement d'accélérer le mouvement d'agitation des particules mais également d'empêcher la formation d'agglomérats.



**Figure I-19** : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par disque rotatif [75].

## **I-2. Séparation électrostatique des matériaux pulvérulents**

Elle représente de nos jours, une technologie économiquement viable pour la concentration des minerais, le recyclage des déchets et la purification des produits agro-alimentaires [2], [76]. Son utilisation dans ces industries nécessite le développement de nouvelles technologies afin d'améliorer les résultats, tout en respectant une réglementation de plus en plus sévère pour la protection de l'environnement. Les recherches entreprises dans ce sens ont été très fructueuses lorsqu'il s'agissait de la séparation des particules de tailles millimétriques, dites granulaires [77], [78].

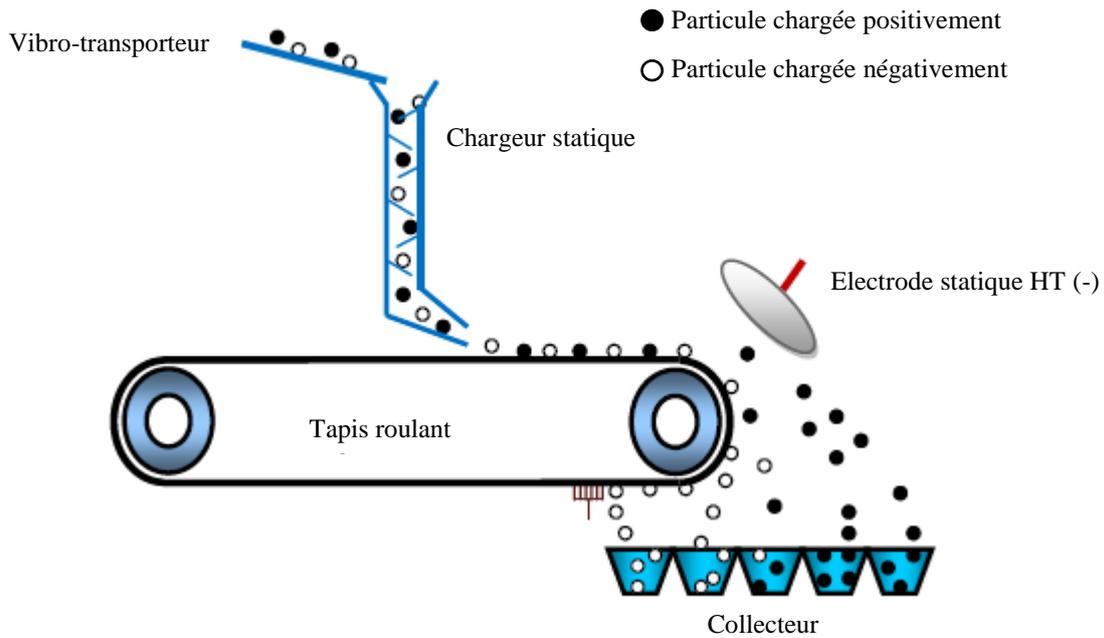
Cependant, peu de résultats ont été obtenus pour la séparation électrostatique des particules pulvérulentes dont la taille est inférieure à 1 mm [79], comme celles rencontrées dans l'industrie agro-alimentaire [80]. Les procédés de séparation de ces particules fines se heurtent souvent à la difficulté de contrôler leurs trajectoires, en raison de l'influence des forces aérodynamiques.

### **I-2.1. Installations de laboratoire**

Afin de répondre aux besoins de l'industrie du recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques, multiples recherches ont été réalisées par des laboratoires américains, japonais, européens, canadiens et algériens sur la séparation électrostatique [81-83]. Cette technique se révèle efficace dans le tri de matériaux granulaires ou pulvérulents selon leurs caractéristiques physiques, en faisant appel aux forces qui s'exercent sur les particules chargées ou polarisées, en champ électrique intense [84-87]. La majorité des installations traitant les particules pulvérulentes utilisent l'effet tribo-électrique comme mécanisme de charge, qui empêche l'apparition des agglomérats. Le point commun entre ces dispositifs est la nécessité d'avoir deux parties successives, la première celle de chargement triboélectrique des particules, et l'autre destinée à leur séparation.

#### **I-2.1.1. Séparateur tribo-électrostatique à tapis roulant**

Le schéma de la **Figure I-20** explique le fonctionnement d'un séparateur tribo-électrique à tapis roulant TBS (Tribocharged Belt Separator) [64]. Les particules sont tribo-électrisées par un dispositif de chargement statique, puis elles tombent sur un tapis roulant et sont transportées vers la zone de séparation. Les particules se séparent sous l'action des forces du champ électrique généré entre l'électrode haute tension et le tapis relié à la terre. Cette électrode attire les particules d'une polarité et repousse les particules de polarité opposée, grâce aux forces électriques de Coulomb, permettant ainsi la séparation [88,93].



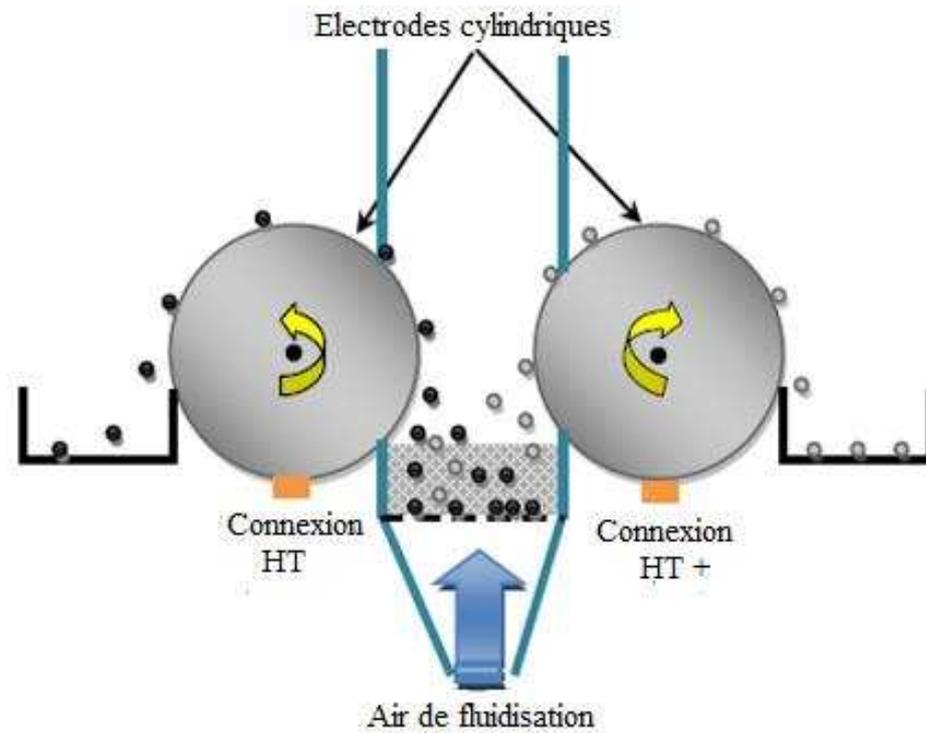
**Figure I-20** : Représentation schématique d'un séparateur TBS [64].

### I-2.1.2. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes

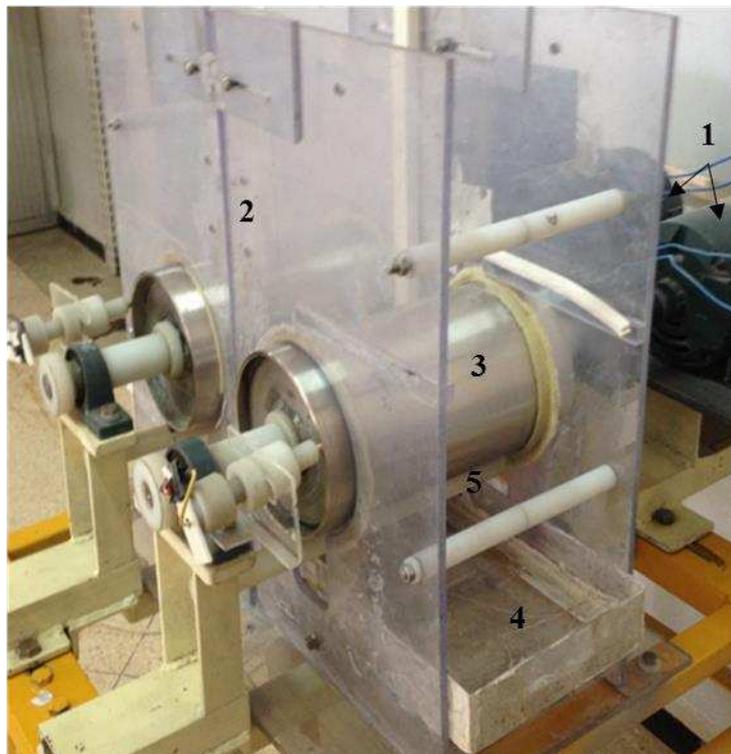
Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes conçu par le laboratoire IRECOM, de l'université de Sidi-Bel-Abbès, Algérie est présenté sur les **Figures I-20** et **I-21**. Le mélange pulvérulent est introduit dans la chambre de fluidisation qui sert aussi de chambre de séparation. Celle-ci a les dimensions de  $23 \times 8 \times 7 \text{ cm}^3$ , de parois en PMMA transparent. L'injection de l'air est faite à vitesse variable par une soufflante d'une puissance nominale de 1,1 kW.

Le champ électrique est généré entre les deux électrodes cylindriques tournantes (Diamètre : 16 cm ; Longueur : 30 cm) qui sont éloignées de 8 cm et situées dans la chambre de séparation. Elles sont alimentées à partir de deux alimentations de haute tension continue de polarités opposées, leur entraînement à vitesse variable est réalisé par des moteurs à courant continu. Les produits séparés sont récupérés dans les deux bacs collecteurs placés de part et d'autre de la chambre de séparation [94].

Le mélange de matériaux pulvérulents qui a été testé sur cette installation comprend deux types de PVC, l'un de couleur blanche et l'autre de couleur grise broyés dans une usine de fabrication de tuyaux de plastique (CHIALI, Sidi-Bel-Abbès, Algérie). La taille des particules est typiquement comprise entre  $150 \mu\text{m}$  et  $250 \mu\text{m}$ .



**Figure I-21** : Représentation schématique du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes [94].

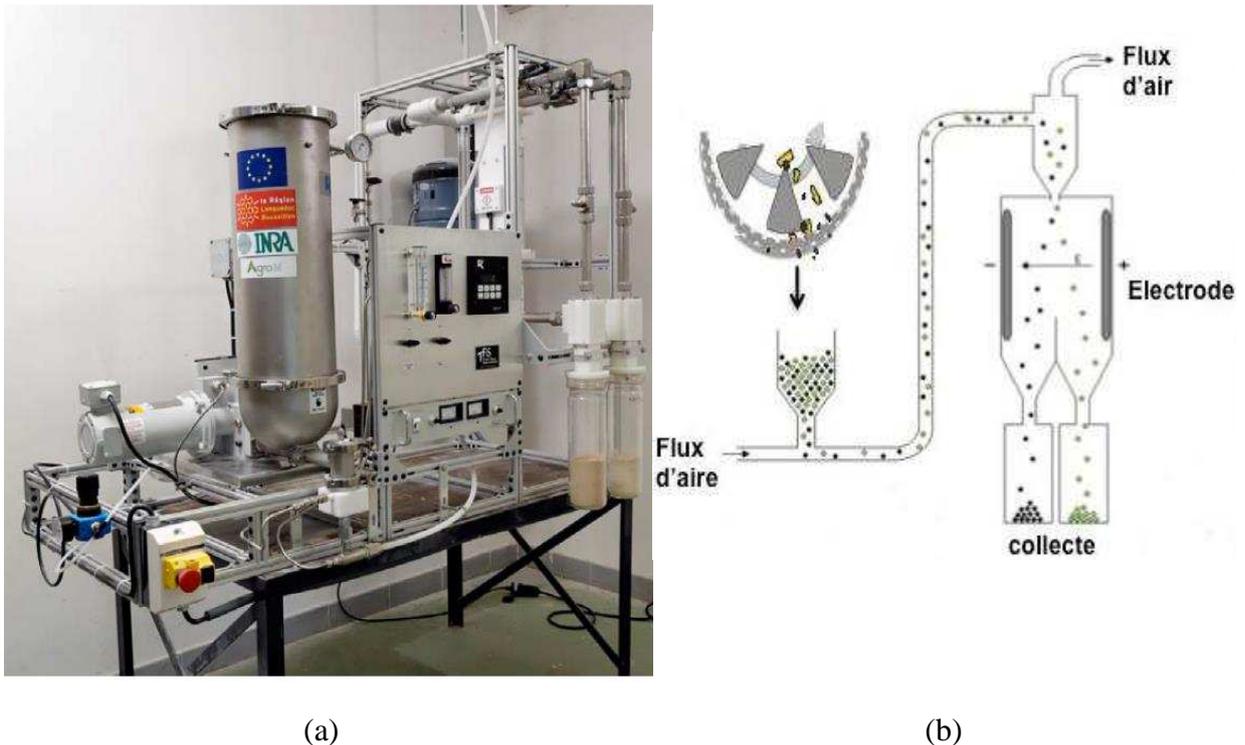


**Figure I-22** : Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes tournantes ; 1 : Moteur DC ; 2 : Chambre de séparation ; 3 : Electrodes cylindriques tournantes ; 4 : Bacs collecteurs, 5 : Racleurs [94].

### I-2.1.3. Séparateurs tribo-électrostatique à chute libre

#### a. Première installation

Le séparateur électrostatique de la **Figure I-23 a**, utilisé par l'Institut National de la Recherche Agronomique de Montpellier (INRA), a la particularité que les mélanges pulvérulents subissent un chargement triboélectrique dans un tube isolant, grâce à l'injection d'air par une soufflante. Une fois chargées, les particules sortent vers le séparateur à chute libre à travers un clapet commandé [95].

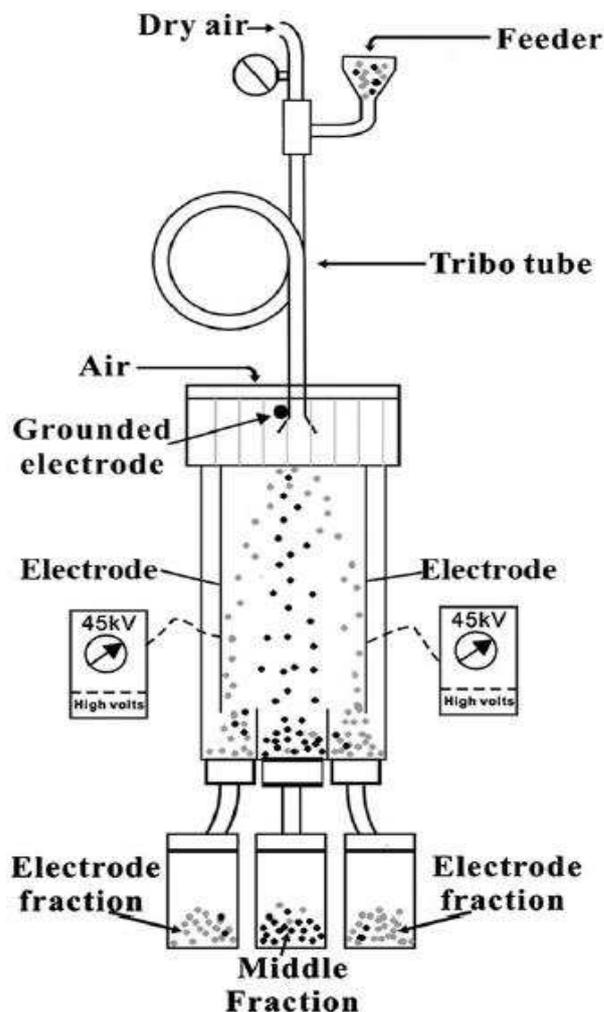


**Figure I-23** : (a) Photographie et (b) Schéma descriptif d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique (INRA) [95].

Les particules à l'alimentation (**Figure I-23 b**) vont se charger lors de leur convoyage à travers le tuyau de charge. L'air sec va permettre le transport à travers le conduit de charge et ainsi charger les particules par effet tribo-électrique. Suivant le matériau du tuyau de convoyage (PVC, TEFLON, INOX), des particules différentes peuvent se retrouver avec des charges négatives ou positives, et vont ensuite passer dans une cellule de séparation dans laquelle un champ électrique va dévier la trajectoire des particules en mouvement, en attirant les particules positives vers la cathode et les particules négatives vers l'anode. Les particules vont ensuite être décantées dans un cyclone (centrifugation aérodynamique) et être collectées dans les bouches de récupération [96], [97].

### b. Deuxième installation

Ce séparateur tribo-électrostatique, est constitué d'un entonnoir en verre qui sert à l'alimentation du matériau, d'un tube en Polytétrafluoroéthylène (PTFE) pour la charge tribo-électrique, d'une chambre de séparation électrostatique avec deux électrodes plaques reliées à des alimentations en haute tension réversibles, et d'une autre électrode reliée à la terre (**Figure I-24**) qui permet d'empêcher l'accumulation des charges dans le tube en PTFE. Lors de la séparation tribo-électrique, les particules sont introduites dans l'entonnoir en verre à raison de 50 g/min et sont ensuite chargées par un dispositif tribo-électrique en forme de tube où la circulation de l'air est de  $3,0 \pm 0,05$  m/s. Des collisions vont être créées, particule-particule ou bien particule-paroi, ce qui leurs permettra d'acquérir des charges électriques différents (positives ou négatives). Puis ces particules vont se déplacer dans la chambre de séparation dans laquelle un champ électrique va dévier leur trajectoire grâce à la force électrostatique, en attirant les particules positives vers la cathode et les particules négatives vers l'anode.

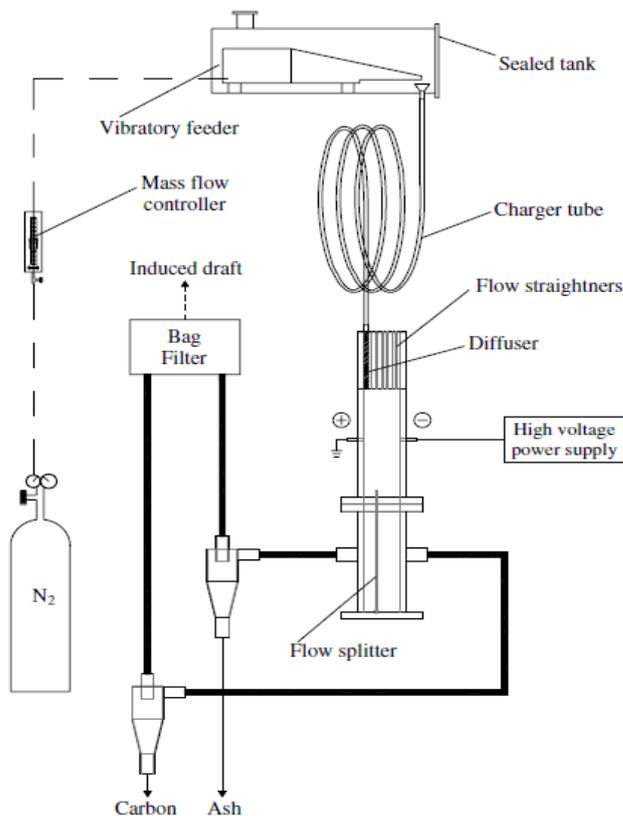


**Figure I-24** : Schéma descriptif du séparateur tribo-électrostatique [98],[99].

A l'extrémité inférieure de la chambre de séparation, trois bacs de collecte sont utilisés pour la récupération des particules, deux d'entre eux situés à droite et à gauche du séparateur, sont destinés à la collecte des particules attirés précédemment par les deux électrodes et celui du milieu est destiné pour la collecte des particules qui n'arrivent pas à acquérir une charge suffisante [98], [99].

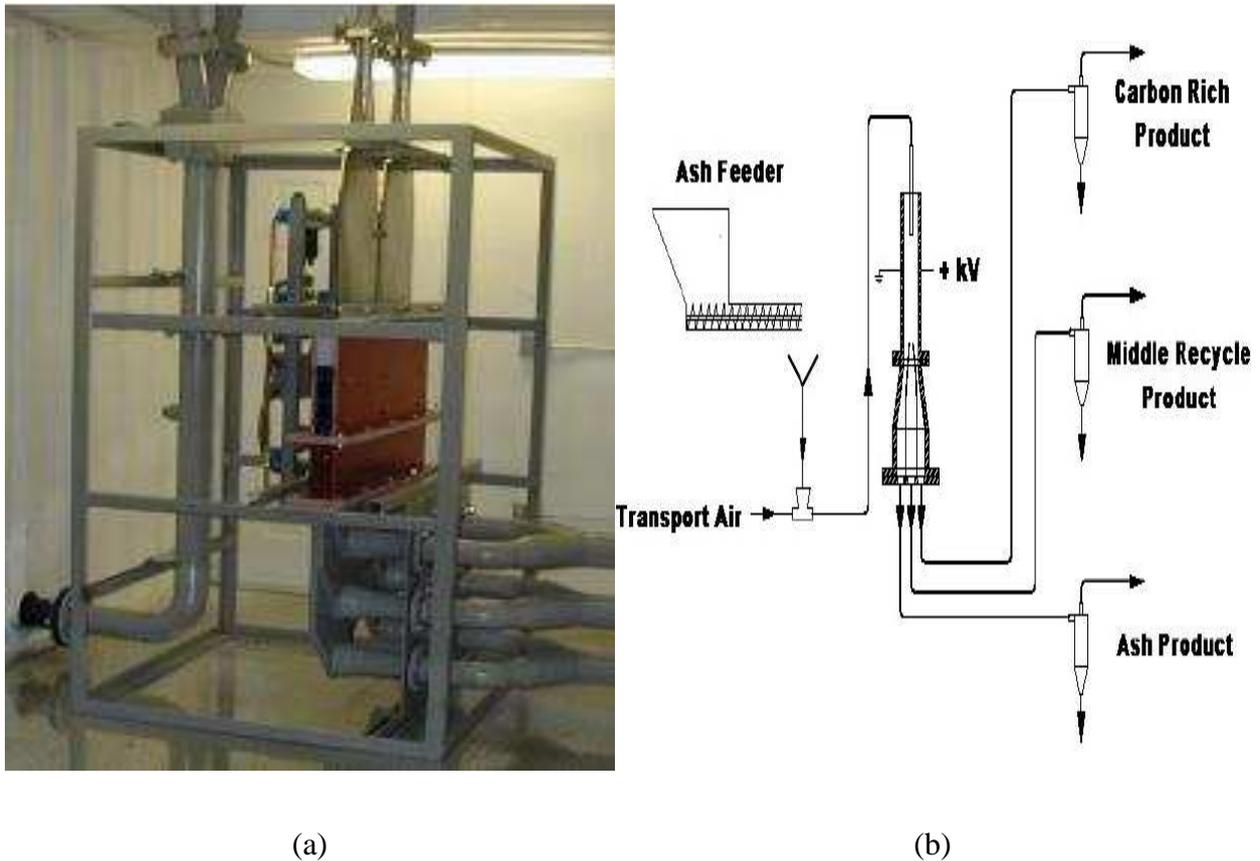
### c. Troisième installation

La troisième installation électrostatique (**Figure I-25**) représente un autre séparateur tribo-électrostatique. Il est destiné à l'étude de la séparabilité des particules fines d'un diamètre inférieur à  $100\ \mu\text{m}$  pour une capacité d'alimentation de  $10\ \text{kg/h}$ , en utilisant une goulotte oscillante. Les particules tombent à travers un tube, où elles acquièrent une charge électrique lors de l'injection à  $20\ \text{m/s}$  d'un gaz inerte qui est l'azote  $\text{N}_2$ . Ce dernier empêche l'apparition des décharges électriques pour éviter tout risque d'explosion et crée en même temps des turbulences à l'intérieur du tube, qui génèrent des collisions particule-particule et particule-paroi. Le flux du gaz est contrôlé par un régulateur de débit. Les particules chargées entrent ensuite dans chambre de séparation où règne un champ électrique intense généré par deux électrodes plaques reliées à des alimentations haute tension ( $0 - 20\ \text{kV}$ ) [100], [101].



**Figure I- 25** : Schéma descriptif du séparateur tribo-électrostatique [100], [101].

Les **Figures I-26 (a) et I-26 (b)** représentent un autre séparateur électrostatique conçu par une entreprise américaine BORAL, utilisant la triboélectricité comme mécanisme de charge pour les particules fines, le principe de fonctionnement est similaire au principe de la troisième installation décrite précédemment.



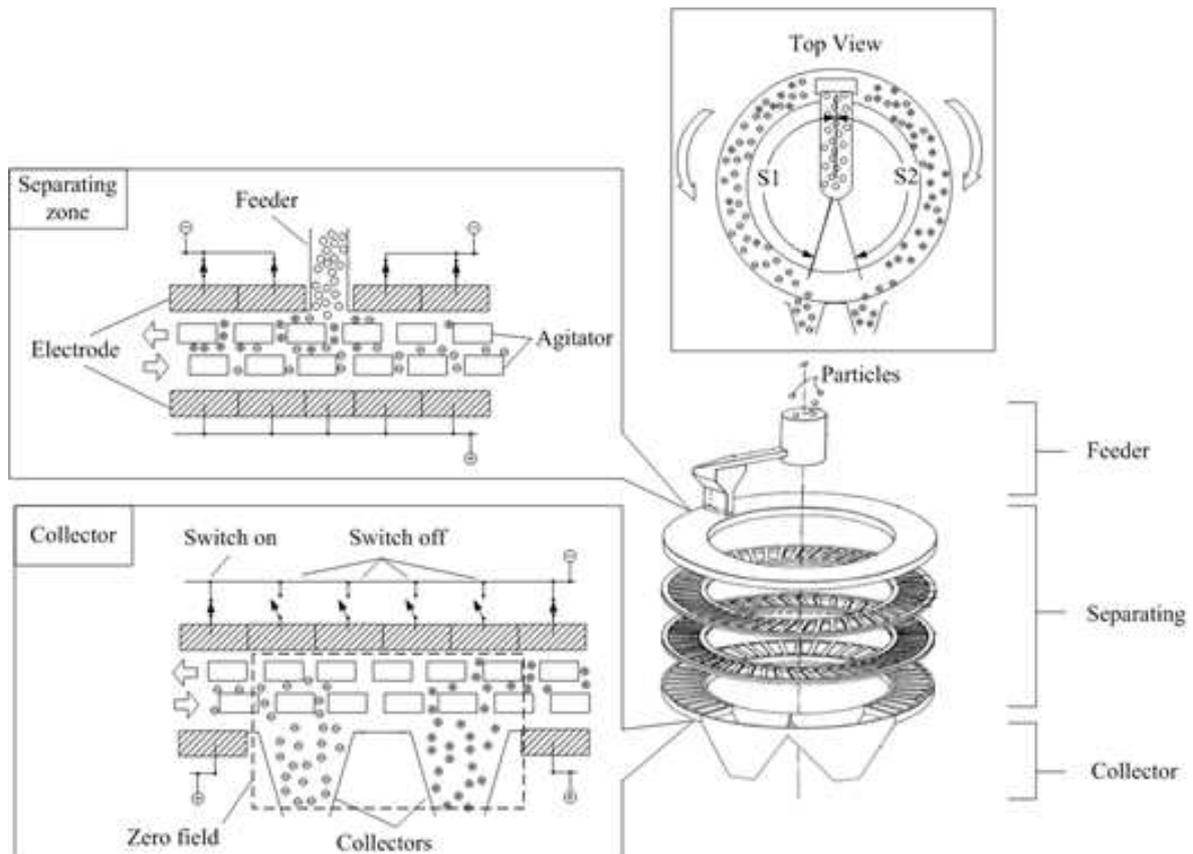
**Figure I-26** : Schéma descriptif du séparateur tribo-électrostatique [102].

#### I-2.1.4. Séparateur tribo-électrostatique à anneaux

Le séparateur à anneaux [103] se compose d'un dispositif d'alimentation, d'une zone de séparation et d'un collecteur. La zone de séparation, qui sert également à charger les particules par effet tribo-électrique, est composée de quatre anneaux. Les anneaux supérieurs et inférieurs sont fixés ensemble et représentent les électrodes du séparateur. Les électrodes sont constituées de petits secteurs liés à la haute tension au moyen d'un interrupteur.

Les deux anneaux du milieu sont utilisés comme des agitateurs, reliés à des moteurs électriques. La **Figure I-27** représente les agitateurs qui tournent en sens inverse et agitent le flux de particules pour la charge des particules fines (tribo-électrique).

Lorsque les particules sont chargées, elles sont attirées par les électrodes et se déplacent avec les agitateurs. Ainsi, les particules chargées positivement sont attirées par l'électrode supérieure de polarité négative et se déplacent avec l'agitateur du haut. Les particules chargées négativement sont attirées par l'électrode inférieure de polarité positive et se déplacent avec l'agitateur du bas. De cette manière, les particules chargées sont séparées par les deux agitateurs qui tournent dans des directions opposées. Et enfin la zone de collecte comprend deux ou plusieurs collecteurs.



**Figure I-27** : Schéma descriptif du séparateur électrostatique à anneaux [103].

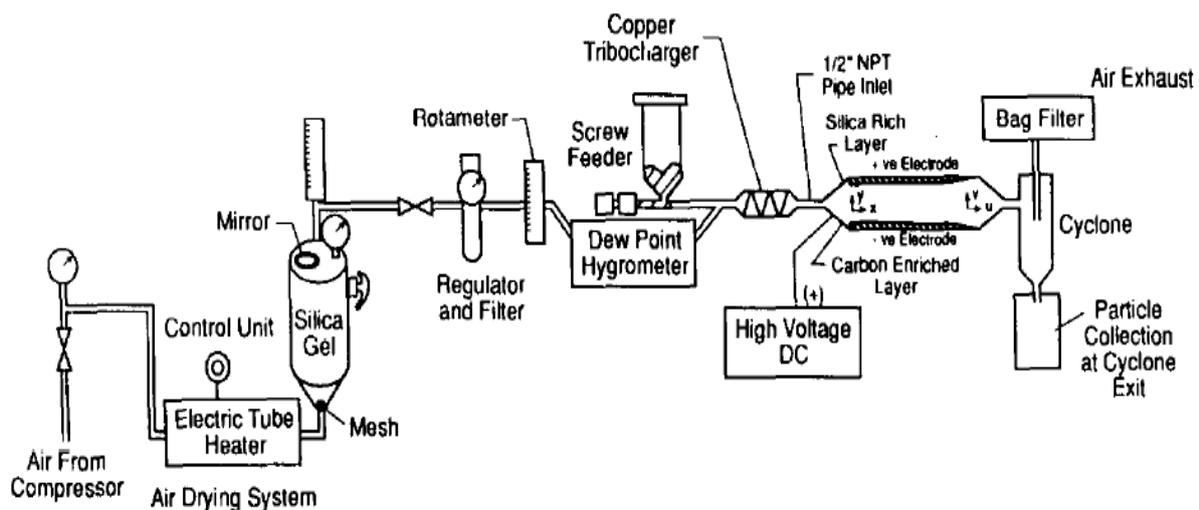
### I-2.1.5. Séparateur tribo-électrostatique à deux électrodes horizontales

La **Figure I-28** représente une installation expérimentale pour la séparation électrostatique. Cette installation se compose essentiellement en trois parties : (1) mesure et contrôle de l'humidité de l'air, température, pression et débit ; (2) convoyage et charge triboélectrique pour la charge des particules fines avant leur introduction dans le séparateur à deux électrodes ; et (3) la séparation électrostatique.

Ce séparateur est constitué de deux électrodes en forme de plaques en cuivre, la distance entre les électrodes est de 10 cm, reliées à des alimentations haute tension (fabriquées par Universal Voltronics) avec une tension de l'ordre de 36 kV.

Les particules fines sont chargées à travers un d'un dispositif tribo-électrique en cuivre lors de la mise en marche d'un compresseur d'air, ainsi les particules peuvent se retrouver avec des charges positives ou négatives. Les particules chargées sont ensuite séparées lors de leur passage entre les deux électrodes, celles chargées négativement sont attirées par l'électrode supérieure de polarité positive et celles chargées positivement sont attirées par l'électrode inférieure de polarité négative.

La vitesse d'admission des particules dans le séparateur est contrôlée à l'aide d'un régulateur de pression et d'un régulateur de débit (rota-mètre). Et comme l'humidité de l'air joue un rôle essentiel dans le processus de chargement des particules, celle-ci est soigneusement examinée en passant l'air par un lit de gel de silice et /ou par un système de chauffe. L'humidité relative est mesurée par un hygromètre [104], [105].



**Figure I-28** : Schéma descriptif de l'installation pour la séparation tribo-électrostatique [104].

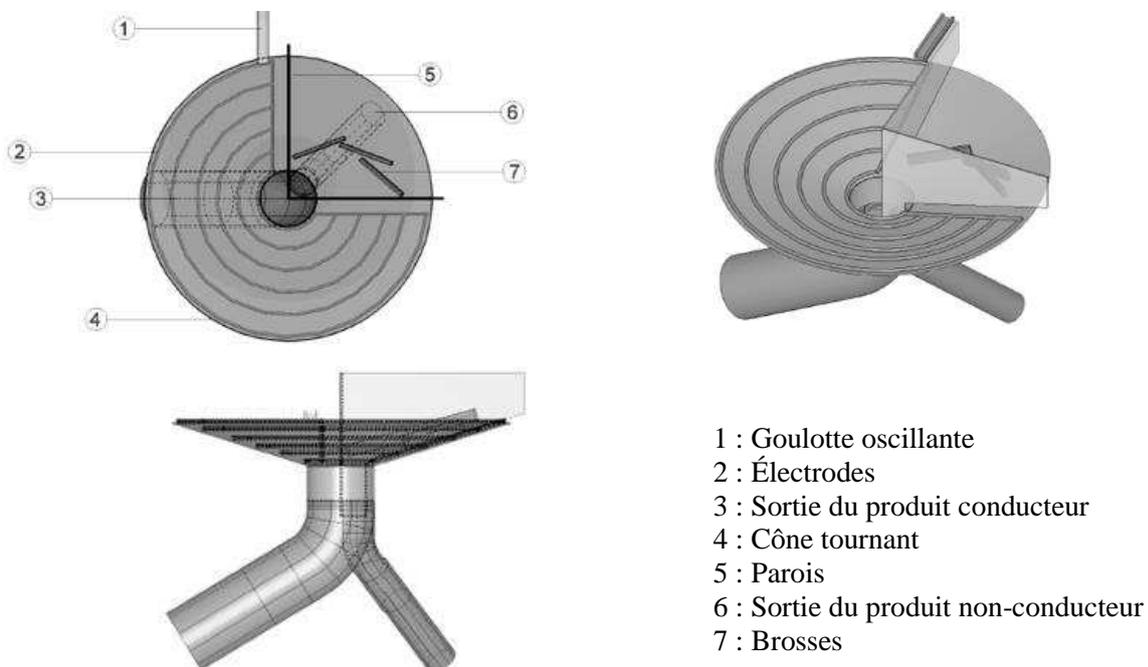
#### I-2.1.6. Séparateur tribo-électrostatique en forme de cône

Le séparateur représenté sur la **Figure I-29** est un prototype de laboratoire conçu par le Centre d'Étude de Science Minéral et de la Recherche National, de Cagliari en Italie, en collaboration avec le département de Géo-ingénierie et Technologies de l'environnement de l'université de Cagliari, Italie. Ce dernier est constitué [106] :

- D'un dispositif d'alimentation sous forme de goulotte oscillante en acier inoxydable (1) sur laquelle les particules fines sont déposées.

- D'une surface tournante en forme de cône en acier inoxydable (4) d'un diamètre de 860 mm, qui peut être connectée à la terre ou bien à une alimentation en haute tension, qui tourne sur son axe vertical.
- De cinq d'électrodes (2) en acier inoxydable en forme d'anneaux d'un diamètre de 8mm, espacé de 80mm, qui sont reliées à une source de haute tension. L'ensemble de ces électrodes couvrent les trois quart (3/4) de la surface conique du séparateur.
- D'une zone de collection des produits à séparer, qui comprend deux sorties, la première sortie est centrale (3) pour la récupération des particules dite conductrices et la deuxième sortie (6) pour la récupération des particules non-conductrices.
- De deux parois (5) qui empêchent l'intrusion les particules conductrices, et de brosses (7) pour racler des particules non conductrices qui resteraient collées à la surface du cône.

Ainsi les particules qui se chargent de la même polarité que des électrodes restent collées sur la surface du cône puisque cette dernière est reliée à la terre et atteignent la sortie qui leur est consacrée. Tandis que les particules conductrices qui perdent rapidement leurs charges vont être récupérer au niveau de la sortie centrale du séparateur.



**Figure I-29** : Schéma descriptif du séparateur tribo-électrostatique en forme de cône [106].

## I-2.2. Brevets d'inventions

La base de données de l'Institut National de la Propriété Industrielle contient plusieurs centaines de brevets concernant les méthodes et les installations de séparation électrostatique. La plupart ont comme objet le tri des matériaux granulaires de taille millimétrique. Peu sont ceux qui proposent des solutions pour la séparation électrostatique des mélanges granulaires sous-millimétrique. Des solutions peuvent être groupées en quatre catégories, décrites dans les paragraphes suivants.

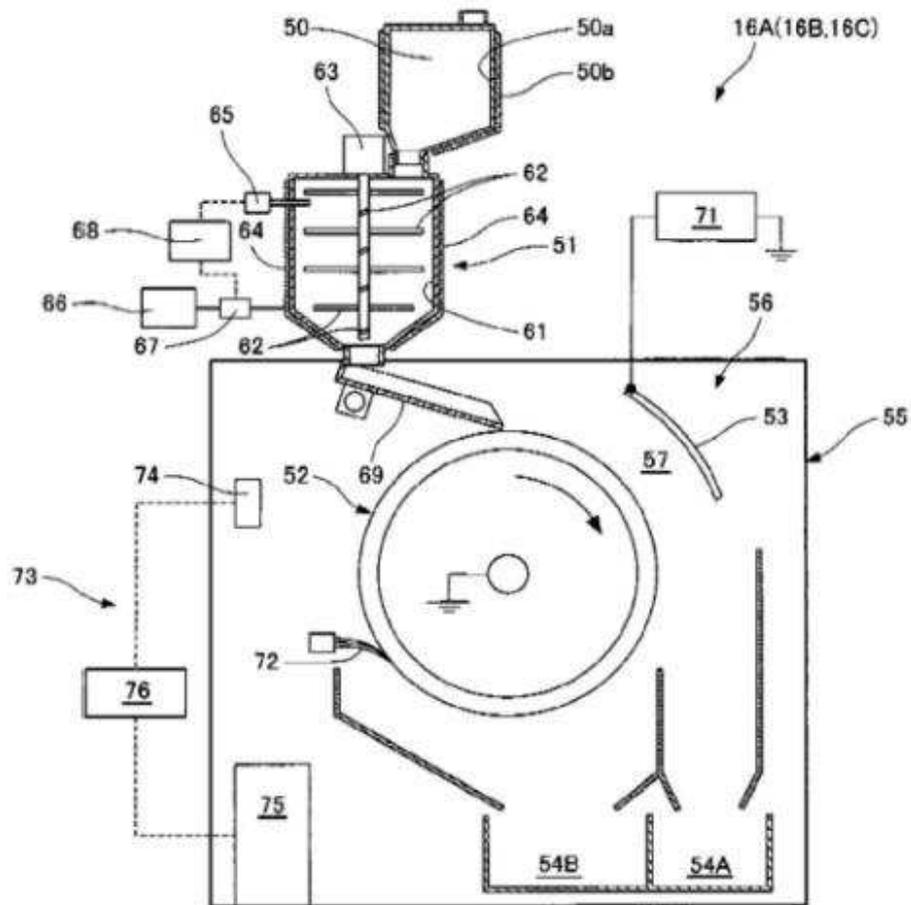
### I-2.2.1. Séparateurs électrostatiques à tambour ou à bandes

Dans ces installations (**Figures I-30 et I-31**), typiquement utilisées pour la séparation des mélanges de matériaux conducteurs et non-conducteurs, les mélanges de matériaux isolants doivent être préalablement chargés par effet tribo-électrique, comme dans le dispositif (51) de l'installations représentée sur la **Figures I-30** [107]. Les particules chargées de signe opposé à l'électrode haute tension (53) sont attirées vers celle-ci et sont collectées dans le compartiment (54 A) du collecteur de produits. Les autres restent collées par la force d'image électrique à l'électrode cylindrique tournante liée à la terre (52) ; la brosse (72) les détache et elles tombent dans le compartiment 54 B du collecteur.

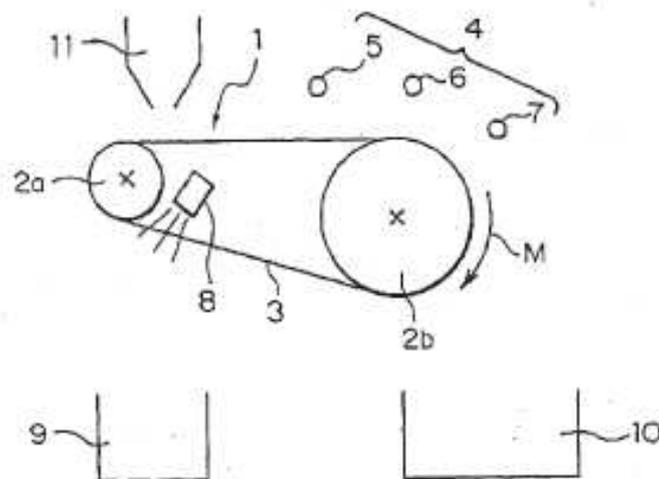
Le fonctionnement du séparateur à convoyeur métallique [108] est similaire (**Figure I-31**). C'est la bande métallique liée à la terre (3) qui entraîne les particules préalablement chargées par le dispositif (11) dans la zone de champ électrique créée par le système d'électrodes (4). En fonction du signe de leur charge, les particules sont collectées dans un des deux compartiments (9) ou (10).

Les deux séparateurs décrits ci-dessus présentent les mêmes désavantages :

1. Les dispositifs de charge triboélectrique restent à développer en rapport avec les particularités de chaque mélange à traiter.
2. Les matériaux à séparer doivent être déposés en mono-couche à la surface des électrodes liées à la terre, ce qui limite à quelques kilogrammes les quantités traitées par heure et par mètre de longueur du cylindre ou de largeur de la bande.
3. Les forces d'adhésion, très fortes entre les particules et les électrodes, rendent très difficile la séparation des particules fines (taille inférieure à 0,05 mm).



**Figure I-30** : Séparateur tribo-électrostatique à tambour [107] ; 50 : Entonnoir ; 51 : Dispositif de charge tribo-électrique ; 52 : Electrode cylindrique tournante liée à la terre ; 53 : Electrode haute tension ; 54 A et B : Collecteurs de produits ; 72 : Brosse.

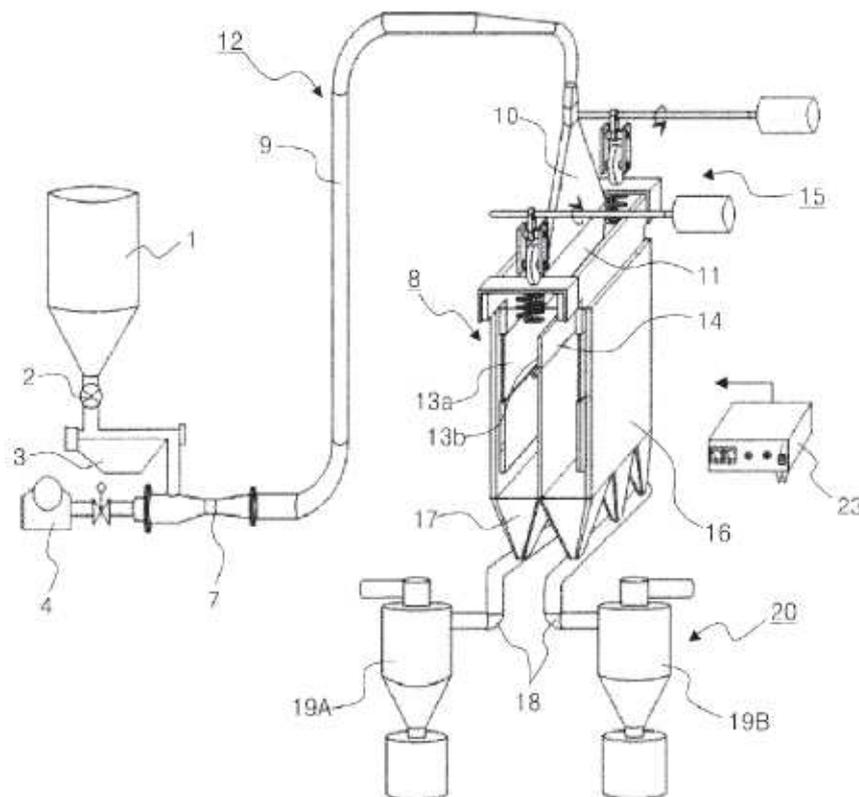


**Figure I-31** : Séparateur tribo-électrostatique à convoyeur [108] ; 1 : Convoyeur métallique ; 2 a et b : Cylindres d'entraînement de la bande du convoyeur ; 3 : Bande métallique du convoyeur, liée à la terre ; 4 : Système d'électrodes hautes tension (5, 6, et 7) ; 8 : Système de nettoyage de la bande ; 9 et 10 : Collecteurs de produits ; 11 : Alimentation (dispositif de charge).

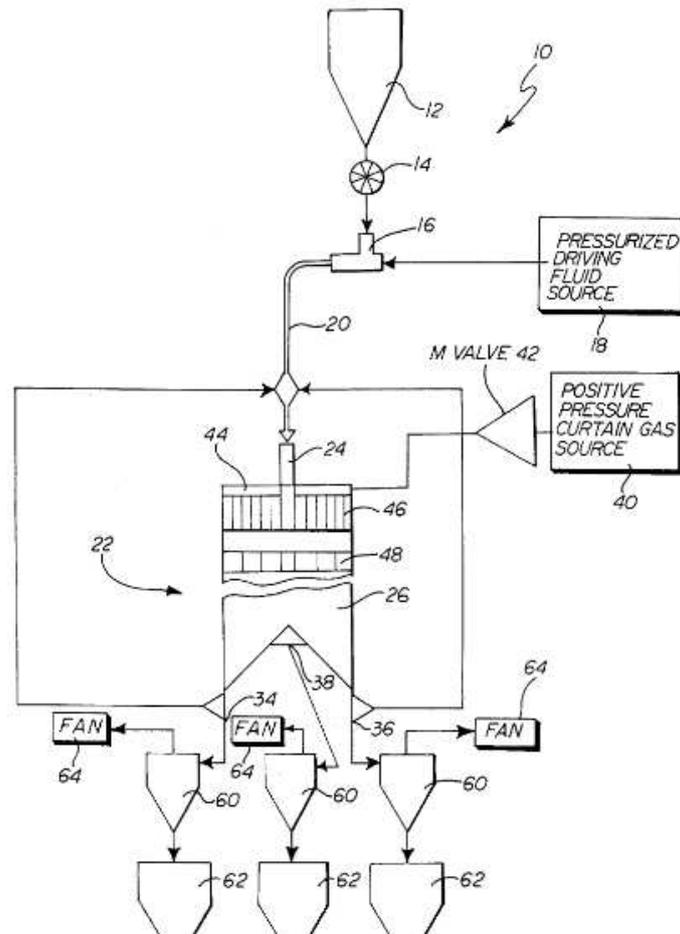
### I-2.2.2. Séparateurs tribo-électrostatiques à circulation d'air

Ces installations semblent les plus performantes, car les matériaux à séparer sont entraînés par un flux d'air, qui facilite dans un premier temps leur charge par effet tribo-électrique, dans des dispositifs de type tube de Venturi [109] (**Figure I-32**), ou tout simplement dans les tubes qui les dirigent vers la zone de séparation [110] (**Figure I-33**). Dans la zone de séparation, le flux d'air empêche la formation d'agglomérats et la formation des couches de particules sur les électrodes, facilitant le processus de collecte.

Les séparateurs de cette classe sont typiquement utilisés pour la purification des produits agroalimentaires et le traitement des cendres collectées par les électrofiltres des centrales thermiques. Ces applications se caractérisent par une distribution granulométrique des particules assez serrée, dans la gamme 0,01 mm à 0,1 mm. Ceci impose une limite très contraignante à leur utilisation dans l'industrie du recyclage, où les opérateurs sont confrontés à des mélanges granulaires ayant une distribution granulométrique plus large, s'étalant de 0,01 mm à 2 mm.



**Figure I-32** : Séparateur tribo-électrostatique à dispositif de charge de type Venturi [109] ;  
 Parties principales : 1 : Entonnoir, 2 : Alimentateur rotatif, 3 : Vibreur, 4 : Soufflante, 7 :  
 Dispositif de charge de type Venturi, 8 : Séparateur électrostatique, 9 : Tube de transfert, 10 :  
 Distributeur de matière, 13 a et b : Electrodes, 20 : Collecteur.



**Figure I-33 :** Séparateur tribo-électrostatique à air comprimé [110] ; Parties principales :  
 12 : Entonnoir, 14 : Alimentateur rotatif, 16 : Transporteur pneumatique, 20 : Tube de transport, 22 : Séparateur électrostatique, 24 : Distributeur de matière, 60 : Collecteurs de type cyclone, 62 : Collecteurs de produit.

### I-2.3. Applications industrielles

Actuellement de nombreuses sociétés fabriquent, utilisent et commercialisent des installations de séparation électrostatique dans le monde, historiquement, la firme américaine CARPCO Inc. était la première compagnie qui pratiqua avec succès le tri des mélanges PVC-Cuivre de taille supérieure à 1 mm, en utilisant la décharge couronne.

Parmi les sociétés qui traitent les matières pulvérulentes, deux d'entre elles se distinguent, la première est allemande *Hamos GmbH* qui représente de nos jours le leader mondial dans l'industrie du traitement des minéraux, avec ses séparateurs *KMS* et *EMS* pour des mélanges de taille comprise entre 100 microns à 1000 microns. La deuxième est américaine *Separation Technologies LLC*, spécialiste dans la séparation électrostatique des cendres issues des centrales électriques et de l'industries du ciment.

### I-2.3.1. Séparateurs de *Hamos GmbH* pour le traitement des minéraux

Les séparateurs KMS de *Hamos* (**Figure I-34 a**) sont capables de faire le tri des sables en utilisant les différences de conductivité des substances minérales à séparer, telles que l'ilménite, le rutile ou le zircon. Le mélange est déposé sur un tambour relié à la terre par l'intermédiaire d'une unité de dosage sur des rouleaux de séparation, ce qui leur permet d'acquérir des charges électro-statiquement. Les minéraux conducteurs perdent leur charge rapidement lors de leur contact avec le tambour mis à la terre, et sont collectés dans d'un compartiment du collecteur comme étant le produit A, tandis que les minéraux non conducteurs perdent leur charge plus lentement, et restent collés à la surface du tambour, à partir duquel ils sont récupérés dans un autre compartiment du collecteur comme étant le produit B.

Le séparateur *EMS* de *Hamos* (**Figure I-34 b**) a été conçu pour le tri d'un mélange minéral constitué de particules de quartz et de feldspath, qui doit être dépoussiéré et conditionné avant la séparation électrostatique, le conditionnement ne nécessite pas l'ajout de produits chimiques ou liquides. Le mélange minéral est chargé par des effets triboélectriques dans une unité de chargement spécialement conçue. Son passage dans un champ électrique, entraîne la séparation. Il est possible de séparer toutes sortes de mélanges plastiques différents, sans grand effort à travers des modifications mineures à l'unité de chargement et en modifiant la position de la plaque de séparation.



(a)



(b)

**Figure I-34** : Séparateurs électrostatiques de *Hamos* pour le traitement des minéraux [111];  
(a) : Séparateur électrostatique *KMS*, (b) : Séparateur électrostatique *EMS*.

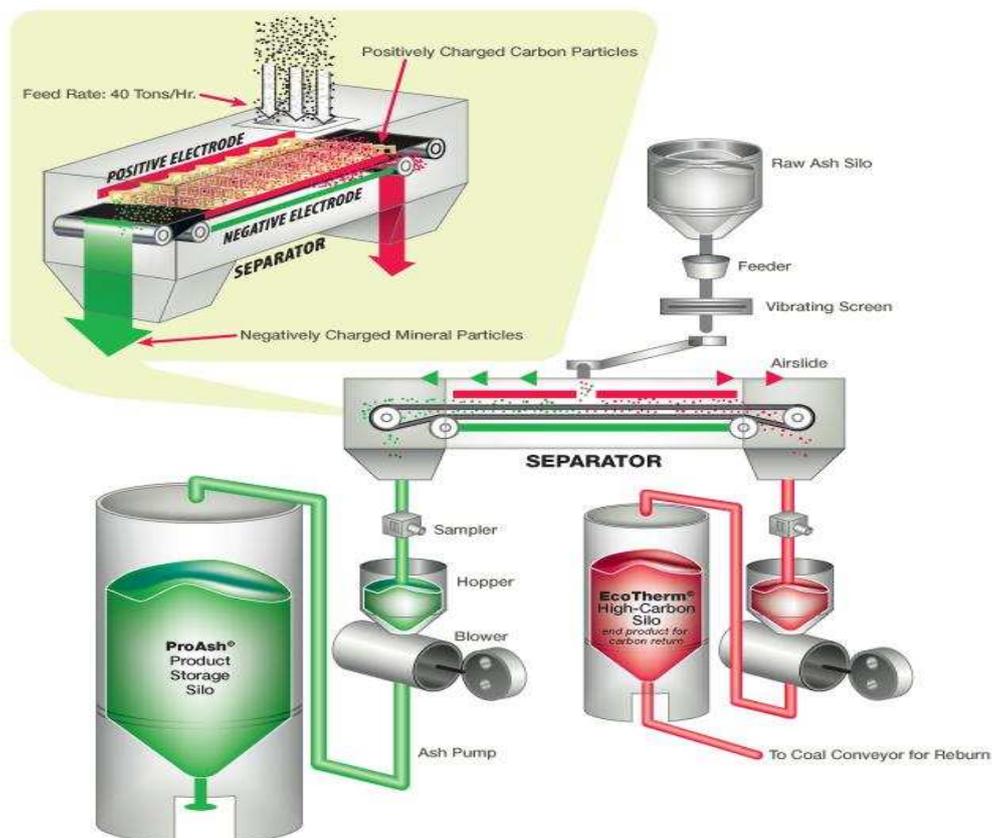
**Tableau I-2** : Avantages et inconvénients des séparateurs électrostatiques de *Hamos*.

Avantages	Inconvénients
Processus de séparation à sec	Mélange de minéraux avec une conductivité différente
Pas de produits chimiques - Fractions minérales propres	
Facilité d'utilisation	Matériau dépoussiéré (les poussières fines doivent être séparées au préalable)
Rentabilité élevée	Température maximale du matériau + 150 ° C
Faible consommation d'énergie	
Processus entièrement automatique	

### I-2.3.2. Séparateur tribo-électrostatique à deux bandes de la société

#### *Separation Technologies LLC*

Dans un séparateur de ce type, les particules préalablement chargées sont introduites dans le champ électrique vertical, créé par deux électrodes plaques [112] (**Figure I-35**). Elles s'attachent à deux bandes qui se déplacent en sens opposés et sont collectées à l'extrémité de celles-ci, par un système de type cyclone.



**Figure I-36** : Séparateur tribo-électrostatique à deux bandes de la société Separation Technologies LLC [112].

Ces installations, initialement conçues pour la séparation des cendres, sont aussi utilisées dans l'industrie minière, où elles peuvent atteindre des débits horaires très élevés : 40 t/h. Leur complexité limite actuellement l'application dans le domaine du recyclage.

Deux autres désavantages : (1) les particules doivent être préalablement chargées, (2) les particules moins chargées se retrouvent sur la bande en bas, qui va récupérer un produit de pureté moindre.

### **Conclusions**

1. Il existe une multitude d'installations électrostatiques qui traitent différents types de mélange de matériaux pulvérulents dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières.
2. La séparation électrostatique des matériaux pulvérulents peut être effectuée, en associant un ou deux mécanismes de charge différents. L'effet tribo-électrique apporte d'irremplaçables avantages pour la séparation des mélanges de matériaux non-conducteurs. Pour des mélanges de matériaux conducteur - non-conducteur la séparation électrostatique nécessite l'utilisation de l'induction électrostatique et /ou de la décharge couronne. Ce qui justifie l'orientation de la thèse à concevoir et à réaliser une nouvelle installation multifonctions.
3. Les études réalisées sur des modèles de laboratoires montrent l'efficacité des lits fluidisés à charger des matériaux isolants par effet tribo-électrique, d'où l'intérêt à concevoir et réaliser une seconde installation à lit fluidisé.

# Chapitre II

## MATERIAUX ET METHODES

Les recherches sur la séparation électrostatique des matériaux pulvérulents ont été réalisées sur plusieurs types de produits : des mélanges de conducteurs et isolants issus des déchets d'équipement électrique et électronique (DEEE), traités par les sociétés APR2 et Goodfellow, ainsi que des matières végétales fournies par l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) de Montpellier. Les caractéristiques des matériaux ayant fait l'objet de l'étude sont présentées dans le § II-1.

Dans le but de démontrer la faisabilité de la séparation électrostatique de ces matériaux, deux installations électrostatiques ont été conçues par l'institut PPRIME, et réalisées par la société CITF. Ces installations, décrites dans § II-2, permettent notamment d'étudier les phénomènes de charge des matériaux pulvérulents par effet triboélectrique, par induction électrostatique et par décharge couronne, en vue de leur séparation dans un champ électrique intense.

Les différentes techniques de mesure utilisées, ainsi que la méthode des plans d'expérience qui a permis la modélisation de certains des processus de charge ou de séparation électrostatique, sont exposées dans le § II-3.

## II-1. Caractérisation des matériaux

Les expériences de séparation électrostatique ont été réalisées sur plusieurs mélanges de matériaux pulvérulents conducteur/isolant et isolant/isolant, issus essentiellement du broyage de DEEE (§ II-1.1), et de certaines matériaux végétaux (§ II-1.2).

### II-1.1. Matériaux issus des DEEE

La première série d'expérience a été effectuée sur quatre types de mélanges pulvérulents couramment rencontrés dans le domaine du recyclage des DEEE : Aluminium/Acrylonitrile-Butadiène-Styrène, Aluminium/Polystyrène, Acrylonitrile Butadiène Styrene/Polycarbonate, et Acrylonitrile-Butadiène-Styrène/Polystyrène.

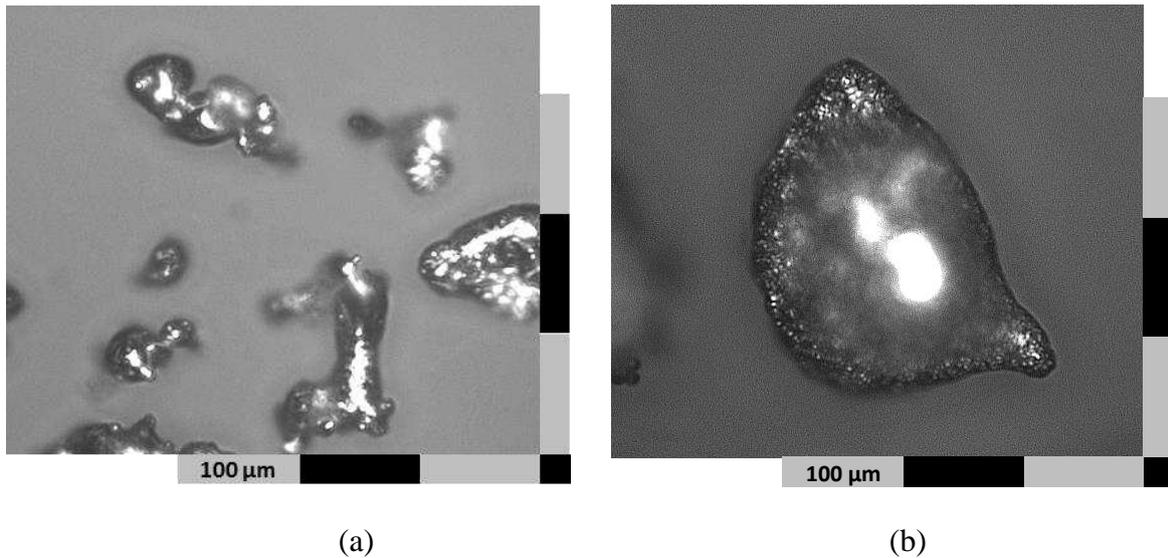
#### II-1.1.1. Aluminium

L'aluminium est un métal très léger dont la masse volumique est de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , soit environ un tiers de celle de l'acier ou du cuivre, ce qui explique son emploi privilégié dans les applications de transport d'électricité à haute tension sur une grande distance (**Tableau II-1**). Il est recyclable à 100% sans dégradation de ses propriétés et nécessite que 5% de l'énergie nécessaire à la production primaire d'aluminium. Aujourd'hui, près de 47 % de l'aluminium consommé en France est issu du recyclage.

Dans le cadre de l'étude de la séparation électrostatique des mélanges de particules conducteur/isolant, le conducteur utilisé a été fourni par la société Goodfellow. Le produit avait une pureté de 99,5%, et une calibration homogène, les tailles des particules étant comprises entre  $60 \mu\text{m}$  et  $250 \mu\text{m}$  (**Figure II-1**).

**Tableau II-1** : Carte d'identité de l'aluminium.

Carte d'identité de l'aluminium	
Résistivité à 20 °C	$2,67 \cdot 10^{-8} \text{ [ } \Omega \cdot \text{m]}$
Température critique de super conductivité	1,175 [ K ]
Masse volumique à 20 °C	$2,7 \cdot 10^3 \text{ [ kg / m}^3 \text{ ]}$
Conductivité thermique à 0-100 °C	237 [ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ]

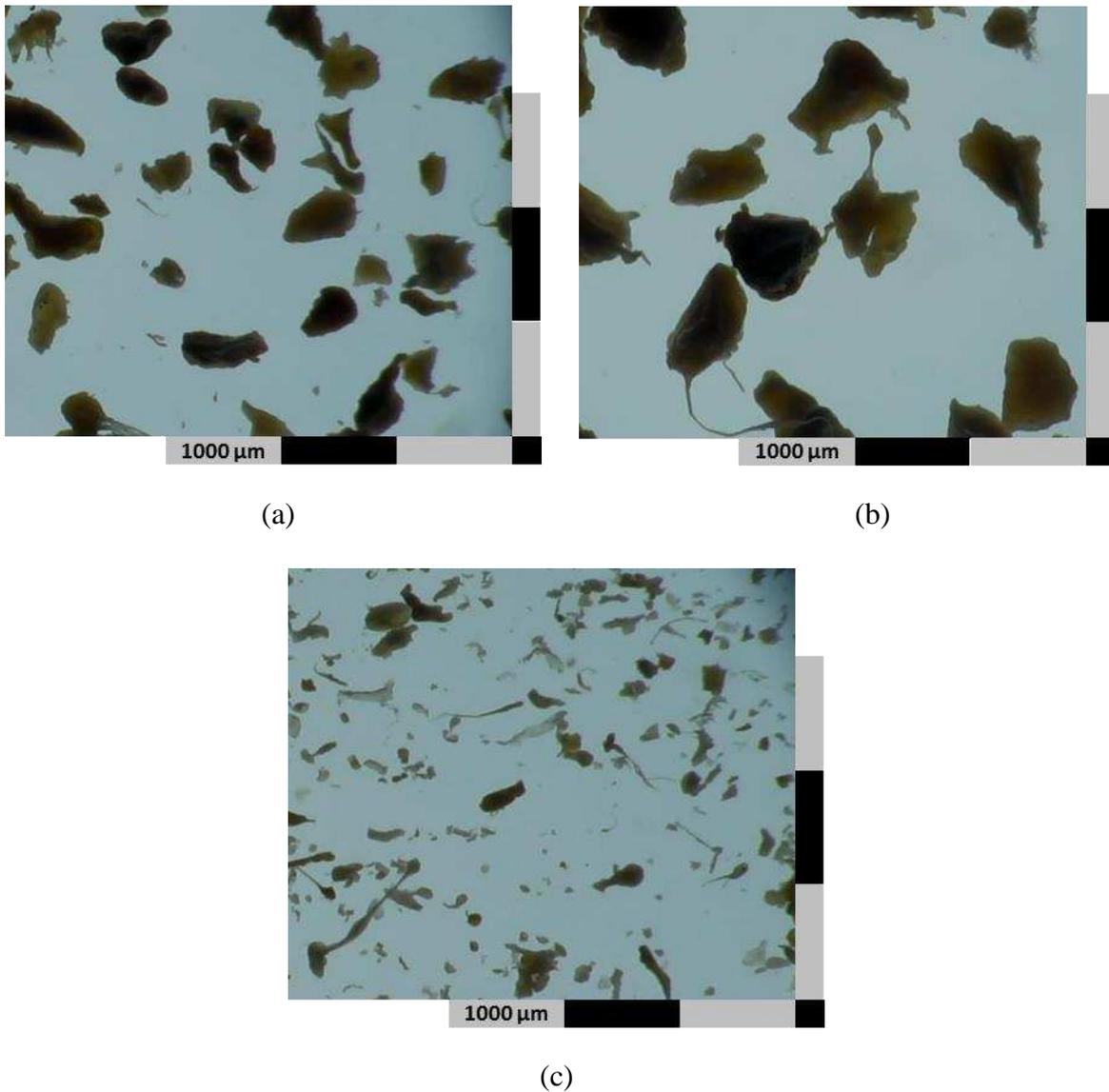


**Figure II-1** : Micrographies des particules d'Aluminium ; (a) Tailles comprises entre 63  $\mu\text{m}$  et 125  $\mu\text{m}$  ; (b) Tailles comprises entre 125  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$ .

### II-1.1.2. Acrylonitrile-Butadiène-Styrène, Polystyrène et Polycarbonate

L'Acrylonitrile-Butadiène-Styrène (ABS), le Polystyrène (PS) et le Polycarbonate (PC) utilisés dans les travaux de recherches sont des matériaux isolants issus du broyage des DEEE, sur les lignes de production de la société APR2, Bonnières-sur-Seine, France. L'orientation vers ces trois polymères vient du fait de leur proportion dans les déchets plastiques, excédant les 44% selon des statistiques récentes [113]. Leur large utilisation est due à des excellentes caractéristiques mécaniques (robustesse, dureté, légèreté) et esthétiques (**Tableau II-2**).

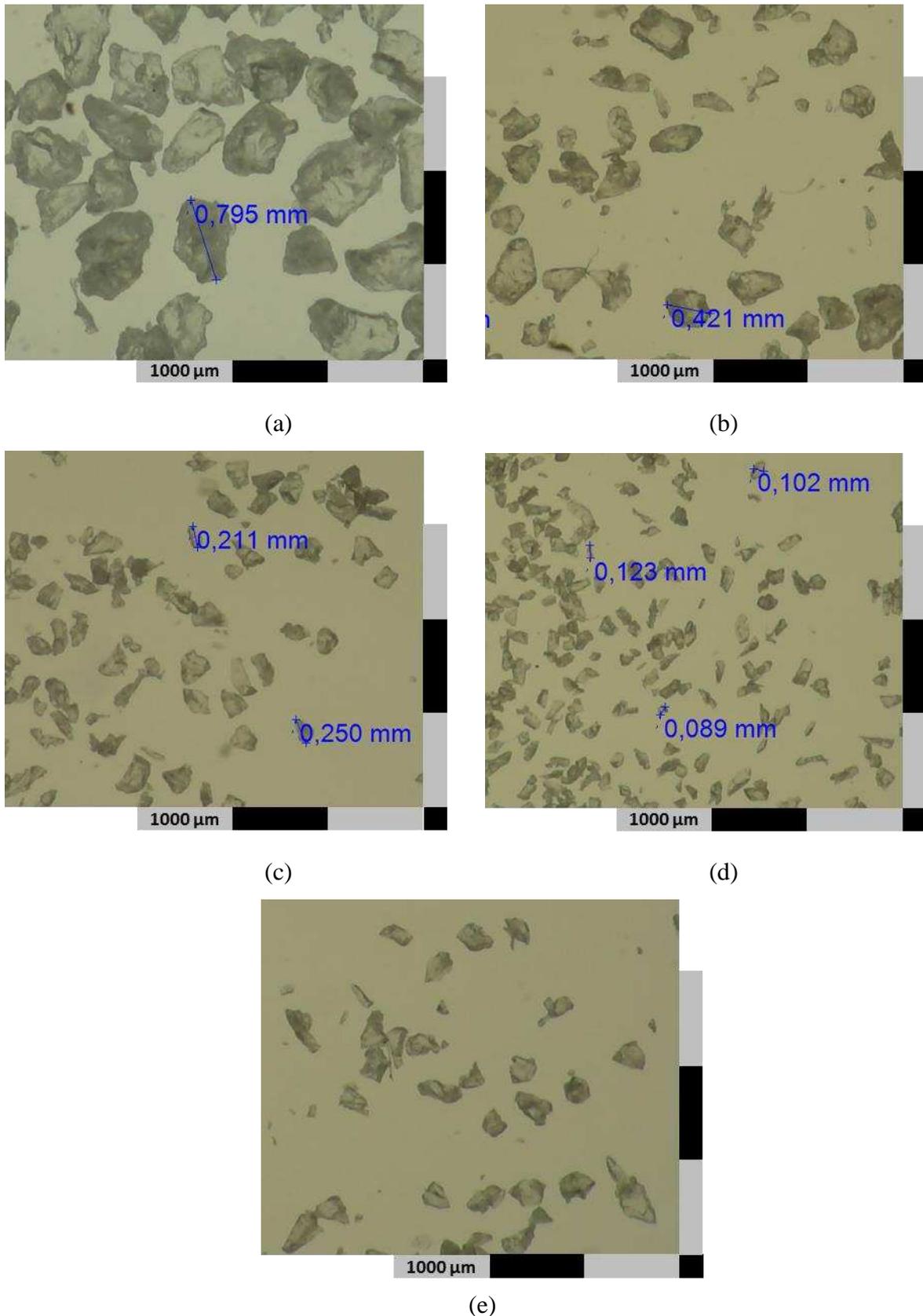
L'ABS est généralement utilisé dans la fabrication d'instruments de musique, de composants automobiles, notamment de pare-chocs, de boîtiers pour les assemblages électriques et électroniques, de bagages et d'étuis de protection. Le PS se trouve dans les appareils ménagers, les jouets et les composants électriques et informatiques, en raison de sa bonne résistance aux chocs, à basse température, tandis que le PC est utilisé dans la fabrication de certains composants extérieurs des automobiles. La taille et l'aspect des particules d'ABS, de PS et de PC faisant l'objet de l'étude peuvent être examinées respectivement sur les **Figures II-2 et II-3**).



**Figure II-2** : Micrographies des particules de l'ABS ; (a) Tailles comprises entre 500  $\mu\text{m}$  et 1000  $\mu\text{m}$  ; (b) Tailles comprises entre 250  $\mu\text{m}$  et 500  $\mu\text{m}$  ; (c) Tailles comprises entre 125  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$ .

**Tableau II-2** : Propriétés physiques de l'ABS, du PS et du PC.

	ABS	PS	PC
Température de service [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-20 à 80	-40 à 75	-40 à 75
Masse volumique [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1060 - 1080	1040 - 1050	1200 - 1220
Résistivité [ $\Omega\cdot\text{m}$ ]	$10^{15}$ à $2.7^{20}$	$10^{17}$	$10^{15}$
Rigidité diélectrique [ $\text{kV}/\text{mm}$ ]	14 à 20	40 à 100	15 à 67
L'absorption d'eau [ % ]	0,2 à 0,45	0,05 à 0,6	0,16 à 0,35



**Figure II-3** : Micrographies des particules de PS et de PC ; (a) Tailles de PS comprises entre 500 μm et 1000 μm ; (b) Tailles de PS comprises entre 250 μm et 500 μm ; (c) et (e) Tailles de PS et PC comprises entre 125 μm et 250 μm ; (d) Tailles de PS comprises entre 63 μm et 125 μm.

## II-1.2. Matériaux végétaux

La seconde série d'expériences a été réalisée sur cinq matériaux végétaux fournis par l'INRA de Montpellier : du liège, de la semoule de blé (SDB), des copeaux de bois de pin (CDB) de classes granulométriques différentes, ainsi que des particules de ciment et de paille.

### II-1.2.1. Copeaux de bois de pin, semoule de blé et liège

Un protocole de préparation des trois classes granulométriques pour chaque poudre des CDB, de SDB, et de Liège (**Figures II-4, II-5, II-6**) a été élaboré par les des équipes de recherches de l'INRA de Montpellier, afin d'étudier l'influence de la taille des particules lors d'un processus de séparation (**Tableau II-3**).

**Tableau II-3** : Différentes classes granulométriques pour le liège, les copeaux de bois de pin, et la semoule de blé.

	N° de la classe granulométrique	Taille X [ $\mu\text{m}$ ]	Masse volumique [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]
Liège	1	1400<X<2000	0,33
	2	560<X<900	
	3	315<X<450	
Copeaux de bois de pin	1	560<X<900	1,7
	2	315<X<450	
	3	100<X<200	
Semoule de blé	1	315<X<450	1,5
	2	200<X<315	
	3	100<X<200	

Les trois classes granulométriques de CDB ont été obtenues selon le protocole suivant :

- Un tasseau de pin non traité et sans nœud, acheté dans le commerce, a été passé par une raboteuse électrique avec des ouvertures de couteau de 2 mm, 1,2 mm, 1 mm et 0,2 mm.

- Les CDB obtenues après la première opération ont été tamisés deux fois, pendant cinq à dix minutes, sur une colonne de tamis vibrants aux diamètres de pores : 0,9 mm, 0,56 mm, 0,45 mm, 0,315 mm, 0,2 mm et 0,1 mm.

- Les fractions retenues par le premier tamis ( $\varnothing = 0,9$  mm) ont ensuite été émincées dans un broyeur à couteaux avec une grille de diamètre de pores de 2 mm. Ce broyeur est souvent utilisé pour les broyages « grossiers ». Les broyats du broyeur à couteaux ont ensuite été tamisés selon les mêmes conditions de tamisage que précédemment.

- Afin de compléter les fractions de poudres de bois désirées pour les essais, les fractions non souhaitées ont été affinées au broyeur centrifuge avec des grilles de diamètre de pores de 1 mm, 0,5 mm et 0,25 mm ; puis tamisées. Trois vitesses de broyage ont été utilisées en fonction de la finesse des poudres souhaitées. Plus la vitesse de broyage est importante et plus les diamètres des particules fines dans le broyat s'éloignent des diamètres initiaux.

- Enfin les trois classes granulométriques obtenus sont stockées dans des piluliers.

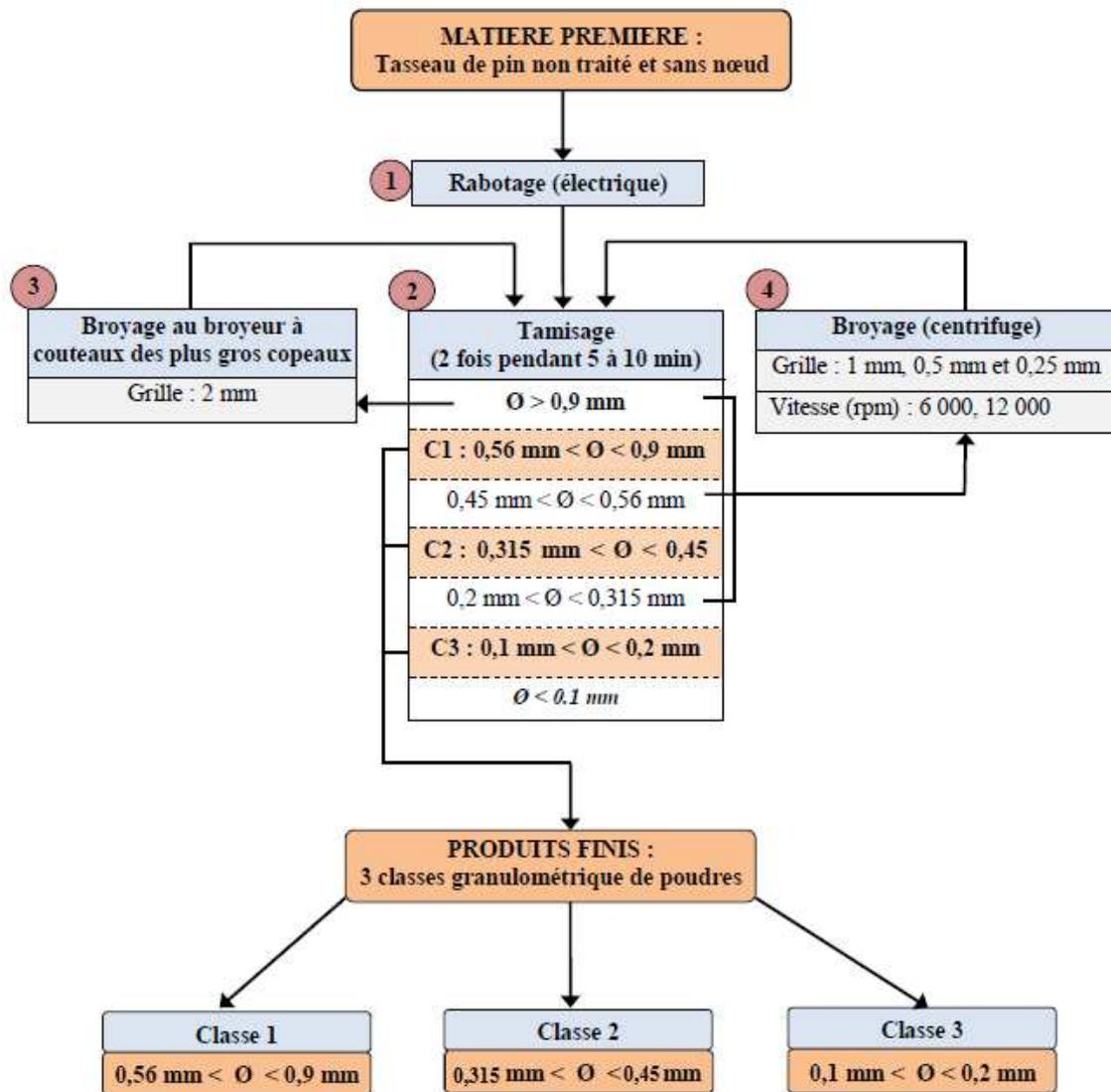
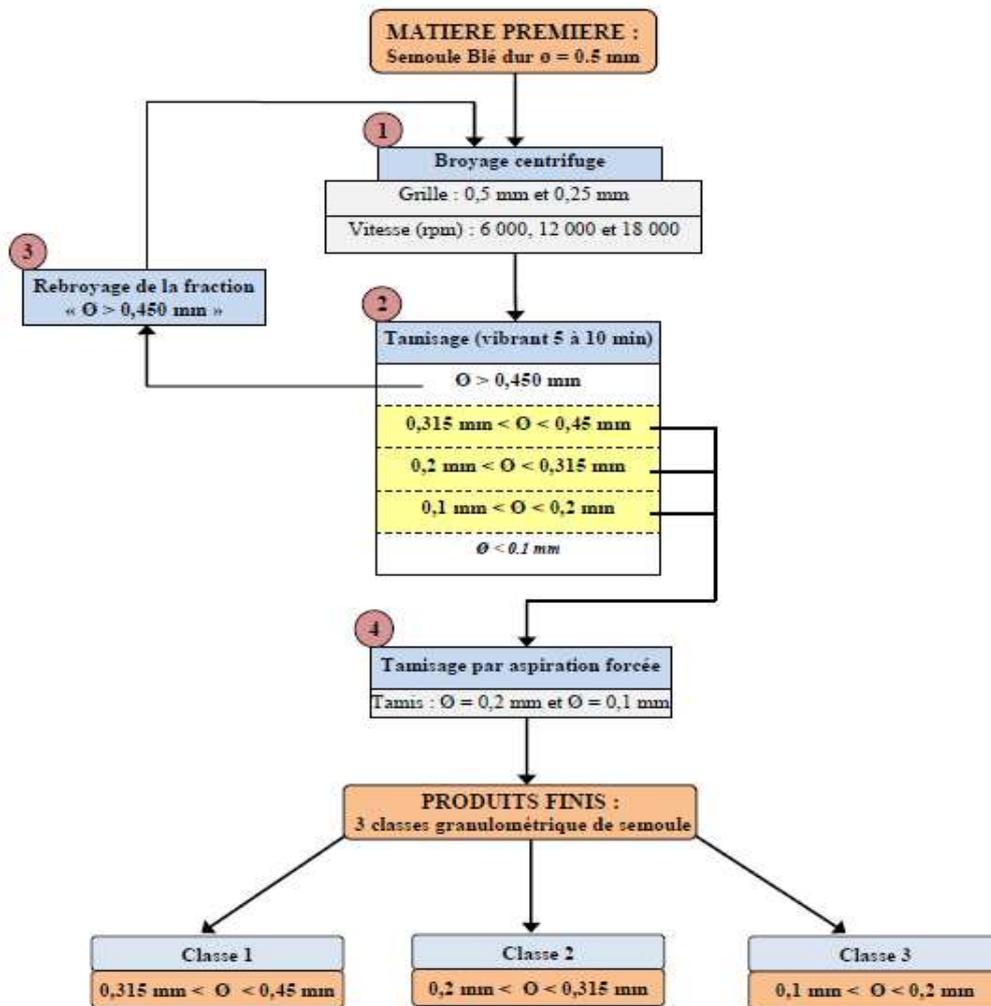


Figure II-4 : Schéma du protocole de préparation des échantillons de CDB [114].

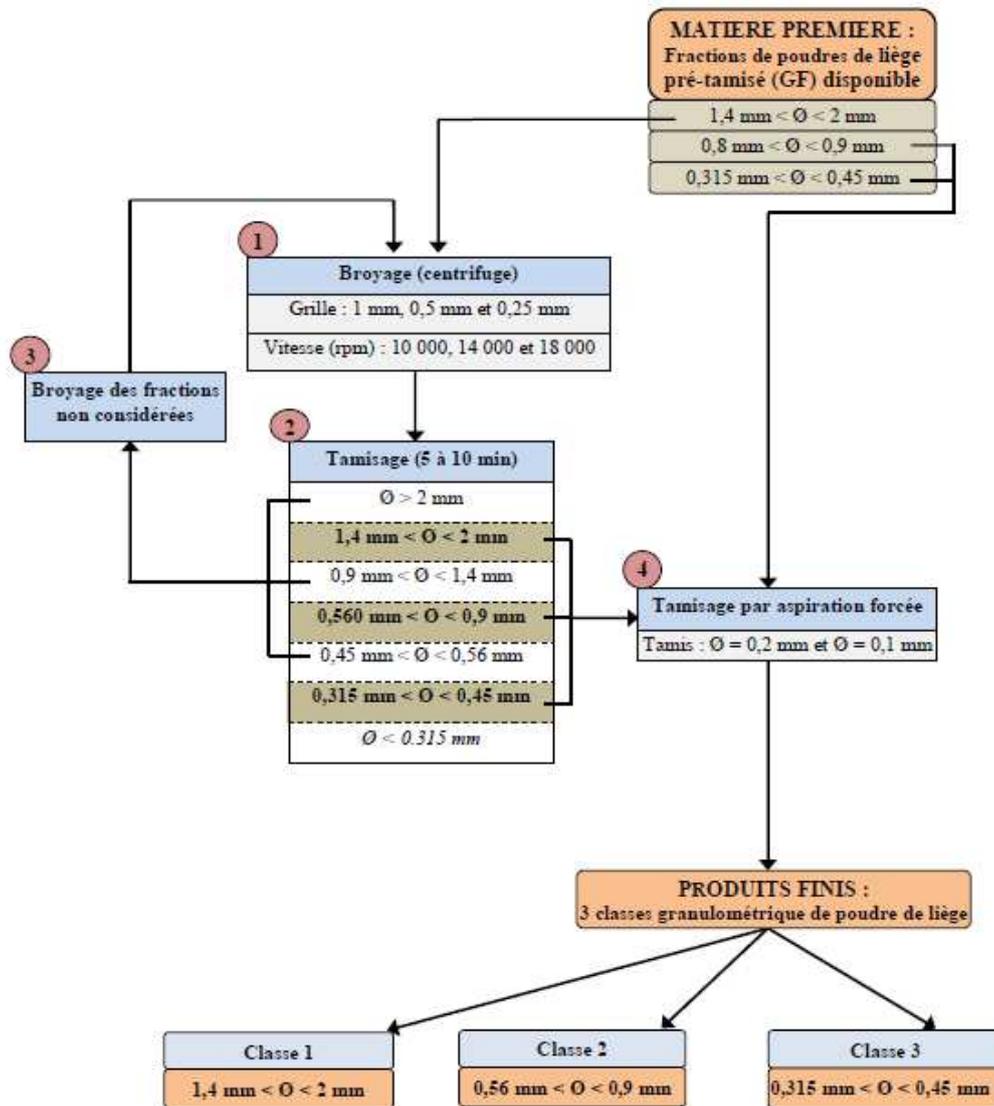
Afin de vérifier l'efficacité des opérations de préparation des échantillons et caractériser la structure des particules, les particules ont été analysées par granulométrie laser dans un dispersant alcoolique (éthanol). Cette analyse fait appel à une hypothèse de sphéricité des particules et représente les résultats sous forme de courbes de distributions granulométriques.



**Figure II-5** : Schéma du protocole de préparation des échantillons de SDB [114].

Les données principales fournies par ces analyses sont :

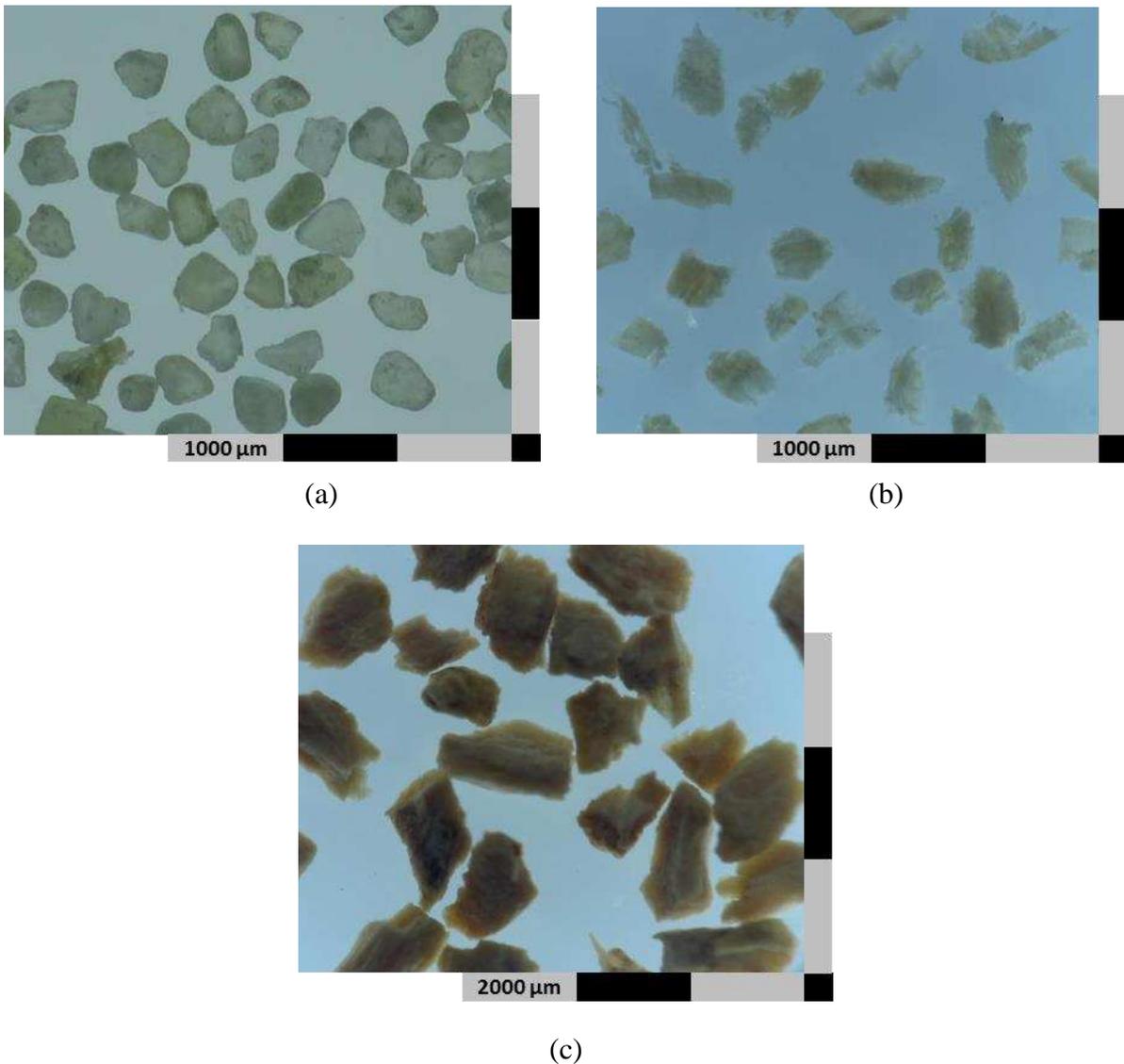
- $d(v, 0,1)$ , la taille de particule pour laquelle 10 % de l'échantillon en volume se trouve en dessous de cette dimension.
- $d(v, 0,5)$ , le diamètre médian (50 % des particules ont une taille inférieure à cette valeur).
- $d(v, 0,9)$ , la taille de particule pour laquelle 90 % de l'échantillon en volume se trouve en dessous de cette dimension.



**Figure II-6** : Schéma du protocole de préparation des échantillons de liège [114].

La poly-dispersité est la mesure de l'étalement de la distribution granulométrique et se calcule de la façon suivante :  $\frac{d(v,0,1)-d(v,0,9)}{d(v,0,5)}$ . Le dispositif permet de déterminer aussi la surface spécifique, exprimée en m<sup>2</sup>/g.

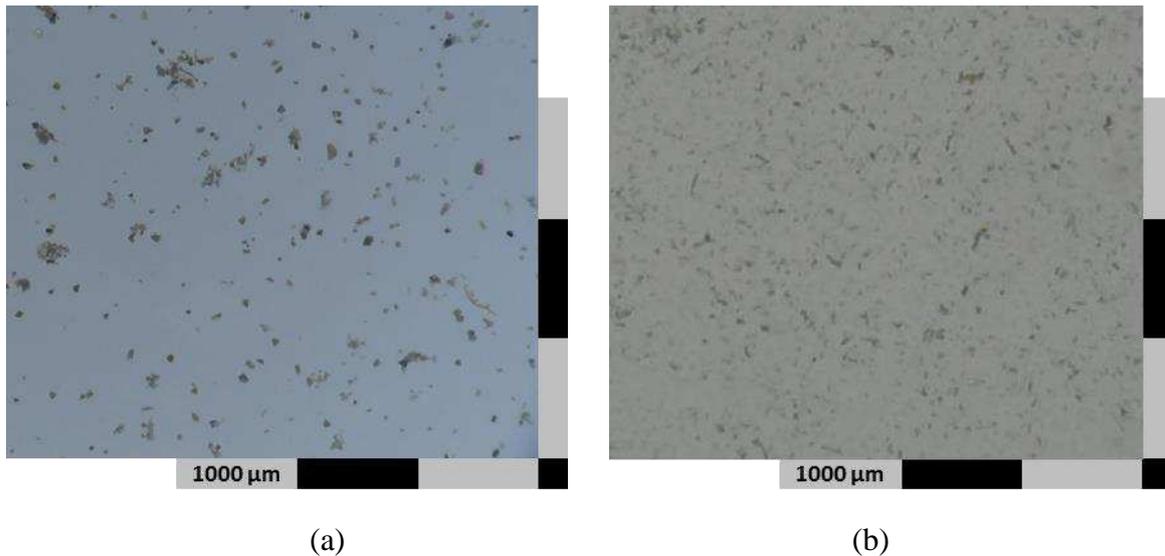
La **Figure II-7** représente des micrographies de particules de semoule de blé (a), des copeaux de bois de pin (b) et de liège (c) de la première classe granulométrique, les tailles des particules de liège se situent dans l'intervalle 450 – 2000 µm, tandis que celles des copeaux de bois de pin sont comprises entre 100 et 900 µm. La semoule de blé est caractérisée par une distribution plus serrée, entre 100 et 450 µm. Par ailleurs, les copeaux de bois ont une forme allongée, tandis que la semoule est plutôt sphérique.



**Figure II-7** : Micrographies des particules de la première classe granulométrique ; (a) Particules de semoule de blé ; (b) Particules de copeaux de bois de pin ; (c) Particules de liège.

### II-1.2.2. Ciment et Paille

D'autres essais ont été réalisés sur des échantillons de particules de Paille et de Ciment (**Figure II-8**), d'une teneur totale en matière minérale voisine de 52%, fournis par l'INRA de Montpellier. Le diamètre moyen des particules de Ciment est de 21 µm et leur teneur en minéraux est d'environ 99 %. Celui des particules de Paille est de 20 µm, et leur teneur en minéraux est d'environ 6 %.



**Figure II-8** : Micrographies des particules de Ciment et de Paille ; (a) Particules de Ciment de tailles moyennes 21  $\mu\text{m}$  ; (b) Particules de Paille de tailles moyennes 20  $\mu\text{m}$ .

## II-2. Installations de séparation électrostatique pour matériaux pulvérulents

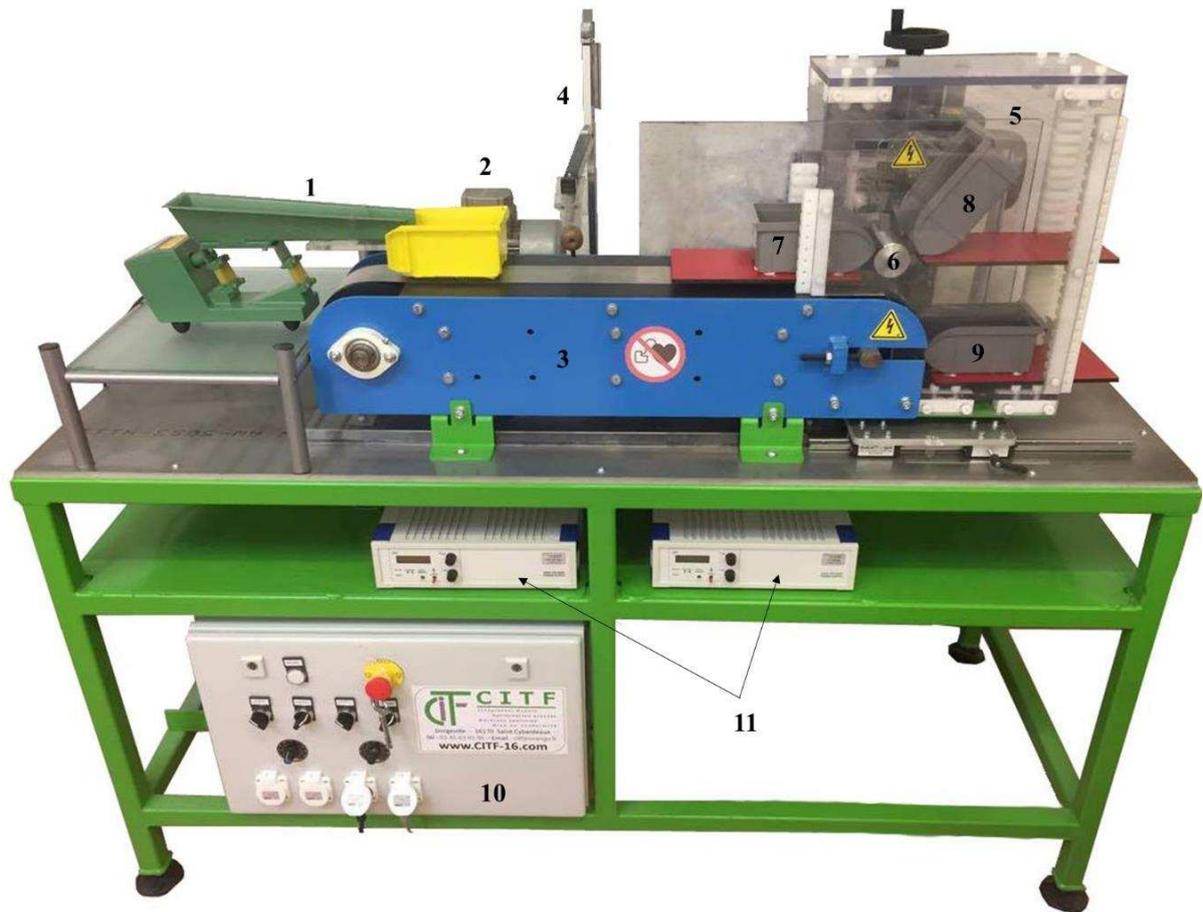
Plusieurs études ont été menées par des chercheurs afin d'analyser les diverses possibilités d'utilisation des forces du champ électrique pour la séparation électrostatique de mélanges de matériaux pulvérulents. Les recherches ont porté sur des matières provenant de l'industrie agroalimentaire, notamment sur les divers constituants des grains de blé [115], mais aussi sur des produits issus du recyclage des DEEE (des mélanges de particules isolantes, comme le PVC gris et le PVC blanc) [116].

En s'appuyant sur ces études, deux installations de séparation électrostatique ont été conçues par l'Institut PPRIME de Poitiers et réalisées par la société CITF, Saint Cybardeaux, France. La première installation est un séparateur électrostatique multifonctions à convoyeur métallique utilisant plusieurs mécanismes physiques pour la charge des particules (§ II-2.1), tandis que la deuxième installation est un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux disques métalliques utilisant l'effet tribo-électrique pour la charge des particules (§ II-2.2).

### II-2.1. Séparateur électrostatique à électrode-convoyeur multifonctions

La première installation est un séparateur multifonctions capable de faire le tri de matériaux granulaires ou micronisés grâce à l'utilisation de trois mécanismes physiques différents pour la charge des particules (**Figure II-9**) :

- (1) l'effet tribo-électrique [117-119].
- (2) la décharge couronne [120] de polarité positive ou négative.

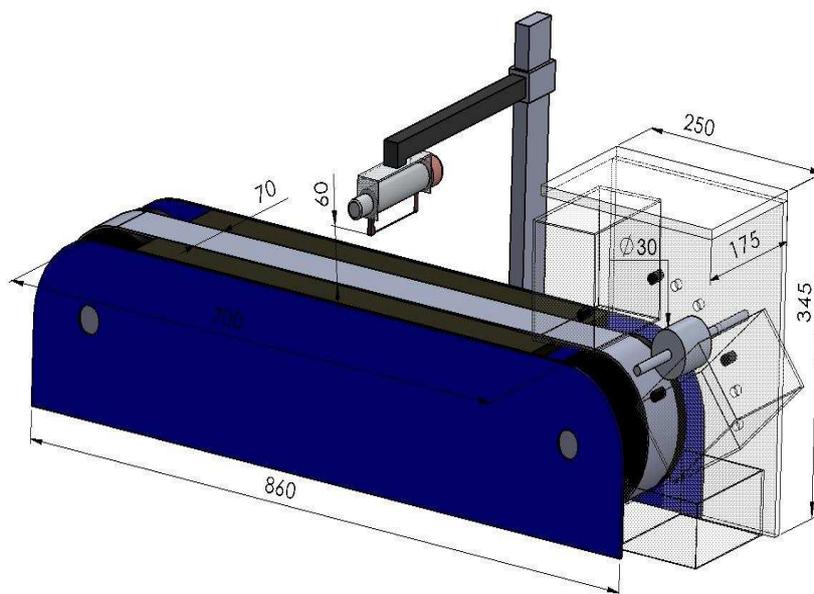


**Figure II-9** : Séparateur électrostatique à électrode-convoyeur multifonctions [121], [122] ;  
 1 : Goulotte oscillante ; 2 : Moteur électrique entraînant le convoyeur métallique ; 3 :  
 Convoyeur métallique ; 4 : Electrode couronne ; 5 : Moteur électrique entraînant l'électrode  
 cylindrique ; 6 : Electrode cylindrique tournante ; 7 : Boite 1 ; 8 : Boite 2 ; 9 : Boite 3, 10 :  
 Armoire électrique ; 11 : Alimentations en haute tension continue.

### (3) l'induction électrostatique [24].

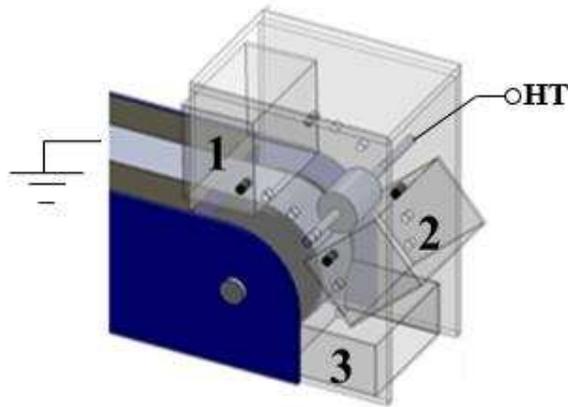
Ce dispositif est destiné aux études de faisabilité de la séparation électrostatique des matériaux pulvérulents. Des mélanges constitués de fines particules sont déposées sous forme d'une monocouche sur la surface d'un convoyeur à bande métallique, long de 700 mm et large de 70 mm, qui joue aussi le rôle d'une électrode liée à la terre. Le convoyeur est entraîné par un moteur électrique triphasé de 120 W, commandé par un variateur de vitesse. Le dépôt des particules se fait à l'aide d'une goulotte oscillante (modèle APB 4/30, VIBRA France) à unité de contrôle dédiée et a été doté d'un dispositif de dispersion des particules, de construction originale.

Diverses possibilités sont offertes à ce séparateur pour charger les particules. Le choix du dispositif de charge dépendra essentiellement des propriétés électriques des matériaux à séparer (**Tableau II-4**). La distinction entre ces matériaux sera faite par rapport à leur conductivité qui définit leur aptitude à garder la charge acquise par effet tribo-électrique, par décharge couronne ou encore par induction électrostatique. Pour chaque option, un dispositif viendra se greffer au séparateur. Ainsi, il pourrait être équipé d'une ou plusieurs des dispositifs suivants : (1) un dispositif de charge par effet tribo-électrique (lit fluidisé, canon à l'air comprimé ou goulotte oscillante), (2) une électrode couronne unique à fil métallique fin (diamètre : 0,2 mm), longue de 130 mm (**Figure II-10**), (3) une électrode cylindrique tournante en acier d'un diamètre de 30 mm, et d'une largeur de 70 mm, entraînée par un moteur électrique doté d'un variateur électronique de vitesse. Les électrodes sont connectées à des alimentations de haute tension continue réversibles (de polarité positive ou négative) en fonction des besoins spécifiques de chaque application.



**Figure II-10** : Schéma descriptif du séparateur électrostatique multifonctions à convoyeur métallique.

L'électrode cylindrique tournante crée une zone de champ électrique intense à travers laquelle transitent les particules déposées à la surface du convoyeur. En fonction de la polarité et du montant de la charge électrique portée par chaque particule, certaines d'entre elles les plus conductrices sont attirées vers l'électrode tournante, fixées sur sa surface, tandis que quelques-unes d'entre elles rebondissent après leur contact avec l'électrode tournante, et sont récupérées ensuite dans des compartiments des collecteurs n°1 et n°2 comme étant le produit A (**Figure II-11**). Les autres particules non conductrices finissent leur parcours sur le convoyeur et sont collectées dans le collecteur n° 3 comme étant le produit B.



**Figure II-11** : Schéma descriptif du système de collecte des particules ; 1 et 2 : Boîtes destinées à la collecte des particules conductrices ; 3 : Boîte destinée à la collecte des particules isolantes.

Ce séparateur électrostatique se présente sous plusieurs configurations de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ , selon l'angle  $\alpha$  entre la verticale et le plan défini par les axes de l'électrode tournante et du tambour du convoyeur. La distance entre l'électrode cylindrique et le convoyeur métallique est variable entre 10 et 50 mm. L'électrode cylindrique peut changer de sens de rotation.

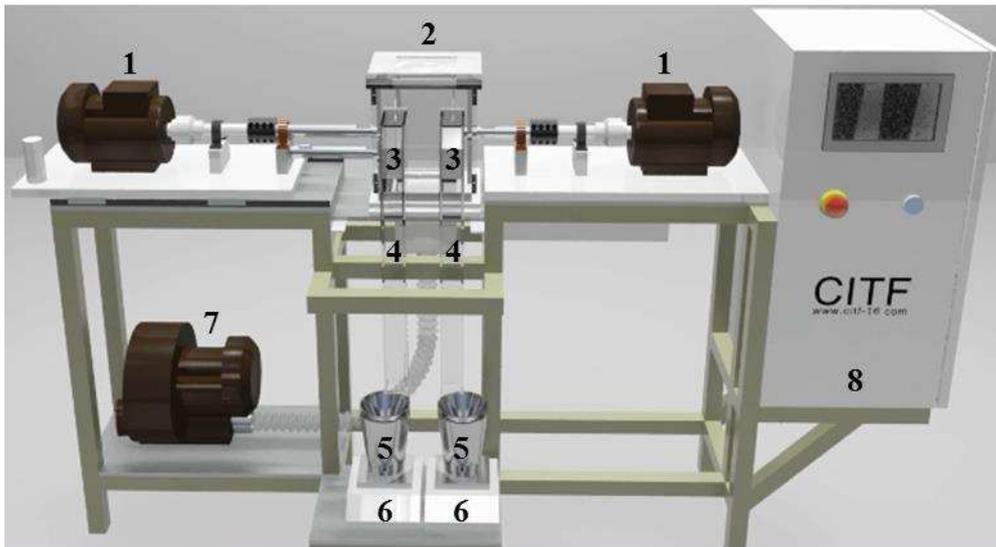
**Tableau II-4** : Différents mécanismes de charge en fonction du type de mélange.

Type de mélange	Mécanisme de chargement
Isolant/Isolant	Effet tribo-électrique
Isolant/Isolant avec une conductivité relativement faible.	Effet tribo-électrique ou décharge couronne
Isolant/Isolant avec une conductivité relativement élevée.	Induction électrostatique
Isolant/Conducteur	Décharge couronne et induction électrostatique
Conducteur/Conducteur	Induction électrostatique

### II-2.2. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux disques métalliques

La deuxième installation de séparation électrostatique conçue, réalisée et puis utilisée pour ce travail est présentée sur la **Figure II-12 a et II-12 b**, elle est destinée premièrement au traitement des mélanges de matériaux isolants de tailles millimétriques et sous-millimétriques.

Une quantité de 750 g de matériaux pulvérulent est introduit dans un lit fluidisé généré dans une chambre de séparation de dimensions  $160 \times 160 \times 240 \text{ mm}^3$ , dont les parois sont en PMMA transparent. L'injection de l'air est assurée par une soufflante de 1,5 kW / 4000 tr.min<sup>1</sup> /  $166 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  contrôlée par un variateur de vitesse imposant une rotation comprise entre 1000 tr/min et 4000 tr/min.

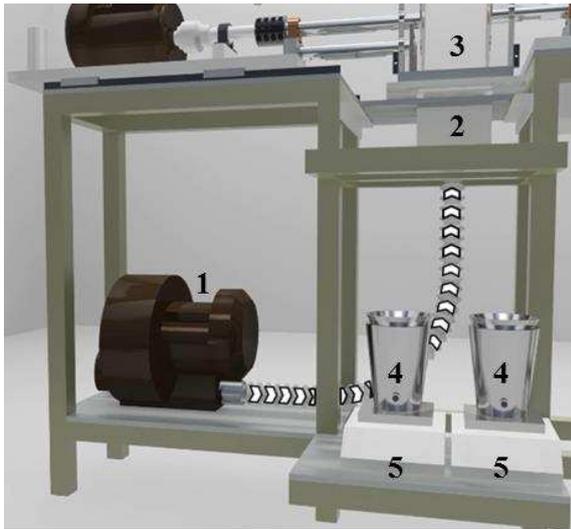


(a)



(b)

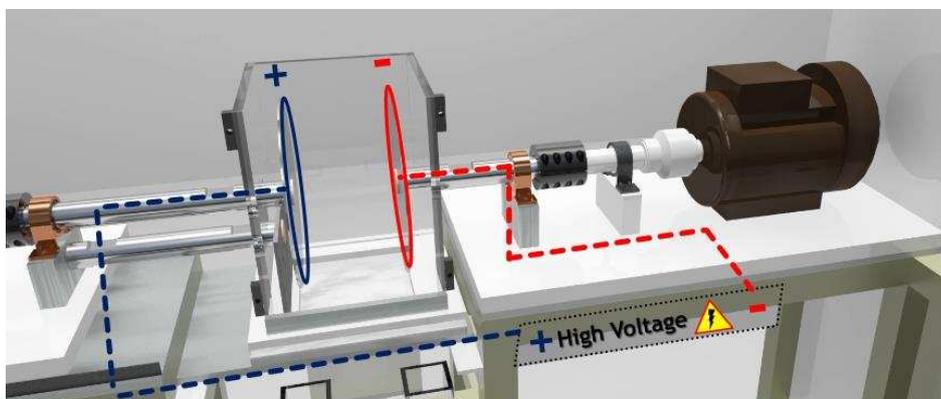
**Figure II-12** : Schéma descriptif (a) et photographie (b) du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux disques métalliques [123] ; 1 : Moteurs électriques, 2 : Chambre de séparation ; 3 : Electrodes-disques métalliques tournants ; 4 : Collecteurs ; 5 : Cages de Faraday ; 6 : Balances électroniques ; 7 : Soufflante ; 8 : Armoire électrique.



**Figure II-13** : Représentation schématique du système d'injection d'air ; 1 : Soufflante ; 2 : Lit fluidisé ; 3 : Chambre de séparation ; 4 : Cages Faraday ; 5 : Balances électroniques.

Le lit fluidisé à une hauteur de 10 cm à partir de la plaque poreuse ou une grille qui distribue uniformément l'air (**Figure II-13**). Les effets électrostatiques dans le lit fluidisé sont dus à des collisions entre les particules elles-mêmes et entre les particules et les parois de la chambre de séparation. Il en résulte la tribo-électrification des matériaux pulvérulents [60], [61].

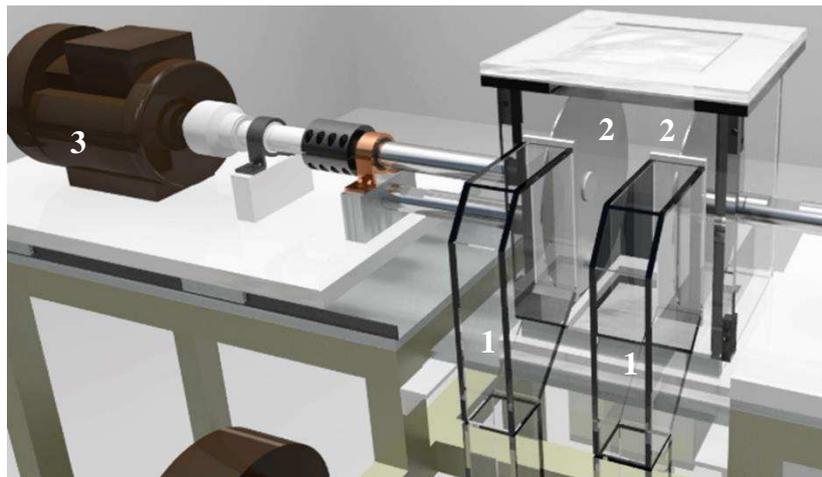
Le champ électrique est généré entre deux disques tournants en acier inoxydable de diamètre 220 mm et épaisseur 2 mm, plongés dans le lit fluidisé situés l'un et l'autre à une distance variable comprise entre 40 mm et 120 mm (**Figure II-14**). Entraînés en rotation par deux moteurs électriques dont la vitesse est contrôlée par un variateur de vitesse électronique. Cette vitesse peut varier continument de 25 tr/min à 70 tr/min. La rigidité des arbres porteurs des disques a été calculée pour ne pas engendrer une flexion en bout d'arbre susceptible de modifier le parallélisme entre les plans des disques pendant le fonctionnement.



**Figure II-14** : Représentation schématique des électrodes-disques tournantes alimentés en haute tension.

L'alimentation en haute tension des disques se fait à partir de deux générateurs de polarités opposées de la marque SPELLMAN de 30 kV / 15 W / 0.5 mA. Les tensions appliquées peuvent varier de 0 V à 30 kV. Les paliers de guidage des arbres sont utilisés pour alimenter les disques en haute tension. Notons qu'une des originalités de ce dispositif est la simultanéité de la charge tribo-électrique et de la séparation.

Les produits séparés sont récupérés dans deux boîtes collectrices placées à l'extérieur de la chambre de séparation (**Figure II-15**). La récupération des particules sur les électrodes est assurée par des racleurs qui viennent lécher les particules sur les surfaces des disques. Les particules séparées sont ainsi collectées dans les boîtes dont les bas sont constitués de cages de Faraday. Ainsi, les charges électriques acquises par les particules sont mesurées au fur et à mesure de la séparation par des électromètres KEITHLEY, modèle 6514 connectés aux cages de Faraday. Ces boîtes reposent sur des balances électroniques d'une résolution de 0.1 g mesurant les masses des particules séparées.



**Figure II-15** : Représentation schématique des collecteurs ; 1 : Collecteurs ; 2 : Electrodes-disques métalliques ; 3 : Moteur électrique.

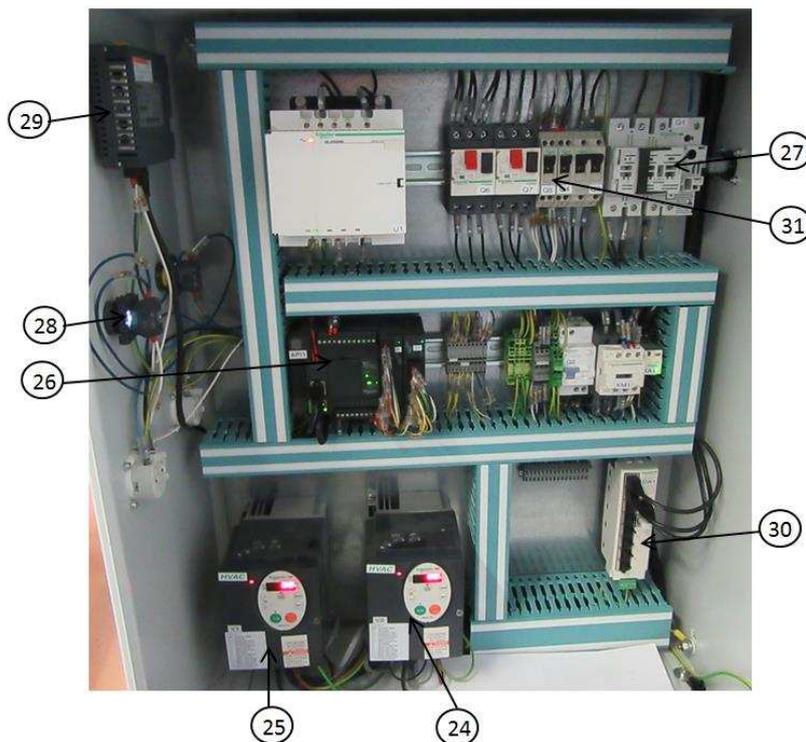
Ce séparateur est équipé d'un panneau de commande (**Figure II-16 a**) permettant la saisie et la lecture directe ou en acquisition instantanée de l'ensemble des données de fonctionnement :

- Hautes tensions appliquées aux deux disques électrodes.
- Vitesses de rotations des deux disques électrodes.
- Vitesse de rotation de la soufflante d'air.
- Débit d'air arrivant à la chambre de séparation.

Ce panneau est intégré à une armoire de commande (**Figure II-16 b**) réalisée selon les normes de sécurité en vigueur.



(a)



(b)

**Figure II-16** : Panneau (a) et armoire (b) de commande de l'installation ;  
 24 : Variateur de la soufflante, 25 : Variateurs de vitesse des moteurs d'entraînement des disques, 26 : Automate programmable, 27 : Portes fusibles, 28 : Disjoncteur général et bouton coup-de-poing à verrouillage (bouton d'arrêt d'urgence), 29 : Panneau de commande pour saisir et lire l'ensemble des données de fonctionnement, 30 : Variateurs des alimentations haute tension, 31 : Alimentations électriques de l'ensemble des composants.

### II-3. Techniques de mesure et procédures expérimentales

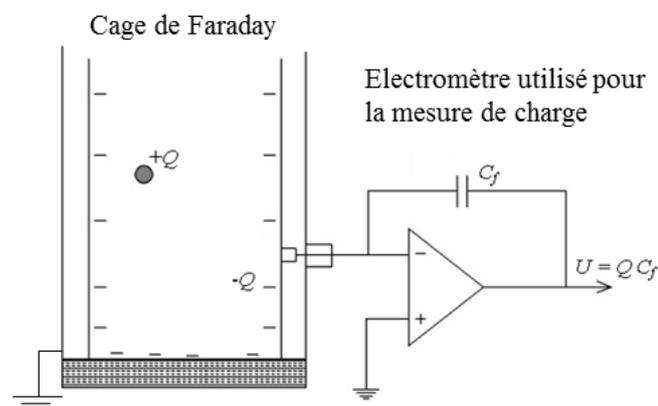
L'évaluation des performances des procédés de séparation électrostatique est rendue possible par la mise en œuvre de systèmes de mesure complexes, permettant l'enregistrement, en continu et en simultané, des charges et des masses des produits séparés (§ II-3.1), le monitoring du potentiel électrique de surface (§ II-3.2), en faisant appel à l'instrumentation virtuelle, ainsi que l'analyse « off-line » de la pureté des produits (§ II-3.3). La modélisation et l'optimisation des divers procédés sont rendues possibles par la méthodologie des plans d'expérience, brièvement présentée dans le § II-3.4.

#### II.3.1. Mesure des charges et des masses des produits séparés

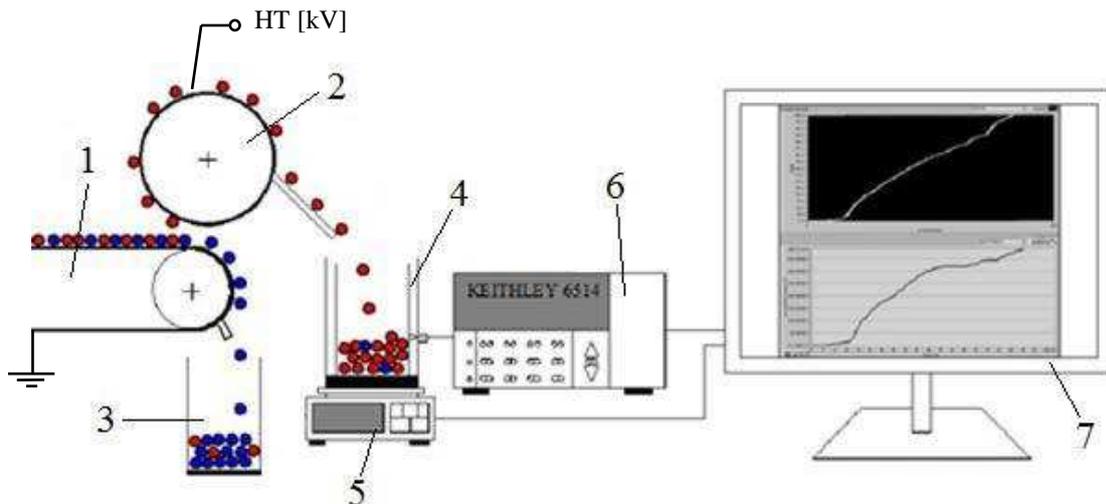
La mesure de la charge électrique est un processus fortement sensible aux conditions environnementales, il peut être à l'origine de nombreuses erreurs lors du traitement des données. C'est pour cela que l'interprétation de ces données ne peut être faite que par la bonne compréhension des processus physiques et les hypothèses qui sont proposées.

Le dispositif le plus connu et le plus utilisé pour la mesure de cette charge est la cage de Faraday, souvent constituée de deux cylindres concentriques séparés par un isolant. Le cylindre extérieur est relié à la terre pour réduire les perturbations électriques extérieures tandis que le cylindre intérieur est connecté à un électromètre qui permet d'évaluer la charge électrique des particules accumulées dans la cage [21], [124].

Les valeurs de charges mesurées peuvent être enregistrées en connectant l'électromètre (Keithley Instruments, modèle 6514) à un PC équipé d'une carte d'acquisition de données, en utilisant un instrument virtuel, créé avec LabView (**Figure II-17**). La masse peut être mesurée simultanément en utilisant une balance électronique (KERN, modèle PCB 250-3, résolution 0,001 g), connectée au même ordinateur [30] (**Figure II-18**).



**Figure II-17** : Mesure de la charge des particules collectées dans une cage de Faraday connectée à un électromètre.



**Figure II-18** : Schéma de principe du système de mesure simultanée de la charge et de la masse des particules collectées après séparation ; 1 : Convoyeur à bande métallique (électrode liée à la terre) ; 2 : Electrode cylindrique tournante ; 3 : Collecteur des produits restés attachés à la bande métallique liée à la terre ; 4 : Cage de Faraday où sont collectés les particules attachées à l'électrode cylindrique tournante ; 5 : Balance électronique (résolution : 0,001 g) ; 6 : Electromètre utilisé pour la mesure de charge ; 7 : PC équipé de carte d'acquisition et du logiciel Labview, pour enregistrer les valeurs instantanées de la charge et de la masse des particules collectées après séparation.

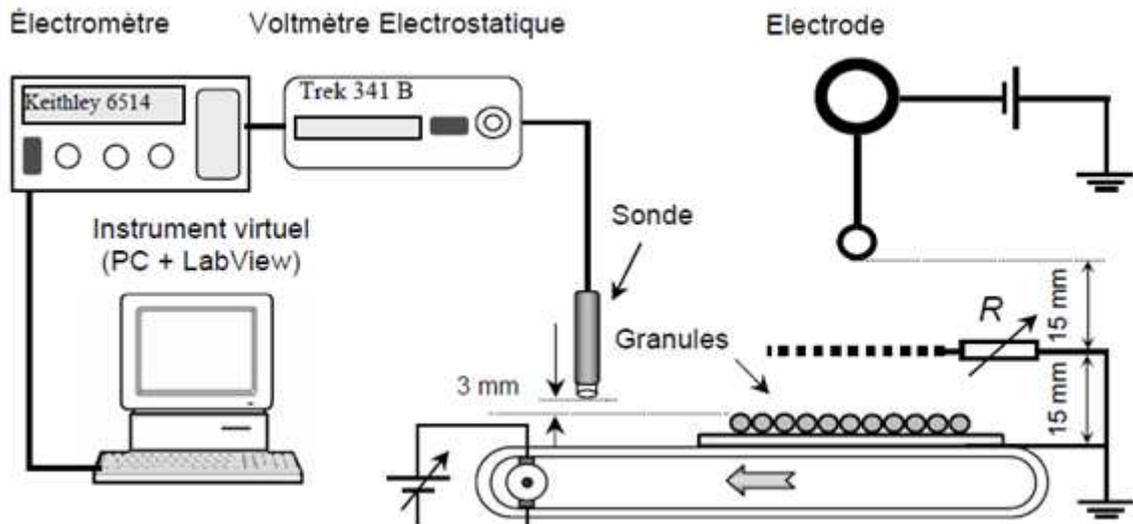
### II-3.2. Mesure de potentiel de surface par voltmètre électrostatique

La mesure du potentiel à la surface d'une couche de granules isolants chargés se fait par simple transfert de ceux-ci sous une sonde électrostatique à condensateur vibrant de type Trek 3435 reliée à un voltmètre électrostatique Trek, modèle 341B [125]. La sonde électrostatique est située à une distance  $h = 3$  mm au-dessus de la surface libre des échantillons.

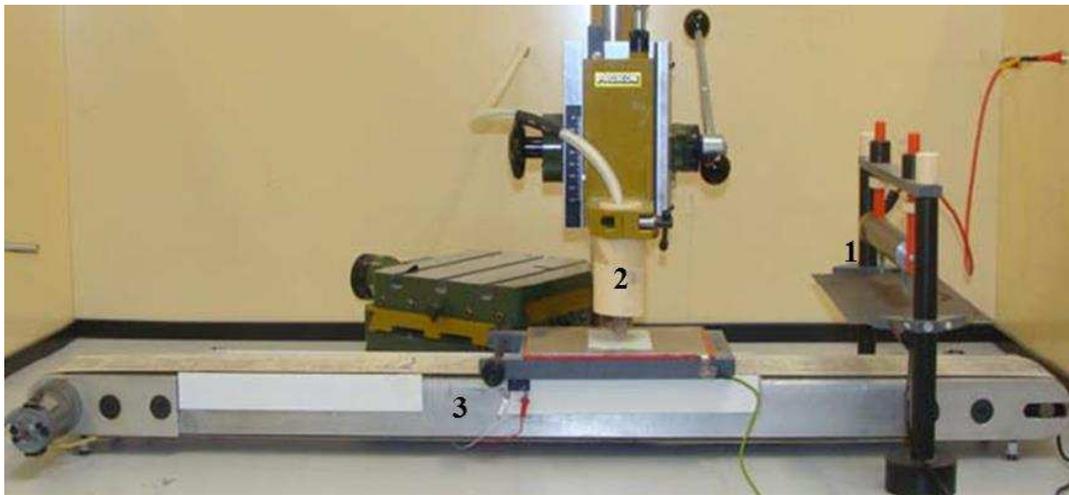
L'acquisition des données expérimentales se fait par un instrument virtuel, développé sous un environnement LabView. Un électromètre numérique (Keithley Instruments, modèle 6514), est connecté au voltmètre électrostatique et communique avec l'instrument virtuel implanté sur ordinateur à l'aide d'un bus GPIB de la norme IEEE 488. La **Figure II-19** illustre le principe de mesure du potentiel en surface.

### II-3.3. Analyse de la pureté des produits séparés

La mesure de la pureté est réalisée à l'aide d'un colorimètre portable (3nh Focus on Color, modèle NH310) présenté sur la **Figure II-20 a**. Une table d'étalonnage est mise en place pour des mélanges de produits allant de 0% à 100 % par pas de 10% pour le produit A et de 100% à 0% par de -10% pour le produit B (**Figure II-20 b**).



(a)



(b)

**Figure II-19** : Représentation schématique (a) et photographie du dispositif de mesure du potentiel en surface ; 1 : Electrode couronne (procédé de charge) ; 2 : Sonde de mesure de potentiel en surface ; 3 : Convoyeur isolant.

Le colorimètre fournit des mesures en plusieurs modes : Cie  $L^*a^*b$  ; CIE XYZ ; CIE RVB ; CIE  $L^*u^*v$  ; CIE  $C^*H$  et Yellowness de blancheur. Une procédure est mise en place pour déterminer la constitution et donc la pureté des produits séparés dans les boîtes de récupération. Après chaque séparation, des échantillons sont prélevés dans chaque boîte de récupération et font l'objet de plusieurs mesures par le colorimètre. L'ensemble des informations du colorimètre est ensuite comparé avec les données de la table d'étalonnage pour déduire la pureté de chaque produit.



(a)



0 % produit A et 100 % produit B  
 10 % produit A et 90 % produit B  
 20 % produit A et 80 % produit B  
 30 % produit A et 70 % produit B  
 40 % produit A et 60 % produit B  
 50 % produit A et 50 % produit B  
 60 % produit A et 40 % produit B  
 70 % produit A et 30 % produit B  
 80 % produit A et 20 % produit B  
 90 % produit A et 10 % produit B  
 100 % produit A et 0 % produit B

(b)

**Color Diff Measurement and Analysis**

Sample  
 File Name: C:\COCS3\data\SampleData.dat  
 Name: induction/alAL  
 Light: D65 Measuring Aperture: 4 SCI/SCE: SCI

	Standard	Sample	d
L*	58.983	60.231	1.248
a*	-0.948	-0.265	0.683
b*	0.024	2.854	2.829
C*	0.948	2.866	1.918
h*	178.533	95.300	2.190
dE*			3.167

Chromaticity Diagram  
 +db\*(Yellow) +6  
 +dL\*(Light)  
 -da\*(Green) +da\*(Red)  
 -db\*(Blue) -6  
 -dL\*(Dark)

Color Simulation  
 Standard Color Sample Color

Standard Database  
 File Name: C:\COCS3\data\TargetData.dat  
 Name: 10PS/90AL10PS/90AL

(c)

**Figure II-20 :** Colorimètre NH310 portable (a), Table d'étalonnage (b) et Interface du logiciel CQCS3 fournie avec le colorimètre pour la mesure et l'analyse de la pureté (c).

#### II-4. Méthode des plans d'expériences

Avec la méthodologie des plans d'expériences, il est possible d'obtenir le maximum de renseignements sur le fonctionnement d'un processus avec le minimum d'essais. Cette méthode prescrit le nombre d'expériences à accomplir afin d'atteindre un objectif bien déterminé et prédit le comportement des systèmes dans le domaine d'utilisation en fonction de plusieurs facteurs qui peuvent varier simultanément ; elle permet d'évaluer les effets de ces facteurs et leurs interactions [126-128].

L'étude d'un processus peut, le plus souvent, être schématisé de la manière suivante

(Figure II-21) :

- Variables de sortie (aussi appelées réponses)  $y_i$ , avec  $i = 1, \dots, n$ .
- Variables d'entrée  $u_i$ , avec  $i = 1, \dots, m$ . Celles-ci peuvent être contrôlées et sont aussi appelées facteurs.

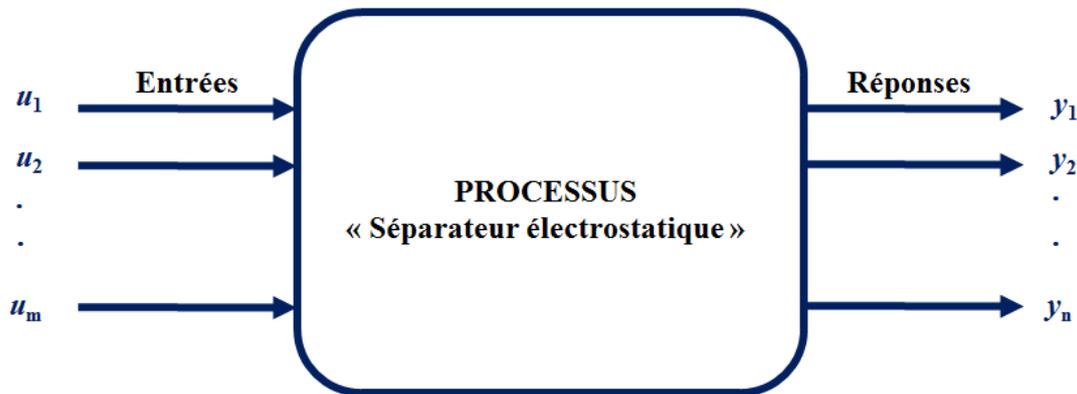


Figure II-21 : Représentation schématique d'un processus.

Sous une forme mathématique, une réponse  $y$  est une fonction de plusieurs variables d'entrées  $u_i$  (variables ou bien facteurs). Le plus souvent, la réponse est exprimée comme un polynôme d'ordre un ou deux :

$$y = c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ij} u_i^2 \quad (\text{II-1})$$

Pour chaque facteur  $u_i$  on définit une variable centrée réduite :

$$x_i = \frac{(u_i - u_{i0})}{\Delta u_i} = u_i^* \quad (\text{II-2})$$

où

$$u_{i0} = \frac{(u_{i\max} + u_{i\min})}{2}; \Delta u_i = \frac{(u_{i\max} - u_{i\min})}{2} \quad (\text{II-3})$$

Avec ces notations, la fonction de réponse devient :

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,i} x_i^2 \quad (\text{II-4})$$

où  $x_i$  prend la valeur  $-1$ , pour le niveau inférieur  $u_{i\min}$  du facteur, et la valeur  $+1$  pour le niveau supérieur du même facteur  $u_{i\max}$

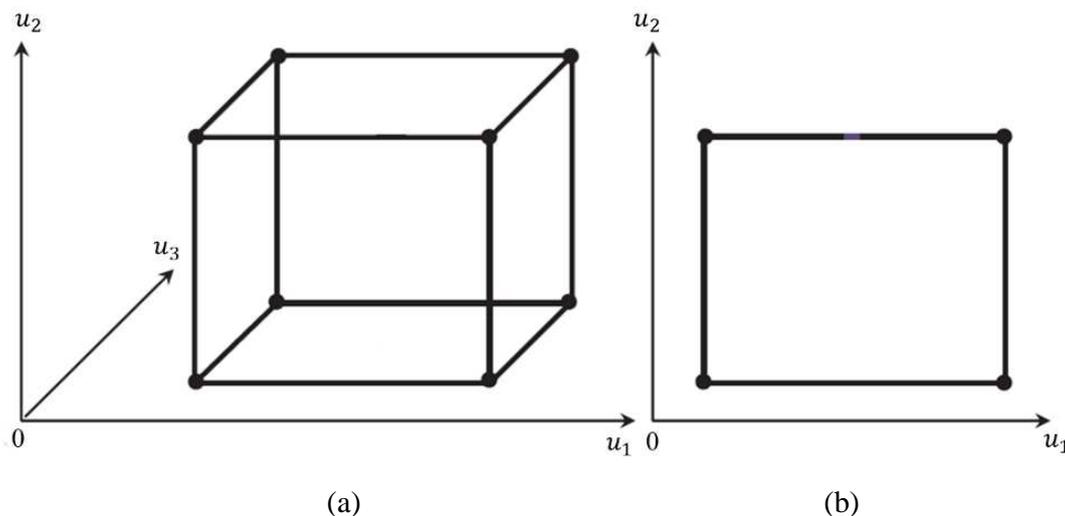
La modélisation ainsi que l'optimisation de ce processus [96,97] peut se faire par la réalisation, soit d'un plan factoriel complet qui permet d'exprimer la réponse par un modèle polynôme de premier degré, soit par un plan factoriel composite qui conduit à un modèle polynôme de second degré.

Les plans d'expériences complets sont les plus simples, ils sont aussi les plus utilisés. Les premiers résultats obtenus grâce à ces plans peuvent toujours être complétés par de nouvelles expériences permettant d'atteindre le degré de précision et d'information recherché.

Un plan comportant l'étude de  $k$  facteurs prenant chacun deux niveaux est désigné par la notation  $2^k$ . Le domaine d'étude d'un plan  $2^2$  peut être représenté comme sur la **Figure II-22**.

La fonction de réponse  $y_i$  peut s'exprimer comme suit :

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,i,l} x_i x_j x_l + \dots + a_{i,j,\dots,k} x_i x_j \dots x_k \quad (\text{II-5})$$

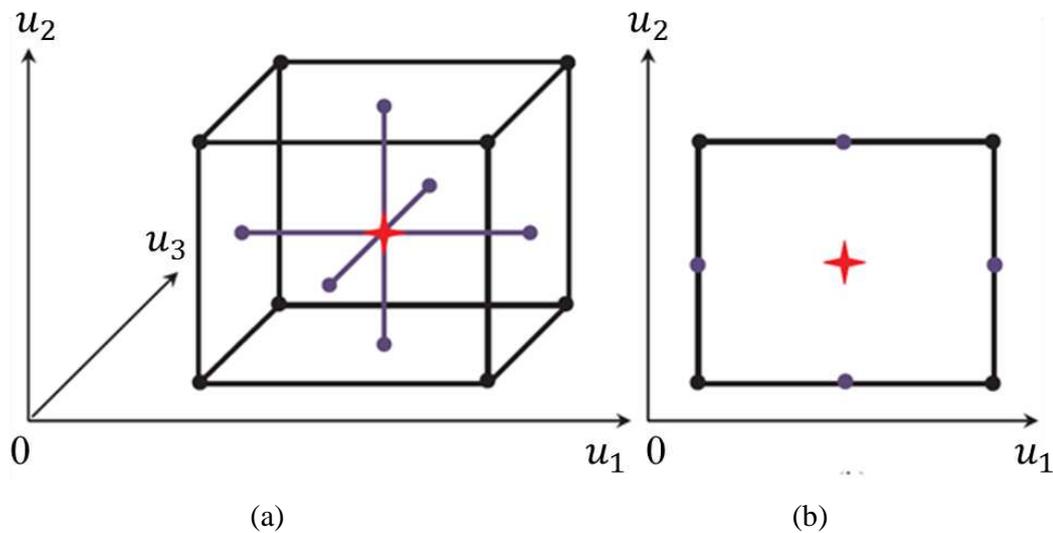


**Figure II-22** : Représentation graphique des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences complet pour un domaine défini par 3 facteurs (a) ou 2 facteurs (b).

La construction de plans composites centrés consiste à rajouter des points en étoile à partir d'un plan factoriel complet. Ces points sont positionnés à une distance  $\pm a$  du centre du domaine suivant les axes des facteurs.

L'ensemble de ces points constitue un système au sein duquel on ne fait varier qu'un seul facteur à la fois. Il y a donc  $2k$  points en étoile,  $k$  étant le nombre des variables du plan d'expériences (**Figure II-23**).

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,i,l} x_i x_j x_l + \dots + a_{i..k} x_{i..} x_k + \sum a_{i,i} x_i^2 \quad (\text{II-6})$$



**Figure II-23** : Représentation graphique des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences composite pour un domaine défini par 3 facteurs (a) ou 2 facteurs (b).

Le domaine de variation d'un facteur est représenté par un segment, tandis que le point de mesure est marqué par un point. L'étoile marque le centre du domaine total de la variation, correspondant à la valeur moyenne de chaque facteur. Le nombre total des essais  $N$ , pour  $k$  facteurs s'écrit :

$$N = 2^k + 2.k + 3 \quad (\text{II-7})$$

**Conclusions**

1. Des essais seront réalisés avec des matériaux micronisés permettant la validation des différents procédés de séparation électrostatique pour l'industrie du recyclage et de l'agro-alimentaire.
2. Plusieurs techniques de mesure seront mises en œuvre pour évaluer l'efficacité des dispositifs de charge par effet triboélectrique, par induction électrostatique et par décharge couronne.
3. La modélisation et l'optimisation des installations électrostatiques utilisant la méthodologie des plans d'expérience pourrait représenter une solution viable pour d'améliorer de façon importante la qualité des produits de la séparation.

# Chapitre III

## PROCEDES DE SEPARATION COURONNE – ELECTROSTATIQUES

Le résultat de tout processus de séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité de la charge des matériaux pulvérulents. Le séparateur électrostatique à électrode-convoyeur multifonctions offre cette opportunité, en utilisant différents modes de fonctionnement, décrits dans le § III-1.

Le premier mode, la séparation électrostatique, fait appel à l'induction électrostatique pour charger des mélanges composés des particules de conductivités différentes. Les expériences présentées et discutées dans le § III-2 ont porté sur des échantillons composés de matières végétales et de ciment, ainsi que sur des mélanges de particules d'aluminium et d'ABS, provenant des DEEE.

Le second mode de fonctionnement, la séparation couronne-électrostatique, a été étudié pour deux types de mélanges de matériaux pulvérulents : l'un composé de particules de semoule de blé et de copeaux de bois de pin, l'autre constitué de particules d'aluminium et de PS. Les résultats de cette étude sont exposés dans § III-3. Les mélanges comportant des matières végétales ont été préparés par l'INRA de Montpellier, tandis que les DEEE ont été fournis par les sociétés Goodfellow et APR2.

### III-1. Modes de fonctionnement du séparateur électrostatique multifonctions

Dans le séparateur électrostatique multifonctions (§ II. 2.1), la charge électrique des matériaux pulvérulents à trier peut-être produite par induction électrostatique [24], par décharge couronne de polarité positive ou négative [23] ou encore par l'association de ces deux mécanismes physiques.

L'installation conçue par l'Institut PPRIME de Poitiers à l'IUT d'Angoulême a la particularité de permettre l'utilisation séparée ou simultanée de ces deux mécanismes, en fonction des caractéristiques des matériaux à traiter. Une distinction sera faite entre les matériaux pulvérulents à conductivité faible ou élevée, en fonction de leur aptitude à garder la charge acquise par décharge couronne. En contact avec une électrode de polarité opposée, les premiers ne perdent qu'une partie de leur charge et ne vont pas changer le signe de celle-ci ; dans les mêmes conditions, les particules à conductivité élevée perdent toute leur charge initiale et vont changer de polarité.

Les procédés de séparation utilisant la décharge couronne ne conviennent que pour des mélanges de particules ayant des conductivités relativement faibles, pour que leur charge ne varie pas excessivement lorsqu'elles sont en contact avec la bande transporteuse (l'électrode liée à la terre). En revanche, le mécanisme de charge par induction électrostatique ne sera efficace que pour des mélanges dont un des constituants est caractérisé par une conductivité relativement élevée.

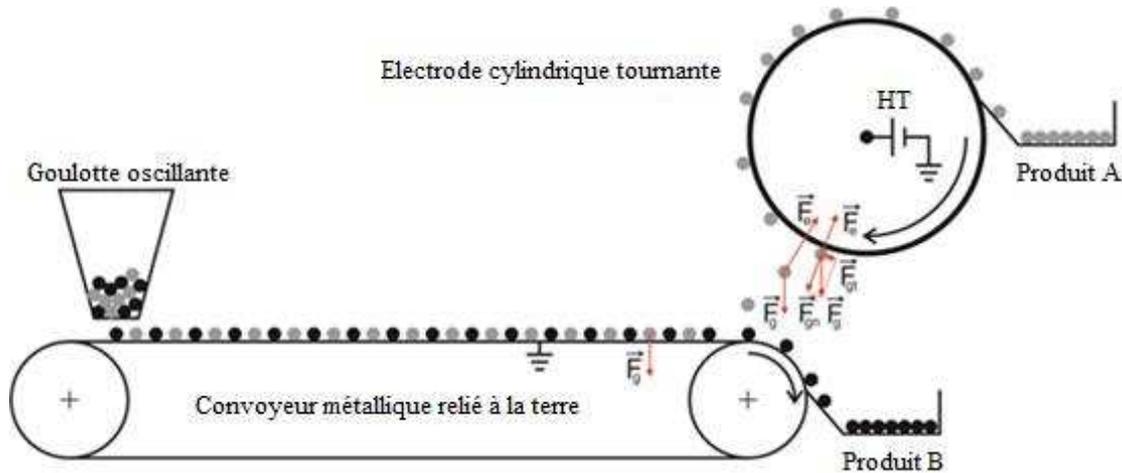
**La Figure III-1** illustre un schéma du séparateur électrostatique multifonctions sur lequel est représenté les forces électrostatiques qui agissent sur une particule sphérique de rayon  $r$  et de masse  $m$ , portant une charge  $Q$  et évoluant dans un champ électrique d'intensité  $E$ , assez uniforme [39] :

-Force de la pesanteur :  $F_g = g m ; g = 9,81 \text{ m/s}^2$

-Force de Coulomb :  $F_C = Q E$

-Force d'image électrique :  $F_i = Q^2 / [(4\pi\epsilon)(2r)^2] ; \epsilon \cong 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

La particule se détache de la surface de l'électrode liée à la terre si  $F = F_C - F_i - F_g > 0$ .

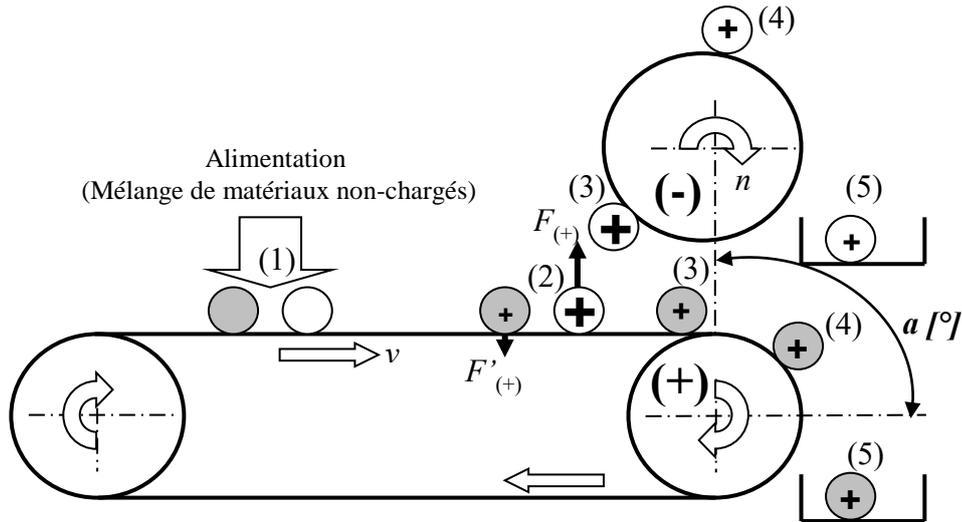


**Figure III-1** : Représentation schématique de l'installation de séparation électrostatique.

### III-1.1. Séparation électrostatique

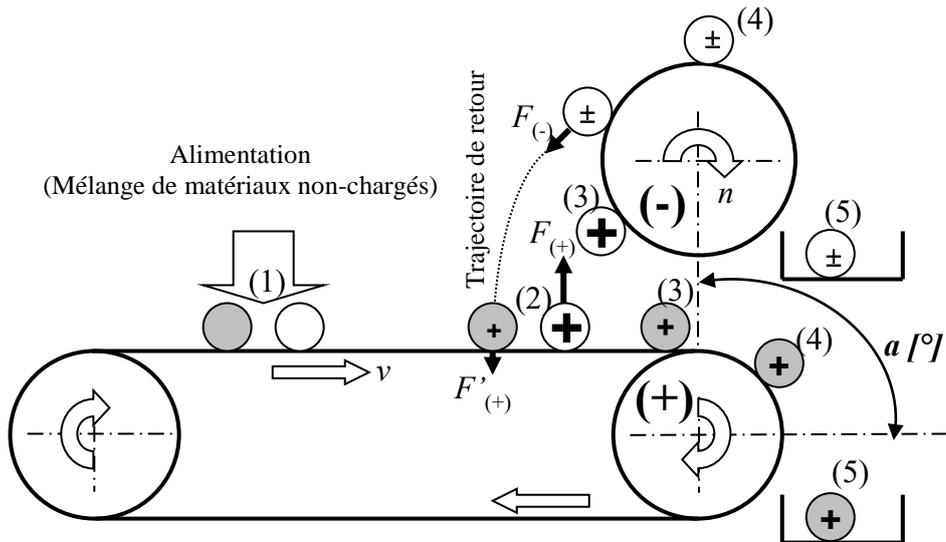
Les particules doivent avoir des conductivités suffisamment élevées pour qu'au moins un des constituants du mélange se charge en contact avec la bande transporteuse métallique grâce au phénomène d'induction électrostatique [24]. Les phases du processus de séparation sont présentées sur la **Figure III-2** :

- (1) Le mélange de matériaux pulvérulents non-chargés est déposé sous la forme d'une mono-couche sur la surface de la bande transporteuse métallique.
- (2) En contact avec la bande métallique et sous l'action du champ électrique créé par l'électrode cylindrique tournante de polarité positive, les particules se chargent positivement, par induction électrostatique. Les particules ayant des conductivités plus élevées se chargent plus fortement que les autres et seront attirées vers l'électrode tournante de polarité opposée dès que la résultante des forces électriques et mécaniques  $F_{(+)} > 0$  ; Les particules faiblement conductrices se chargent beaucoup moins et la force de Coulomb n'est pas suffisante pour les soulever ( $F'_{(+)} < 0$ ).
- (3) Les deux classes de particules sont fixées par les forces électriques et mécaniques à la surface des électrodes de polarités opposées, l'électrode cylindrique tournante et la bande transporteuse, respectivement.
- (4) Les électrodes entraînent les particules dans leur mouvement, jusqu'au moment où des racleurs les détachent de leurs surfaces.
- (5) Les particules sont récupérées dans deux compartiments du collecteur des produits.



**Figure III-2 :** Les cinq phases du processus de séparation utilisant l'induction électrostatique, dans le cas d'un mélange de matériaux pulvérulents, comportant une classe de particules à conductivité élevée.

La séparation selon le schéma de la **Figure III-2** n'est pas possible si la conductivité des particules est trop élevée. Dans ce cas, illustré sur la **Figure III-3**, après être entrés en contact avec l'électrode cylindrique tournante à la phase 3, les particules risquent de perdre trop vite la charge positive [129], voire acquérir une charge négative (phase 4). Par conséquent, les particules reviennent sur la bande transporteuse et vont exécuter plusieurs mouvements de va-et-vient entre les électrodes, Certaines arrivent finalement à rester sur l'électrode tournante (phase 4) et à être collectées comme un produit distinct (phase 5).



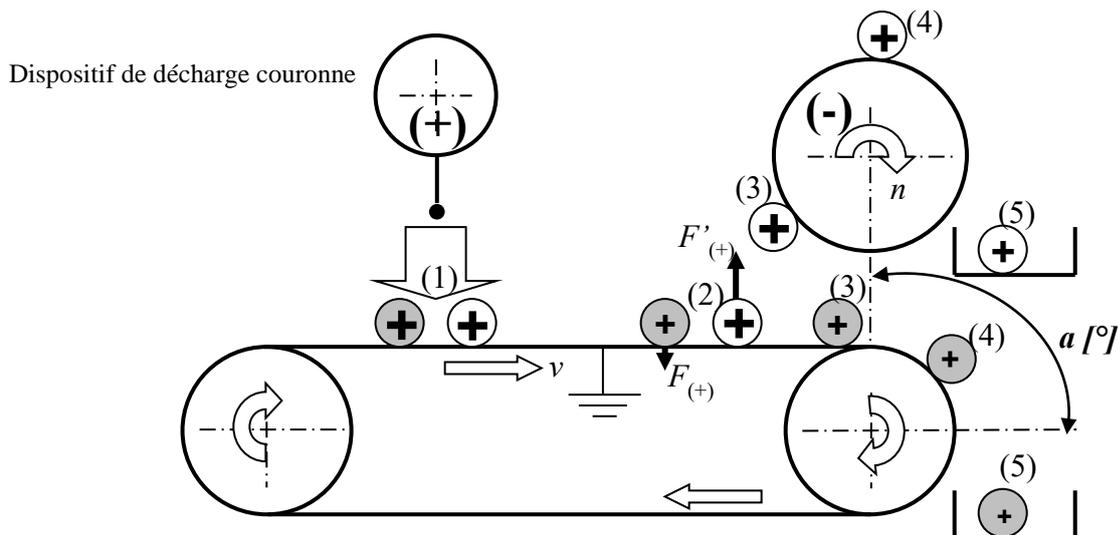
**Figure III-3 :** Cinq phases du processus de séparation utilisant l'induction électrostatique, dans le cas d'un mélange de matériaux pulvérulents, comportant une classe de particules à conductivité trop élevée.

### III-1.2. Séparation couronne-électrostatique

Deux cas présentent un intérêt pratique :

#### III-1.2.1. Mélange de matériaux faiblement conducteurs

Dans le cas où la conductivité de (A) est légèrement inférieure à la conductivité de (B), la séparation se produit selon le scénario suivant : Les deux classes de particules déposées sur la surface de la bande transporteuse se chargent positivement dans la « douche ionique » produite par une électrode couronne. Introduites par la bande transporteuse dans la zone de champ électrique intense, les particules de la classe (A), qui – en étant moins conductrices – ont gardé leur charge, sont attirées vers l'électrode cylindrique tournante de polarité opposée, dès que la résultante des forces électriques et mécaniques  $F'_{(+)} > 0$ . Le détachement de ces particules peut être facilité en intensifiant le champ électrique E, soit en augmentant (en valeur absolue) la tension U appliquée à l'électrode cylindrique tournante, soit en diminuant l'espace entre les électrodes. Cependant, cette fois-ci le domaine de variation de E ne sera pas limité par la rigidité diélectrique de l'air, mais par la valeur à partir de laquelle la force de Coulomb devient suffisamment importante pour soulever aussi les particules de la classe (B). Ces particules en raison de leur conductivité plus élevée, perdent une partie de leur charge en contact avec la bande transporteuse métallique. Dans les conditions optimales de fonctionnement du séparateur, la résultante des forces électriques et mécaniques qui s'exercent sur eux est négative  $F_{(+)} < 0$ , elles restent donc sur l'électrode inférieure.



**Figure III-4** : Cinq phases du processus de séparation couronne-électrostatique, dans le cas d'un mélange de particules faiblement conductrices.

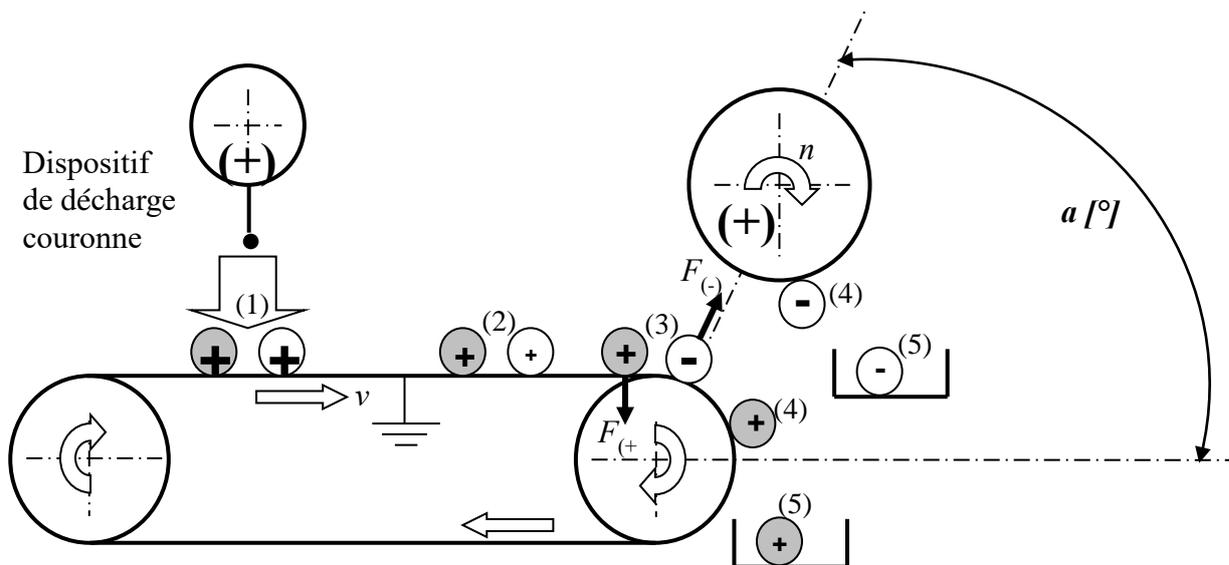
Les phases 3 à 5 du processus de séparation sont similaires au cas décrit au § III-1.1. La seule différence : les particules récupérées dans les deux boîtes du collecteur ont la même polarité.

**Remarque importante :** La séparation pourrait se faire aussi en utilisant la décharge couronne négative et en alimentant l'électrode tournant en polarité positive. Cependant, compte tenu du fait que la couronne négative s'accompagne de la génération d'une quantité plus importante d'ozone, il est plus prudent de travailler en polarité positive, comme proposé ci-dessus.

### III-1.2.2. Mélange de matériaux caractérisés par des conductivités très différentes

La séparation de ce type de mélange s'effectue typiquement dans un séparateur couronne-électrostatique à tambour [23]. Le séparateur à bande transporteuse peut être aussi utilisé dans ce cas, avec une configuration d'électrodes légèrement modifiée par rapport au cas précédent : l'électrode tournante n'est plus placée au-dessus de la bande transporteuse mais plutôt positionnée à un angle  $a$  [°] avec le tambour d'entraînement de celle-ci. Les phases du processus modifié sont présentées sur la **Figure III-5** :

- (1) Les deux classes de particules déposées sur la surface de la bande transporteuse se chargent positivement dans la « douche ionique » produite par une électrode couronne.
- (2) En contact avec la bande transporteuse métallique liée à la terre, les particules de type (B), ayant une conductivité relativement élevée, se déchargent assez vite.



**Figure III-5 :** Les cinq phases du processus de séparation couronne-électrostatique, dans le cas d'un mélange de particules à conductivités très différentes.

(3) Dans la zone de champ électrique intense, les particules conductrices se chargent négativement par induction électrostatique et sont attirées par l'électrode tournante de polarité opposée, dès que la résultante des forces électriques et mécaniques  $F_{(-)} > 0$ . Les particules faiblement conductrices ne sont pas affectées par l'induction électrostatique, restent positives et la force  $F_{(+)} < 0$  les fixe sur la bande transporteuse métallique.

Les phases 4 et 5 sont similaires aux cas précédents.

### **III-2. Applications de la séparation électrostatique**

Deux types de mélanges de matériaux feront l'objet de cette étude : un mélange de matières végétales fait de particules de ciment et de paille fournis par l'INRA de Montpellier ainsi qu'un mélange de DEEE constitué de particules d'aluminium et d'ABS fourni par les sociétés Goodfellow et APR2 respectivement.

#### **III-2.1. Séparation d'un mélange pulvérulent de ciment et paille**

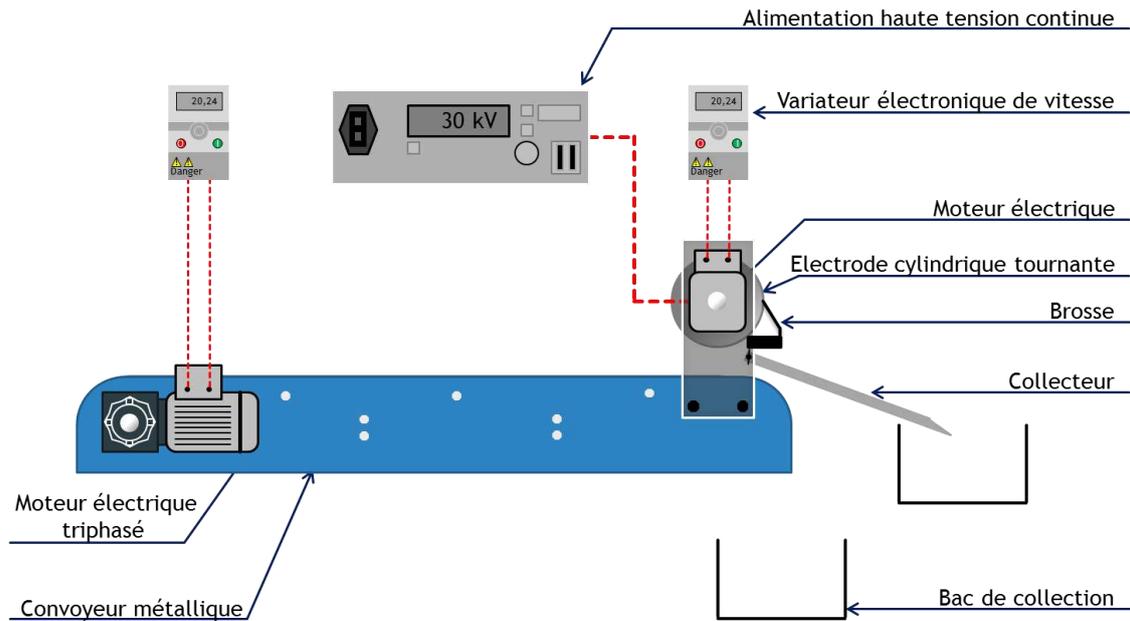
##### **III-2.1.1. Protocole et configuration expérimentale**

Plusieurs séries d'expériences sur le séparateur électrostatique multifonctions (**Figure III-6**) ont été réalisées, en utilisant uniquement le mécanisme de charge par induction électrostatique. Les essais ont été réalisés sur des échantillons constitués en proportions égales (50 % - 50 %) de particules de paille et de ciment (§ II-1.2).

Dans un premier temps, les particules de ciment et de paille ont été soumises séparément à des essais de séparation électrostatique, en faisant varier les trois facteurs principaux qui peuvent influencer le processus. Il s'agit de la haute tension qui alimente l'électrode cylindrique, de la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique et de la vitesse linéaire du convoyeur. Le but de cette étape consistait à déterminer les valeurs de ces facteurs susceptibles d'assurer la meilleure séparation d'un mélange paille – ciment. Ces expériences ont toutes été réalisées sur la même machine, par les mêmes opérateurs, en utilisant le même échantillon, et dans les mêmes conditions climatiques d'humidité et de température, afin d'éliminer toute cause de variabilité du processus de séparation.

Pour les expériences de séparation, réalisées dans un deuxième temps, la méthode de travail a suivi les étapes suivantes : (1) mise en marche des appareils électriques dans l'ordre : alimentation haute tension, électrode tournante, convoyeur, alimentation en matière, (2) séparation et collecte des produits ; (3) arrêt des appareils dans l'ordre inverse (convoyeur, électrode cylindrique, alimentation haute tension) ; (4) pesage des masses collectées.

Ce protocole expérimental a scrupuleusement été observé pour toutes nos campagnes d'essais.



**Figure III-6** : Schéma descriptif du séparateur électrostatique à électrode-convoyeur multifonctions.

### III-2.1.2. Résultats et interprétations

La première étape consiste d'abord à définir les caractéristiques physiques des particules de ciment et de paille et de déterminer la haute tension optimale à appliquer aux bornes de l'électrode cylindrique en vue de leur séparation. Pour chaque type de particules, la haute tension a été variée de 10 kV à 18 kV par pas de 2 kV. Deux séries d'expériences ont donc été réalisées sur les produits pulvérulents (taille moyenne de l'ordre de 20  $\mu\text{m}$ ), l'une avec les particules de ciment où nous avons utilisé une masse de 1 g, et l'autre avec des particules de paille d'une masse de 0,5 g.

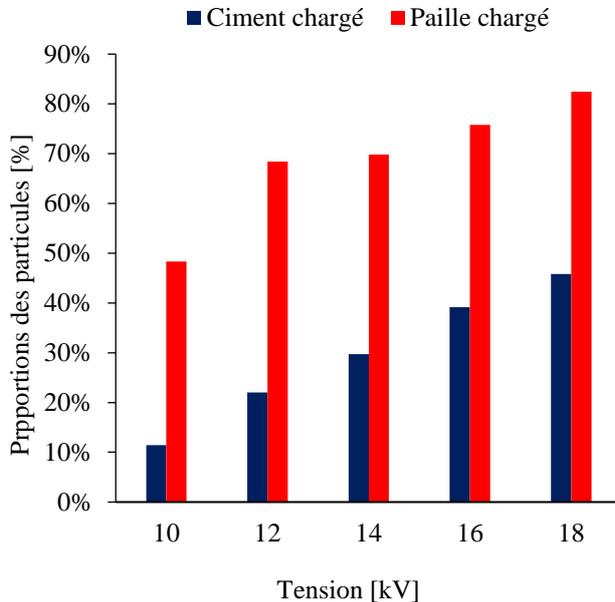
Les paramètres de départ étaient réglés comme suit :

- Position de l'électrode cylindrique  $\alpha = 0^\circ$ .
- Vitesse de rotation de l'électrode cylindrique à 138 tr/min.
- Vitesse linéaire du convoyeur à 2,84 m/min.

Au cours de cette expérience, les particules chargées par induction électrostatique étaient attirées par l'électrode cylindrique et finissaient dans le bac supérieur, alors que les particules non-chargées terminaient leur course vers le bac inférieur.

Les résultats obtenus (à savoir les masses collectées dans le bac supérieur après chaque expérience – **Figure III-7**) confirment le fait que le phénomène d'induction électrostatique charge à la fois les particules de paille et de ciment. La charge acquise est proportionnelle à la tension appliquée à l'électrode.

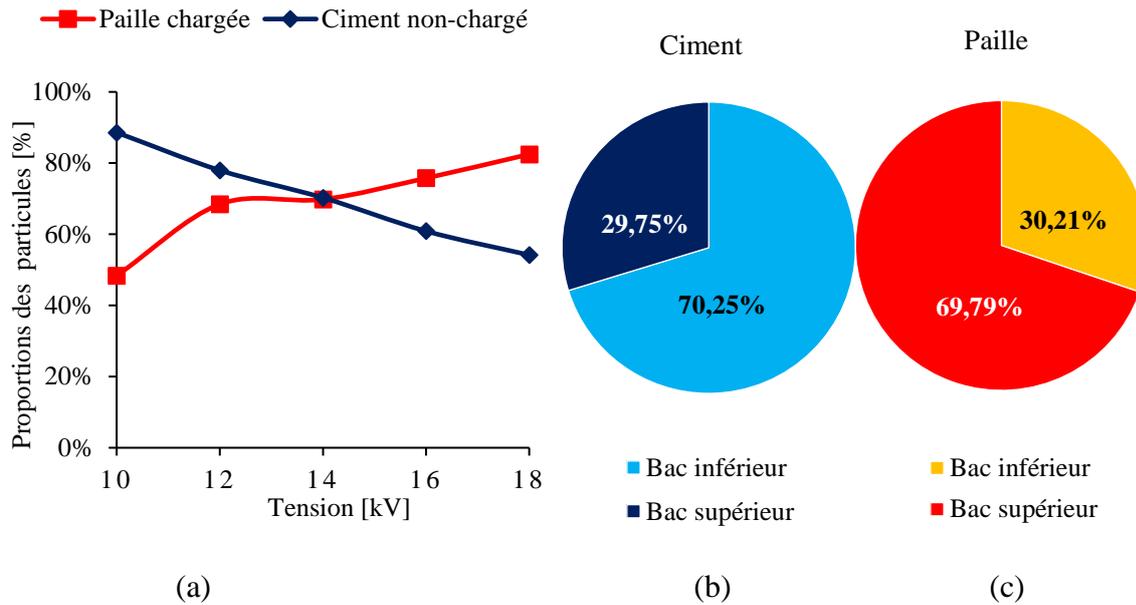
Ces expériences ont également montré que les particules de paille se chargeaient mieux que celles de ciment, ce qui constitue une observation d'intérêt majeur pour la séparation de ces deux matériaux.



**Figure III-7** : Proportions des particules collectées dans le bac supérieur, en fonction de la tension appliquée.

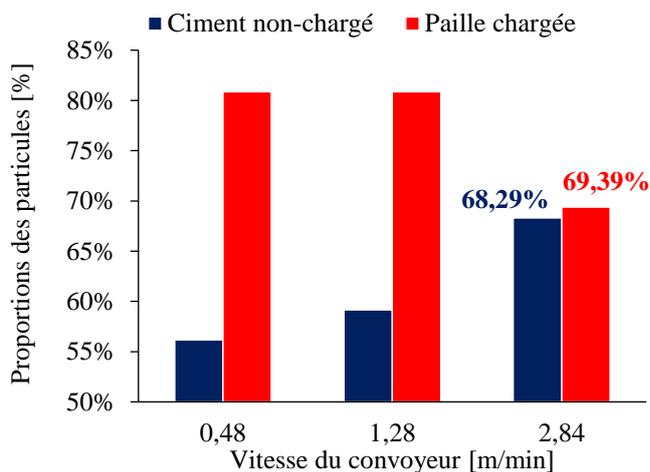
Une tension optimale appliquée aux bornes de l'électrode pour séparer ces matériaux devrait donc permettre de charger un maximum de particules de paille et un minimum de particules de ciment. Elle correspond, au point d'équilibre entre les proportions de particules de paille chargées et de ciment non-chargées (**Figure III-8 a**), soit une tension de 14 kV. En appliquant cette tension, environ 70 % des particules de paille sont collectées dans le bac supérieur et environ 70 % des particules de ciment le sont dans le bac inférieur (**Figure III-8 b, c**).

D'autres expériences ont été réalisées sur les mêmes matériaux (1 g de ciment et 0,5 g de paille) pris toujours séparément, en fixant la tension à 14 kV et en faisant varier la vitesse du convoyeur, commandée par un variateur et mesurée par un tachymètre. Le but de cette expérience était de déterminer l'influence de cette vitesse sur le taux de chargement des particules et de trouver une valeur idéale pour séparer ces deux matériaux.



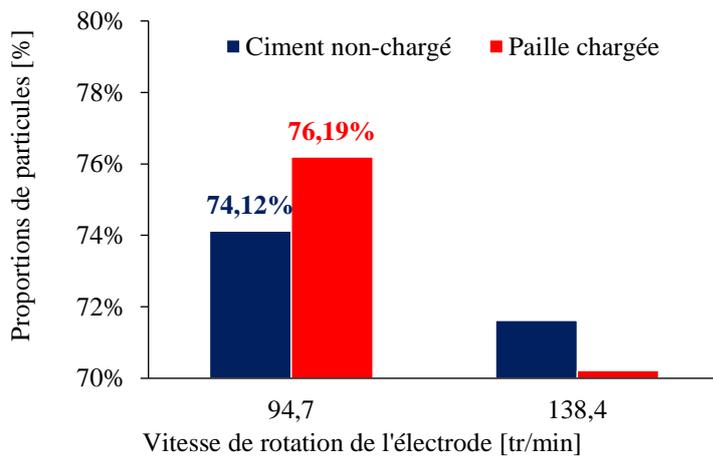
**Figure III-8 :** (a) : Proportions en masse des particules de paille chargées et de ciment non-chargées en fonction de la tension appliquée à l'électrode cylindrique tournante ; (b) et (c) : Proportions de masses de ciment et de paille dans les deux bacs à une tension de 14 kV.

La meilleure valeur de la vitesse linéaire du convoyeur, déterminée par les expériences, a été de 2,84 m/min (**Figure III-9**). Une moindre vitesse chargeait certes plus de particules de paille mais également davantage de particules de ciment, alors qu'une vitesse supérieure ne permettrait pas de charger suffisamment les particules de paille.



**Figure III-9 :** Proportions de masses de ciment et de paille récupérées dans les deux collecteurs en fonction de la vitesse linéaire du convoyeur.

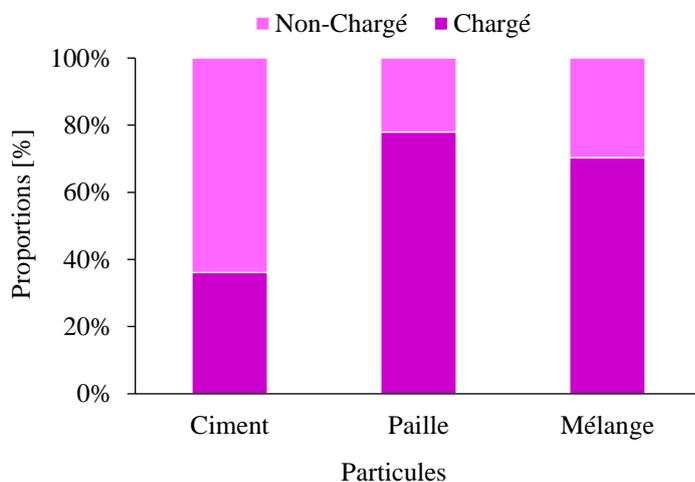
Des expériences similaires ont été réalisées pour déterminer la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique. Les résultats ont permis de fixer cette vitesse à 94,7 tr/min (**Figure III-10**). A cette vitesse, des taux avoisinant les 75 % ont été obtenus pour les deux matériaux dans leurs bacs correspondants.



**Figure III-10 :** Proportions de masses de ciment et de paille récupérées dans les deux collecteurs en fonction de la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique.

En appliquant une tension de 14 kV aux bornes de l'électrode et en réglant les vitesses du convoyeur à 2,84 m/min et celle de l'électrode cylindrique à 94,7 tr/min (soit les valeurs optimales obtenues précédemment), une nouvelle série d'expériences a été réalisée, d'abord sur chaque type de particules (ciment et paille) séparément, puis sur le mélange des deux. Les masses utilisées pour chaque expérience étaient : 6 g pour le ciment, 6 g pour la paille et 6 g pour le mélange.

Avec l'électrode cylindrique à 0° (son axe est dans le même plan vertical que l'axe du tambour du convoyeur métallique), environ 64 % du ciment était présent dans le bac inférieur et 78 % de la paille dans le bac supérieur. L'expérience avec le mélange donnait quant à elle environ 70 % de particules – majoritairement paille - dans le bac supérieur (**Figure III-11**). Une analyse de la pureté des produits obtenus devrait confirmer la faisabilité de la séparation électrostatique de ces deux matériaux.



**Figure III-11:** Répartition massique des particules dans les bacs supérieurs (particules chargées) et inférieur (particules non-chargées).

## III-2.2. Séparation d'un mélange d'Aluminium et ABS

### III-2.2.1. Protocole et configuration expérimentale

Sur ce séparateur électrostatique multifonctions, plusieurs séries expériences ont été réalisées utilisant uniquement l'induction électrostatique pour la charge des particules.

Le mélange des particules à séparer provenait de déchets d'EEE. Pour chaque expérience, un échantillon d'un poids total de 2 g a été utilisé, il était constitué en proportions égales en masse (50 % – 50 %) de particules d'aluminium et d'ABS. Le diamètre moyen des particules du mélange variaient entre 125  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$  (§ II-1.2).

Des essais préliminaires de séparation électrostatique sur le dispositif ont permis de déterminer les deux facteurs les plus influents sur le résultat, il s'agit de l'angle d'inclinaison de l'électrode cylindrique  $\alpha$  et la haute tension U qui lui est appliquée. Leurs domaines d'études respectives ont été établis de façon à ce qu'il n'y ait pas d'apparition d'arcs électriques et qu'il y ait une séparation notable des particules d'ABS et d'aluminium (**Tableau III-1**).

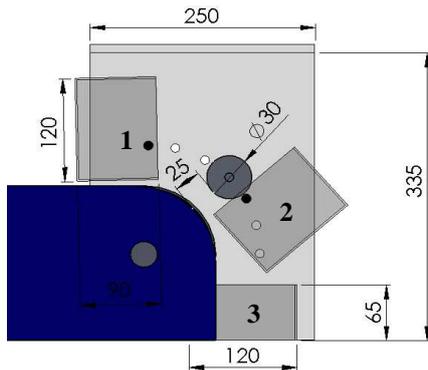
**Tableau III-1** : Domaines d'étude des variables du processus

	Minimum	Maximum
Angle $\alpha$ (°)	15	45
Haute Tension U (kV)	14	20

L'utilisation de la méthode des plans d'expérience a permis de mesurer l'influence de ces deux facteurs et de déterminer leurs valeurs optimales, tout en réduisant le nombre d'essais au strict nécessaire. Un plan factoriel complet  $2^2$  a été choisi, plus simple à réaliser et permettant de mettre en évidence très rapidement l'existence d'interactions entre les variables de contrôle du processus. L'étude des deux facteurs (U et  $\alpha$ ) à deux niveaux, sans valeurs intermédiaires et avec une répétition pour chaque essai, a nécessité 8 expériences ( $2 * 2^2$ ). Les résultats ont été analysés avec le logiciel « MODDE version 5,0 », de la société UMETRICS [130].

Ces expériences ont toutes été réalisées sur la même machine, par les mêmes opérateurs, en utilisant les mêmes échantillons et dans les mêmes conditions climatiques d'humidité (entre 56,2 % et 62,4 %) et de température (entre 23,9° et 25,6°), afin d'éliminer toute cause de variabilité du processus de séparation, en respectant la même méthode de travail décrite dans le cas précédent § III-2.1.1. La vitesse linéaire du convoyeur métallique est fixée à 1 m/min et la vitesse de rotation de l'électrode tournante à 10 tr/min.

Les particules d'ABS ne se chargent pas par effet d'induction et finissent leur parcours sur le convoyeur jusqu'à la boîte n° 3. Les particules d'aluminium chargées sont par contre attirées par l'électrode vers la boîte n° 2 ; certaines d'entre-elles entrent en contact direct avec l'électrode pour rebondir et finir dans la boîte n° 1 mise en place à cet effet. Les boîtes n° 1 et n° 2 contiennent donc majoritairement ( $\geq 50\%$ ) de l'aluminium, et seront considérées comme étant un même compartiment (**Figure III-12**).



**Figure III-12:** Schéma du dispositif de collecte des particules.

### III-2.2.2. Résultats et interprétations

Les résultats du plan factoriel complet  $2^2$  sont représentés dans le **Tableau III-2**. Les pertes de produits enregistrées dans ces expériences sont négligeables, car elles représentent une moyenne de l'ordre 0,94 %.

**Tableau III-2 :** Résultats de la séparation électrostatique.

N°	U [kV]	$\alpha$ [°]	$m_{Al}$ [%]	$m_{ABS}$ [%]	Pertes [%]
1	14	15	53,27	44,86	1,87
2	20	15	58,06	40,32	1,61
3	14	45	33,17	66,35	0,48
4	20	45	49,72	49,73	0,55
5	14	15	47,32	51,71	0,98
6	20	15	60,99	38,46	0,55
7	14	45	36,04	62,94	1,02
8	20	45	42,42	57,07	0,51

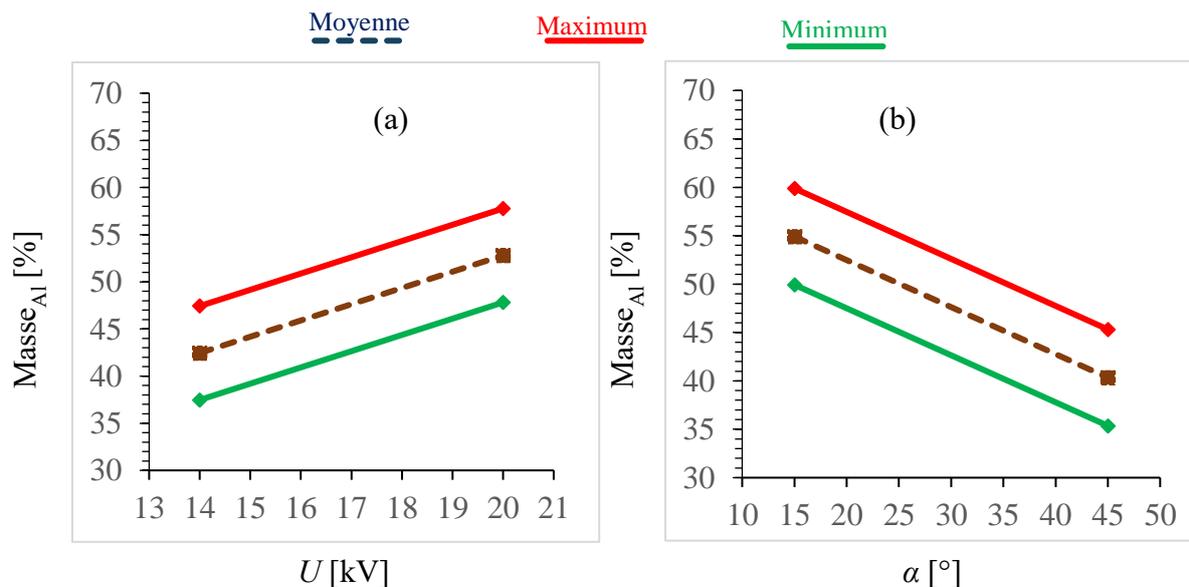
En utilisant la méthodologie des plans expériences, un modèle linéaire a été obtenu pour chacune des réponses  $m_{ABS}$ ,  $m_{Al}$ , (les proportions des masses des produits collectés, en fonction la de haute tension U et de l'angle d'inclinaison de l'électrode  $\alpha$ ) :

$$-m_{Al} = 47,62 + 5,17 U^* - 7,28 \alpha^* \quad (III-1)$$

$$-m_{ABS} = 51,43 - 5,03 U^* + 7,59 \alpha^* \quad (III-2)$$

La masse du produit conducteur  $m_{Al}$  récupéré dans les boîtes n° 1 et n° 2 augmente d'environ 42 % à une haute tension  $U = 14$  kV (ce qui signifie que le champ électrique est trop faible pour attirer toutes les particules de Al vers l'électrode cylindrique tournante), par contre environ 52 % se font attirer à  $U = 20$  kV (**Figure III-13 a**). En effet, en augmentant le niveau de la tension, le champ électrique devient suffisamment fort pour attirer vers l'électrode cylindrique non seulement les 1 g d'Al, mais aussi certaines particules d'ABS qui portent une charge positive, acquise par l'effet tribo-électrique pendant le dépôt du mélange sur la bande convoyeuse. La neutralisation des matériaux avant la séparation électrostatique pourrait résoudre ce problème.

La position angulaire  $\alpha$  de l'électrode cylindrique tournante a également un effet significatif sur la masse du produit conducteur (**Figure III-13 b**). La masse collectée avec l'électrode cylindrique tournante à  $\alpha = 15^\circ$  représente plus de 55 % de la masse initiale, ce qui signifie que le champ électrique attire non seulement les particules de Al dans les boîtes n° 1 et n° 2, mais aussi une proportion relativement importante des particules isolantes. La force de Coulomb agissant sur les particules isolantes chargée d'ABS. A  $\alpha = 45^\circ$ , les forces mécaniques (centrifuge et gravitationnelle) ont une plus grande influence sur les particules des deux matériaux, et la masse moyenne du produit conducteur représente seulement 35 % de la masse initiale, si  $U = 14$  kV. Selon le modèle linéaire (1), les meilleurs résultats (c'est-à-dire,  $m_{Al} = 50$  %) sont censés être obtenues à  $U^* = 1$  (c'est-à-dire,  $U = 20$  kV) et  $\alpha^* = 0,4$  (c'est-à-dire,  $\alpha = 33^\circ$ ).



**Figure III-13** : Variation prédite des masses recueillies de l'aluminium, en fonction de la haute tension appliquée (a), et de la position angulaire de l'électrode (b). Des courbes similaires ont été obtenues pour l'ABS.

Toutefois, un plan d'expérience factoriel composite doit être effectué afin d'établir rigoureusement les conditions de fonctionnement optimales. Une technique appropriée pour évaluer la pureté des produits serait nécessaire à la validation de cet optimum.

### III-3. Applications de la séparation couronne-électrostatique

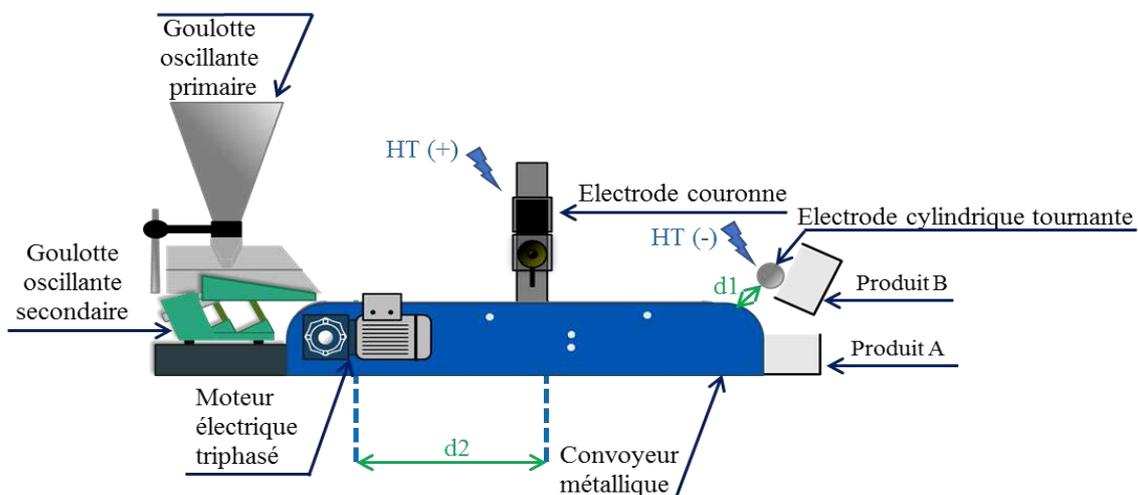
Deux types de mélanges de matériaux feront l'objet de cette étude : un mélange de matières végétales composé de particules de liège, de semoule de blé et de copeaux de bois de pin fournis par l'INRA de Montpellier, ainsi qu'un mélange de DEEE constitué de particules d'aluminium et de PS fourni par les sociétés Goodfellow et APR2 respectivement.

#### III-3.1. Séparation couronne-électrostatique de matières végétales

##### III-3.1.1. Protocole et configuration expérimentale

Les expériences ont été réalisées sur trois matériaux végétaux : liège, semoule de blé (SDB) et copeaux de bois de pin (CDB), pour trois classes granulométriques différentes fournis par INRA Montpellier. Les limites inférieure et supérieure des classes granulométriques sont déterminées en fonction de la taille des mailles du tamis utilisé lors de la préparation des échantillons, Les classes granulométriques qui composent les trois matériaux ne sont pas les mêmes (§ II.1.2).

Dans un premier temps, des échantillons de 2 g de particules de liège, de copeaux de bois et de semoule de blé, de chacune de trois classes granulométriques, ont été soumis à des essais de charge couronne, en faisant varier les deux facteurs qui peuvent influencer le processus : la distance entre l'électrode cylindrique et le convoyeur  $d_1$  [mm], et la position de l'électrode couronne par rapport au dispositif d'alimentation,  $d_2$  [mm] (**Figure III-14**). Le but était de déterminer les valeurs de ces facteurs susceptibles d'assurer la meilleure séparation.



**Figure III-14** : Schéma descriptif du séparateur électrostatique multifonctions.

Dans un deuxième temps, des expériences de séparation ont été réalisées sur un mélange comportant en proportions égales (50% - 50%) des copeaux de bois de pin et de semoule de blé, appartenant aux classes granulométriques n° 1 (donne les valeurs entre parenthèses) des deux matières, pour une masse totale de 2 g. Les conditions expérimentales sont données dans le **Tableau III-3**, Elles ont été établies après l'examen des résultats des tests préliminaires, selon la même méthode de travail décrite dans le § III-2.1.1 pour une humidité de  $49\pm 2$  % et une température de  $24\pm 1$ °C, afin d'éliminer toute cause de variabilité du processus de séparation.

**Tableau III-3** : Paramètres opératoires du séparateur électrostatique à convoyeur métallique, utilisé pour le tri des mélanges de matières végétales.

Paramètres	
HT appliquée à l'électrode couronne	20 [kV]
Distance entre l'électrode couronne et le convoyeur	20 [mm]
HT appliquée à l'électrode cylindrique tournante	-20 [kV]
Vitesse de rotation de l'électrode cylindrique	90 [tr/min]
Angle de l'électrode cylindrique	20 [°]
Vitesse du convoyeur métallique	30 [mm/s]

### III-3.1.2. Résultats et interprétations

Le premier facteur étudié a été la position  $d_2$  de l'électrode couronne par rapport au dispositif d'alimentation, La distance  $d_1$  entre l'électrode cylindrique et le convoyeur a été fixée à 25 mm. Le **Tableau III-4** donne, pour chaque classe granulométrique de particules de liège, de copeaux de bois de pin et de semoule de blé, la répartition massique des produits dans les deux boîtes du système collecteur.

Les quantités des copeaux de bois, et de particules de liège récupérées dans le bac B sont plus grandes pour  $d_2 = 1000$  mm par rapport à  $d_2 = 500$  mm, et cela pour les trois classes granulométriques (**Tableau III-4A, III-4C**).

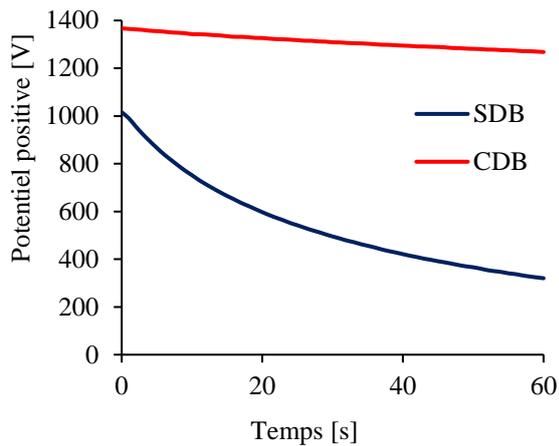
**Tableau III-4** : Distribution massique des trois produits dans les bacs A et B du collecteur de produits, pour deux valeurs de la position  $d_2$  de l'électrode couronne.

<b>A</b>						
<b>Copeaux de bois de pin</b>						
Classes	500 mm			1000 mm		
	Bac A [%]	Bac B [%]	Pertes [%]	Bac A [%]	Bac B [%]	Pertes [%]
1	8,5	91,5	0	3,5	96,5	0
2	15	75,5	9,5	4,5	90,5	5
3	14,5	62	23,5	14,5	67	18,5
<b>B</b>						
<b>Semoule de blé</b>						
Classes	500 mm			1000 mm		
	Bac A [%]	Bac B [%]	Pertes [%]	Bac A [%]	Bac B [%]	Pertes [%]
1	55,5	15	29,5	51	15	34
2	31	31	38	30	36	34
3	20,5	45	34,5	40,5	30,5	29
<b>C</b>						
<b>Liège</b>						
Classes	500 mm			1000 mm		
	Bac A [%]	Bac B [%]	Pertes [%]	Bac A [%]	Bac B [%]	Pertes [%]
1	14,5	61	24,5	4	96	0
2	15	85	0	10	90	0
3	19,5	65	15,5	14,5	75	10,5

En effet, pour  $d_2 = 1000$  mm la zone de charge par effet couronne se trouve plus proche de la zone de séparation, ce qui limite le déchargement des particules en contact avec le convoyeur lié à la terre. La charge de ces deux types de particules, moins conductrices que la semoule de blé, reste suffisamment élevée (voir les courbes de déclin de potentiel électrique de la **Figure III-15**) pour qu'elles puissent être attirées vers l'électrode de polarité opposée.

Pour les particules de semoule de blé (**Tableau III-4B**) le facteur  $d_2$  n'as pas un effet significatif, car elles sont plus conductrices que les autres. Même pour  $d_2 = 1000$  mm, elles perdent très rapidement leur charge, comme le montre la courbe de déclin de potentiel électrique (§ II-3.2) de la **Figure III-15**, et les forces électriques ne sont pas suffisantes pour les détacher de la bande métallique du convoyeur. Ces particules finissent leur parcours sur le convoyeur et sont collectées dans le bac A.

Le deuxième facteur étudié a été la distance  $d_1$  entre l'électrode cylindrique et le convoyeur, en fixant la position de l'électrode couronne à  $d_2 = 1000$  mm. Les résultats donnés sur le **Tableau III-5** montrent que l'effet de la distance  $d_1$  est significatif, car à 40 mm le champ électrique est moins intense, et la force électrique est trop faible pour attirer les copeaux de bois et les particules de liège vers l'électrode cylindrique, d'où les faibles quantités de produits récupérés dans le bac B. Par contre les particules de semoule de blé sont plus nombreuses dans le bac A, car elles sont moins attirées par l'électrode cylindrique.



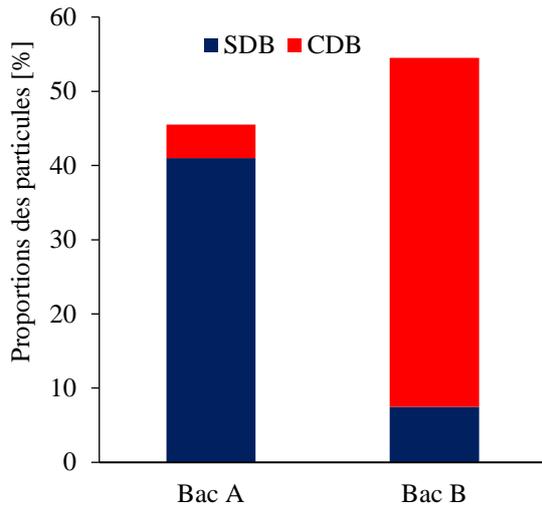
**Figure III-15 :** Courbes de déclin de potentiel à la surface de monocouches de particules de semoule de blé (SDB) et de copeaux de bois (CDB), le potentiel appliquée étant de 2 kV (§ II-3.2).

**Tableau III-5 :** Distribution massique des trois produits dans les bacs A et B du collecteur de produits, pour deux valeurs de la distance  $d_1$  de l'électrode cylindrique tournante.

<b>A</b>	<b>Copeaux de bois de pin</b>					
Classes	25 mm			40 mm		
	Bac A [%]	Bac B [%]	Pertes [%]	Bac A [%]	Bac B [%]	Pertes [%]
1	3,5	96,5	0	5	95	0
2	4,5	90,5	5	19,5	75,5	5
3	14,5	67	18,5	64,5	27	8,5
<b>B</b>	<b>Semoule de blé</b>					
Classes	25 mm			40 mm		
	Bac A [%]	Bac B [%]	Pertes [%]	Bac A [%]	Bac B [%]	Pertes [%]
1	51	15	34	71,5	15	13,5
2	30	36	34	55	21	24
3	40,5	30,5	29	45,5	19,5	35
<b>C</b>	<b>Liège</b>					
Classes	25 mm			40 mm		
	Bac A [%]	Bac B [%]	Pertes [%]	Bac A [%]	Bac B [%]	Pertes [%]
1	4	96	0	9,5	90,5	0
2	10	90	0	25,5	74,5	0
3	14,5	75	10,5	30	60,5	9,5

Le niveau élevé des pertes dans le cas de la semoule de blé s'explique par le fait que ces particules sont légères, elles ont tendance à se disperser sous l'action du champ électrique.

Les résultats d'une expérience de séparation électrostatique d'un mélange 50 % copeaux de bois, 50 % semoule de blé sont donnés sur la **Figure III-16**. Notons que les deux types de particules sont de tailles différentes, une analyse de la pureté des produits récupérés dans les bacs A et B a pu être réalisé, grâce à une tamiseuse à vibrations. Les résultats de la séparation sont jugés excellents : 90,10 % des particules de SDB sont récupérées dans le Bac A et 86,23 % des particules de CDB le sont dans le Bac B.



**Figure III-16** : Résultats de la séparation électrostatique du mélange CDB-SDB, 1ere classe (entre 560  $\mu\text{m}$  et 900  $\mu\text{m}$ ), pour  $d_1 = 40$  mm et  $d_2 = 1000$  mm.

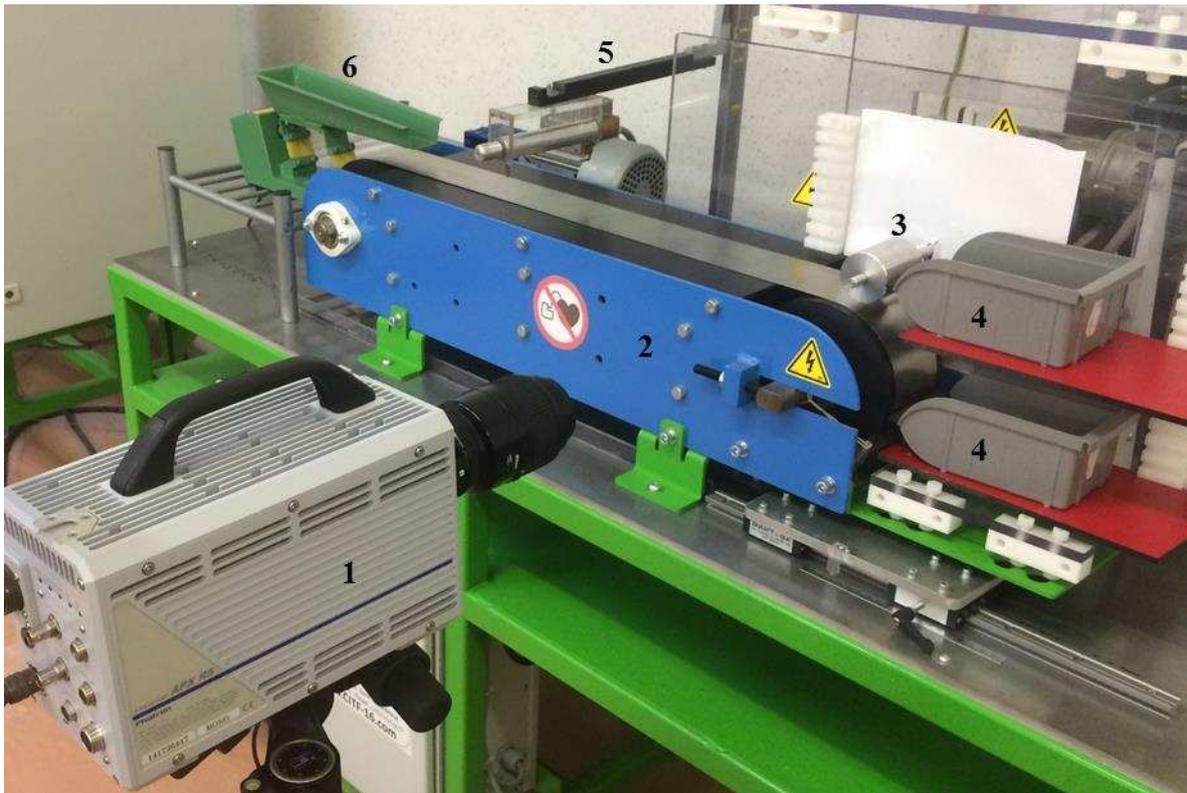
### III-3.1.3. Simulation expérimentale et numérique des trajectoires des CDB

L'étude de la cinématique des particules de CDB dans un séparateur électrostatique multifonctions (**Figure III-17**) est primordiale, les trajectoires de ces particules ont une influence significative sur l'efficacité du procédé. Afin de visualiser expérimentalement les trajectoires des particules de copeaux de bois, une caméra haute vitesse Photron APX-RS a été utilisée (**Figure III-17 a**). Celle-ci fut placée perpendiculairement à la longueur du convoyeur métallique, à une distance d'environ 500 mm de ce dernier.

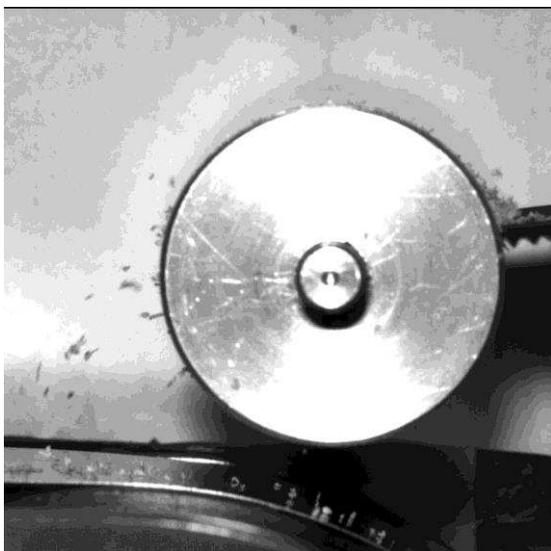
La fréquence d'acquisition de la caméra était fixée à 1000 images par seconde, le temps d'obturation à 1/1000 s, la résolution était de 1024 x 1024 pixels (correspondant à une surface de visualisation de 720 x 720 mm<sup>2</sup>) et la durée d'acquisition était de 6,144 sec. L'exploitation des images (**Figure III-17 b**) ainsi obtenues a été possible grâce au logiciel Photron Fastcam Viewer. À l'aide de ces données des trajectoires expérimentales ont été tracées pour trois particules de copeaux de bois.

Dans le cadre d'une collaboration scientifique avec l'Université de Sidi-Bel-Abbes, Algérie, et l'Université de Caire, Egypte, une étude numérique sur les trajectoires des particules de CDB a été réalisée à l'aide de deux logiciels : MATLAB 7.12 et COMSOL Multiphysics 4.3.

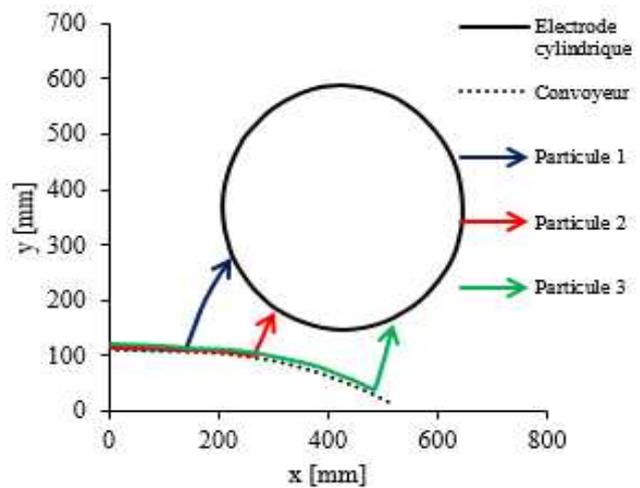
Afin de calculer numériquement les trajectoires des particules de copeaux de bois, il est nécessaire de simuler le champ électrique effectif dans ce type de séparateur. Le champ électrique global a été calculé grâce au logiciel COMSOL Multiphysics 4.3 (**Figure III-18 a**).



(a)



(b)



(c)

**Figure III-17** : Installation expérimentale pour la visualisation des trajectoires des particules de CDB (a), image obtenue par la camera (b), et trajectoires expérimentales de trois particules de copeaux de bois (c) ; 1 : Caméra haute vitesse Photron APX-RS, 2 : Convoyeur métallique, 3 : Electrode cylindrique, 4 : Bacs de collecte, 5 : Electrode couronne, 6 : Goulotte oscillante.

Les paramètres du modelé ont été établies comme suit : (1) la particule est une sphère parfaitement isolante d'un rayon  $r$  [ $\mu\text{m}$ ], et d'une densité  $\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$ ; (2) la particule se charge instantanément à sa valeur maximale [131] ; (3) la distance entre deux particules est suffisamment importante pour qu'elles n'influent pas l'une sur l'autre ; (4) l'espace est homogène et isotrope, de permittivité relative  $\epsilon_r = 7$ ; (5) les effets tribo-électriques sont négligeables, ainsi que la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique. Le programme permettant de simuler les trajectoires des particules fut réalisé sur MATLAB 7.12, avec un pas de temps de 1 ms.

#### a. Particule sur la partie plane du convoyeur

MATLAB 7.12 permet d'extraire les données calculées par COMSOL Multiphysics 4.3, notamment celles sur le champ électrique. Grâce à ce champ électrique, il est possible de déterminer le point de décollement de la particule (c'est-à-dire la position pour laquelle elle se détache du convoyeur métallique) et sa trajectoire dans l'air, après son détachement. Une méthode différentielle fut utilisée pour calculer la trajectoire des particules.

Considérons qu'une particule nécessite une durée  $dt$  pour se déplacer de  $(x_i, y_i)$  à  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  avec une vitesse  $V(x_i, y_i)$  et une accélération  $a(x_i, y_i)$  pour déterminer sa trajectoire. Sur la partie plane du convoyeur, trois forces s'appliquent sur les particules : la force électrique (de Coulomb)  $F_e$ , la force d'image électrique  $F_i$  et la force de gravité  $F_g$ . Pour qu'une particule décolle du convoyeur, il faut que la condition suivante soit satisfaite :

$$F_e > F_i + F_g \quad (\text{III-1})$$

Si la particule décolle sur cette partie du convoyeur métallique, les composantes horizontale (suivant l'axe  $x$ ) et verticale (suivant l'axe  $y$ ) de sa vitesse et de son accélération initiale seront déterminées par :

$$V_x(x_0, y_0) = v_0 \quad (\text{III-2})$$

$$V_y(x_0, y_0) = 0 \quad (\text{III-3})$$

$$a_x(x_0, y_0) = \frac{(Q_m E_x(x_0, y_0))}{m} \quad (\text{III-4})$$

$$a_y(x_0, y_0) = \frac{(Q_m E_y(x_0, y_0))}{m} - g \quad (\text{III-5})$$

où  $v_0$  correspond à la vitesse linéaire du convoyeur [ $\text{m.s}^{-1}$ ],  $Q_m$  étant la charge maximale de la particule [ $\text{C}$ ],  $m$  sa masse [ $\text{kg}$ ],  $g$  la constante de gravité [ $\text{m.s}^{-2}$ ] et  $E_x$  et  $E_y$  respectivement les composantes horizontale et verticale du champ électrique [ $\text{V.m}^{-1}$ ].

**b. Particule sur la partie cylindrique du convoyeur**

Ici, la force centrifuge  $F_c$  doit aussi être prise en compte ainsi que la position angulaire de la particule,  $\theta$ . La condition de décollement devient donc :

$$F_e + F_c > F_i + F_g \cos \theta \quad (\text{III-6})$$

Les composantes de la vitesse et de l'accélération d'une particule deviennent alors :

$$V_x(x_0, y_0) = \omega R \cos \theta \quad (\text{III-7})$$

$$V_y(x_0, y_0) = -\omega R \sin \theta \quad (\text{III-8})$$

$$a_x(x_0, y_0) = \frac{(Q_m E_x(x_0, y_0))}{m} \quad (\text{III-9})$$

$$a_y(x_0, y_0) = \frac{(Q_m E_y(x_0, y_0))}{m} - g \quad (\text{III-10})$$

$\omega$  étant la vitesse de rotation de la poulie du convoyeur métallique et R son rayon.

**c. Particule ayant décollé du convoyeur**

Lorsque la particule n'est plus en contact avec le convoyeur, sa position est donnée par la formule suivante :

$$x_{i+1} = x_i + V_x(x_i, y_i)dt + 0.5a_x(x_i, y_i)dt^2 \quad (\text{III-11})$$

$$y_{i+1} = y_i + V_y(x_i, y_i)dt + 0.5a_y(x_i, y_i)dt^2 \quad (\text{III-12})$$

avec :

$$V_x(x_i, y_i) = V_x(x_{i-1}, y_{i-1}) + a_x(x_{i+1}, y_{i+1})dt \quad (\text{III-13})$$

$$V_y(x_i, y_i) = V_y(x_{i-1}, y_{i-1}) + a_y(x_{i+1}, y_{i+1})dt \quad (\text{III-14})$$

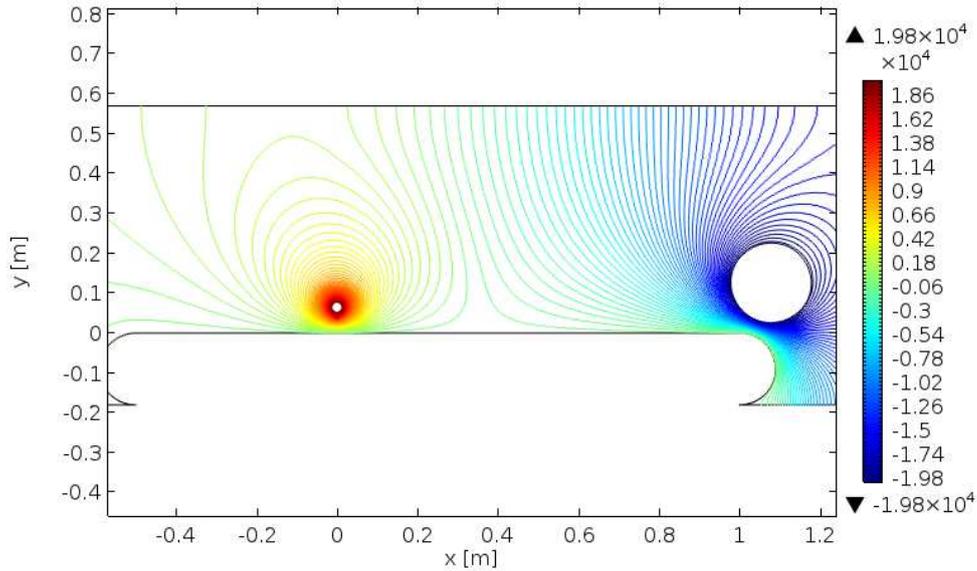
$$a_x(x_i, y_i) = \frac{-6\pi\eta r V_x(x_{i-1}, y_{i-1}) + Q_m E_x(x_{i-1}, y_{i-1})}{m} \quad (\text{III-15})$$

$$a_y(x_i, y_i) = \frac{6\pi\eta r V_y(x_{i-1}, y_{i-1}) + Q_m E_y(x_{i-1}, y_{i-1})}{m} - g \quad (\text{III-16})$$

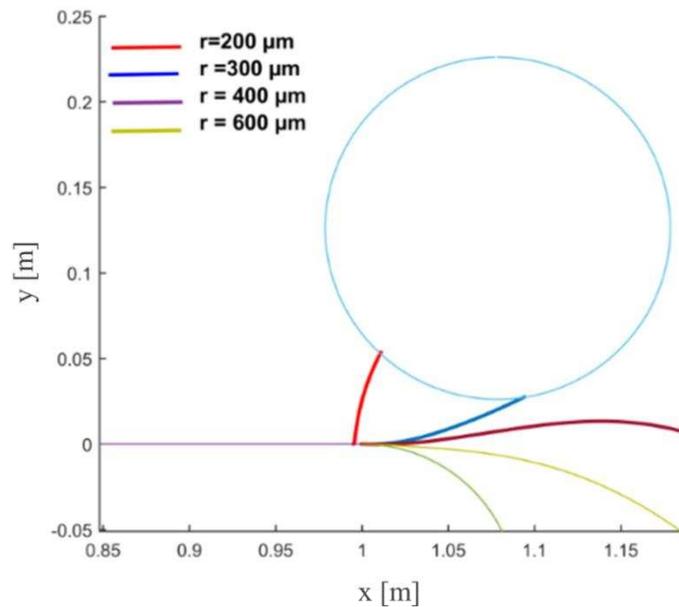
où :  $\eta = 1.81 \times 10^{-5}$  correspond au coefficient de trainé.

Le comportement des particules consécutif à un choc avec l'électrode haute tension n'a pas été envisagé dans cette simulation. Aussi, le calcul s'arrête-t-il si un contact particule-électrode venait se produire.

Une tension de -20 kV appliquée à électrode cylindrique permet d’attirer des particules de CDB pour des rayons  $r$  entre 200  $\mu\text{m}$  et 300  $\mu\text{m}$ , c’est à dire de taille comprise entre 400  $\mu\text{m}$  et 600  $\mu\text{m}$  (**Figure III-18 b**). Au-delà de  $r = 300 \mu\text{m}$ , les particules de CDB tombent dans le bac B (inferieur) du séparateur multifonctions. Cela signifie que les 10 % qui tombaient dans le bac B (**Figure III-16**) avaient une taille supérieure à 600  $\mu\text{m}$  (les particules de la classe 1 des CDB avaient une taille comprise entre 560  $\mu\text{m}$  et 900  $\mu\text{m}$ ).



(a)



(b)

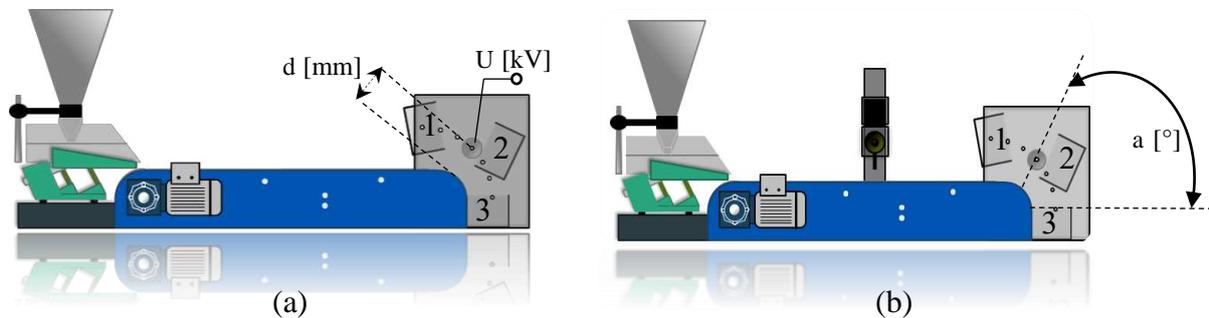
**Figure III-18** : Répartition des lignes équipotentiels dans le modèle (a), Trajectoires des particules isolantes de CDB pour différents rayons.

### III-3.2 Séparation couronne-électrostatique des DEEE micronisés

#### III-3.2.1. Protocole et configuration expérimentale

Pour chaque expérience, un échantillon contenant 0,5 g d'aluminium (Al) et 0,5 g de polystyrène (PS) a été utilisé. Le diamètre moyen des particules du mélange varie entre 63  $\mu\text{m}$  et 125  $\mu\text{m}$ . Selon le principe de fonctionnement décrit dans le § II.2.1, les particules de PS sont récupérées dans la boîte n° 3. Les boîtes n° 1 et n° 2 sont censées contenir principalement des particules d'aluminium. L'étude a été menée selon la méthodologie des plans d'expériences [126-128]. Les données expérimentales sont traitées avec le logiciel MODDE 5.0 [130].

Un premier plan factoriel composite a été réalisé, visant à modéliser et optimiser le procédé de séparation en utilisant uniquement l'induction électrostatique pour la récupération des particules conductrices (**Figure III-19 a**). Le deuxième plan factoriel composite a été effectué en utilisant l'effet couronne pour la charge des particules non-conductrices et en associant l'induction électrostatique pour faciliter la récupération des particules conductrices (**Figure III-19 b**). Il est attendu que l'association des deux mécanismes de charge améliore les résultats de la séparation électrostatique.



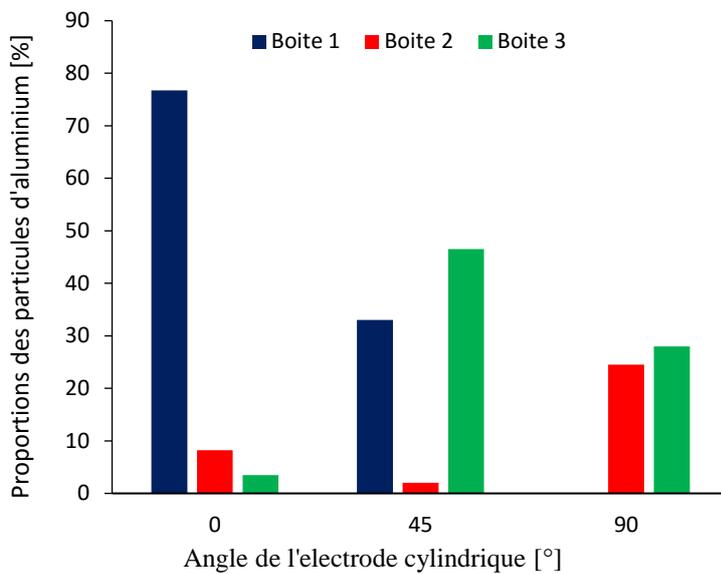
**Figure III-19** : Représentation schématique du séparateur multifonctions utilisant l'induction électrostatique (a) et la décharge couronne (b) pour la charge d'un mélange de particules d'aluminium et PS.

Plusieurs expériences préliminaires ont été effectuées, avec des échantillons de 1 g d'Al, sans l'utilisation de la décharge couronne, afin d'établir le domaine de variation des trois variables de contrôle qui sont susceptibles d'affecter les performances du processus de séparation électrostatique : l'angle de l'électrode cylindrique tournante  $\alpha$  [°] ; la distance  $d$  [mm] entre cette électrode et le convoyeur ; la haute tension  $U$  [kV] appliquée à l'électrode cylindrique tournante.

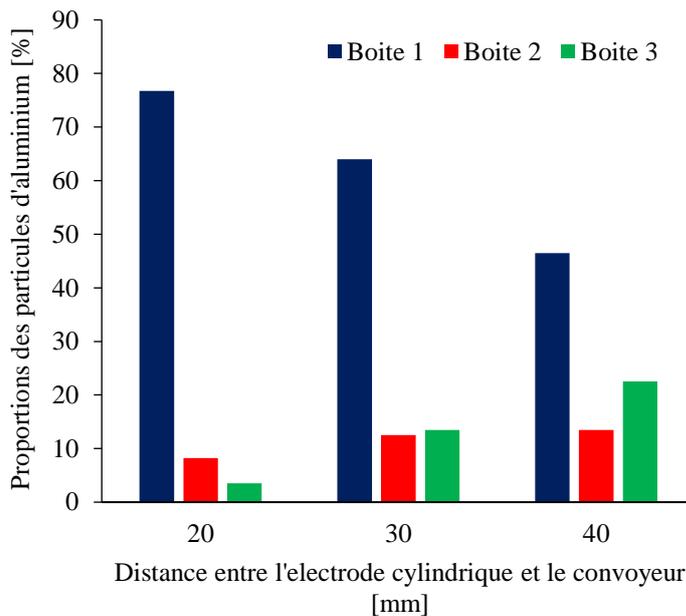
Ces expériences ont été réalisées dans des conditions climatiques stables (humidité relative : 48 à 55 % ; température : 21° C à 23° C, selon le protocole expérimental défini dans le § III-2.1.1. La vitesse linéaire du convoyeur métallique a été fixée à 1 m/min et la vitesse de rotation de l'électrique tournante à 10 tr/min.

### III-3.2.2. Domaines de variation des variables de contrôle ( $U$ , $\alpha$ , $d$ )

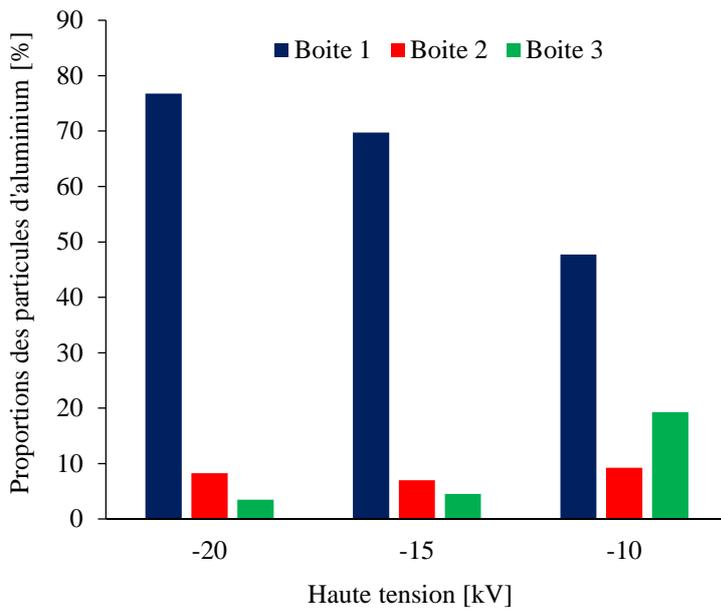
Les **Figures III-20**, **III-21** et **III-22** illustrent les résultats des expériences préliminaires effectuées en utilisant uniquement l'induction électrostatique pour la récupération des particules d'Al.



**Figure III-20:** Répartition des particules d'aluminium dans les trois boîtes, en fonction de l'angle  $\alpha$  de l'électrode cylindrique tournante  $\alpha$ , pour  $U = 20$  kV ;  $d = 20$  mm.



**Figure III-21 :** Répartition des particules d'aluminium dans les trois boîtes, en fonction de la distance  $d$  entre l'électrode cylindrique tournante et le convoyeur, pour  $U = 20$  kV ;  $\alpha = 0^\circ$ .



**Figures III-22:** Répartition des particules d'aluminium dans les trois boîtes, en fonction de la la haute tension U, pour d = 20 mm ;  $\alpha = 0^\circ$ .

Lorsque l'électrode cylindrique est positionnée à  $\alpha = 0^\circ$ , presque 80 % des particules d'aluminium sont récupérées dans la boîte n° 1 et environ 10 % dans la boîte n° 2 (**Figure III-20**). Pour  $\alpha = 45^\circ$  et  $\alpha = 90^\circ$ , la majorité des particules d'aluminium se trouvent dans la boîte n° 3, parce que dans le cas présent, la force gravitationnelle dépasse la force de Coulomb. Les pertes dans ce cas sont d'environ 47 %, cela peut s'expliquer par un mauvais positionnement des collecteurs, car les particules ont tendance de tomber à l'extérieur du système de collecte.

L'augmentation de la distance d entre l'électrode cylindrique tournante et le convoyeur est accompagnée d'une diminution de l'intensité du champ électrique et donc une réduction de la quantité d'aluminium récupéré dans la boîte n° 1 (**Figure III-21**). En réduisant la haute tension U de 20 kV à 10 kV (**Figure III-22**), le pourcentage de particules d'aluminium collectées dans la boîte n° 1 diminue d'environ 80 % à moins de 50 %. L'augmentation de U serait bénéfique au processus de séparation, mais est limitée par le risque d'apparition des étincelles entre les deux électrodes.

Après ces observations, les plages de variation de ces trois variables de contrôle sont présentées dans le **Tableau III-6**.

**Tableau III-6 :** Domaine de variation des variables de contrôle.

Variable de contrôle	Minimum	Centre	Maximum
Haute tension U [kV]	-18	-20	-22
Distance d [mm]	20	25	30
Angle a [°]	0	15	30

### III-3.2.3. Expériences de séparation par induction électrostatique

Les résultats des 17 expériences du plan factoriel composite réalisées sans la décharge de couronne sont présentés dans **Tableau III-7**.

Les modèles mathématiques des réponses de  $m_{Al}$  ( $R^2 = 99,6 \%$  et  $Q^2 = 94 \%$ ) et de  $m_{PS}$  ( $R^2 = 97,6 \%$  et  $Q^2 = 87,3$ ) étaient comme suit :

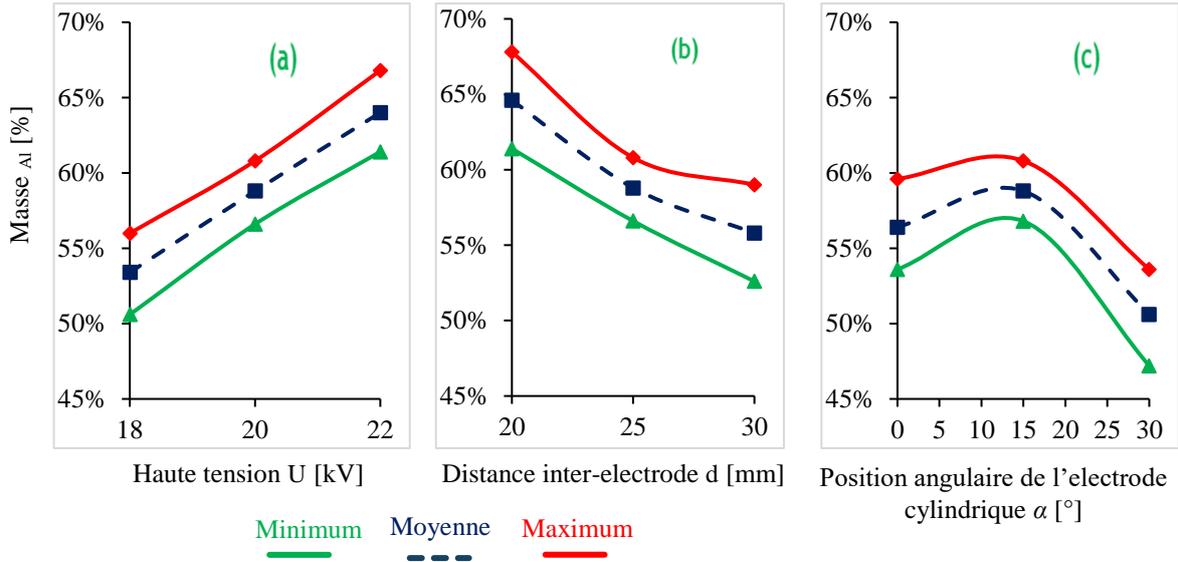
$$m_{Al} = 0,32 + 0,02 U - 0,05 d - 0,04 \alpha + 0,01 U^2 - 0,02 \alpha^2 - 0,01 U*d - 0,02 U*\alpha - 0,01 d*\alpha \quad (III-17)$$

$$m_{PS} = 0,55 - 0,01 U + 0,03 d - 0,01 \alpha + 0,04 U^2 + 0,01 \alpha^2 + 0,01 d*\alpha \quad (III-18)$$

**Tableau III-7** : Résultats de la séparation électrostatique en utilisant un plan factoriel composite.

N°	U [kV]	d [mm]	a [°]	Al [g]	PS [g]	Pertes [g]
1	18	20	0	0,34	0,58	0,08
2	22	20	0	0,39	0,56	0,05
3	18	30	0	0,24	0,64	0,12
4	22	30	0	0,33	0,58	0,09
5	18	20	30	0,31	0,54	0,15
6	22	20	30	0,35	0,52	0,13
7	18	30	30	0,28	0,63	0,09
8	22	30	30	0,2	0,6	0,2
9	18	25	15	0,31	0,6	0,09
10	22	25	15	0,35	0,54	0,11
11	20	20	15	0,37	0,57	0,06
12	20	30	15	0,26	0,63	0,11
13	20	25	0	0,33	0,55	0,12
14	20	25	30	0,26	0,54	0,2
15	20	25	15	0,32	0,55	0,13
16	20	25	15	0,32	0,54	0,14
17	20	25	15	0,31	0,55	0,14

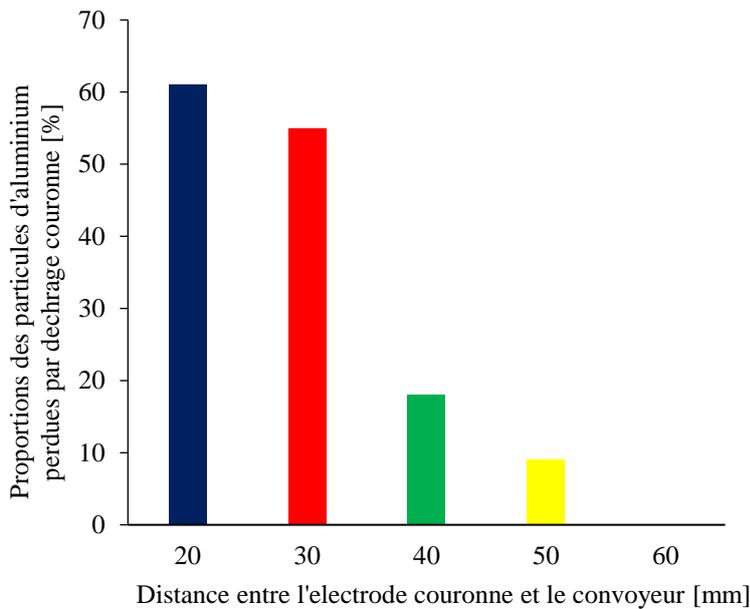
Les modèles quadratiques déduits de ces expériences ont permis la prédiction des masses des particules collectées d'Al et de PS dans diverses conditions de fonctionnement (**Figure III-23**). Les meilleures performances ont été obtenues à :  $U = 22$  kV,  $d = 21,5$  mm et  $\alpha = 12^\circ$ , pour lesquelles les masses prédites des matériaux ont été de :  $m_{Al} = 0,38$  g ;  $m_{PS} = 0,54$  g. Ces prédictions ont été confirmées par une expérience réalisée dans ces conditions optimales :  $m_{Al} = 0,39$  g ;  $m_{PS} = 0,56$  g. La pureté de l'aluminium récupéré a été estimée par un colorimètre à  $92 \pm 2 \%$  (§ II.3.3).



**Figure III-23 :** MODDE 5.0-prédit la variation des masses récupérées  $M_{Al}$  d'aluminium, en fonction de la haute tension  $U$  [kV] (a), la position angulaire  $\alpha$  [°] de l'électrode cylindrique tournante (b) et la distance inter-électrode  $d$  [mm] (c). Les courbes inférieures et supérieures correspondent à l'intervalle de niveau de confiance de 95 %. Des courbes similaires ont été obtenues pour le PS.

### III-3.2.4. Expériences de séparation couronne-électrostatique

Pour toutes ces expériences, l'électrode couronne se trouvait à  $h = 60$  mm au-dessus du convoyeur et alimentée par une alimentation en haute tension à  $U = -20$  kV, afin de limiter les effets de vent électrique (**Figure III-24**).



**Figure III-24 :** Proportions de perte des particules d'aluminium dues au vent ionique, en fonction de la distance  $h$  entre l'électrode couronne et le convoyeur, pour  $U = -20$  kV.

Les résultats des 17 expériences du plan factoriel composite réalisées par la décharge couronne sont présentés dans le **Tableau III-8**.

Les modèles mathématiques des réponses de  $m_{Al}$  ( $R^2 = 97.3 \%$ , et  $Q^2 = 88.2 \%$ ) et de  $m_{PS}$  ( $R^2 = 98.1 \%$  et  $Q^2 = 87.4 \%$ ) étaient comme suit :

$$m_{Al} = 0,29 + 0,03 U - 0,02 d - 0,02 \alpha - 0,03 \alpha^2 + 0,02 U*d \quad (III-19)$$

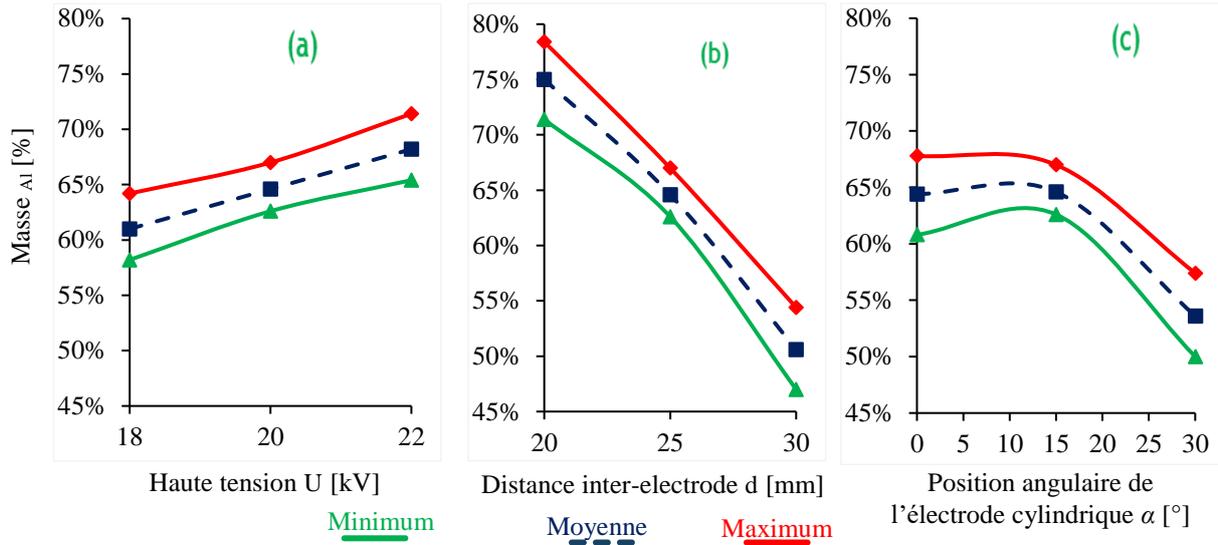
$$m_{PS} = 0,66 - 0,04 U - 0,03 d - 0,01 U^2 - 0,05 d^2 + 0,03 \alpha^2 - 0,02 U*d + 0,01 d*\alpha \quad (III-20)$$

**Tableau III-8** : Résultats de la séparation couronne- électrostatique en utilisant un plan factoriel composite.

N°	U [kV]	d [mm]	a [°]	Al [g]	PS [g]	Pertes [g]
1	18	20	0	0,31	0,64	0,05
2	22	20	0	0,32	0,59	0,09
3	18	30	0	0,22	0,71	0,07
4	22	30	0	0,32	0,61	0,07
5	18	20	30	0,28	0,61	0,11
6	22	20	30	0,28	0,59	0,13
7	18	30	30	0,19	0,74	0,07
8	22	30	30	0,28	0,62	0,1
9	18	25	15	0,26	0,68	0,06
10	22	25	15	0,33	0,61	0,06
11	20	20	15	0,31	0,57	0,12
12	20	30	15	0,27	0,65	0,08
13	20	25	0	0,26	0,69	0,05
14	20	25	30	0,25	0,69	0,06
15	20	25	15	0,31	0,66	0,03
16	20	25	15	0,29	0,68	0,03
17	20	25	15	0,3	0,67	0,03

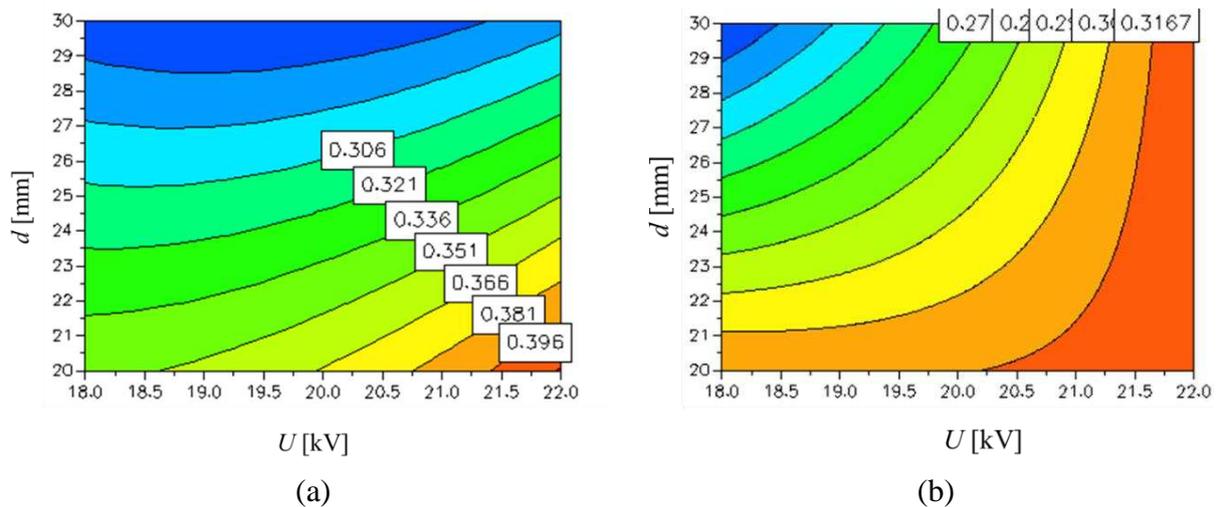
Les modèles quadratiques déduits de ces expériences ont permis la prédiction des masses des particules collectées d'Al et PS de dans diverses conditions de fonctionnement (**Figure III-25**). Les meilleures performances ont été obtenues à :  $U = 22$  kV,  $d = 20.0$  mm et  $\alpha = 15^\circ$ , pour lesquelles les masses prédites collectées sont :  $m_{Al} = 0,33$  g ;  $m_{PS} = 0,56$  g. Une expérience a été réalisée dans ces conditions optimales afin de confirmer les pertes de MODDE 5.0 [130] :  $m_{Al} = 0,35$  g ;  $m_{PS} = 0,57$  g. La pureté de l'aluminium récupéré a été estimée par une méthode colorimétrique à  $98 \pm 2 \%$ .

Les valeurs optimales correspondent à la limite supérieure de la haute tension U et à la plus courte distance entre électrodes d, qui produisent la valeur la plus élevée du champ électrique. Avec l'électrode à  $\alpha = 15^\circ$ , la résultante des forces électriques et mécaniques favorise un détachement précoce des particules conductrices de la surface du convoyeur.



**Figure III-25 :** MODDE 5.0-prédit la variation des masses récupérées M d'aluminium, en fonction de la haute tension U [kV] (a), la position angulaire  $\alpha$  [°] de l'électrode cylindrique tournante (b) et la distance inter-électrode d [mm] (c). Les courbes inférieures et supérieures correspondent à l'intervalle de niveau de confiance de 95 %, Des courbes similaires ont été obtenues pour le PS.

Dans des conditions d'exploitation semblables, la masse de l'aluminium collectée dans les boites n° 1 et n° 2 a été plus faible dans le cas où la décharge couronne a été utilisée (**Figure III-26**).



**Figure III- 26 :** Courbes iso-critères exprimant la masse de l'aluminium récupérée par induction électrostatique (a) et décharge couronne (b) comme fonction de distance entre de l'électrode cylindrique tournante et le convoyeur métallique d [mm] et de la haute tension appliquée à cette électrode U [kV].

Cela peut s'expliquer par le fait que les particules non-conductrices ont été chargées par l'effet couronne, restent collées à la surface du convoyeur et polluent dans un moindre degré les particules d'aluminium. Ce qui signifie que la pureté des particules d'aluminium collectées dans les boîtes n° 1 et n° 2 augmente dans le cas où l'effet couronne a été utilisé. Toutefois, la masse des particules conductrices n'a jamais dépassé 0,4 g, puisque certaines d'entre elles restent fortement coller à la surface du convoyeur par les forces mécaniques d'adhésion où sont dispersées par le vent ionique. Ces particules conductrices polluent le produit non-conducteur, dont la masse est souvent supérieure à 0,6 g, ce qui signifie que sa pureté est inférieure à 80 %.

### Conclusions

1. Le séparateur électrostatique à électrode-convoyeur multifonctions, est une installation multifonctionnelle. Elle permet d'étudier la faisabilité de la séparation électrostatique d'une gamme très large de mélanges de matériaux pulvérulents d'intérêt pour l'industrie agro-alimentaire et l'industrie du recyclage des déchets, en utilisant la décharge couronne et/ou l'induction électrostatique comme mécanisme de charge.
2. Dans le cas des mélanges dont les propriétés électriques ne sont pas connues par avance, il est conseillé de commencer par des essais de séparation en utilisant l'induction électrostatique. Ceux-ci sont les plus simples à mettre en œuvre et permettent aussi d'orienter les expériences vers une séparation couronne-électrostatique, si une partie des particules semblent être moins conductrices que les autres ou si les performances sont en deçà des attentes.
3. Compte tenu du fait que la séparation électrostatique est un processus multifactoriel, la méthodologie des plans d'expériences pour surfaces de réponse (plan factoriel composite) se révèle opportun l'identification du point de fonctionnement optimal.
4. Vu les propriétés électriques du ciment et de la paille, le mécanisme d'induction électrostatique s'impose comme solution pour charger ces particules et parvenir à les séparer. L'analyse des résultats obtenus lors de cette séparation a permis de constater que les particules de paille étaient plus conductrices que celles du ciment. Toutefois, étant donné que la paille est un matériau hygroscopique et que la majorité de ces expériences a été réalisée à un taux d'humidité élevé d'environ 75%, il serait préférable de procéder à quelques essais supplémentaires à basse humidité, avant de conclure sur ce procédé de séparation électrostatique.

5. Un plan d'expérience factoriel composite doit être effectué afin d'établir rigoureusement les conditions de fonctionnement optimales du séparateur multifonctions pour le mélange de particules d'aluminium et d'ABS.
6. La décharge couronne s'impose comme mécanisme physique de choix pour charger les particules de CDB et parvenir à les séparer. L'analyse des résultats obtenus lors de cette séparation et les courbes de déclin de potentiel confirment le fait que les particules de liège et de copeaux de bois sont moins conductrices que celles de semoule de blé. La distance entre l'électrode cylindrique et le convoyeur, ainsi que la position de l'électrode couronne par rapport au dispositif d'alimentation ont des effets significatifs sur le procédé de séparation.
7. La modélisation numérique de la trajectoire des particules de CDB dans un dispositif de séparation électrostatique nécessite impérativement la connaissance du champ électrique qui représente le cœur du processus de séparation. Cela ne peut se faire qu'avec l'outil numérique.
8. Près de 70 % des particules conductrices contenues dans le mélange Al-PS peuvent être obtenues avec une pureté supérieure à 96 %, en utilisant le procédé de séparation couronne-électrostatique. La récupération du PS est supérieure à 95 %, mais sa pureté est inférieure à 80 %. La décharge couronne améliore l'issue du processus de séparation électrostatique, plus précisément la pureté du produit conducteur (Al). En effet, elle permet de charger les particules non conductrices (PS) qui restent coller à la surface du convoyeur métallique.

# Chapitre IV

## PROCEDES DE SEPARATION TRIBO-ELECTROSTATIQUES

La charge électrique des mélanges pulvérulents de matériaux plastiques à séparer peut-être produite par le mécanisme physique tribo-électrique [48], comportant un transfert d'électrons, d'ions ou de matière à l'impact et/ou au frottement entre les particules ou entre celles-ci et les parois de dispositifs dédiés [132-138].

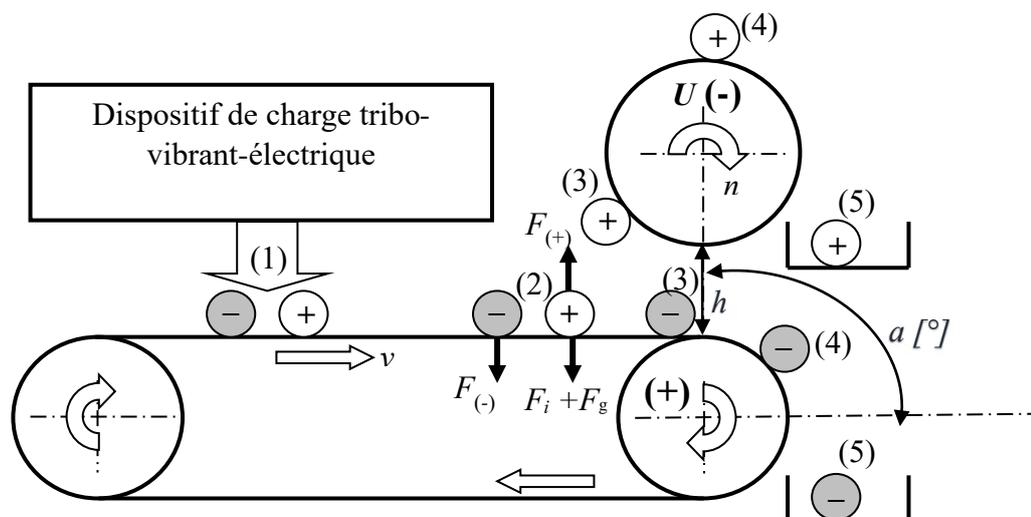
Deux installations différentes ont été utilisées pour l'étude de la séparation tribo-électrostatique. La première est un séparateur électrostatique à convoyeur métallique. L'étude a porté sur deux types de mélanges de matériaux isolants granulaires, provenant des DEEE, ABS-PS et ABS-PC, fournis par la société APR2, et qui ont été chargés dans un dispositif de type lit vibrant. Les résultats de cette séparation tribo-vibro-électrostatique sont présentés dans le § IV-1.

La seconde installation est un séparateur électrostatique à deux électrodes-disques métalliques tournantes. L'étude sur la séparation tribo-aéro-électrostatique réalisée sur cette installation fait l'objet du § IV-2. Elle a conduit à l'évaluation des effets de plusieurs facteurs qui pourraient déterminer l'efficacité d'un processus de charge de la même classe de mélanges granulaires dans un dispositif de type lit fluidisé, en présence d'un champ électrique intense.

### IV-1. Séparation tribo-vibro-électrostatique

Une des solutions possibles pour le tri des matériaux isolants provenant de déchets granulaires d'équipements électriques et électroniques est la séparation tribo-vibro-électrostatique. Il s'agit d'utiliser, en un premier temps, un lit vibrant pour la charge tribo-électrique des particules isolantes. Les phases du processus de tri, réalisé sur le séparateur électrostatique à électrode-convoyeur métallique (§ II-2.1) peuvent être décrites en relation avec la **Figure IV-1**, comme suit :

- (1) Les particules caractérisées par des faibles conductivités et portant des charges de polarités différentes, acquises dans un dispositif à vibrations qui n'est pas fourni avec cette installation, sont déposées en mono couche sur la surface de la bande transporteuse (électrode liée à la terre).
- (2) Arrivées dans la zone de champ électrique intense, les particules chargées positivement (A) se détachent de la bande transporteuse dès que la force de Coulomb,  $F_C$ , proportionnelle à l'intensité du champ électrique  $E$  et orientée vers l'électrode de polarité opposée, devient supérieure à la somme des forces d'image électrique et de la pesanteur,  $F_i + F_g$ . Le champ électrique s'intensifiant progressivement vers l'extrémité de la bande transporteuse, où la distance entre les deux électrodes est la plus faible, les particules mieux chargées vont se détacher avant les autres. Le détachement des particules peut être facilité en intensifiant le champ électrique  $E$  jusqu'à la limite de la rigidité diélectrique de l'air, soit en augmentant (en valeur absolue) la tension  $U$  appliquée à l'électrode cylindrique tournante, soit en diminuant l'espace  $h$  entre les électrodes.



**Figure IV-1** : Cinq phases du processus de séparation tribo-électrostatique.

- (3) Les deux classes de particules sont fixées par les forces électriques et mécaniques à la surface des électrodes de polarités opposées, l'électrode cylindrique tournante et la bande transporteuse, respectivement.
- (4) Les électrodes entraînent les particules dans leur mouvement, jusqu'au moment où des racleurs les détachent de leurs surfaces.
- (5) Les particules sont récupérées dans deux compartiments du collecteur des produits.

La faible conductivité des particules est une condition essentielle pour le bon fonctionnement du séparateur électrostatique. Si, dans la situation représentée sur la **Figure IV-1**, les particules chargées positivement ne sont pas assez isolantes, elles perdent une partie de la charge en contact avec la bande métallique pendant le transfert vers la zone de champ électrique intense et la force du Coulomb risque de ne pas être suffisante pour les détacher. D'autre part, si les particules chargées négativement sont trop conductrices, elles pourraient aussi perdre leur charge initiale et changer de polarité, par induction électrostatique. En fonction du niveau de cette charge, elles pourraient être même attirées par l'électrode tournante, rendant la séparation impossible.

#### **IV-1.1. Application à la séparation d'un mélange d'ABS et de PC**

L'ABS et le PC sont deux matériaux qui se trouvent souvent mélangés dans les DEEE. Le but de l'étude expérimentale décrite dans les paragraphes suivants a été de valider la faisabilité de la séparation de ces matériaux par un procédé tribo-vibro-électrostatique. La mise en œuvre de la méthodologie des plans d'expériences a conduit à la détermination des facteurs influents et à l'identification du point optimal de fonctionnement d'un tel procédé.

##### **IV-1.1.1. Protocole expérimental**

Sur le séparateur électrostatique multifonctions, décrit dans le § II-2.1 et schématisé sur la **Figure IV-1**, plusieurs séries d'expériences ont été réalisées, en utilisant l'effet triboélectrique pour la charge d'un mélange de particules provenant de DEEE. Pour chaque expérience, un échantillon d'un poids total de 1 g a été utilisé, il était constitué en proportions égales en masse (50 % – 50 %) de particules d'ABS et de PC, de diamètre moyen variant entre 125  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$  (§ II-1.2). Les expériences ont toutes été réalisées sur la même machine, par le même opérateur, selon la même méthode de travail décrite dans le § III-2.1.1, dans les mêmes conditions ambiantes (température :  $18 \pm 2^\circ\text{C}$  ; humidité relative :  $56 \pm 4\%$ ), afin d'éliminer toute cause de variabilité du processus de séparation.

Les conditions expérimentales (**Tableau IV-1**) ont été établies après l'examen des résultats de plusieurs tests préliminaires, non-présentés dans ce mémoire.

**Tableau IV-1** : Paramètres opératoires du séparateur électrostatique multifonctions.

Paramètres	
Haute tension appliquée à l'électrode cylindrique U	- 20 [kV]
Vitesse de rotation de l'électrode cylindrique tournante n	10 [tr/min]
Vitesse linéaire du convoyeur métallique v	1 [m/min]
Distance entre l'électrode cylindrique tournante et le convoyeur d	15 [mm]

La méthodologie des plans des expériences, utilisée dans le but de modéliser et d'optimiser le procédé de séparation, comporte typiquement deux étapes : criblage et optimisation. Utilisées dans les phases préliminaires des recherches sur une nouvelle application, les expériences de criblage permettent d'évaluer les effets des différentes variables de contrôle du procédé. Pour cette étude, un plan d'expériences à deux facteurs à deux niveaux (plan factoriel complet  $2^2$ ) a été réalisé pour répondre à cet objectif. Les deux facteurs choisis étaient :

- $x_1 = \alpha$  [°] : la position angulaire de l'électrode cylindrique tournante.
- $x_2 = t$  [min] : la durée du processus de charge tribo-électrique, réalisé dans un dispositif à vibrations (Retsch, modèle AS 200 basic) présenté sur la **Figure IV-2**.

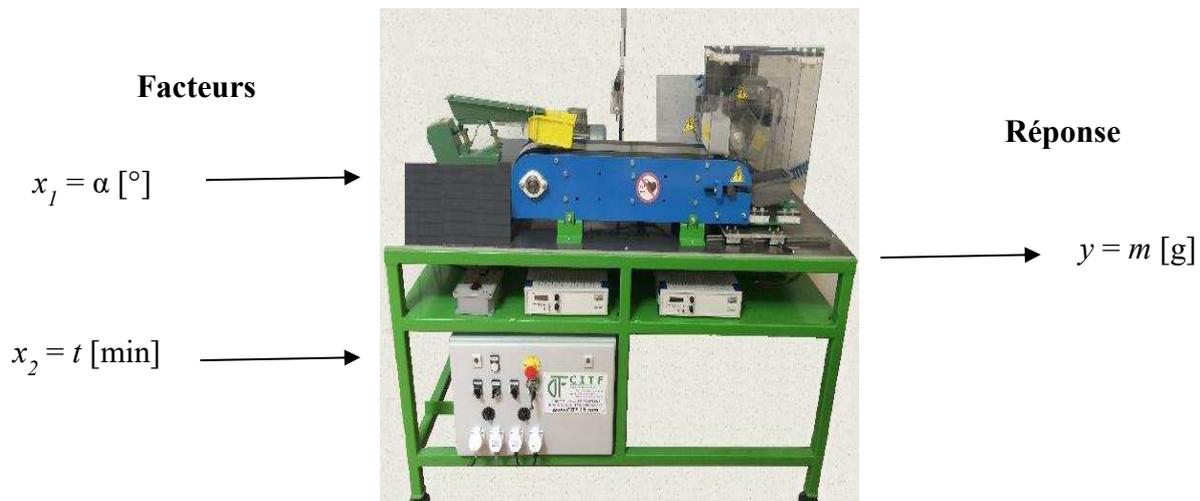
Suite à une série d'expériences préliminaires, les plages de variation étudiées de ces deux paramètres ont été établies comme suit :

$$15^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \text{ et } 4 \text{ min} \leq t \leq 6 \text{ min.}$$



**Figure IV-2** : Dispositif de charge par vibrations « Tamiseuse » ; 1 : Plaque de base de la tamiseuse (amplitude des vibrations : 2 mm) ; 2 : Récipient en acier sur lequel la matière est préalablement déposée ; 3 : Couvercle en acier.

La caractérisation du processus de séparation peut être faite en mesurant la masse de produit collecté dans chacun des bacs de récupérations grâce à une balance électronique (KERN, modèle 440-33N) d'une précision de 0,01 g. Pour cette étude, la masse  $m$  [g] de PC, chargé positivement et collecté dans le bac supérieur, a été choisie comme réponse  $y$  du processus (**Figure IV-3**). Ce produit a une pureté qui atteint pratiquement 100%. Le produit ABS, chargé négativement et collecté dans le bac inférieur, contient aussi des particules de PC insuffisamment chargées pour être attirées par l'électrode cylindrique rotatif de polarité opposée (négative).



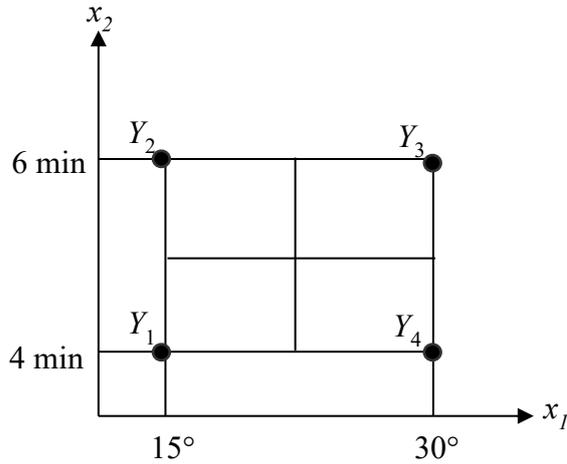
**Figure IV-3** : Les facteurs (les variables d'entrées) et la réponse (la variable de sortie) du processus de séparation électrostatique faisant l'objet de l'étude.

Les données expérimentales du plan factoriel complet  $2^2$  ont été soumises à une analyse statistique, afin de vérifier : (1) l'homogénéité de la variance de l'erreur expérimentale, en effectuant le test C de Cochran ; (2) la signification des effets, en utilisant le test de Student ; (3) la validité du modèle, en appliquant le test de Fischer.

Un plan factoriel composite a été réalisé par la suite pour trouver les valeurs des facteurs qui optimisent la réponse  $y = m$  [g] du processus.

#### IV-1.1.2. Plan de criblage

Les quatre expériences du plan factoriel complet  $2^2$  (**Figure IV-4**) ont été réalisées deux fois ( $r = 2$ ). Les résultats sont présentés dans le **Tableau IV-2**.



**Figure IV-4 :** Définition du plan d'expériences deux facteurs à deux niveaux  $2^2$ , les effets des facteurs  $x_1$  et  $x_2$  sont calculés grâce aux mesures réalisées dans l'ensemble des quatre expériences  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ .

**Tableau IV-2 :** Résultats d'un plan d'expériences  $2^2$  (deux facteurs à deux niveaux).

Essais k	Facteurs		Masse [g]	Réponse $Y_k$	Variance expérimentale $s_{yk}^2$
	Position $x_1$	Durée $x_2$			
1.a	-1	-1	0,30	0,31	0,0002
1.b	-1	-1	0,32		
2.a	-1	+1	0,39	0,40	0,0002
2.b	-1	+1	0,41		
3.a	+1	-1	0,09	0,09	0
3.b	+1	-1	0,09		
4.a	+1	+1	0,09	0,11	0,0008
4.b	+1	+1	0,13		
<b>Niveau -1</b>	<b>15°</b>	<b>4 min</b>			
<b>Niveau +1</b>	<b>30°</b>	<b>6 min</b>			

La moyenne des réponses au niveau inférieur (-1) du facteur 1 est :

$$\frac{(Y_1 + Y_2)}{2} = \frac{(0,31 + 0,40)}{2} = 0,355 \text{ g} \tag{IV-1}$$

Au niveau supérieur (+1) du facteur 1 la moyenne des réponses est :

$$\frac{(Y_3 + Y_4)}{2} = \frac{(0,09 + 0,11)}{2} = 0,1 \text{ g} \tag{IV-2}$$

L'effet moyen du facteur  $x_1$  (position  $\alpha$  de l'électrode cylindrique tournante) a été calculé selon la définition comme la moitié de la différence entre la moyenne des réponses au niveau +1 et la moyenne des réponses au niveau -1 (**Figure IV-5**) :

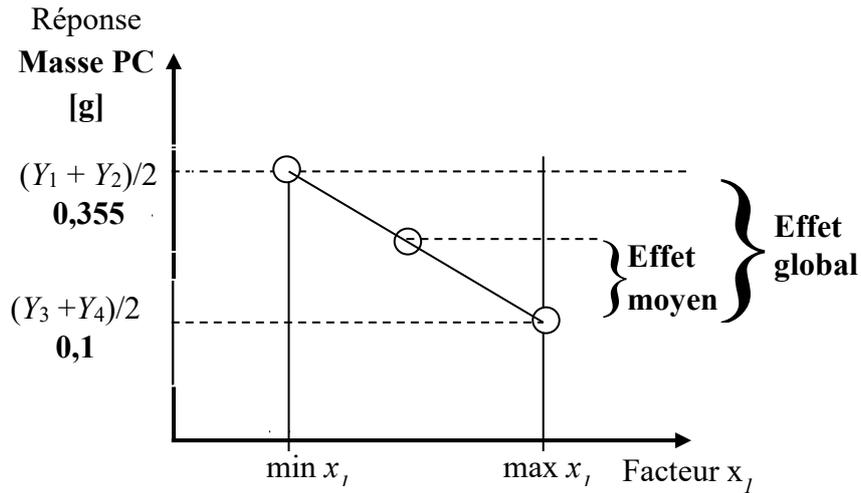


Figure IV-5 : Définition de l'effet global et de l'effet moyen du facteur  $x_1$ .

$$E_1 = \frac{\left[ \frac{(Y_3 + Y_4)}{2} - \frac{(Y_1 + Y_2)}{2} \right]}{2} = \frac{(0,1 - 0,355)}{2} = -0,1275 \text{ g} \quad (\text{IV-3})$$

Le calcul de l'effet du facteur  $x_2$  (la durée  $t$  du processus de charge tribo-électrique) a été réalisé de la même façon :  $E_2 = + 0,0275 \text{ g}$ .

Deux conclusions ont été dégagées de ces calculs :

- L'augmentation de l'angle d'inclinaison de l'électrode diminue la quantité du produit PC récupérée

- Plus la durée de charge est longue, plus la quantité récupérée est grande.

La moyenne des quatre réponses vaut :

$$M = \frac{(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)}{4} = 0,2275 \text{ g} \quad (\text{IV-4})$$

La masse du produit PC collectée dans le bac supérieur représente la réponse  $y$  du processus (**Figure IV-3**). Sous sa forme mathématique, la réponse  $y$  est une fonction de deux variables ( $\alpha$ ,  $t$ ). En analysant la signification des coefficients  $E_1$ ,  $E_2$  et  $M$ , la réponse  $y$  a été exprimée comme étant un polynôme de premier degré :

$$y = f(x_i) = 0,2275 - 0,1275 x_1 + 0,0275 x_2 \quad (\text{IV-5})$$

La relation (IV-5) pourrait être utilisée pour prédire la quantité de produit PC obtenue à des valeurs imposées de la position de l'électrode  $\alpha$  et de la durée de charge  $t$ . Au point central du plan d'expériences,  $x_1 = 0$  ( $\alpha = 22,5^\circ$ ) et  $x_2 = 0$  ( $t = 5$  min), la valeur prédite de la réponse est  $y = 0,2275$  g. Des expériences réalisées dans ces conditions ( $\alpha = 22,5^\circ$  ;  $t = 5$  min) n'ont pas confirmé ces prédictions, la masse moyenne de PC collectée n'étant que de 0,17 g. Ceci signifie que le modèle linéaire ne reflète pas bien le comportement de ce processus. Afin de répondre à la question « Est-ce que ce modèle linéaire prédit fidèlement la réalité ? », une analyse statistique des données expérimentales du plan factoriel complet a été réalisée, en s'appuyant sur les tests de Cochran, de Student et de Fischer.

### IV-1.1.3. Analyse statistique des données expérimentales

#### a. Homogénéité des erreurs expérimentales : Test de Cochran

L'homogénéité des variances des erreurs expérimentales a été analysée avec le test C de Cochran, dont le but était de vérifier l'inexistence des valeurs aberrantes, qui pourraient entacher les conclusions des calculs. Selon Cochran, il faut évaluer le rapport entre la valeur la plus élevée des variances des erreurs expérimentales de chaque ligne  $k$  du plan d'expérience, et la somme de ces variances pour les  $N$  lignes du plan :

$$C_{\max} = \frac{\max(s_{yk}^2)}{\sum_{k=1}^N s_{yk}^2} = \frac{0,0008}{(0,0002 + 0,0002 + 0,0 + 0,0008)} = 0,67 \quad (\text{IV-6})$$

Les variances des erreurs expérimentales sont homogènes si :

$$C_{\max} < C_T \quad (\text{IV-7})$$

$C_T$  étant lue dans la table de Cochran (**Annexe 1**).

$$C_T((r-1), N) = 0,906 \Rightarrow C_{\max} < C_T \quad (\text{IV-8})$$

Les variances sont homogènes, ce qui signifie qu'il n'y a pas de valeur aberrante et, donc les expériences ne sont pas entachées d'erreurs inacceptables.

#### b. Signification des effets : Test de Student

L'effet d'un facteur  $E$  est significatif si ce dernier est très grand par rapport à l'erreur  $\Delta E$ .

$$E \gg \Delta E \quad (\text{IV-9})$$

Pour estimer cette erreur, il faut calculer la variance expérimentale  $s_y^2$  et la variance sur un effet  $s_E^2$  :

$$s_y^2 = \frac{SCEE}{ddl_{SCEE}} = \frac{SCEE}{[N \cdot (r - 1)]} = 0,0012 / (4(2-1)) = 0,0003 \quad (IV-10)$$

$$s_E^2 = \frac{s_y^2}{n} = 0,0003 / (4 \times 2) = 0,0000375 \quad (IV-11)$$

où  $n = N \times r$  est le nombre d'expériences.

La signification des effets a été analysée en utilisant le test « t » de Student. Un effet  $E_i$  est dit significatif (c'est-à-dire que la variable qui lui est associée a une influence sur la réponse), s'il est, pour un risque donné, significativement différent de 0. Pour cela, il faut calculer le rapport :

$$t_i = \frac{|E_i|}{s_E} \quad (IV-12)$$

où  $s_E$  est l'écart-type sur un effet, et le comparer avec la valeur de  $t(\text{crit})$  lue sur la table de Student (**Annexe 2**), pour  $ddl_{SCEE}$  degrés de liberté, en choisissant un risque de première espèce (le plus souvent 5% ou 1%). Dans le cas étudié :  $ddl_{SCEE} = N(r-1) = 4(2-1) = 4$ , et  $t(\text{crit}) = 2,78$ .

La règle du test est la suivante : Si  $t_i < t(\text{crit})$ , l'effet en question n'était pas, au risque 5% significativement différent de 0. La variable qui lui a été associée n'a donc pas d'influence sur la réponse. Dans le cas étudié :

$$s_E = \sqrt{0,0000375} = 0,00612 \quad (IV-13)$$

$$t_1 = \frac{|E_1|}{s_E} = \frac{0,1275}{0,00612} = 20,8 > 2,78 \quad (IV-14)$$

$$t_2 = \frac{|E_2|}{s_E} = \frac{0,0275}{0,00612} = 4,5 > 2,78 \quad (IV-15)$$

Les effets de la position de l'électrode cylindrique tournante  $E_1$  et de la durée de charge  $E_2$  ont été significatifs, ils ont donc une influence sur la réponse. Néanmoins l'effet de la position de l'électrode cylindrique tournante était plus significatif que l'effet de charge des particules.

**c. Validation du modèle : Test de Fischer**

Pour vérifier que le modèle linéaire (IV-5), caractérisé par les  $p = 3$  coefficients  $a_0$ ,  $a_1$ , et  $a_2$ , est valide et qu'il reflète bien le fonctionnement du processus de séparation électrostatique, une analyse de la variance a été réalisée. Celle-ci consiste à comparer à l'aide du test « F » de Fischer la variance d'ajustement avec la variance de l'erreur expérimentale :

$$F_{\text{obs}} = \frac{S_a^2}{S_y^2} \tag{IV-16}$$

Avec un risque établi d'avance, la valeur de  $F_{\text{obs}}$  doit être inférieure à la valeur de  $F = 7,71$  lue dans la table de Fisher-Snedecor (**Annexe 3**) pour les degrés de liberté connus pour le calcul de la somme des carrés de l'écart d'ajustement  $ddl_{\text{SCEA}} = N - p$  et de l'erreur expérimentale  $ddl_{\text{SCEE}} = N(r - 1)$ .

Les valeurs des réponses ont été estimées avec le modèle linéaire dans les quatre points du plan d'expérience  $2^2$  :

$$Y_1^{\text{est}} = y(-1, -1) = 0,2275 + 0,1275 - 0,0275 = 0,3275 \text{ g} \tag{IV-17}$$

$$Y_2^{\text{est}} = y(-1, +1) = 0,2275 + 0,1275 + 0,0275 = 0,3875 \text{ g} \tag{IV-18}$$

$$Y_3^{\text{est}} = y(+1, -1) = 0,2275 - 0,1275 - 0,0275 = 0,0725 \text{ g} \tag{IV-19}$$

$$Y_4^{\text{est}} = y(+1, +1) = 0,2275 - 0,1275 + 0,0275 = 0,1275 \text{ g} \tag{IV-20}$$

La somme des carrés des écarts d'ajustement :

$$SCEA = \sum (Y_k^{\text{est}} - Y_k)^2 = 8 * 0,0175 = 0,14 \tag{IV-21}$$

Avec  $p = 3$ ,  $N = 4$ ,  $ddl_{\text{SCEA}} = N - p = 4 - 3 = 1$ , la variance d'ajustement :

$$S_a^2 = \frac{SCEA}{ddl_{\text{SCEA}}} = \frac{SCEA}{(N - p)} = SCEA = 0,14 \tag{IV-22}$$

Selon le critère de Fisher :

$$F_{\text{obs}} = \frac{S_a^2}{S_y^2} = 0,14/0,0003 = 466,66 \gg 7,71 \tag{IV-23}$$

Le modèle est loin d'être valide. Ceci confirme la nécessité de réaliser un plan d'expériences factoriel composite, afin de pouvoir obtenir un modèle quadratique, qui pourrait mieux modéliser le processus et permettre d'établir le point de fonctionnement optimal du séparateur électrostatique.

#### IV-1.1.4. Optimisation du processus de séparation électrostatique

L'optimisation de ce processus ne peut être abordée qu'en utilisant des plans d'expériences permettant d'exprimer la réponse par un modèle polynomial de second degré. Un plan factoriel composite centré a été réalisé par la suite en rajoutant des « points en étoile » au plan factoriel complet initial.

Les résultats des 11 expériences effectuées selon le plan d'expériences composite sont donnés sur le **Tableau IV-3**. Ils permettent de calculer, en utilisant le logiciel MODDE 5.0 [130] les effets des facteurs sur la quantité de PC [g] et d'exprimer la réponse du processus en fonction des variables centrées réduites  $\alpha^*$  et  $t^*$ :

$$y = 0,18 - 0,14 \alpha^* + 0,03 t^* - 0,02 \alpha^{*2} + 0,07 t^{*2} - 0,02 \alpha^* t^* \quad (IV-24)$$

Les qualités descriptives et prédictives du modèle sont respectivement caractérisées par les indicateurs statistiques :  $R^2 = 98,2\%$  et  $Q^2 = 86,3\%$ .

Selon le logiciel MODDE 5.0 [130], l'optimum du processus (c'est-à-dire, obtenir un maximum de PC) devrait être obtenu pour l'électrode placée à  $\alpha = 15^\circ$  et pour une durée de charge  $t = 6$  min (**Figures IV-6 et IV-7**). Ce point se trouve à l'une des extrémités du domaine de variation des facteurs. Il serait judicieux de réaliser un autre plan d'expériences, autour de ce point, pour voir si c'est possible d'améliorer encore plus la quantité de PC récupérée. Pour récupérer l'ABS, le produit obtenu après une première séparation devrait être passé dans un dispositif similaire, mais avec l'électrode cylindrique tournante alimentée en polarité positive.

**Tableau IV-3** : Résultats du plan factoriel composite centré.

N°	Facteurs		Masse PC [g]
	Position a [°]	Durée t [min]	
1	15	4	0,31
2	30	4	0,09
3	15	6	0,40
4	30	6	0,10
5	15	5	0,32
6	30	5	0,12
7	22,5	4	0,24
8	22,5	6	0,29
9	22,5	5	0,18
10	22,5	5	0,16
11	22,5	5	0,19

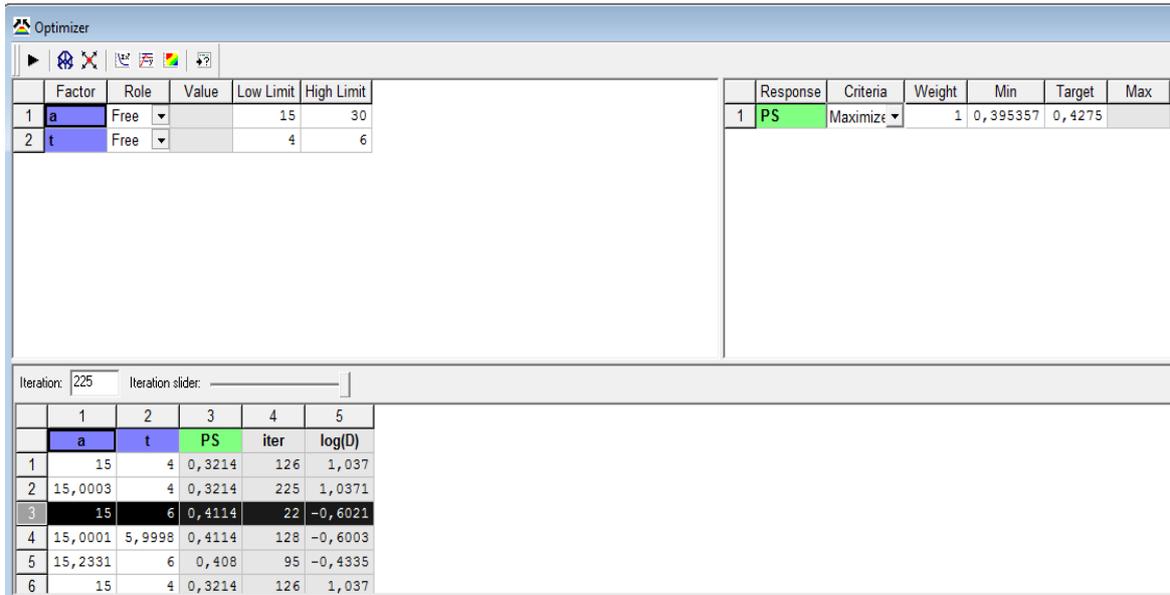


Figure IV-6 : Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0.

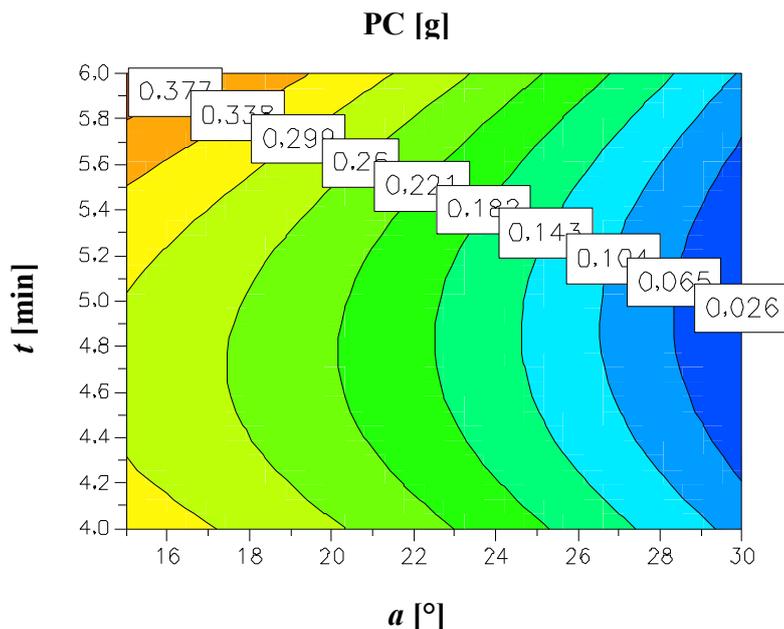


Figure IV-7 : Courbes iso-critères exprimant la masse du PC récupérée comme fonction de la position de l'électrode cylindrique tournante  $\alpha$  et de la durée t du processus de charge.

#### IV-1.2. Application à la séparation d'un mélange d'ABS et de PS

Le but de l'étude présentée dans les paragraphes suivants est d'analyser l'effet de la taille des particules sur leur comportement dans le séparateur multifonctions à électrode-convoyeur métallique.

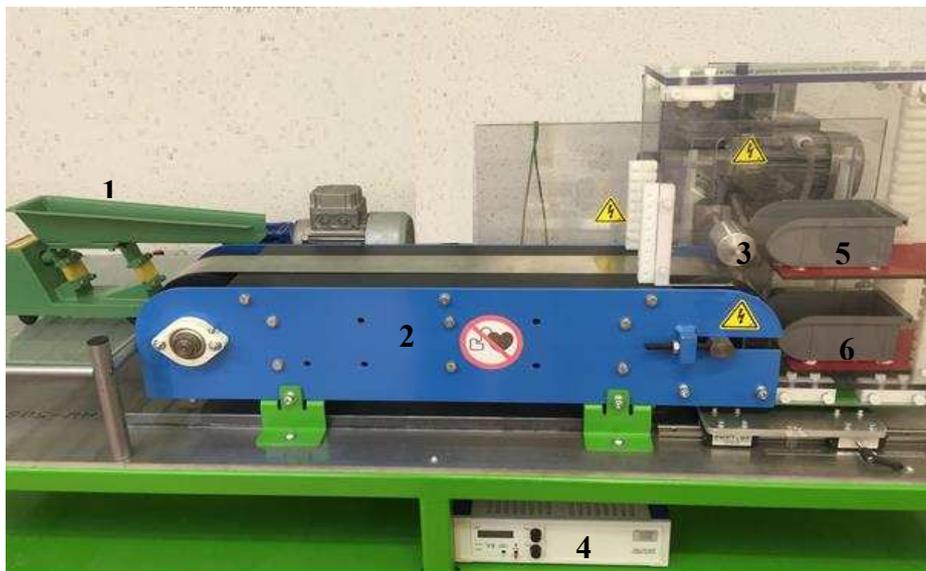
#### IV-1.2.1. Protocole et configuration expérimentale

Le mélange des particules à séparer provenait des DEEE broyés. Pour chaque expérience, un échantillon d'un poids total de 2 g a été utilisé, il était constitué en proportions égales en masse (50 % – 50 %) de particules d'ABS et de PS, de trois classes granulométriques différentes, préparées par tamisage (**Tableau IV-4**).

**Tableau IV-4** : Différentes classes granulométriques de particules d'ABS et de PS utilisées dans les expériences de séparation tribo-vibro-électrostatique.

	Taille X [ $\mu\text{m}$ ]
Classe 1	$500 < X < 1000$
Classe 2	$250 < X < 500$
Classe 3	$125 < X < 250$

Les expériences ont été réalisées sur le séparateur électrostatique multifonctions (**Figure IV-8**), en utilisant un lit vibrant pour charger les particules par effet tribo-électrique, et en respectant toujours la même méthode de travail décrite précédemment dans le § III-2.1.1.



**Figure IV- 8** : Séparateur électrostatique multifonctions pour des matériaux isolants ;  
 1 : Goulotte oscillante ; 2 : Convoyeur métallique ; 3 : Electrode cylindrique tournante ;  
 4 : Alimentation en haute tension ; 5 : Bac de récupération supérieur ; 6 : bac de récupération inférieur.

Dans le cadre de cette étude, le dispositif à lit vibrant décrit précédemment dans le § IV-1.1.1, a été utilisé pour pré-charger durant 120 secondes le mélange de particules d'ABS et de PS, juste avant de les déposer manuellement sur la goulotte oscillante, dans le but de procéder à leur séparation.

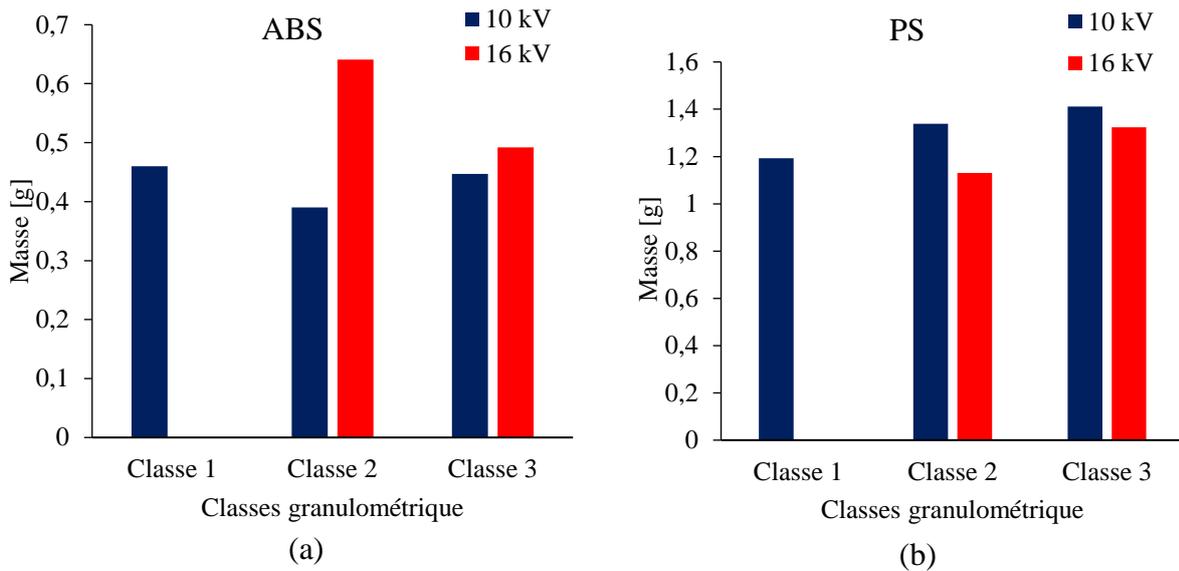
L'influence de la taille des particules sur les résultats de la séparation a été étudiée à des valeurs différentes de la haute tension  $U$  appliquée à l'électrode cylindrique tournante. L'angle de l'électrode cylindrique tournante  $\alpha = 15^\circ$ , la distance entre cette électrode et le convoyeur  $d = 15$  mm, la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique  $n = 10$  tr/min, ainsi que la vitesse du convoyeur métallique  $v = 1$  m/min ont été maintenus constants. Ces conditions expérimentales ont été établies après l'examen des résultats des tests préliminaires.

Les essais ont été réalisés à une température de  $21 \pm 1$  °C et une humidité relative de  $60 \pm 2$  %. Pour chaque expérience réalisée, la masse du produit récupéré dans les deux bacs du collecteur a été pesée avec une balance électronique d'une précision de 0,001 g (KERN, modèle PCB 250-3). La charge électrique des produits séparés a été mesurée en utilisant une cage de Faraday connectée à un électromètre (Keithley Instruments, modèle 6514).

#### IV-1.2.2. Résultats et interprétations

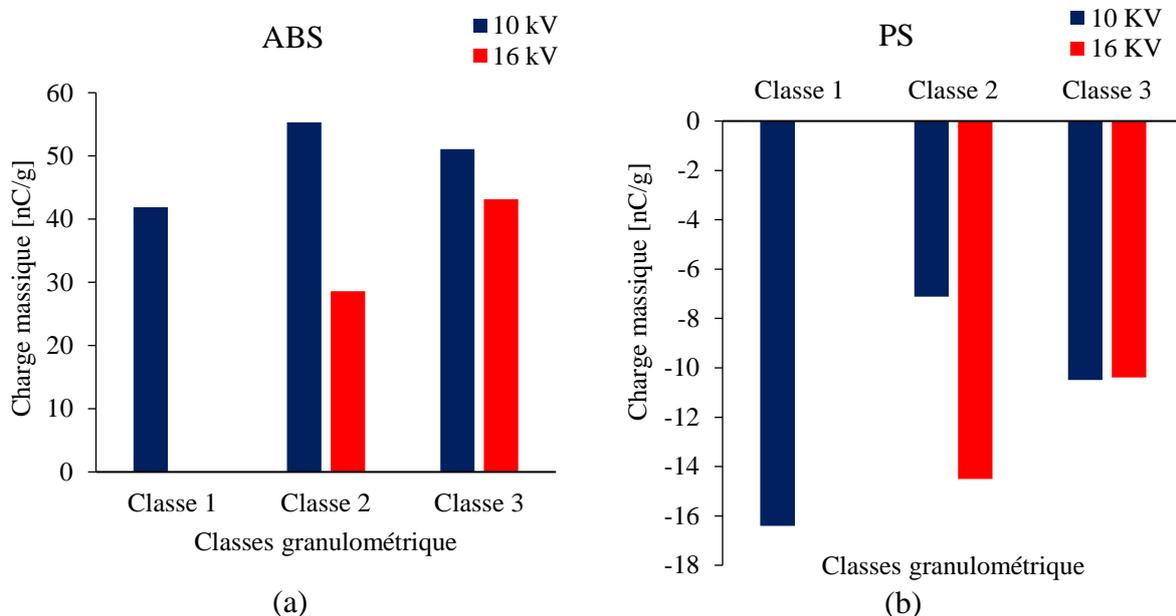
Les résultats des **Figures IV-9 et IV-10** illustrent l'influence de la haute tension  $U = -10$  kV et  $U = -16$  kV appliquée à l'électrode cylindrique tournante sur la quantité des particules d'ABS et de PS récupérées, ainsi que sur leurs charges électriques, pour les trois classes granulométriques définies.

Ces résultats obtenus démontrent que les particules d'ABS, chargées positivement au contact avec les particules de PS, étaient attirées par l'électrode cylindrique tournante de polarité négative et finissaient dans le bac supérieur. Les particules de PS, chargées négativement, terminaient leur course dans le bac inférieur, cela pour les trois classes granulométriques. Pour les classes 2 et 3, les quantités des particules d'ABS collectées dans le bac supérieur sont plus grandes pour  $U = -16$  kV par rapport à  $U = -10$  kV, par contre pour la classe 1 aucune quantité n'a pas été récupérée à cause de la production des arcs électriques, due à la présence des particules de taille plus grande (**Figure IV-9 a**). La situation de la collecte des particules de PS dans le bac inférieur est différente (**Figure IV-9 b**). A  $U = -10$  kV le champ électrique est moins intense et une grande partie de la quantité des particules d'ABS se retrouvent dans le bac inférieur avec les particules de PS. A des valeurs plus élevées de la tension  $U = -16$  kV, où le champ électrique est beaucoup plus intense, la pureté de produit PS sera meilleure, car il aura moins de particules d'ABS dans le bac inférieur.



**Figure IV-9** : Quantités des particules collectées pour les trois classes granulométriques et deux niveaux de la haute tension appliquée :  
 (a) dans le bac supérieur (100% ABS) ; (b) dans le bac inférieur (majorité de PS).

La charge électrique a été mesurée pour chaque produit récupéré dans les deux bacs, (supérieur et inférieur) avec un électromètre connecté à une cage de Faraday. Le rapport entre cette charge et la masse collectée (c'est-à-dire, la charge massique [nC/g]) est représenté sur la **Figure IV-10**.



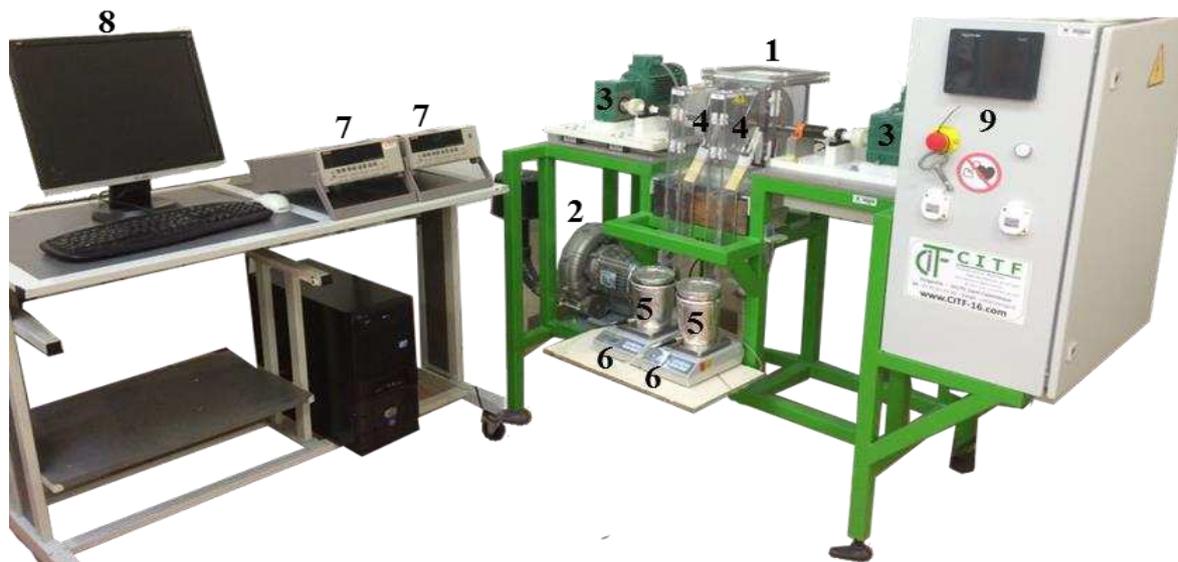
**Figure IV-10** : Charge massique des particules collectées, pour les trois classes granulométriques et deux niveaux de la haute tension appliquée :  
 (a) dans le bac supérieur (100% ABS) ; (b) dans le bac inférieur (majorité de PS).

Les particules d'ABS se sont chargées positivement (**Figure IV-10 a**), tandis que les particules de PS portaient des charges négatives (**Figure IV-10 b**). Pour  $U = -16$  kV la charge massique pour les classes 2 et 3 des particules d'ABS est moins élevée par rapport aux valeurs relevées à  $U = -10$  kV. Effectivement pour une tension élevée, le champ électrique qui a été généré entre l'électrode cylindrique et le convoyeur métallique est intense, et les particules d'ABS sont attirées vers l'électrode haute tension même en ayant une charge plus faible.

En ce qui concerne la charge massique des particules récupérées dans le bac inférieur pour la classe 2, elle est nettement plus faible à  $U = -10$  kV, car le produit collecté contient un pourcentage élevé de particules d'ABS (de polarité opposée aux particules majoritaires de PS), qui n'ont pas été attirées par l'électrode cylindrique tournante. Ce phénomène est moins net pour les produits de la classe 3 (taille comprise entre  $125 \mu\text{m}$  et  $250 \mu\text{m}$ ), car la séparation est affectée aussi par l'agglomération des particules lors de leur alimentation.

#### IV-2. Séparation tribo-aéro –électrostatique d'un mélange d'ABS et de PS

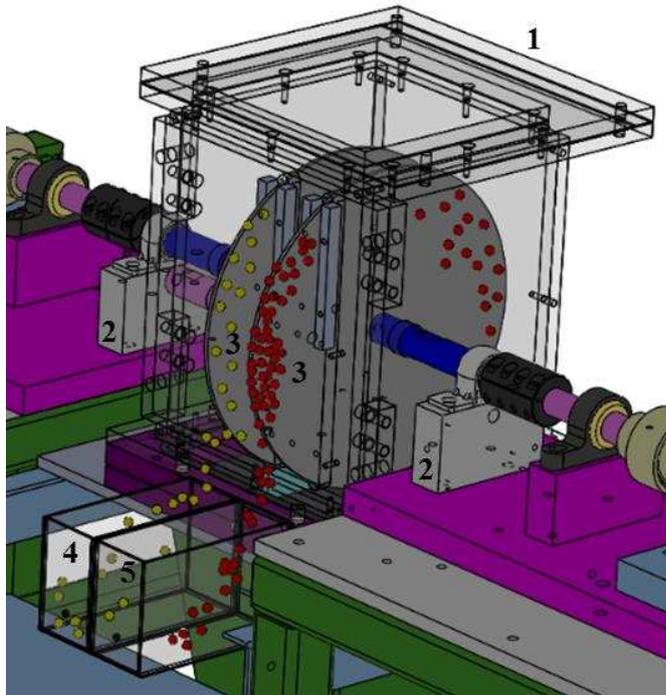
Une autre solution qui peut être également intéressante pour le tri des mélanges de matériaux isolants, consiste à charger les particules par effet tribo-électrique dans un lit fluidisé, en présence d'un champ électrique. L'étude du processus de séparation tribo-aéro-électrostatique a été réalisée sur l'installation à deux électrodes-disques tournantes (§ II-2.2), en mesurant simultanément la masse et la charge électrique des produits collectés, utilisant un programme d'acquisition de données piloté par le logiciel LabView (**Figure IV-11**).



**Figure IV-11** : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques tournantes ; 1 : Chambre de séparation ; 2 : Soufflante ; 3 : Moteurs électriques ; 4 : Electrodes-disques tournantes ; 5 : Cages de Faraday ; 6 : Balances électroniques ; 7 : Electromètres ; 8 : PC avec LabView ; 9 : Armoire électrique.

### IV-2.1. Matériaux et méthode

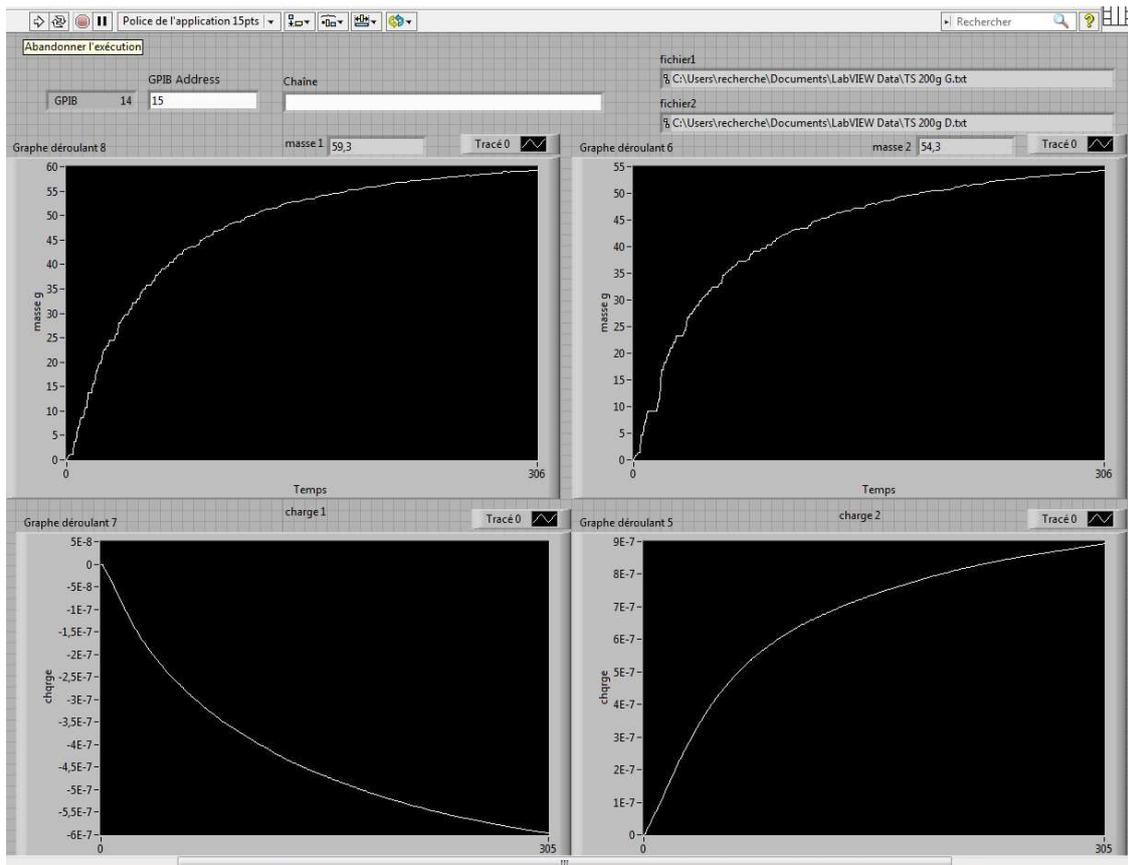
Chaque échantillon du mélange de deux types de polymères utilisés pour cette étude contenait 100 g d'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS) et 100 g de Polystyrène (PS). Ces matériaux pulvérulents ont été fournis par la société APR2, France, spécialisée dans le recyclage des DEEE. Le diamètre moyen des particules du mélange variait de 500  $\mu\text{m}$  à 1000  $\mu\text{m}$ .



**Figure IV-12 :** Collecte des particules isolantes dans le séparateur tribo-aérostatisque à deux-électrodes-disques-tournante ; 1 : Chambre de séparation ; 2 : Connexions à la haute tension ; 3 : Deux électrodes-disques tournantes ; 4 : Boîte de collecte des particules de PS (charge négatives) ; 5 : Boîte de collecte des particules d'ABS (charges positives).

Etant donné que le processus de séparation est multifactoriel, une étude expérimentale a été réalisée en prenant en considération : la tension  $U$  [kV], la vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes  $v$  [tr/min], la durée du processus de charge tribo-électrique  $t_c$  [s], le temps de séparation  $t_s$  [s], le débit d'air de la soufflante  $n$  [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] et la masse initiale du mélange pulvérulent à séparer  $m$  [g]. Le système de mesure permet l'enregistrement continu et simultané de la charge électrique et de la masse des produits séparés. L'équipement utilisé dans le laboratoire se composait de deux balances électroniques (KERN, modèle PCB 2000-1) d'une résolution de 0.1 g et une limite supérieure de 2 kg, de deux cages de Faraday connectées à deux électromètres « Keithley Instruments 6514 », tous ces équipements ont été reliés par une carte d'acquisition de données GPIB à un ordinateur sur lequel est installé le logiciel LabView 6. Les résultats des mesures étaient affichés sur l'écran de l'ordinateur par un instrument virtuel dédié (**Figure IV-13**).

Une méthode de travail a été élaborée et scrupuleusement respectée pour chaque expérience de séparation: (1) dépôt du mélange pulvérulent de particules d'ABS et de PS dans la chambre de séparation, (2) mise sous tension des appareils de mesure : balances électroniques, et électromètres connectés à des cages de Faraday, (3) mise en marche des équipements électriques : soufflante, moteurs électriques et alimentations haute tension, (4) acquisition des données par LabView 6, (5) mise à l'arrêt des équipements électrique et d'acquisition des données, (6) nettoyage du séparateur électrostatique.



**Figure IV-13** : Interface du logiciel LabView, pour la mesure de la charge électrique et de la masse collectée dans les deux collecteurs pour les particules d'ABS et de PS.

Un ensemble de six expériences a été réalisé, à une distance constante entre les électrodes-disques tournantes de 120 mm :

- La première expérience a été effectuée pour un temps de  $t_s = 300$  s, à  $U = \pm 8$  kV,  $v = 30$  tr/min,  $m = 200$  g,  $n = 6,4$  m<sup>3</sup>/h et  $t_c = 0$  s.

- Le temps de séparation pour la seconde expérience a été de  $t_s = 100$  s. La masse  $m$  initiale du mélange pulvérulent à séparer a été variée de 200 g à 400 g, les autres variables de contrôle du processus ont été maintenues à des valeurs constantes :  $U = \pm 8$  kV,  $v = 30$  tr/min,  $n = 6,4$  m<sup>3</sup>/h et  $t_c = 0$  s.

- L'effet de la durée du processus de charge tribo-électrique  $t_c$  a été étudiée dans la troisième expérience. Le temps  $t_c$  a été successivement de 0 s, 10 s et 20 s, à  $U = \pm 8$  kV,  $t_s = 100$  s,  $v = 30$  tr/min,  $m = 200$  g et  $n = 6,4$  m<sup>3</sup>/h.

- Dans la quatrième expérience, le débit d'air de la soufflante  $n$  a été varié entre 6 m<sup>3</sup>/h et 6,8 m<sup>3</sup>/h, à  $U = \pm 8$  kV,  $t_s = 100$  s,  $v = 30$  tr/min,  $m = 200$  g et  $t_c = 0$  s.

- La variable de contrôle étudiée dans la cinquième expérience a été la vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes  $v$ , qui a été variée entre 25 tr/min et 65 tr/min, à  $U = \pm 8$  kV,  $n = 6,4$  m<sup>3</sup>/h,  $t_s = 100$  s,  $m = 200$  g et  $t_c = 0$  s.

- Enfin, dans la sixième expérience, le niveau de la haute tension  $U$  a été varié entre 4 kV et 20 kV, à  $n = 6,4$  m<sup>3</sup>/h,  $t_s = 100$  s,  $v = 30$  tr/min,  $m = 200$  g et  $t_c = 0$  s.

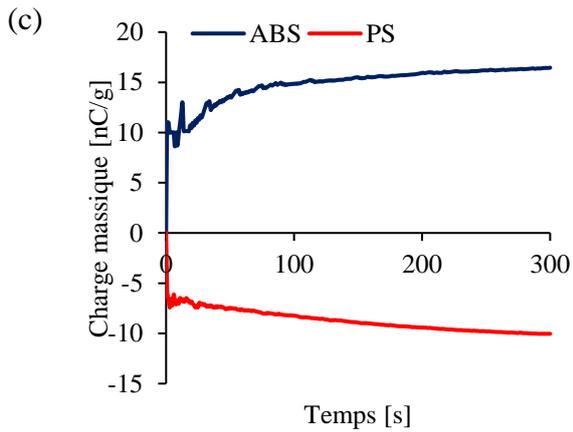
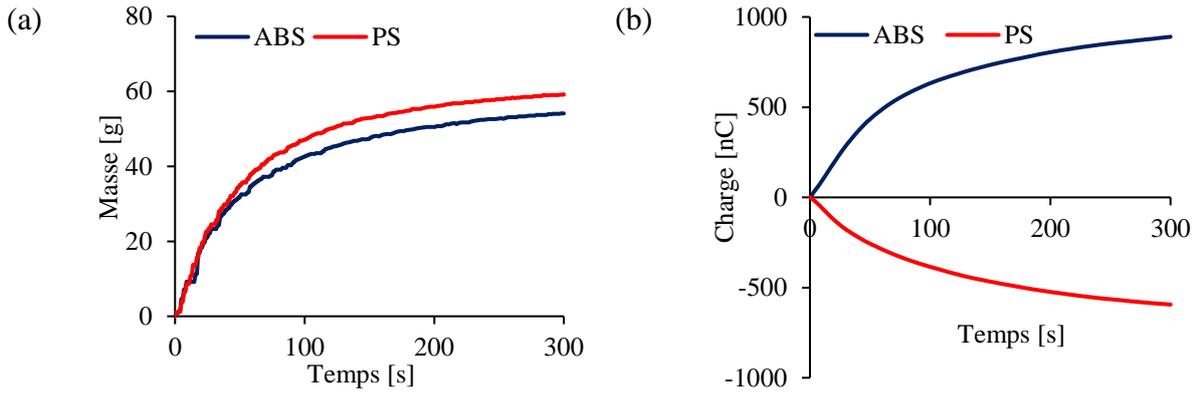
Toutes les expériences ont été effectuées dans des conditions relativement stables de température (18° C à 20° C) et humidité relative (45% à 57%).

#### IV-2.2. Résultats et interprétations

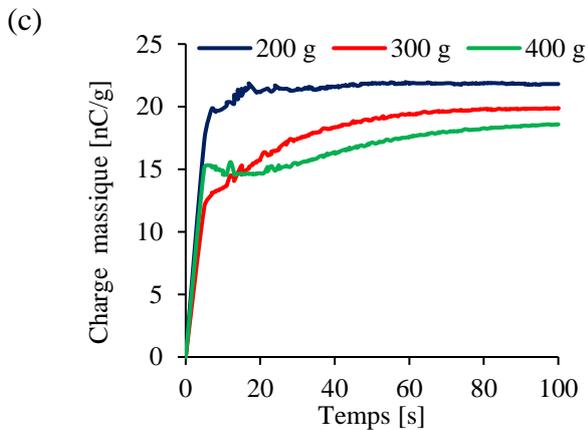
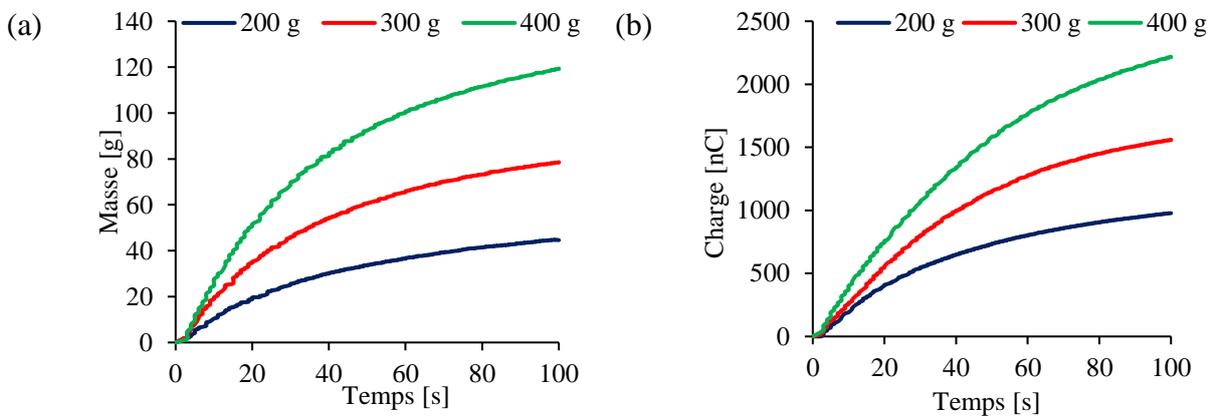
Les résultats de la première d'expérience sont représentés sur la **Figure IV-14**. Ils dévoilent seulement une légère différence entre les masses des particules d'ABS et de PS récupérées après 300 s. La charge massique des particules de PS qui se chargent moins en contact avec les parois en PMMA transparent de la chambre de séparation, est seulement de 2/3 de celle enregistrée pour l'ABS.

Les quantités des produits collectées en fonction du temps croient avec l'augmentation de la masse initiale du mélange déposée dans le lit fluidisé (**Figure IV-15**). La charge massique des produits collectés diminue légèrement avec l'augmentation de la masse initiale dans la chambre de séparation (**Figure IV-15 b**). En effet, pour un débit d'air de soufflante donné, les particules vont plus ou moins entrer en collision les unes avec les autres selon la masse du mélange présente dans la chambre de séparation. Une masse trop importante dans le lit fluidisé laissera des particules immobiles ; à l'inverse, dans le cas d'une petite masse, les particules seront dispersées dans un volume plus grand et entreront moins en collision les unes avec les autres. La **Figure IV-15 a**, indique une séparation plus rapide pour une masse dans la chambre de 400 g par rapport à une masse de 300 g ou de 200 g.

Avec une masse initiale plus grande, le niveau supérieur du lit fluidisé est plus élevé. Par conséquent, les particules sont plus proches des disques tournants, qui peuvent être partiellement immergés dans le lit fluidisé. Dans ces conditions, les particules seront attirées par les électrodes même en étant moins bien chargées et seront évacuées plus rapidement.



**Figure IV-14 :** Masse (a), charge électrique (b) et charge massique (c) en fonction du temps, pour un échantillon de 200 g d'un mélange pulvérulent composé de 50 % d'ABS et de 50 % de PS (débit d'air :  $n = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$  ; haute tension appliquée:  $U = \pm 8 \text{ kV}$  ; vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes :  $v = 30 \text{ tr/min}$  ; et la durée du processus de charge tribo-électrique  $t_c = 0 \text{ s}$ ).



**Figure IV-15 :** Masse ABS (a), charge électrique ABS (b) et charge massique ABS (c) en fonction du temps, pour des échantillons de 200 g, 300 g et 400 g d'un mélange pulvérulent de produit composé de 50 % d'ABS de 50 % de PS (débit d'air :  $n = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$  ; haute tension appliquée :  $U = \pm 8 \text{ kV}$  ; vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes :  $v = 30 \text{ tr/min}$  ; et la durée du processus de charge tribo-électrique  $t_c = 0 \text{ s}$ ).

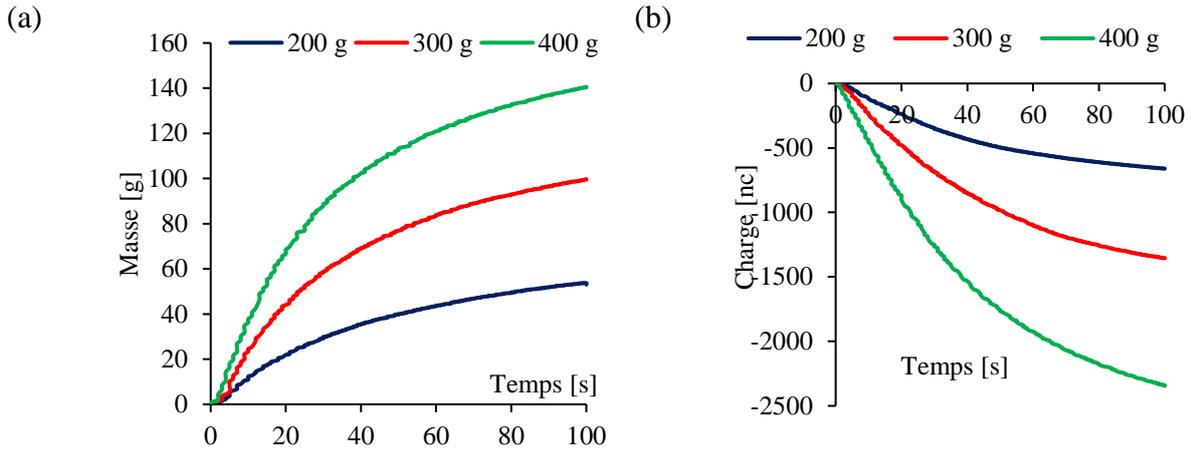
La variation de la masse, de la charge électrique et de la charge massique est similaire pour le produit PS récupéré pendant le processus de séparation tribo-aéro-électrostatique des 200 g, 300 g et 400 g des mélanges pulvérulents (**Figure IV-16**).

La durée du processus de charge tribo-électrique du mélange pulvérulent a peu d'effet sur le processus de séparation (**Figure IV-17**). Les particules d'ABS qui sont pré-chargées plus longtemps (à  $t_c = 20$  s), sont collectées légèrement plus vite que ceux non-pré-chargées à  $t_c = 0$  s (**Figure IV-17 a**), car leur charge massique est aussi un peu plus élevée (**Figure IV-17 c**). Les particules de PS ont un comportement similaire (**Figure IV-18**). En effet, les masses des particules qui peuvent être évacuées par les disques sont limitées. Même très bien chargées après 20 s, une partie des particules ne peuvent pas adhérer aux électrodes, car empêchées par les couches formées par celles arrivées avant.

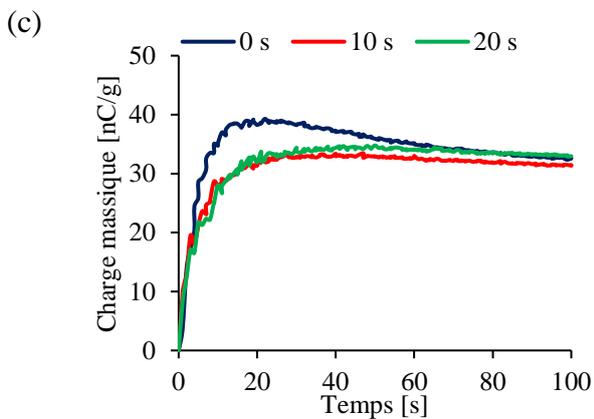
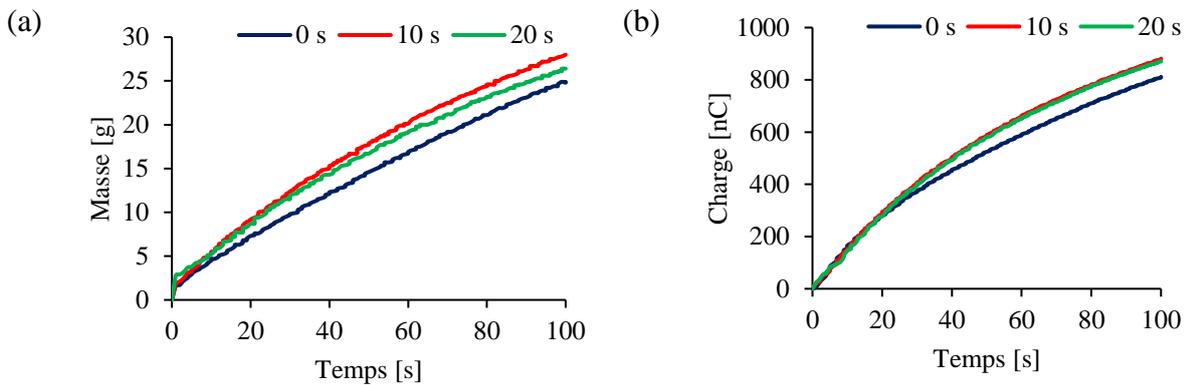
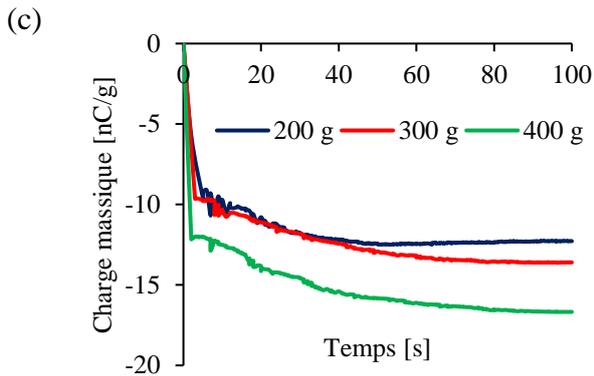
Ces matériaux, ABS et PS, sont connus pour être des très bons isolants ; ils se chargent assez facilement par l'effet triboélectrique. D'autres couples de matériaux isolants pourraient nécessiter un pré-chargement préalable avant le début de la séparation tribo-aéro-électrostatique.

Le débit d'air influence considérablement les conditions de charge des particules et donc sur le temps de séparation et de collecte des produits s (**Figures IV-19 et IV-20**). L'augmentation du débit d'air modifie l'aspect du lit fluidisé et s'accompagne, jusqu'à un certain seuil, d'une augmentation du nombre et de l'intensité des collisions entre particules. Ainsi, la charge massique atteint sa valeur élevée à des débits d'air élevés (**Figures IV-19 c et IV-20 c**) qui favorisent une séparation rapide des particules. Cette augmentation de la charge massique peut s'expliquer aussi par le fait que la turbulence générée par un débit d'air plus fort rend plus difficile le maintien des particules à la surface des électrodes. Elles doivent avoir une charge plus importante pour que la force d'image électrique les attache aux électrodes-disques tournantes.

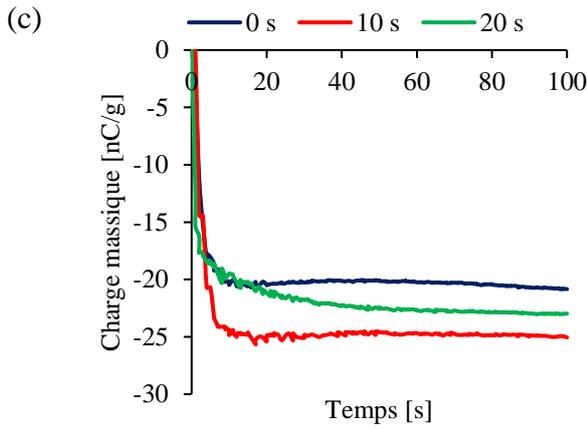
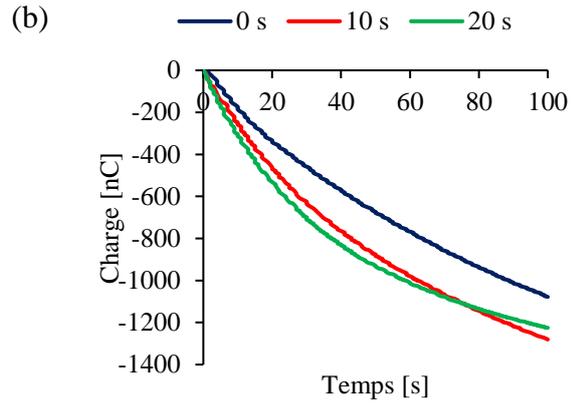
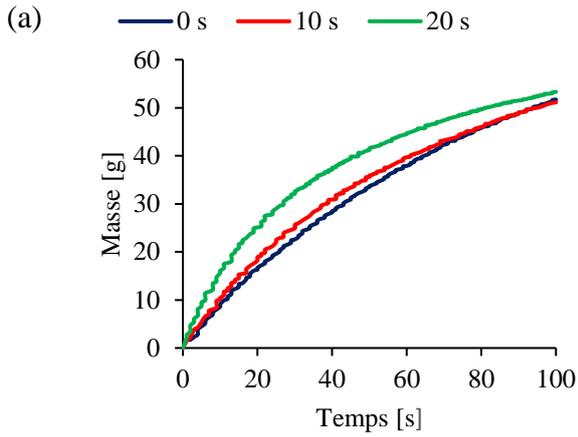
Les expériences étant faites sans pré-charge des particules, la vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes n'influence pas de manière significative sur le processus de séparation. La quantité du produit récupérée reste quasiment là même (**Figures IV-21 a et IV-22 a**), car elle dépend de la masse des particules qui atteignent le niveau de charge suffisant pour être attirées par les disques. Même en tournant plus vite, les disques ne peuvent évacuer que les particules satisfaisant cette condition.



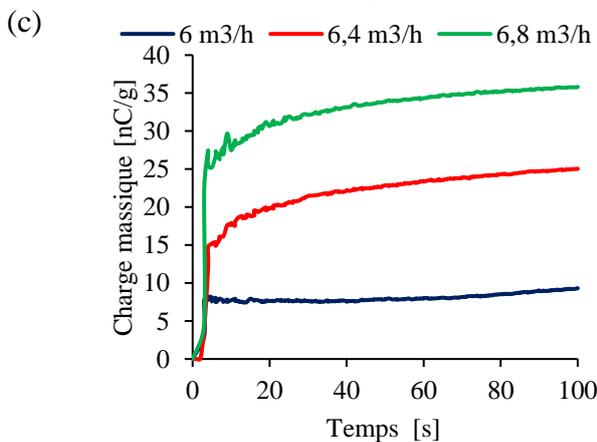
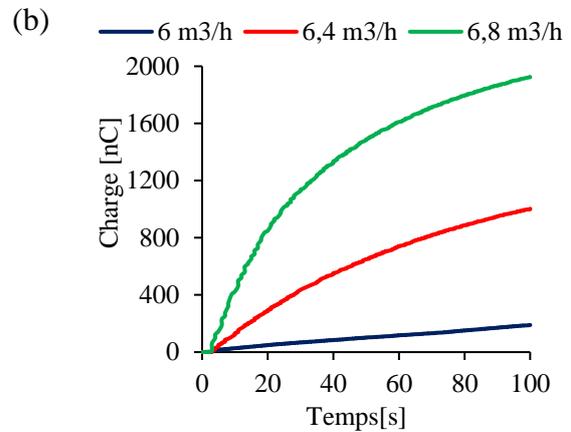
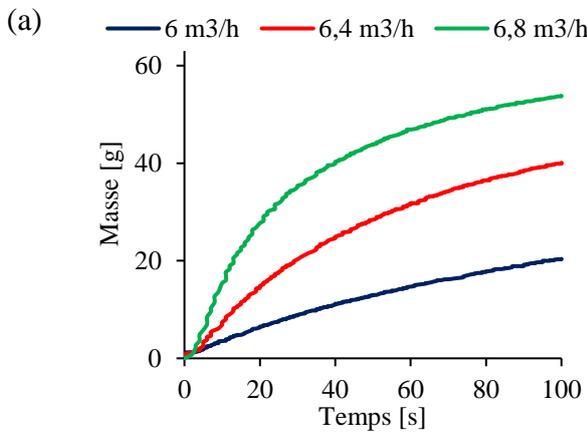
**Figure IV-16** : Masse PS (a), charge électrique PS (b) et charge massique PS (c) en fonction du temps, pour des échantillons de 200 g, 300 g et 400 g d'un mélange pulvérulent de produit composé de 50 % d'ABS de 50 % de PS (débit d'air :  $n = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$  ; haute tension appliquée :  $U = \pm 8 \text{ kV}$  ; vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes :  $v = 30 \text{ tr/min}$  ; durée du processus de charge tribo-électrique  $t_c = 0 \text{ s}$ ).



**Figure IV-17** : Masse ABS (a), charge électrique ABS (b) et charge massique ABS (c) en fonction du temps, pour des durées du processus de charge tribo-électrique de 0 s, 10 s et 20 s (débit d'air :  $n = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$  ; haute tension appliquée :  $U = \pm 8 \text{ kV}$  ; vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes :  $v = 30 \text{ tr/min}$  ; masse initiale du mélange  $m = 200 \text{ g}$ ).



**Figure IV-18 :** Masse PS (a), charge électrique PS (b) et charge massique PS (c) en fonction du temps, pour des durées du processus de charge tribo-électrique de 0 s, 10 s et 20 s (débit d'air :  $n = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$  ; haute tension appliquée :  $U = \pm 8 \text{ kV}$  ; vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes :  $v = 30 \text{ tr/min}$  ; masse initiale du mélange  $m = 200 \text{ g}$ ).

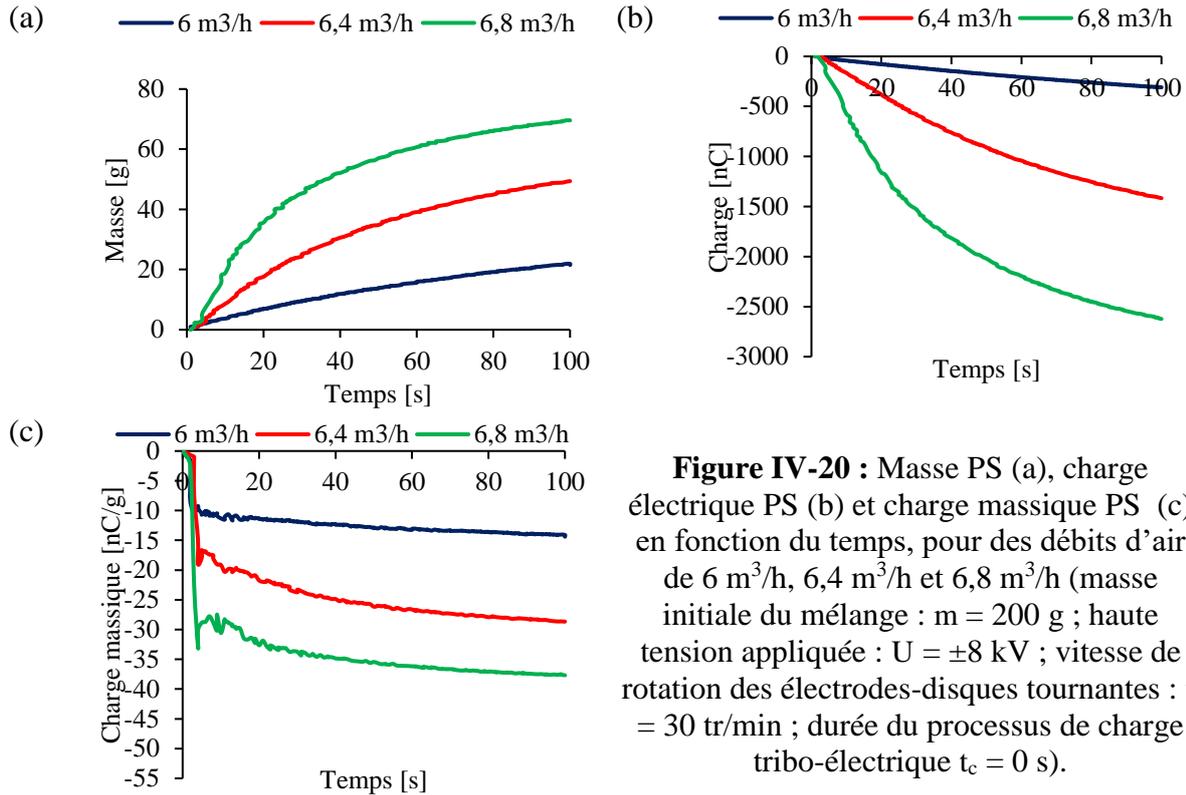


**Figure IV-19 :** Masse ABS (a), charge électrique ABS (b) et charge massique ABS (c) en fonction du temps, pour des débits d'air de  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $6,4 \text{ m}^3/\text{h}$  et  $6,8 \text{ m}^3/\text{h}$  (masse initiale du mélange :  $m = 200 \text{ g}$  ; haute tension appliquée :  $U = \pm 8 \text{ kV}$  ; vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes :  $v = 30 \text{ tr/min}$  ; durée du processus de charge  $t_c = 0 \text{ s}$ ).

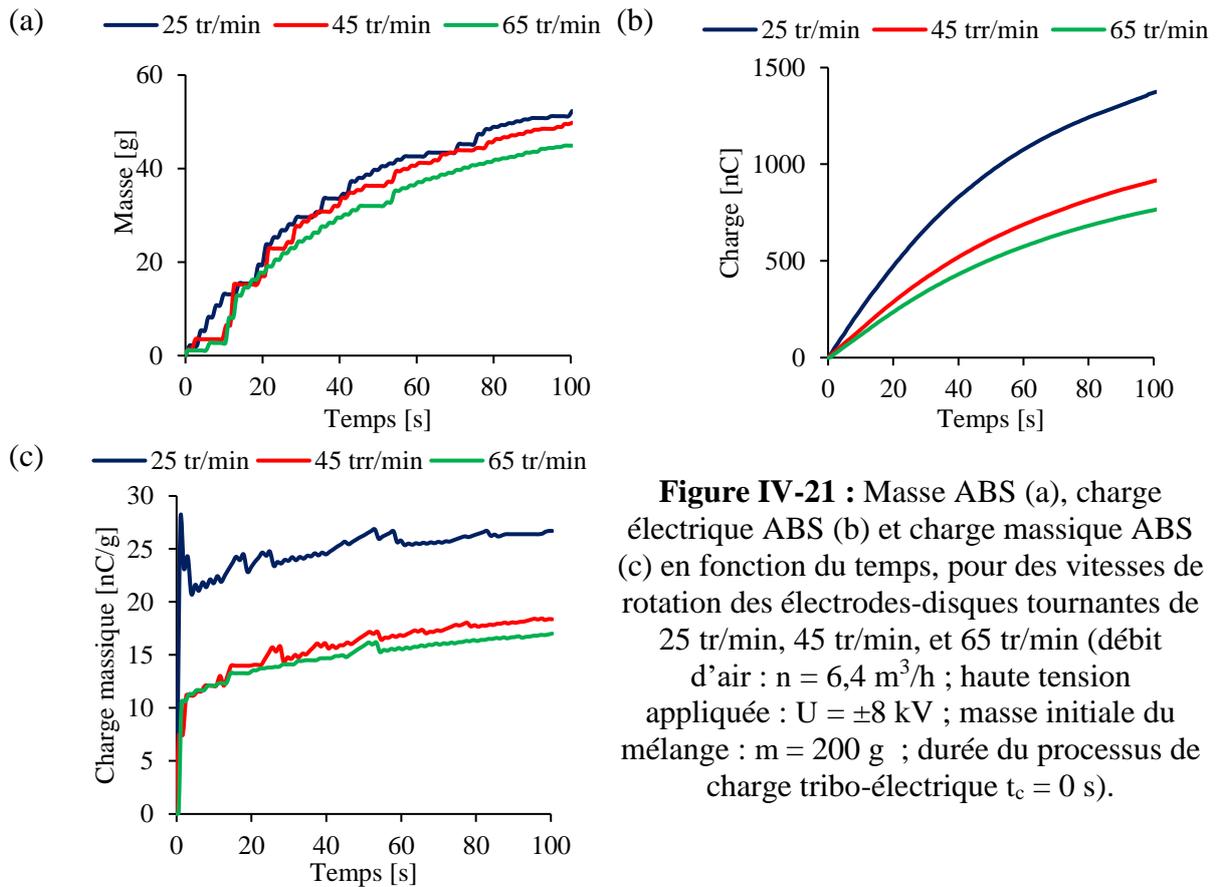
Les courbes de la charge électrique représentées sur les **Figure IV-21 b et IV-22 b**), sont assez surprenantes. Toutefois, une simple explication peut être donnée au fait qu'à une faible vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes la charge massique des particules augmente (**Figure IV-21 c et IV-22 c**). À des vitesses supérieures à 30 tr/min, les particules forment une monocouche à la surface des électrodes-disques tournantes. En contact avec une électrode de polarité opposée, les particules peuvent perdre une partie de leur charge. À des vitesses inférieures à 30 tr/min, les particules sont récupérées dans une multicouche. Comme bon nombre d'entre elles n'entrent pas en contact avec l'électrode, ils conservent leur charge et donc la charge massique du produit récupéré est plus élevée qu'à des vitesses plus élevées.

La masse collectée croît avec l'augmentation de la haute tension appliquée aux électrodes (**Figure IV- 23 a, b et Figure IV-24 a, b**), car la force électrique s'exerçant sur chaque particule augmente aussi, facilitant le déplacement des particules dans le champ électrique. En revanche, l'augmentation de la tension s'accompagne d'une diminution de la charge massique des produits collectés. Celle-ci arrive même à changer de signe pour des tensions très élevées (**Figure IV- 23 c, d et Figure IV-24 c, d**).

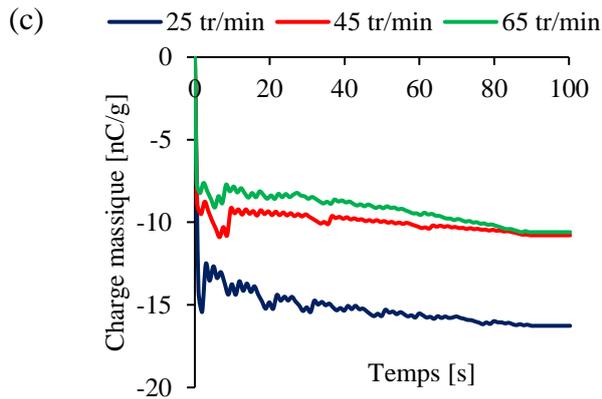
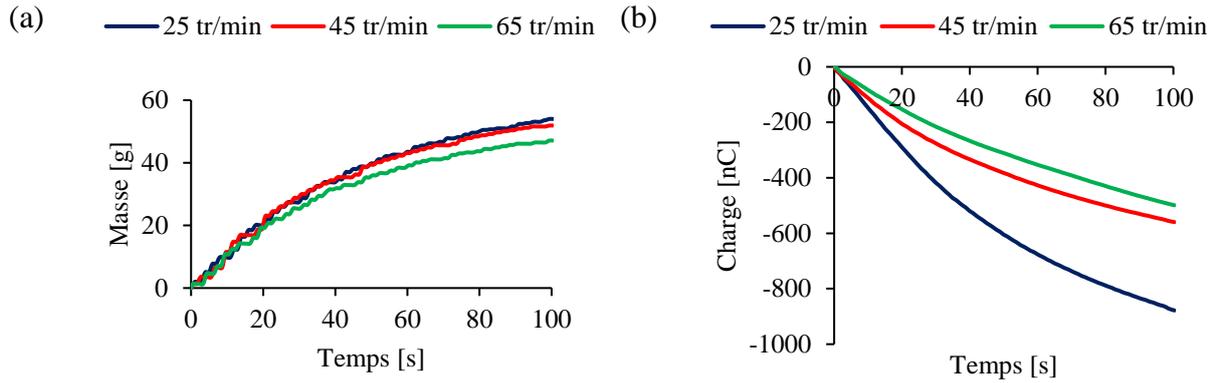
La diminution de la charge massique des produits collectés à des valeurs élevées de la tension s'explique par deux mécanismes physiques distincts. Tout d'abord, en augmentant l'intensité du champ électrique, des particules moins bien chargées peuvent être attirées par les électrodes. D'autre part, la formation d'une couche de particules isolantes chargées à la surface des électrodes s'accompagne d'une intensification locale de l'intensité du champ électrique, créant les conditions d'apparition d'une décharge couronne inverse. Par conséquent, les particules peuvent arriver à changer de polarité de charge, sans pour autant se détacher des électrodes, car retenues par les forces d'adhésion mécaniques. Les particules d'ABS, par exemple, se chargent positivement par effet triboélectrique au contact avec les particules de PS et sont attirées par l'électrode négative. En contact avec celle-ci, dans un champ électrique extérieur fort, elles peuvent perdre leur charge et, pour les valeurs les plus élevées de la tension d'alimentation, acquérir une charge négative. Ce changement de signe de la charge peut être dû aussi à l'effet couronne qui se produit aux bords anguleux des électrodes-disques soumises à des tensions élevées. Détachées de l'électrode par les racleurs prévus à cet effet, les particules changent de signe de charge en traversant cette zone de décharge couronne.



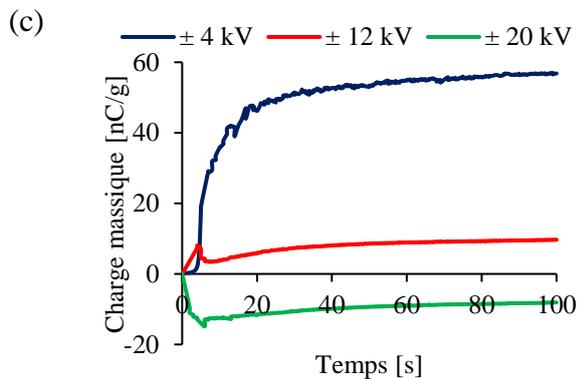
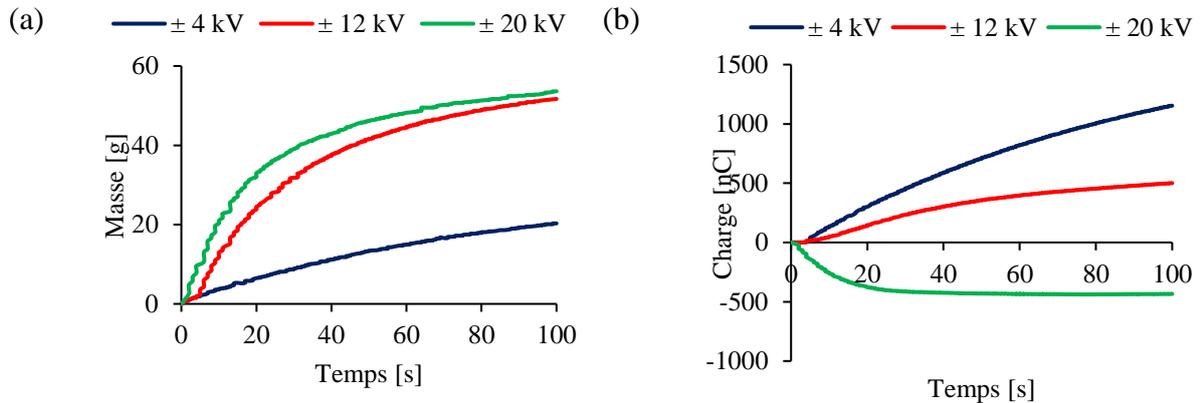
**Figure IV-20 :** Masse PS (a), charge électrique PS (b) et charge massique PS (c) en fonction du temps, pour des débits d'air de 6 m<sup>3</sup>/h, 6,4 m<sup>3</sup>/h et 6,8 m<sup>3</sup>/h (masse initiale du mélange : m = 200 g ; haute tension appliquée : U = ±8 kV ; vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes : v = 30 tr/min ; durée du processus de charge tribo-électrique t<sub>c</sub> = 0 s).



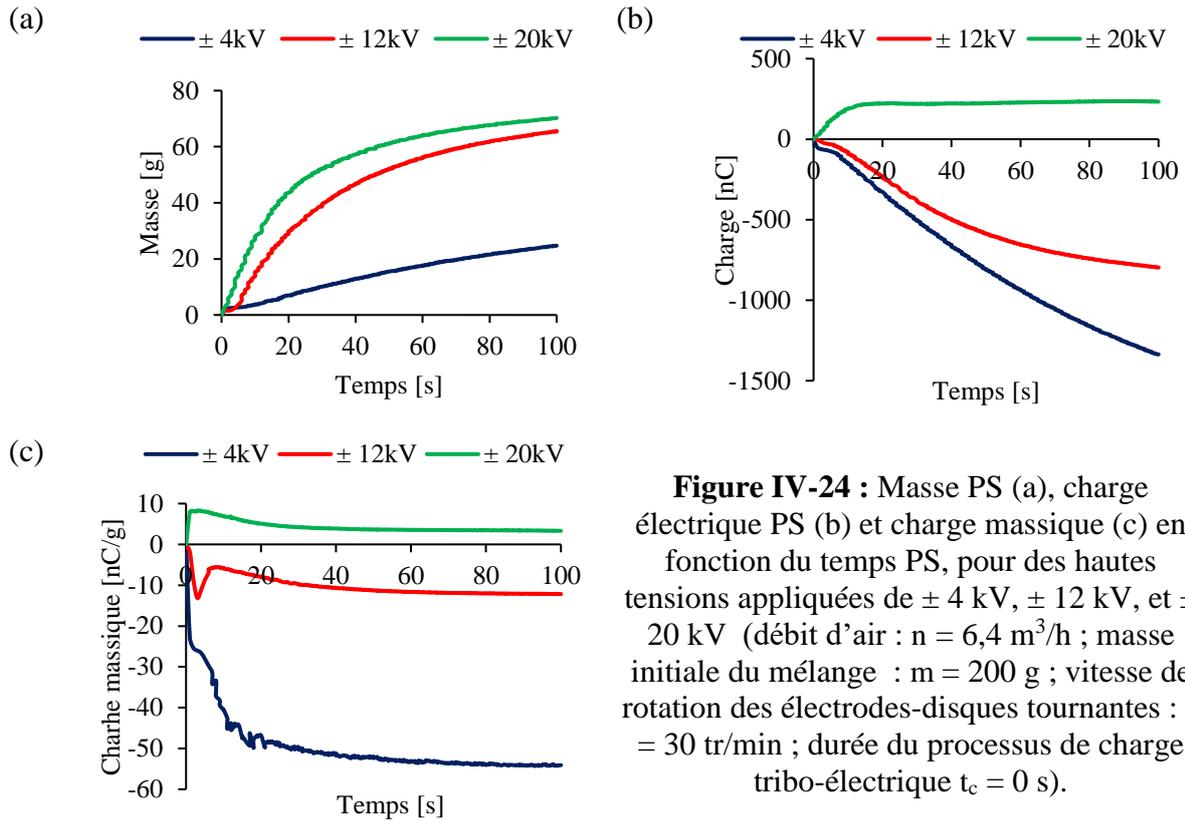
**Figure IV-21 :** Masse ABS (a), charge électrique ABS (b) et charge massique ABS (c) en fonction du temps, pour des vitesses de rotation des électrodes-disques tournantes de 25 tr/min, 45 tr/min, et 65 tr/min (débit d'air : n = 6,4 m<sup>3</sup>/h ; haute tension appliquée : U = ±8 kV ; masse initiale du mélange : m = 200 g ; durée du processus de charge tribo-électrique t<sub>c</sub> = 0 s).



**Figure IV-22 :** Masse PS (a), charge électrique PS (b) et charge massique PS (c) en fonction du temps, pour des vitesses de rotation des électrodes-disques tournantes de 25 tr/min, 45 tr/min, et 65 tr/min (débit d'air :  $n = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$  ; haute tension appliquée :  $U = \pm 8 \text{ kV}$  ; masse initiale du mélange :  $m = 200 \text{ g}$  ; et la durée du processus de charge tribo-électrique  $t_c = 0 \text{ s}$ ).



**Figure IV-23 :** Masse ABS (a), charge électrique ABS (b) et charge massique ABS (c) en fonction du temps, pour des hautes tensions appliquées de  $\pm 4 \text{ kV}$ ,  $\pm 12 \text{ kV}$ , et  $\pm 20 \text{ kV}$  (débit d'air :  $n = 6,4 \text{ m}^3/\text{h}$  ; masse initiale du mélange :  $m = 200 \text{ g}$  ; vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes :  $v = 30 \text{ tr/min}$  ; et la durée du processus de charge tribo-électrique  $t_c = 0 \text{ s}$ ).



**Figure IV-24 :** Masse PS (a), charge électrique PS (b) et charge massique (c) en fonction du temps PS, pour des hautes tensions appliquées de  $\pm 4$  kV,  $\pm 12$  kV, et  $\pm 20$  kV (débit d'air :  $n = 6,4$  m<sup>3</sup>/h ; masse initiale du mélange :  $m = 200$  g ; vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes :  $v = 30$  tr/min ; durée du processus de charge tribo-électrique  $t_c = 0$  s).

## Conclusions

1. La séparation tribo-vibro-électrostatique à électrode-convoyeur métallique est une solution viable pour le tri des matériaux isolants pulvérulents provenant des DEEE. Elle permet de récupérer par un passage en champ électrique intense un des constituants du mélange à une pureté proche de 100%. Un deuxième, voir un troisième passage, dans des installations ayant des polarités différentes des électrodes, permettent la séparation des autres constituants à des puretés similaires.
2. L'augmentation de la durée de tribo-charge dans un lit vibrant et la diminution de l'angle de position de l'électrode cylindrique tournante produisent, selon le test de Student, une amélioration significative des résultats de la séparation. La quantité de produit pur récupérée à l'électrode cylindrique tournante peut attendre 75% de la masse présente dans le mélange initial. Cependant, selon le test de Fischer, le modèle linéaire ne décrit pas d'une façon adéquate la variation des masses de produits récupérés par rapport à ces deux facteurs.
3. La modélisation du processus de séparation par un modèle quadratique, obtenu suite à un plan d'expériences factoriel composite, permet de mieux prédire les quantités des produits récupérés dans les deux bacs collecteurs.

4. Les matériaux isolants pulvérulents de classes granulométriques différentes peuvent être bien chargés dans des dispositifs à vibrations et séparés dans l'installation à électrode-convoyeur métallique. Cependant, le processus est plus efficace pour les classes granulométriques 125 – 250  $\mu\text{m}$  et 250 – 500  $\mu\text{m}$ . Le tri des particules appartenant à la classe granulométrique 500 – 1000  $\mu\text{m}$  nécessiterait des tensions d'alimentations plus élevées, situées à la limite d'apparition de décharges électrique de type couronne à partir des bords de l'électrode-convoyeur métallique.
5. L'application industrielle du procédé nécessiterait la mise au point d'un dispositif fiable pour assurer le dépôt de la matière en monocouche sur la surface du convoyeur métallique du séparateur multifonctions.
6. Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques tournantes a prouvé son efficacité pour le traitement des mélanges des plastiques pulvérulents obtenus de DEEE. Les essais réalisés ont confirmé la séparabilité d'un mélange pulvérulent d'ABS et de PS, qui se chargent différemment par effet tribo-électrique dans un dispositif à lit fluidisé.
7. Le système de mesures simultanées et continues de la masse et de la charge électrique des produits collectés facilite l'analyse des effets de la multitude des facteurs qui influent sur l'efficacité de la séparation.
8. La durée du processus de charge tribo-électrique et la vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes n'affectent pas le résultat de la séparation dans ce type d'installation. Les facteurs qui ont un effet important sur le processus de séparation tribo-aéro-électrostatique sont : la haute tension appliquée, le débit d'air et la masse initiale du produit à séparer.
9. Les prochaines études seront focalisées sur la modélisation et l'optimisation expérimentale du processus de séparation tribo-aéro-électrostatique, pour plusieurs tailles des particules et combinaisons des produits.
10. Le transfert de cette technologie vers l'industrie passe par la résolution de plusieurs problèmes techniques : améliorer l'étanchéité de la chambre de tribo-électrisation et de séparation pour des particules de taille micrométrique ; assurer le fonctionnement continu de l'installation par des dispositifs appropriés de récupération des produits restés dans le lit fluidisé ; élaborer des schémas de séparation pour le tri des mélanges de trois constituants ou plus.

## CONCLUSION GENERALE



**Michael Faraday**

(1791-1867)

« All this is a dream. Still examine it by a few experiments. Nothing is too wonderful to be true, if it be consistent with the laws of nature ; and in such things as these, experiment is the best test of such consistency».

La grande diversité des constituants des déchets d'équipements électriques et électroniques traités dans les usines de recyclage, ou des biomasses végétales utilisées comme matières premières dans l'industrie agro-alimentaire, impose aux chercheurs et aux ingénieurs de développer de nouvelles technologies, aptes à assurer la séparation physique de ceux-ci, en vue de leur récupération et de leur valorisation. Après une brève synthèse sur l'état de l'art dans ces domaines, la thèse présente les deux installations de séparation électrostatique conçues et mises au point à l'Institut PPRIME, afin de répondre aux besoins de la recherche scientifique sur le tri des mélanges des matériaux pulvérulents et aux exigences des partenaires industriels. Une partie des études expérimentales a porté sur différents procédés de séparation électrostatique ou couronne-électrostatique, pour des mélanges de matières pulvérulentes ayant des conductivités différentes. D'autres études ont visé la modélisation expérimentale et l'optimisation des procédés de séparation tribo-vibro-électrostatique et tribo-aéro-électrostatique, pour des mélanges de polymères micronisés.

La conclusion générale de ces travaux de recherche peut être formulée ainsi : grâce à la maîtrise des trois mécanismes physiques qui assurent la charge électrique des mélanges pulvérulents (effet couronne, induction électrostatique, effet tribo-électrique), la séparation en champ électrostatique est un procédé efficace pour la purification des matières premières dans l'industrie agro-alimentaire et pour la récupération des matériaux contenus dans les déchets d'équipements électriques et électroniques. Par ailleurs, ce procédé non-polluant est caractérisé par des coûts d'exploitation et d'entretien réduits, ainsi que par une faible consommation d'énergie.

#### **a. Principales contributions originales**

1. Identification des problèmes scientifiques et techniques à résoudre dans le domaine de la séparation électrostatique pour une large gamme de matériaux pulvérulents.
2. Réalisation de deux installations expérimentales différentes ; la première met en œuvre un ou plusieurs des trois mécanismes de charge (effet couronne et/ ou induction électrostatique, effet tribo-électrique) en rapport avec les propriétés électriques des matériaux à traiter ; la seconde utilise seulement l'effet tribo-électrique pour la charge des matériaux isolants dans un lit fluidisé, en présence d'un champ électrique intense.

3. Confirmation de la faisabilité de la séparation électrostatique des matériaux pulvérulents de taille sous-millimétrique, provenant des industries agro-alimentaires et du recyclage des déchets équipements électriques et électroniques.
4. Etude de l'efficacité de l'induction électrostatique à séparer des mélanges de particules pulvérulentes dont les propriétés électriques ne sont pas connues par avance.
5. Analyse de la pureté du produit conducteur obtenu par séparation couronne-électrostatique.
6. Etude des phénomènes tribo-électriques liés au mouvement des particules isolantes dans des dispositifs de type lit vibrant ou fluidisé.
7. Evaluation des facteurs influents sur un processus tribo-aéro-électrostatique pour le tri d'un mélange pulvérulent d'ABS et de PS.
8. Démonstration de l'intérêt de l'utilisation de la méthode des plans d'expériences à la quantification des effets des facteurs et des interactions entre eux, afin d'exprimer le taux de récupération des produits pulvérulents : Al, ABS, PS, PC par des modèles mathématiques.
9. Mise au point d'un système d'acquisition et de traitement des données provenant des mesures simultanées et continues de charge électrique et de masse des produits de la séparation.

## **b. Perspectives**

1. Amélioration des installations de laboratoire :
  - conception d'un nouveau dispositif de dispersion des particules sur la surface du convoyeur métallique du séparateur multifonctions ;
  - renforcement de l'étanchéité de la chambre de tribo-électrisation des particules de taille micrométrique dans le séparateur tribo-aéro-électrostatique.
2. Recherche et développement d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique industriel, à fonctionnement continu.
3. Modélisation numérique des divers processus de séparation électrostatique, prenant en compte l'ensemble des phénomènes physiques en jeu.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



**Carl Friedrich Gauss**

(1777-1855)

« When a philosopher says something that is true then it is trivial. When he says something that is not trivial then it is false ».

- [1] SUEZ, "La seconde vie des déchets." [en ligne], Disponible sur : <http://www.emag.suez-environnement.com/seconde-vie-des-dechets>.
- [2] K. Haga, "Applications of the electrostatic separation technique." Handbook of Electrostatic Processes (J. S. Chang, A. J. Kelly, and J. M. Crowley, Eds), New York: Marcel Decker, pp. 365-386, 1995.
- [3] L. Brands, P. M. Beier, and I. Stahl, "Electrostatic separation. " Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. New York, NY, USA: Wiley, 2000.
- [4] L. Dascalescu, T. Zegloul, and A. Iuga, "Electrostatic separation of metals and plastics from WEEE." WEEE Recycling. Reserch, Development, and Policies (A. Chagnes, G. Cote, E. Ekberg, M. Nilsson, T. Retegan, Eds), Amsterdam:Elsevier, pp. 53-74, 2016.
- [5] J. E. Lawver and W.P. Dyrenforth, "Electrostatic Separation." Electrostatics and Its Applications, (A.D. Moore, Ed.) New York: Wiley, pp. 221-249, 1973.
- [6] Y. Hemery, U. Holopainen, A.M. Lampi, P. Lehtinen, T. Nurmi, V. Piironen, M. Edelmann, and X. Rouau, "Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part II: Electrostatic separation of particles." Journal of Cereal Science, Vol. 53, pp. 9–18, 2011.
- [7] Y. Higashiyama and K. Asano, "Recent progresses in electrostatic separation technology." Part. Sci. & Technol, Vol. 16, pp. 77-90, 1998.
- [8] A. Tilmatine, K. Medles, M. Younes, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, "Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 46, pp. 1564–1569, 2010.
- [9] L. Calin, and L. Dascalescu, "Procédé de séparation électrostatique d'un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en œuvre.", Brevet FR2943561, 2010.
- [10] A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, and L. Dascalescu., "Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes." IEE Proc. -Sci. Meas. Technol., Vol. 148, pp. 47-54, 2001.
- [11] L. Dascalescu, A Iuga, R. Morar, "Electrostatic Technologies for the Recycling of Non-ferrous Metals and Plastics from Wastes. " Inculet, I.I., Tanasescu, F.T., Cramariuc, R. (Eds.) The Modern Problems of Electrostatics with Applications in Environmental Protection, Dordrecht/Boston/London: Kluwer, pp. 77-89, 1999.

- [12] T. Zeghloul, S. Touhami, G. Richard, M. Miloudi, O. Dahou, and L. Dascalescu, "Optimal operation of a plate-type corona-electrostatic separator for the recovery of metals and plastics from granular wastes." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 52, pp. 2506 - 2512, 2016.
- [13] L. Dascalescu, C. Dragan, M. Bilici, R. Beleca, Y. Hemery, and X. Rouau, "Electrostatic bases for separation of wheat bran tissues." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 46, pp. 659 – 665, 2010.
- [14] J. Wang, E. Smits, R.M. Boom, and M.A.I. Schutyser, "Arabinoxylans concentrates from wheat bran by electrostatic separation." *J. Food Eng.*, Vol. 155, pp. 29–36, 2015.
- [15] J. Wang, M. Wit, M.A.I. Schutyser, and R.M. Boom, "Analysis of electrostatic powder charging for fractionation of foods." *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, Vol. 26, pp. 360–365, 2014.
- [16] A. Barakat, and X. Rouau, "Method for the fractionation of an oilseed cake, and applications of said method", Brevet WO 2015097290 A1, 2015.
- [17] A. Tilmatine, S. Flazi, K. Medles, Y. Ramdani, and L. Dascalescu. "Séparation électrostatique : complément des procédés mécaniques de recyclage des déchets industriels." *J. Electrostat.*, Vol. 61, pp. 21-30, 2004.
- [18] I.I. Inculet, G.S.P. Castle and J.D. Brown, "Electrostatic separation of plastics for recycling." *Part Sci. & Technol.*, Vol. 16, pp. 1691–100, 1998.
- [19] L. Dascalescu, A. Samuila, A. Mihalcioiu, S. Bente, and A. Tilmatine, "Robust design of electrostatic separation processes." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 41, pp. 715-720, 2005.
- [20] 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.
- [21] D.M Taylor, and P.E Secker, "Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements." Baldock, UK:Research Studies Press, 1994.
- [22] S. Atroune, A. Tilmatine, R. Alkama, A. Samuila, and L. Dascalescu, "Comparative experimental study of tribo-electric charging of two size-classes of granular plastics." *Part. Sci. & Technol.*, Vol.33, pp. 652-658, 2015.

- [23] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, V. Neamtu, and I. Suarasan, "Corona charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 27, pp. 1242-1251, 1994.
- [24] J.M. Crowley, "Fundamentals of Applied Electrostatics." Morgan Hill, California: Laplacian Press, 1999.
- [25] C.H. Park, N. Subasinghe, and H.S. Jeon, "Separation of covering plastics from particulate copper in cable wastes by induction electrostatic separation.", *Materials Trans.* Vol. 56, pp. 1140-1143, 2015.
- [26] H.J. White, "Industrial Electrostatic Precipitation." London, U.K.: Addison-Wesley, 1963.
- [27] J.A. Giacometti, S. Fedosov, and M.M. Costa, "Corona charging of polymers: recent advances on constant current charging." *Brazilian Journal of Physics*, Vol. 29, pp. 269-279, 1999.
- [28] J.H. Dessauer and H.E. Clark, "Xerography and Related Processes." London, U.K.: Focal Press, 1965.
- [29] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, and V. Neamtu. "Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes." *Part. Sci. & Technol.*, Vol. 16, pp. 25-42, 1998.
- [30] K. Senouci, K. Medles, and L. Dascalescu, "Effective solutions for monitoring the electrostatic separation of metal and plastic granular waste from electric and electronic equipment." *Waste Manag. & Res.*, Vol. 31, pp. 160-168, 2013.
- [31] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, I. Saurasan, A. Samuila and D. Rafiroiu, "Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators," *J. Electrostat.*, vol. 29, no. 3, pp. 221-225, 1993.
- [32] A. Abahazem, "Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz." Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, 2009.
- [33] B. Tabti, R. Mekideche, M. Plopeanu, L. Dumitran and L. Dascalescu, "Corona Charging and Charge Decay Characteristics of Non-woven Filter Media." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 46, pp. 634-640, 2010.

- [34] A. Antoniu, B. Tabti, M. Plopeanu and L. Dascalescu, "Accelerated discharge of corona-charged non-woven fabrics." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 46, pp. 1188-1193, 2010.
- [35] K. Senouci, A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, S. Das and L. Dascalescu, "Multivariate statistical process control of electrostatic separation processes." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 45, pp. 1079 -1085, 2009.
- [36] K. Medles, A. Tilmatine, F. Miloua, A. Bendaoud, M. Younes, M.Rahli, and L. Dascalescu, "Set point identification and robustness testing of electrostatic separation processes." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 43, pp. 618–626, 2007.
- [37] L. Dascalescu, S. Vlad, A. Iuga, and P. L. Levin, "Electrostatics of conductive particles in contact with a plate electrode affected by a nonuniform electric field." *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 34, pp. 60–67, 2000.
- [38] M.C. Plopeanu, L. Dascalescu, B. Neagoe, A. Bendaoud, and P.V. Notingher, "Characterization of two electrode systems for corona-charging of non-woven filter media." *J. Electrostat*, Vol. 71, pp. 517-523, 2013.
- [39] L. Dascalescu, A. Mizuno, R. Tobazéon, et al. "Charges and forces on conductive particles in roll-type corona-electrostatic separators." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 31, pp. 947–956, 1995.
- [40] P. Bérard. "Etude du vent ionique produit par décharge couronne à pression atmosphérique pour le contrôle d'écoulement aérodynamique." *Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris*, 2008.
- [41] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, M. Huzau, and L. Dascalescu, "Characterization of dual corona electrodes for electrostatic processes applications." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 44, pp. 692-698, 2008.
- [42] A. Samuila, M. Blajan, R. Belega, M. Huzau, R. Morar, L. Dascalescu, and A. Iuga, "Modeling of wire corona electrode operation in electrostatic separation at small and large gaps." *J. Electrostat.*, Vol. 63, pp. 955-960, 2005.
- [43] A. Bouteffaha, A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Plopeanu and L. Dascalescu, "Experimental and numerical characterization of corona discharge generated by a triode electrode system." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 51, pp. 2513-2519, 2015.

- [44] Govi, "Quelques expériences sur l'induction électrostatique." *J. Phys. Theor. Appl.*, Vol. 4, pp.264-266, 1875.
- [45] G. Richard, A.R. Salama, K. Medles, C. Lubat, S. Touhami, and L. Dascalescu, "Electrostatic Separation of two Types of Copper Wires from Electric Cable Wastes." *Proc. Electrostatics Joint Conference*, 13-17 June 2016, West Lafayette, USA. (submitted to *IEEE Trans Ind Appl.*).
- [46] A. Younes, H. Sayah, M. Younes, A. Samuila and L. Dascalescu, "Behavior of Conducting particles in a new electrostatic separator with two high-voltage electrodes." *Vol. 28*, pp. 207-216, 2010.
- [47] C. Mayer-Laigle, A. Cadin, S. Messal, L. Dascalescu, and X. Rouau, "Dry fractionation of plant material powders using an electrostatic corona separator: a model study." *5th International Congress on Green Process Engineering*, 2016 Canada.
- [48] W.R. Harper, "Contact and Frictional Electrification.", Morgan Hill, CA: Laplacian Press, 1998
- [49] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, and L. Dascalescu, "Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device." *J. Electrostat*, Vol. 63, pp. 937-942, 2005.
- [50] M. Blajan, R. Beleca, A. Iuga, and L. Dascalescu, "Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol 46, pp.1558 – 1563, 2010.
- [51] G. Buda, A. Samuila, S. Atroune, M. Bilici, and L. Dascalescu, "Set point identification of a tribocharging process for mixed granular solids." *J. Electrostat*. Vol. 71, pp. 407-412, 2013.
- [52] L.H. Lee, "Dual mechanism for metal polymer contact electrification." *J. Electrostat.*, Vol. 32, pp. 1-29, 1994.
- [53] S. Nicoara, L. Calin, A. Iuga, and N. Serban, "Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose." *Environment and Progress*, Vol. 6, pp.341- 346, 2006.
- [54] G.S.P. Castle, "Contact charging between insulators.", *J. Electrostat*, Vol. 40 and 41, pp. 13- 18, 1997.

- [55] E.G. Kelly and D.J. Spottiswood, "The theory of electrostatic separations: a review, part 1, Fundamentals", *Miner Eng*, Vol 2, pp. 33-46, 1989.
- [56] W. Jing, and M.J. Realff, "Design and optimization of free-fall electrostatic separators for plastics recycling", *AIChE J*, Vol. 49, pp. 3138-3149, 2003.
- [57] V. Gente, F.L. Marca, F. Lucci and P. Massacci, "Electrical separation of plastics coming from special waste." *Waste Manag*, Vol. 23, pp. 951-958, 2003.
- [58] R.D. Pascoe, and B.O. Connel, "Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation." *Miner Eng*, Vol. 16, pp. 1205-1212, 2003.
- [59] Trifield, "Tribo-electric series." [En ligne], Disponible sur : <https://www.trifield.com/content/tribo-electric-series/>.
- [60] L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, and L. Dascalescu, "Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 44, pp. 1044-1051, 2008
- [61] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, and A. Samuila, "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices." *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 18, pp. 1476-1483, 2011.
- [62] L. Calin, A. Mihalcioiu, A. Iuga, and L. Dascalescu. "Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification." *Part.Sci.& Technol.*, Vol.25, pp. 205-211, 2007.
- [63] C. Dragan, O. Fati, M. Radu, L. Calin, A. Samuila, and L. Dascalescu, "Tribocharging of mixed granular plastics in a fluidized bed device." *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 47, pp. 1922-1928, 2011.
- [64] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, and L. Dascalescu, "Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials." *J.Electrostat*, Vol. 69, pp. 631-637, 2011.
- [65] M. Sarki and A. Masumoto, "Electrostatic separation of chopped waste electric cables." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 2, pp 227-236, 2007.
- [66] A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S. Bendimerad, M. Miloudi and K. Medles, "Experimental investigation of electrostatic separators of plastic particles using different charging devices." *Separation Science and Technology*, Vol. 49:3, pp. 464-468, 2014.

- [67] M.M. Zelmat, A.T. Rizouga, K. Medles, and L. Dascalescu, "Experimental comparative study of different tri-bocharging devices for triboelectric separation of insulating particles." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 49, pp. 1113-1118, 2013.
- [68] J. Li, G. Wu, and Z. Xu, "Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation." *Waste Management*, Vol. 35, pp. 36–41, 2014.
- [69] S. Masuda, M. Toraguchi, T. Takahashi, and K. Haga, "Electrostatic beneficiation of coal using a cyclone-tribocharger." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 19, pp. 789-793, 1983.
- [70] L. Dascalescu, A. Urs, S. Bente, M. Huzau, and A. Samuila, "Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices." *J. Electrostat.*, Vol. 63, pp. 705-710, 2005.
- [71] Y. Higashiyama, Y. Ujiie, and K. Asano. "Triboelectrification of plastic particles on vibrating feeder laminated with a plastic film." *J. Electrostat.*, Vol. 42, pp. 63-68, 1997.
- [72] S. Kazmierczak, P. Anglaret et J. Filippi, "Technologie Génie Chimique", Centre régional de documentation pédagogique, Tome 3, 1989.
- [73] S.L. Escalante, G. Touchard, and G. Dominguez, "Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes." *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp.694-697, 2002.
- [74] J.D. Brown, and P.F. Wynen, "Tribo-charging and Electrostatic Separation of Mixed Electrically Insulating Particles." *U. S. Patent 6, .927-354*, August 9, 2005.
- [75] J. Li, and L. Dascalescu, "Newly-patented technical solutions for improving the tribo-electrostatic separation of mixed granular solids," *Recent Patents on Engineering*, Vol. 6, pp. 104-115, 2012.
- [76] H.R. Manouchehri, K.H.K. Hanumantha Rao, and K.S.E. Forssberg, "Review of electrical separation methodes. Part 2: Practical considerations." *Min. and Metal. Proc.*, Vol. 17, pp. 139-166, 2000.
- [77] A. Iuga, A. Samuila, R. Morar, M. Bilici, and L. Dascalescu, "Tribocharging techniques for the electrostatic separation of granular plastics from waste electric and electronic equipment." *Part. Sci. & Technol*, Vol. 34, pp. 45 – 54, 2016.
- [78] C.H. Park, H.S. Jeon, H.S. Yu, O.H. Han, and J.K. Park, J.K. "Application of electrostatic separation to the recycling of plastic wastes: separation of PVC, PET and ABS." *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 42, pp. 249–255, 2008.

- [79] Y. Brahami, A. Tilmatine, R. Ouiddir, A. Bendaoud, K. Medles, and L. Dascalescu, "Experimental modelling of a new triboelectrostatic separation process for micronized plastics." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 51, pp.4145 – 4150, 2015.
- [80] J. Wang, M. Wit, R. M. Boom, M.A.I. Schutyser, "Charging and separation behavior of gluten–starch mixtures assessed with a custom-built electrostatic separator." *Separation and Purification Technology*, Vol. 152, pp. 164–171, 2015.
- [81] G. Wu, J. Li, and Z. Xu, Z. "Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review." *Waste Management*, Vol. 33, pp. 585–597, 2013.
- [82] S. Das, K. Medles, M. Younes, C. Dragan, and L. Dascalescu, "Separation of fine granular mixtures in S-Plate type electrostatic separators." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 43, pp.1137-1143, 2007.
- [83] H. Daiku, T. Inoue, M. Tsukahara, H. Maehata, and K. Kakeda, "Electrostatic separation technology for waste plastics." *Conf. Rec. IEEE Ann. Meet.*, pp. 562 – 565, 2001.
- [84] R. Kohnlechner and L. Dascalescu, "New applications for “standard” electrostatic separators." *Conf. Rec. IEEE IAS Ann. Meet.*, Hong-Kong, pp. 2569–2572, 2005.
- [85] L. Dascalescu, A.Tilmatine, F. Aman, and M. Mihailescu, "Optimisation of electrostatic separation processes using response surface modelling." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 40, pp. 53-59, 2004
- [86] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, "Experimental study of the optimum operating conditions of a pilot-scale tribo-aero-electrostatic separator for mixed granular solids." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 49, pp. 699- 706, 2013.
- [87] C. Park, H. Jeon, and J. Park, "PVC removal from mixed plastics by triboelectrostatic separation." *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 144, pp. 470–476. 2007.
- [88] E. Lévy, "Dictionnaire de Physique." Paris, pp. 601,1988.
- [89] F. London, and Z. Physik, "Intermolecular Interactions" N° 245, pp. 63, 1930.
- [90] H.C Hamaker, "The London-van der Waals attraction between spherical particles." *Physica*, Vol..4, pp. 1058, 1937.
- [91] M. Séguin, J. Descheneau, and B. Tardif, "Ondes et physique moderne." *Physique XXI*, Tome C, 2010.

- [92] A. Samuila, L. Dascalescu. "Comportarea materialelor granulare în câmp electric." Cluj-Napoca, Editura Mediamira, 1999.
- [93] Y. Matsushita, N. Mori and T. Sometani, "Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary drum blades." *Electrical Engineering in Japan*, Vol.127, pp. 33–40, 1999.
- [94] A. Mekhalef, K. Medles, F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, L. Dascalescu, "Study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials." *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 51, pp. 4166– 4172, 2015.
- [95] C. Barron, J. Abécassis, M. Chaurand, V. Lullien-Pellerin, F. Mabilille, X. Rouau, A. Sadoudi, et M.F. Samson "Accès à des molécules d'intérêt par fractionnement par voie sèche." *Innovations Agronomiques*, Vol. 19, pp. 51-62, 2012.
- [96] Y. Hemery, X. Rouau, C. Dragan, M. Bilici, R. Belega, and L. Dascalescu, "Electrostatic properties of wheat bran and its constitutive layers: Influence of particle size, composition, and moisture content." *Journal of Food Engineering*, Vol. 93, pp. 114–124, 2009.
- [97] Y. Hemery, X. Rouau, V. Lullien-Pellerin, C. Barron, and J. Abecassis, « Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality», *Journal of Cereal Science*, Vol.46, pp.327–347, 2007.
- [98] Z. Chen, F. Liu, L. Wang, Y. Li, R. Wang, and Z. Chen, "Tribocharging properties of wheat bran fragments in air–solid pipe flow." *Food Research International*, Vol. 62, pp. 262–271, 2014.
- [99] Z. Chen, L. Wang, R. Wang, Y. Li, and Z. Chen, "Triboelectric separation of aleurone cell-cluster from wheat bran fragments in non-uniform electric field." *Food Research International*, Vol. 62, pp. 111–120, 2014.
- [100] T.X. Li, H. Ban, J.C. Hower, J.M. Stencel, and K. Saito, "Dry triboelectrostatic separation of mineral particles: a potential application in space exploration." *J. Electrostat.*, Vol. 47, pp. 133–142, 1999.
- [101] F. Cangialosi, M. Notarnicola, L. Liberti, J.M. Stencel, "The effects of particle concentration and charge exchange on fly ash beneficiation with pneumatic triboelectrostatic separation." *Separation and Purification Technology*, Vol. 62, pp. 240–248, 2008.

- [102] C. A. Lockert, R. Lister and J. M. Stencel "Commercialization status of a pneumatic transport, triboelectrostatic system for carbon/ash separation." International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Paper #46, 2001.
- [103] W. Whitelaw, "Particle separator and method of separating particles", US 6365856 Patent, 2002.
- [104] R. Gupta<sup>1</sup>, D. Gidaspow, and D.T. Wasan, "Electrostatic separation of powder mixtures based on the work functions of its constituents." Powder Technology, Vol. 75, pp. 79–87, 1993.
- [105] S. Banerjee, and S.E. Law, "Characterization of chargeability of biological particulates by triboelectrification." IEEE Trans. Ind. Appl, Vol. 14, pp. 1201-1205, 1999.
- [106] R. Ciccu, M. Ghiani, R. Peretti, A.Serci, and A. Zucca, "A new electrostatic separator for fine particles." Proceedings of the XXI International Mineral, Processing Congress. Italy, 2000.
- [107] K. Ando, T. Inoue, T. Niwa, and T. Itoga, "Method and facility for sorting and separating waste plastic." Brevet EP 2 486 506 A1, 2010.
- [108] S. Yokohama, M. Shimoda, M. Iji, and Y. Kiji, "Electrostatic separating apparatus." Brevet US 6290919, 2000.
- [109] J.K. Kim, and H.D. Lee, "Electrostatic separator for unburned carbon from coal ash using electrostatic induction type ejector tribocharger", Brevet US 2011036758A1, 2011
- [110] J.M. Stencel, J.L. Schaefer, H. Ban, and J.K. Neathery, "Apparatus and method for triboelectrostatic separation." Brevet US 5938041, 1999.
- [111] <http://www.hamos.com/infocenter/brochure.html#hamos/22>.
- [112] B.E. MacKay, B. Sert, "Electrostatic separation control system." Brevet US 8552326 B2, 2013.
- [113] ADEME, "Rapport annuel sur la mise en oeuvre de la réglementation des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)." 2015.
- [114] A. Cadin, "Optimisation d'un trieur électrostatique par effet couronne pour la séparation de produits végétaux pulvérulents;" Memoire Master, Université de Montpellier, 2015.

- [115] M. Remadnia, M. Kachi, S. Messal, A. Oprean, X. Rouau and L. Dascalescu, "Electrostatic separation of peeling and gluten from ground wheat grains." Part. Sci. Technol., Vol. 32, pp. 608-615, 2014.
- [116] A. Tilmatine, A. Benabboun, Y. Brahmi, A. Bendaoud, M. Miloudi, and L. Dascalescu, "Experimental investigation of a new triboelectrostatic separation process for mixed fine granular plastics." IEEE Trans. Ind., Appl. Vol. 50, pp. 4245 – 4250, 2014.
- [117] 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.
- [118] J. Wei, and M.J. Realff, "Design and optimization of drum-type electrostatic separators for plastics recycling."Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 44, pp. 3503–3509, 2005.
- [119] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, M. Boukhoulida, M. Bilici, and L. Dascalescu, "Two stage electrostatic separator for the recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment." Journal of Electrostatics, Vol. 71, pp.681-688, 2013.
- [120] K. Senouci, A. Bendaoud, K. Medles, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, "Statistical control of electrostatic separation processes." IEEE Trans. Ind. Appl, Vol. 16, pp. 22-27, 2010.
- [121] S. Messal, R. Corondan, I. Chetan, R. Ouiddir, K. Medles and L. Dascalescu, "Electrostatic separator for micronized mixtures of metals and plastics originating from waste electric and electronic equipment." Journal of Physics: Conference Series, Vol. 646, 2015.
- [122] S. Messal, T. Zeghloul, A. Mekhalef, and L. Dascalescu, "Sorting of finely-grinded granular mixtures using a belt-type corona-electrostatic separator." IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 18-22 Oct, Addison, USA, 2015. (accepted IEEE Trans Ind Appl).
- [123] S. Messal, A. Mekhaleff, K.Medles, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, "Factors that influence the efficiency of a tribo-eero-electrostatic separator for finely-grinded matter." Proc. Electrostatics Joint Conference, 13-17 June 2016, West Lafayette, USA. (submitted to IEEE Trans Ind Appl.)
- [124] M.A. Noras, "Non-contact surface charge/voltage measurements, capacitive probe Principle of operation." TREK Application Note, N°.3001, 2002.

- [125] A. Fatihou, L. Dascalescu, N. Zouzou, B. Neagoe, A. Reguig, and L.M. Dumitran, "Measurement of surface potential of non-uniformly charged insulating materials using a non-contact electrostatic voltmeter." *IEEE Trans. Dielect. El. Insul.*, Vol. 23, pp. 2377-2384, 2016.
- [126] N.L. Frigon, and D. Mathews, "Practical Guide to Experimental Design." New York: Wiley, 1996.
- [127] C.R. Hicks, and K.V. Turner Jr., "Fundamental Concepts in the Design of Experiments." Oxford: Oxford University Press, 1999.
- [128] J. Goupy, "Experimental Design for Response Surfaces (in French, Plans d'expériences pour surfaces de réponse)." Paris: Dunod, 253- 255.1999.
- [129] M. Kachi, M. Nemamcha, B. Tabti, and L. Dascalescu, "Comparison between three measurement methods for characterizing the charge state of granular insulating materials." *J. Electrostat*, Vol. 69, pp. 394-400, 2011.
- [130] L. Eriksson, E. Johansson, N. Kettaneh-Wold, C. Wikstöm, and S. Wold, "Design of Experiments. Principles and Applications. " Umeaa, Sweden: Umetrics, 2000.
- [131] N. J. Félici, "Forces et charges de petits objets en contact avec une électrode affectée d'un champ électrique." *Rev. Gén. Elect.*, Vol. 75, pp. 1145–1160, 1966.
- [132] A. Mekhaleff, S. Messal, K. Medles, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, "A propeller-type tribocharger for granular plastics mixtures." *Proc. Electrostatics Joint Conference*, 13-17 June 2016, West Lafayette, USA. (submitted to *IEEE Trans Ind Appl.*)
- [133] G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki, and T. Fujita, "Electrostatic separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone." *Mag. Electr. Separat.*, Vol. 11, pp. 63–92, 2002.
- [134] A. Tilmatine and L. Dascalescu, "Set-point identification of a free-fall triboelectrostatic separation process for plastic particles." *International Journal of Environmental Studies*, Vol. 67, pp. 27–40, 2010.
- [135] F. Boukhoulda, M. Miloudi, K. Medles, M. Rezoug, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, "Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 49, pp. 2375- 2381. 2013.
- [136] M. Miloudi, L. Dascalescu, LI. Jia, K. Medles, A. Tilmatine, "Improved Overall Performances of a Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Granular Plastics From Waste Electric and Electronic Equipment." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 51, pp. 4159-4165, 2015.

- [137] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, R. Ouiddir, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, "Modelling and optimization of a separator for granular mixtures of multiple insulating materials." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 51 pp. 4743-4751. 2015.
- [138] Y. Brahami, A. Tilmatine, S.E Bendimerad, M. Miloudi, M. Zelmat, L. Dascalescu, "Tribo-aero-electrostatic separation of micronized mixtures of insulating materials using "back-and-forth" moving vertical electrodes." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 23, pp. 669-704, 2016.

# ANNEXES



**Thomas Alva Edison**

(1847-1931)

« The three great essentials to achieve anything worthwhile are, first, hard work ; second, stick-to-itiveness ; third, common sense ».

**Annexe 1 : Table de Cochran.**

<b>N</b> \ <b>r-1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	0,9965	0,9760	0,9393	0,9867	0,8778	0,8534
<b>3</b>	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6771
<b>4</b>	0,9065	0,7679	0,6641	0,6287	0,6835	0,5598
<b>5</b>	0,8412	0,6838	0,5981	0,5441	0,5065	0,4783
<b>6</b>	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184
<b>7</b>	0,7871	0,5612	0,4800	0,4307	0,3974	0,3726
<b>8</b>	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362
<b>9</b>	0,6885	0,4776	0,4027	0,3684	0,3266	0,3067
<b>10</b>	0,6080	0,4450	0,3733	0,8311	0,3023	0,2823
<b>11</b>	0,5410	0,3924	0,3264	0,2880	0,2624	0,2439

**Annexe 2 : Table de Student**

	<b>Risque 5 %</b>	<b>Confiance 95 %</b>
<b>ddl<sub>SCEE</sub></b>	<b>t(crit)</b>	<b>t(crit)</b>
<b>1</b>	12,70	63,66
<b>2</b>	4,30	9,93
<b>3</b>	3,18	5,84
<b>4</b>	2,78	4,60
<b>5</b>	2,57	4,03
<b>6</b>	2,45	3,71
<b>7</b>	2,37	3,50
<b>8</b>	2,31	3,36
<b>9</b>	2,26	3,25
<b>10</b>	2,23	3,17

**Annexe 3 : Table de Fischer-Snedecor.**

<b>ddl<sub>SCEE</sub></b>	<b>ddl<sub>SCEA</sub></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>1</b>		161	199,5	215,7	224,6	230,2	234	236,8	239	240,5
<b>2</b>		18,5	19	19,16	19,25	19,3	19,33	19,35	19,4	19,38
<b>3</b>		10,1	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81
<b>4</b>		7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6

**PROCEDES DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE DE  
MATERIAUX PULVERULENTS.  
APPLICATIONS DANS L'INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE ET  
AU RECYCLAGE DES DECHETS**

La démarche expérimentale menée dans cette thèse a eu comme objectif l'étude de la faisabilité de la séparation électrostatique d'une large gamme de mélanges de matériaux pulvérulents provenant de l'industrie agro-alimentaire (paille, copeaux de bois, semoule) ou du recyclage des déchets (Al, ABS, polycarbonate, polystyrène). Les recherches se sont focalisées sur des techniques faisant appel à trois mécanismes physiques différents pour la charge des matériaux : la décharge couronne, l'induction électrostatique et l'effet tribo-électrique. Deux nouvelles installations ont été conçues et réalisées. Elles contribuent à la compréhension des phénomènes physiques rencontrés lors de la séparation des particules sous-millimétriques, dont les trajectoires sont difficiles à contrôler, en raison de l'influence importante des forces aérodynamiques en jeu. La première installation, le séparateur électrostatique multifonctions à électrode-convoyeur, met en œuvre un ou plusieurs des trois mécanismes de charge, en rapport avec les propriétés électriques des matériaux à traiter. La seconde installation, le séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes-disques-tournantes, utilise seulement l'effet tribo-électrique pour la charge des matériaux isolants dans un lit fluidisé. Le système de mesures simultanées et continues de la masse et de la charge électrique des produits collectés a facilité l'analyse des phénomènes. Les recherches menées dans cette thèse ont confirmé la séparabilité électrostatique des mélanges de matériaux pulvérulents. L'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences permet d'identifier les facteurs influents et de trouver le point de fonctionnement optimal.

**Mots clés :** Séparation électrostatique, Matériaux pulvérulents, Plans d'expériences, Charge électrique, Champ électrique.

**ELECTROSTATIC SEPARATION PROCESSES FOR POWDERY MATERIALS.  
APPLICATIONS IN FOOD INDUSTRY AND WASTE RECYCLING**

The experimental approach undertaken in this thesis was aimed at the study of the feasibility of the electrostatic separation of a wide range mixtures of powdery materials processed in the food industry (straw, wood chips, meal), or originating from the recycling of waste electric and electronic equipment (Al, ABS, polycarbonate, polystyrene). Researches were focused on techniques using three different physical mechanisms for electrical charging of the materials: corona discharge, electrostatic induction and triboelectric effect. Two new installations have been designed and engineered to facilitate the understanding of the physical phenomena involved in the separation of fine particles, the trajectories of which are difficult to control, as strongly affected by the aerodynamic forces. The first installation, the belt-type multifunction electrostatic separator, offers the possibility to study one or several of the three charging mechanisms, in relation with the electrical properties of the materials to be processed. The second installation, the two-rotating-disks-type tribo-aero-electrostatic separator, uses only the triboelectric effect for charging mixtures of insulating materials in a fluidized bed. A system of simultaneous and continuous measurement of mass and electric charge of collected products facilitated the investigation of the physical phenomena. These researches confirm the feasibility of the electrostatic separation of powdery materials, by taking advantage of the design of experiments methodology to identify the influential factors and find the optimum operating conditions.

**Key words:** Electrostatic Separation, Powdery materials, Design of experiments, Electric Charge, Electric field.