

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



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Génie Electrique

Département d'Électrotechnique

Thèse présentée par :

Abdelkader MEKHALEF BENHAFSSA

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat 3^{ème} cycle en Électrotechnique

Option : Haute Tension

Intitulé de thèse :

**Etude d'un séparateur tribo-aéro-
électrostatique des mélanges des matériaux
poudreux**

Présentée devant le jury composé de :

Président:	Pr. Bendaoud Abdelber	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès
Directeur de thèse:	Pr. Medles Karim	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès
Co-directeur de thèse:	Pr. Dascalescu Lucien	Professeur	Université de Poitiers(France)
Examineurs:	Dr. Miloua Farid	M.C.A	Université de Sidi Bel Abbès
	Dr. AKSA Wessim	M.C.A	Université de Sidi Bel Abbès
	Pr. Ouiddir Rabah	Professeur	Université M.B. Oran
Invité:	Pr. Tilmatine Amar	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès

Soutenue le :Avril 2017

Je dédie ce travail à
ma mère

REMERCIEMENTS

La thèse de doctorat représente un travail s'inscrivant dans la durée, et pour cette raison, constitue le fil conducteur d'une tranche de vie de son auteur, parfois au crépuscule de la candeur étudiante, et souvent à l'aube de la maturité scientifique. De nombreuses personnes se retrouvent ainsi de manière fortuite ou non, pour le pire ou le meilleur, entre le doctorant et son doctorat. Ce sont certaines de ces personnes que j'aimerai mettre en avant dans ces remerciements.

Je tiens à remercier spécialement mon directeur de thèse **Pr Karim MEDLES**. Je vous remercie d'avoir cru en mes capacités, pour le temps et la patience que vous m'avez accordés tout au long de ces années en me fournissant d'excellentes conditions logistiques. Je garderai dans mon cœur votre générosité, votre compréhension et votre efficacité. Pour tout ce que vous m'avez donné, je vous remercie très sincèrement.

Je tiens à remercier mon co-directeur de thèse **Pr Lucian DASCALESCU** d'avoir bien assuré la direction et l'encadrement de mes travaux de thèse. Merci pour votre gentillesse, votre patience et vos précieux conseils. J'ai beaucoup apprécié travailler à vos côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Je garde toujours beaucoup de plaisir à discuter avec vous et à bénéficier de vos conseils.

Je suis redevable à la contribution de monsieur le directeur de l'IUT d'Angoulême **Dr Thami ZEGHLOUL** qui m'a dirigé au cours des deux dernières années de cette thèse. Il a consacré beaucoup de temps et d'énergie pour son avancement. Qu'il trouve ici ma profonde reconnaissance et mes profonds respects.

Mes sincères remerciements et ma gratitude vont aussi à **Pr Abdelber BENDAOUD** pour avoir accepté de juger ce travail et d'en présider le jury de soutenance.

J'adresse ma profonde reconnaissance à : **Dr Farid MILOUA**, **Dr Wessim AKSA** et **Pr Rabah OUIDDIR** pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce modeste travail.

Je remercie **Pr Amar TILMATINE**, directeur de Laboratoire APELEC, pour l'intérêt qu'il a manifesté à ce travail en participant en qualité de membre invité à ce jury.

Je remercie très chaleureusement les membres et les ex-membres de l'équipe Electrostatique Appliquée de **l'institut Pprime, IUT d'Angoulême**, qui m'ont beaucoup aidé et encouragé : Gontran RICHARD, Bogdan NEAGOE, Yopa PRAWATYA, Fethi BAKKARA, Abdeljalil REGUIG, et les autres. Je leur souhaite tous une très belle aventure.

Je remercie également tous les membres de laboratoires **IRECOM** et **APELEC** de **l'université Djillali Liabés** : en particulier Mr Mokadem Djillali et Mme Snoussaoui Aicha.

Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille. Malgré mon éloignement depuis les deux dernières années, leur intelligence, leur confiance, leur tendresse, leur amour me portent et me guident tous les jours. Merci pour avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Est-ce un bon endroit pour dire ce genre de choses ? Je n'en connais en tous cas pas de mauvais. Je vous aime.

TABLE DES MATIERES

Introduction Générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I

Etat de l'art de la séparation triboélectrique

I.1 Recyclage des déchets d'équipements électrique et électronique (DEEE).....	5
I.1.1 Définition.....	6
I.1.2 Recyclage des DEEE et DEEP	11
I.2 Séparation tribo-électrostatique des matériaux Plastiques.....	15
I.2.1 Mécanisme de charge triboélectrique	15
I.2.2 Série triboélectrique.....	18
I.2.3 Dispositifs de charge triboélectrique	20
I.2.4 Forces aérodynamiques et électrostatiques.....	25
I.3 Installations de séparation tribo-électrostatique.....	29
I.3.1 Séparateurs tribo-électrostatiques des mélanges granulaires.....	29
I.3.2 Séparateurs tribo-aéro-électrostatique pour les mélanges granulaires.....	33
I.3.3 Séparateurs tribo-électrostatique pour les mélanges poudreux.....	37
I.4 conclusion	43

Chapitre II

Chargement Triboélectrique des matériaux isolants

II.1 – Mise en Œuvre Expérimentale	44
II.1.1. Dispositif de tribocharge de type hélice	44
II.1.2 Instrumentation	47
II.1.3 Instrumentation virtuelle	49

II.2 Chargement des matériaux granulaires :.....	52
II.2.1 Description des matériaux :.....	52
II.2.2 Etude des facteurs influents – matériaux millimétriques- :.....	54
II.2.3 Etude de chargement de l’ABS poudreux :.....	57
II.3 Séparation des matériaux granulaires :.....	59
II.4 Conclusions :.....	62

Chapitre III

Séparateur Tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques

III.1 Matériels et méthode	63
III.1.1 Matériaux	63
III.1.2 Installation expérimentale :.....	65
III.1.3 Méthodologie expérimentale.....	67
III.2 Modélisation expérimentale :	68
III.2.1 Etude préliminaire :.....	68
III.2.2 Evaluation de la signification des facteurs :.....	71
III.2.3 Optimisation :.....	82
III.3 Conclusions :	84

Chapitre IV

Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques tournantes

IV.1 Matériel et méthode.....	85
IV.1.1 Matériaux	85
IV.1.2 Installation expérimentale :.....	88
IV.1.3 Méthodologie expérimentale	90
IV.2 Etude des facteurs :	95

IV.3 Etude de la taille des particules	100
IV.4 Conclusions :	105

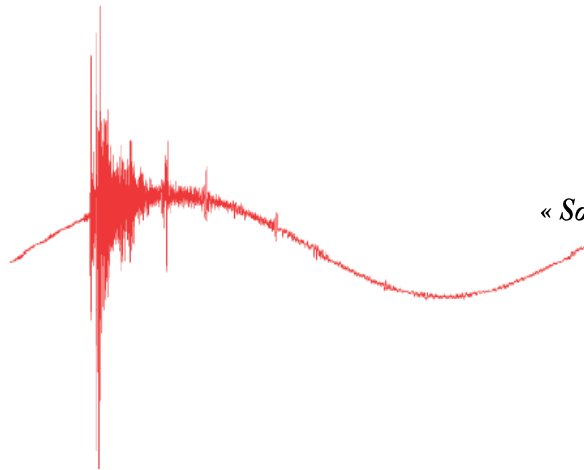
Chapitre V

Fonctionnement en continu du séparateur Tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques tournantes

V.1 Etude des facteurs en régime continu	107
V.1.1 Procédure expérimentale	107
V.1.2 Résultats et discussions	110
V.2 Etude de l'effet la taille des particules.....	115
V.2.1 Procédure expérimentale	116
V.2.2 Résultats et discussions	117
V.3 Conclusions :	123
Conclusion Générale	125
Références Bibliographiques	128
Annexes	140

INTRODUCTION

GENERALE



*« Some people dream of success...
while others wake up
and work hard at it »*

Winston Churchill

INTRODUCTION GENERALE

Avec une croissance significative de la consommation et une mise à niveau fréquente des Equipements Electriques et Electroniques (EEE), les déchets EEE (DEEE) sont devenus l'un des flux de déchets les plus rapides à l'échelle mondiale. Dans l'Union européenne, les DEEE augmentent trois fois plus vite que les déchets municipaux moyens [1]. Les plastiques représentent environ 10% à 30% de la quantité totale de DEEE [2] et, par conséquent, le volume croissant de matières plastiques provenant des DEEE (voir figure 1) entraîne une exigence urgente de gestion de la fin de vie des plastiques des DEEE (DEEP). Ce constat a fixé des orientations majeures de la politique de gestion des déchets par les Etats membres de l'UE. La directive-cadre sur les déchets (directive n° 2008/98/CE) acte les principes de pollueur-payeur, de gestion des déchets au plus près du lieu de production et élargit la responsabilité du producteur. Cette directive propose aux Etats membres un processus hiérarchisé de gestion des déchets en 5 points : prévenir la production des déchets, préparer les déchets en vue de leur réemploi, les recycler, les valoriser, les éliminer de manière sûre et dans des conditions respectueuses de l'environnement. La technique de séparation électrostatique est un procédé capable de satisfaire bon nombre de ces points.



Figure i.1. Les déchets TV et les DEEE plastiques stockés à Shenzhen-Chine. [4]

Au cours des dernières années, les activités de recyclage sur les matériaux polymères augmentent et deviennent de plus en plus importantes [3]. Les méthodes de récupération des matériaux provenant des DEEP sont variées. Les procédés gravitationnels ou par flottation étant moins efficaces, les technologies électrostatiques se sont imposés comme la solution de

choix pour le recyclage des matériaux plastiques contenus dans ces déchets. D'autant plus que la séparation électrostatique est une technique non-polluante, caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien.

Divers dispositifs utilisant l'effet triboélectrique ont été conçus et réalisés comme moyens de charger les granules en vue de leur séparation dans un champ électrique, suivant la polarité de l'électrode et le signe de la charge acquise. Multiples recherches avaient déjà été réalisées par des laboratoires Européens, Américains, Canadiens, Algériens, Japonais ou Roumains, dans le domaine de la séparation tribo-électrique, notamment les bons résultats obtenus dans le cas des mélanges granulaires de taille millimétrique [6-11]. Cependant, peu de travaux ont eu comme objectif la séparation des mélanges de matériaux poudreux (particules de taille sous-millimétrique < 1 mm), tels que les minerais et les produits agro-alimentaires [12-15]. Les recherches actuelles sur la séparation tribo-électrostatique des mélanges de matériaux granulaires poudreux visent le contrôle des trajectoires des particules, qui sont fortement affectées par les forces aérodynamiques [16-18].

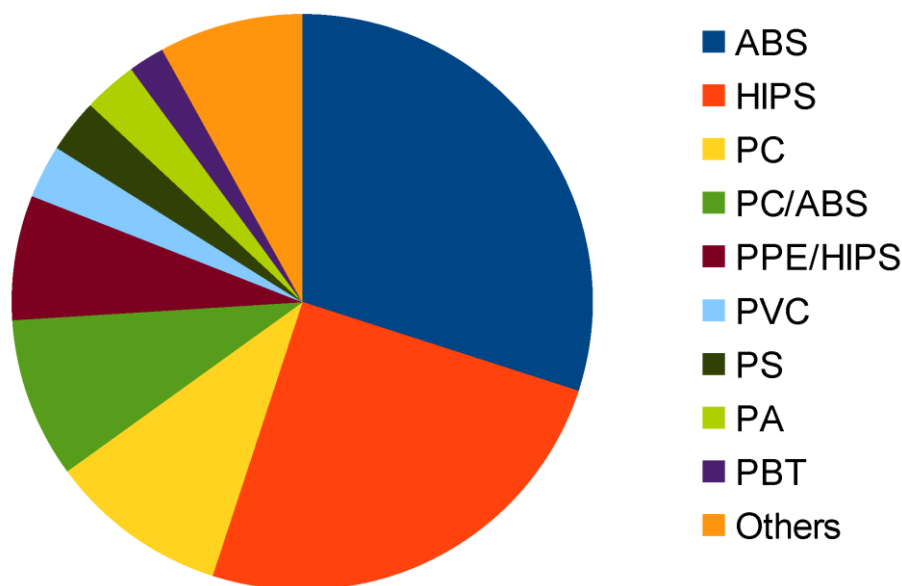


Figure i.2. Composition type des DEEE. [5]

L'objectif de la thèse est de montrer la faisabilité et les particularités de la séparation tribo-électrostatique de mélanges de matériaux poudreux isolant, les recherches sont focalisées sur le mécanisme de la tribocharge. Trois nouvelles installations ont été conçues et réalisées au sein des laboratoires IRECOM de l'Université de Sidi Bel Abbès, Algérie, et l'Institut PPRIME de l'Université de Poitiers, France. Elles contribuent à la compréhension

des phénomènes physiques rencontrée lors de la séparation tribo-électrique des particules poudreuses isolantes, dont les trajectoires sont difficiles à contrôler, en raison de l'influence importante des forces aérodynamiques en jeu et leur faible poids. La première installation, le dispositif de charge triboélectrique de type hélice, met en œuvre le mécanisme de la charge tribo pour les particules poudreuse et granulaires, ainsi que les particularités du chargement triboélectrique des matériaux poudreux par rapport des matériaux granulaires de taille millimétrique. La seconde installation, le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques, a été réalisé au laboratoire IRECOM de l'Université de Sidi Bel Abbés pour la séparation des particules poudreuses. La troisième installation, le séparateur tribo-aéro électrostatique à deux électrodes-disques tournantes, a été conçu par l'équipe Electrostatique Appliquée de l'Institut PPRIME (IUT d'Angoulême, France) qui a piloté sa fabrication par la société CITF (Saint-Cybardeaux, France). Les particules se chargent par effet triboélectrique dans un lit fluidisé, en présence d'un champ électrique, créé entre les deux électrodes-disques connectées à des alimentations haute tension de polarités opposées et entraînées par moteur à vitesse variable.

Dans le **chapitre I**, quelques concepts sur l'effet tribo-électrique sont passés en revue, ainsi que la construction et les principes de fonctionnement de certains dispositifs de triboélectrisation et 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 de travail.

A l'aide d'un nouveau dispositif de charge de type hélice, équipé d'instrumentation virtuelle, il a été possible d'étudier le processus d'acquisition de charge plusieurs matériaux granulaires et poudreux. Les données expérimentales dans le **chapitre II** présentent les particularités de l'acquisition de charge des matériaux poudreux par rapport aux matériaux granulaires de taille millimétrique. Des essais de séparation des mélanges granulaires dans un séparateur à chute libre ont été effectués pour prouver l'efficacité du chargeur pour les mélanges de taille millimétrique.

Les expériences présentées dans le cadre du **chapitre III** ont visé l'évaluation de la faisabilité de la séparation électrostatique des mélanges de matériaux poudreux en utilisant un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques. Les résultats des études menées en utilisant la méthodologie des plans expériences montrent la faisabilité de la séparation tribo-électrique des particules isolantes poudreuses, en utilisant le mécanisme de

charge à lit fluidisé. Son avantage est que les particules chargées s'attachent directement aux électrodes et seront collectées par la suite. Les taux de récupération élevés justifieraient l'utilisation de ce séparateur tribo-aéro-électrostatique pour une bonne séparation des particules de taille fines isolantes.

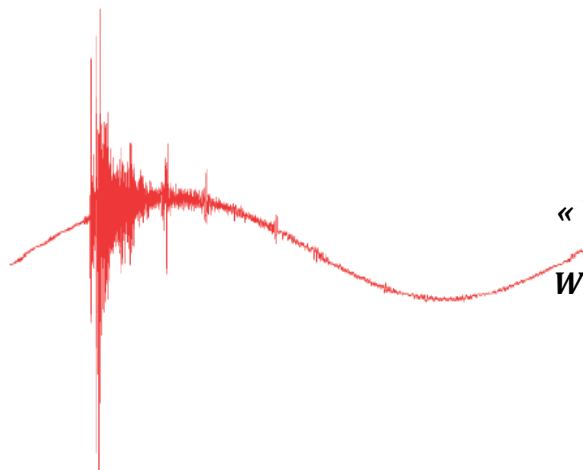
L'étude d'un autre séparateur tribo-aéro-électrostatique fait l'objet du **chapitre IV**. Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques représente une technologie récente développée pour le traitement des déchets plastiques poudreux. L'étude de la séparation des particules poudreuses ainsi que l'influence de la taille des particules, ont été réalisées en étudiant la masse et la charge massique dans chaque bac collecteur durant le processus de séparation à l'aide de l'instrumentation virtuelle. Les techniques de mesure utilisées ont permis une meilleure compréhension de l'influence de plusieurs paramètres sur la nouvelle installation.

Les résultats obtenus de cette étude ont été des arguments forts en faveur de la construction d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques (pilote préindustriel). L'étude de régime de fonctionnement continu était nécessaire pour l'amélioration de ce séparateur en vue de son utilisation en milieu industriel. L'étude présentée dans le **chapitre V** contient les solutions techniques préconisées pour la réalisation d'un séparateur similaire à vocation industrielle.

L'association dans un seul dispositif, du mécanisme de charge triboélectrique en lit fluidisé et de deux électrodes haute tension en mouvement, présente un procédé efficace pour le traitement des mélanges des matériaux isolants poudreux provenant des DEEE, en évitant les problèmes liés aux chargements des matériaux isolants poudreux. Cette conclusion générale, qui clôturera la thèse, s'accompagne d'une synthèse des principales contributions apportées dans le domaine de la séparation des particules isolantes, ainsi que de l'énoncé des perspectives ouvertes par ce travail.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART



« Why speculate

When you can calculate? »

John Baez

Partout dans le monde, le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) est devenu un enjeu fondamental du développement durable. Les méthodes de récupération de matériaux provenant de ces déchets sont variées [19]. Les procédés gravitationnels ou par flottation étant moins efficaces, les technologies électrostatiques se sont imposées comme la solution de choix pour le recyclage des matériaux plastiques contenus dans ces déchets [20].

La séparation électrostatique est le terme générique pour une classe importante de technologies utilisées pour le tri des matériaux solides par les forces électriques qui agissent sur les particules chargées ou polarisées [21-24]. L'essor de son application au recyclage des métaux et plastiques à partir des déchets industriels est dû au fait qu'il s'agit d'une technologie non-polluante, caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien [25-30].

La première partie de ce chapitre sera consacrée à l'étude de la progression des DEEE, et des méthodes de recyclage des matériaux provenant de cette catégorie de déchets. Dans la deuxième partie seront exposés la théorie de la séparation électrostatique, les mécanismes de charge, les forces exercées sur les particules granulaires et poudreuses, ainsi que les différentes technologies de chargement triboélectrique. Enfin, l'étude bibliographique de différentes installations de séparation tribo-électrostatique fera l'objet de la dernière partie du chapitre.

I.1 RECYCLAGE DES DECHETS D'EQUIPEMENTS ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE (DEEE)

Une famille moyenne dans les années 1960 ne possédait que peu d'appareils électriques : généralement un poste de radio, un téléviseur noir et blanc, un réfrigérateur, un aspirateur, un lave-linge, et un lecteur de disque. Notons qu'il s'agit ici de foyers qui étaient relativement bien équipés. Trente ans plus tard, avec la prolifération et le taux stupéfiant de développement technologique de l'équipement électronique, la question de la gestion de fin vie des équipements est devenue de plus en plus urgente [31].

Aujourd'hui, la production d'équipements électriques et électroniques est toujours l'une des activités à la croissance des plus rapides et son chiffre d'affaires dépasse même celui des constructeurs automobiles. Cette croissance rapide engendre également plus de DEEE ou e-déchets [32]. Contrairement à la plupart des autres déchets, il peut y avoir un décalage

considérable entre la fin de vie de ces équipements et leurs rapports éventuels au flux des déchets électroniques. Ainsi, les quantités de DEEE réutilisées, reconditionnées, exportées ou rapportées aux déchèteries sont incertaines. Les petits appareils électroniques (p-DEEE) [33], comme une brosse à dents électrique, un sèche-cheveux, ou un téléphone portable rapportent souvent aux déchets municipale solides (MSW : municipal solid waste). Les déchets électronique riche en métal sont vendus pour leur valeur en métal, ou mêmes volé pour elle.

L'obsolescence ou encore l'obsolescence programmée engendrent la substitution rapide des appareils de télécommunications ou des technologies de l'information ; les moniteurs à tube à rayons cathodiques (CRT) sont rapidement remplacés par écrans à cristaux liquides (LCD) ou à plasma, ce qui augmente la quantité de déchets à éliminer. Il y a au moins quelque 1000 substances différentes dans les déchets électroniques. L'entremêlement proche des matériaux, ainsi que leur utilisation en quantités infimes rendent pratiquement impossible le tri et la séparation de ces flux ; en outre, il y a une énorme variété dans les compositions des déchets électroniques. Les déchets électroniques contiennent également des polluants dangereux, dont des métaux lourds, comme le mercure, le plomb et le cadmium, des bis-phényles poly-chlorés (BPC), ou des agents ignifuges bromés (RFB)

I.1.1 Définition

Les DEEE sont des appareils alimentés électriquement qui ne satisfont plus le propriétaire actuel pour leur but initial. Dans chaque état, les DEEE sont décrits différemment, au moyen de listes inclusives et / ou des définitions juridiques. L'ordonnance suisse sur la restitution, la reprise et l'élimination des équipements électriques et électroniques (1998) a discerné 4 groupes génériques : [34-35]

- Appareils électroniques de divertissement.
- Appareils faisant partie du bureau, la communication et l'informatique.
- Les appareils ménagers.
- Les composants électroniques des appareils ci-dessus.

En 2004, il a été modifié pour correspondre à la classification de la directive européenne identifiant dix catégories (Tableau I.1) de déchets électroniques qui ne doivent pas être éliminés avec les déchets ordinaires. Le système de classification indienne est limité à 6

classes, alors que le système japonais a commencé sur une petite échelle, avec les téléviseurs, réfrigérateurs, machines à laver, climatiseurs et ordinateurs personnels ou PC.

Les appareils individuels sont très différents en tailles, poids et compositions ; par conséquent, citer des valeurs typiques n'a pas beaucoup de sens, sauf si le type d'appareils et sa période de production sont donnés. Les ampoules d'éclairage sont plus grandes en nombre. Les catégories 1-4, dans le tableau 1 représentent près de 95% de la quantité de poids générée (93,3% en 2010).

Tableau I.1. *Catégories de DEEE selon la directive européenne sur les DEEE.*

N	Catégorie
1	Gros appareils électroménagers
2	Petits appareils électroménagers
3	Équipements informatiques et de télécommunications
4	Matériel grand public
5	L'équipement d'éclairage
6	Outils électriques et électroniques (à l'exception des outils industriels fixes à grande échelle)
7	Jouets, équipements de loisir et de sport
8	Dispositifs médicaux (pas de produits implantés et infectés)
9	Instruments de surveillance et de contrôle
1	Distributeurs automatiques

Le recyclage des DEEE est important, non seulement pour réduire la quantité de déchets nécessitant un traitement, mais aussi pour promouvoir la récupération des matières précieuses, ainsi que l'élimination de la responsabilité de ses intrinsèques dangereux et les composants indésirables pour l'environnement.

Tableau I.2. Composition des équipements électriques et électroniques.

Catégorie d'équipement	Métaux ferreux (%)	Métaux non-ferreux (%)	Verre (%)	Plastique (%)	Autre (%)
Gros appareils électroménagers	61	7	3	9	21
Petits appareils électroménagers	19	1	0	48	32
Equipement informatique	43	0	4	30	20
Telecom	13	7	74	74	6
TV, Radio, etc.	11	2	31	31	22

Les DEEE sont principalement composées de métaux ferreux et non ferreux (Tableau I.2) ; viennent ensuite les matières plastiques. La quantité et la composition des DEEP (**Déchets Electriques et Electroniques Plastiques**) dépend aussi du type d'appareils (Tableau I.3 ; figure I.1). Gérer soit l'élimination ou la valorisation des matières plastiques est importante des points de vue environnemental, professionnel et économique : Les DEEP contiennent des substances dangereuses et peuvent donner lieu à des émissions toxiques lors du recyclage ou d'une élimination inadéquate, ou encore à des coûts élevés de traitement dans le cas d'un traitement responsable. Ce fragile équilibre entre les valeurs et les engagements conduit à des questions telles que : qui va payer pour le traitement responsable et comment traiter sur le volet, i.e. l'élimination sélective des parties précieuses de la masse ?

Les matières plastiques sont importantes comme un isolant électrique et / ou thermique et en tant qu'élément structurel léger, facilement déformable. Une partie de ces structures est renforcée et rigidifiée par chargement de résine avec des fibres de renfort. Les plastiques thermo-rigides montrent une grande stabilité et jouent un rôle important.

La part des matières plastiques dans les EEE a continuellement augmenté d'environ 14% en 1980 à 18% en 1992, et 23% en 2005. Leur part dans les DEEE européenne a été estimée à 20,6% (2008). Les DEEE collectés et traités sont estimés à environ 1,5 M tonne en 2008 ; 300.000 tonnes de déchets plastiques sont récupérés ou éliminés [36]. Leurs compositions présentent souvent un mélange complexe.

Tableau I.3. Les principaux polymères utilisés dans la fabrication des DEEE.

Article DEEE	Composition en polymères
Imprimantes/fax	PS (80 %), HIPS (10 %), SAN (5 %), ABS, PP
Telecom	ABS (80 %), PC/ABS (13 %), HIPS, POM
Télévisions	PPE/PS (63 %), PC/ABS (32 %), PET (5 %)
Jeux	ABS (70 %), HIPS (10 %), PP (10 %), PA (5 %), PVC (5 %)
Moniteurs	PC/ABS (90 %), ABS (5 %), HIPS (5 %)
Ordinateurs	ABS (50 %), PC/ABS (35 %), HIPS (15 %)
Petits appareils	PP (43 %), PA (19 %), ABS-SAN (17 %), PC (10 %),
Electroménagers	PBT, POM
Réfrigération	PS&EPS (31 %), ABS (26 %), PU (22 %), UP (9 %), PVC (6 %)
Lave-vaisselles	PP (69 %), PS (8 %), ABS (7 %), PVC (5 %)

Même les petits appareils peuvent contenir jusqu'à six résines plastiques différentes. DEEP contient des styréniques (PS, HIPS, ABS, SAN), des polyoléfinés (HDPE, LDPE, PP), des plastiques techniques (PC, POM, PUR, PA, et PVC), et thermodurcissables. Avant transformation, les matières plastiques sont toujours mélangées avec des additifs tels que des stabilisants (thermique ou UV), des agents antistatiques, des ignifugeants, des colorants, des pigments, des plastifiants, des récipients, des renforts de fibres de verre ou de carbone. La plupart des préoccupations sont relatives à la présence éventuelle de retardateurs de flamme

bromées (RFB) et de métaux lourds, que ce soit intrinsèque ou étranger, introduits sous forme d'impuretés par le traitement préalable des DEEE.

Le traitement mécanique/physique jouera probablement un rôle essentiel dans l'amélioration du recyclage des DEEE. Les flux riches en plastique (95 % de plastique en poids), sont mieux obtenus par démontage manuel, mais cela donne lieu à des coûts élevés de main-d'œuvre. Après l'élimination de toutes les substances dangereuses, l'alternative consiste en un broyage suivi de plusieurs étapes de séparation mécanique. Une conséquence inévitable est l'incorporation de substances étrangères dans la matrice du plastique. Les pressions économiques peuvent conduire les opérateurs de broyage à optimiser la - récupération du métal, résultant des DEEP de taille inappropriée pour les recycler.

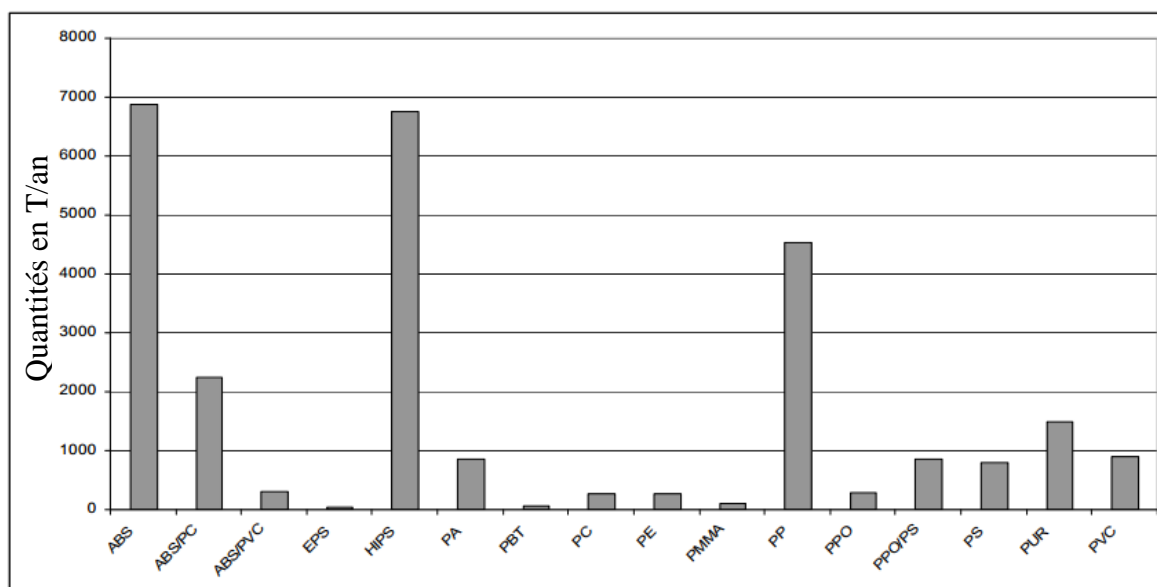


Figure I.1. Les flux annuels de types de plastique dans les catégories de produits DEEE suisses pour l'année 2007 (**ABS**: Acrylonitrile butadiène styrène; **EPS**: polystyrène Extrudé; **HIPS**: High impact polystyrène; **PA**: Poly-acétate; **PBT**: Poly-butylène téréphtalate; **PC**: Polycarbonate; **PE**: Polyéthylène; **PMMA**: Polyéthylène-méthacrylate; **PP**: Polypropylène; **PPO**: polypropylène oxydé; **PS**: Polystyrène; **PUR**: Polyuréthane; **PVC**: polychlorure de vinyle). [34]

Le principal groupe de matières plastiques des DEEE est le groupe des styréniques. Des données détaillées sur la composition des matières plastiques des DEEE sont fournis dans diverses études, par exemple, du laboratoire Fédéral d'essai des matériaux et de recherche EMPA (Dübendorf, Suisse). Le tableau I.3 décrit la composition en polymères des principaux

éléments de DEEE collectés, la figure I.1 donne le flux total de plastique en suisse (2008). Les types de plastique suivants dominent les différentes catégories des produits de DEEE (par ordre de part décroissante) :

- Electronique grand public, y compris les téléviseurs : HIPS et ABS.
- Appareils de technologie de l'information : ABS, HIPS, ABS / PC et PPO / PS.
- Gros appareils électriques : PP, PU, ABS, PS et HIPS.
- Petits appareils électriques : PP, HIPS et ABS.
- Les appareils de refroidissement : ABS et les hanches, PUR, PP et PVC.

I.1.2 Recyclage des DEEE et DEEP

a) REUTILISATION : RE-USINAGE

La plupart des EEE obsolètes peuvent encore être vendus ou donnés à des utilisateurs moins exigeants, si nécessaire, après réparation ou réorganisation. Ces activités sont souvent réalisées par des organismes d'insertion sociale sans objectif de bénéfice.

Comme alternative, les pièces de rechange sont récupérées, pour l'incorporation dans l'équipement nécessitant des réparations. Le ré-usinage a évolué pour devenir une activité importante. Certaines parties largement utilisées sont fournies à un coût nettement inférieur à celui du fabricant de l'équipement d'origine comme par exemple les cartouches de toner.

b) DEMONTAGE

Le démontage manuel est essentiel pour éliminer les composants dangereux ou le plus valorisable, et pourtant c'est le moyen le plus coûteux pour préparer le recyclage. Les procédures varient d'un EEE à l'autre. Malheureusement, la qualité de la décontamination est également variable.

En Autriche, la masse des composants sélectionnés et enlevés et la masse correspondant de substances dangereuses ont été comparées aux estimations de la valeur d'entrée. La décontamination était encore incomplète, allant de 72% pour les batteries à 21% pour les panneaux à cristaux liquides. Cela implique la transmission de substances dangereuses à l'usine de traitement mécanique. Les polluants facilement libérables, tels que le Hg depuis le rétro éclairage des LCD, les Cédérom, les batteries ou les poussières fortement contaminées,

présentent des risques importants pour la santé des travailleurs de l'usine. Les taux d'élimination faibles réduisent la récupération des matières recyclables de valeur [37].

Les études de désassemblage cherchent à développer des procédures, des logiciels et des outils pour l'élaboration des stratégies de démontage et pour la configuration des systèmes de démontage :

- Analyse de l'entrée et de la sortie du produit : les principaux composants et matériaux réutilisables, précieux et dangereux sont définis. Après l'analyse des coûts, des procédures de démontage optimal sont identifiées.
- Analyse de montage : les éléments d'assemblage, la hiérarchie des composants et les anciennes séquences d'assemblage sont analysées.
- Les problèmes d'incertitude : identifier les pièces défectueuses potentielles ou les joints dans le produit entrant, le classement / déclassement lors de l'utilisation des consommateurs, et les dégâts de démontage.
- La stratégie de démontage : en utilisant le démontage non destructif ou destructif.

La recherche sur le démontage a conduit à l'élaboration de centaines de documents. La caractérisation des DEEE est indispensable avant le développement et l'essai de systèmes de traitement et de séparation. Selon ses sources et traitements, les déchets électroniques montrent des caractéristiques et des compositions différentes. En principe, la plupart des plastiques peuvent maintenant être distingués.

c) METHODES DE CLASSIFICATION DES PARTICULES

La récupération des métaux passe par des méthodes de classification des particules, appliquée après le retrait des parties dangereuses et le broyage, afin de libérer les pièces métalliques noyées ou composites. Les grandes pièces sont récupérées d'abord par des séparateurs magnétiques, pour les métaux ferreux, et à courants de Foucault, pour les métaux non ferreux. Les métaux sont plus denses que les plastiques ; ils sont séparés en utilisant un des tables vibrantes, suivies parfois des séparateurs couronne-électrostatiques [38].

La classification est non seulement utilisée pour préparer un produit plus uniforme pour un traitement ultérieur, mais aussi pour séparer les fractions présentant une composition différente. Certaines matières comptent plus dans les fractions les plus fines, en raison de leur

dimension originale, leur ténacité ou leur fragilité. Ce type de séparation utilise le plus couramment des tambours rotatifs ou des tamis vibrants.

Les techniques de la séparation par forme ont été développées principalement par l'industrie de la poudre. Ils exploitent les différences des vitesses des particules sur un mur solide incliné, les temps mis par les particules pour passer à travers une ouverture, la force de cohésion des particules à une paroi et la vitesse de décantation dans un liquide.

La séparation par densité est une étape importante dans la classification des matières plastiques par types de résine. La fraction dense contient des composites métalliques (fil), PVC et PET. Les matériaux dérivés du bois sont légers lorsqu'ils sont secs ; une fois mouillés, ils compromettent la séparation [36].

Les enquêtes sur les techniques de séparation sont présentées par Forsberg et al. [38-40]. La séparation des métaux en profondeur et en outre la classification des particules sont nécessaires pour séparer des mélanges de DEEP dans les classes individuelles de résine. S'ils ne peuvent être traités à un niveau de pureté acceptable, alors ils peuvent être regranulés et proposés dans le commerce en tant que produit recyclé.

d) RECYCLAGE MECANIQUE

Selon Plastics Europe, les plastiques recyclés mécaniquement en provenance de l'EEE représentent 2% de la quantité totale de recyclage mécanique des plastiques: l'origine de ce matériel est principalement de gros appareils électroménagers (réfrigérateurs par exemple). La doublure intérieure des réfrigérateurs en fait un appareil avec un taux de recyclage augmenté.

Le recyclage mécanique se réfère au retraitement des DEEP pour former de nouveaux produits en matière plastique avec des performances similaires (ou moins) que les produits originaux. Les DEEP sont parfaitement libérés des non plastiques, puis triés par résine avant un traitement ultérieur. Un équilibre entre la pureté et le rendement de la récupération des fractions triées est recherché. Idéalement, les lots d'une résine et un ensemble d'additifs sont isolés à la source : un équipement spécifique est susceptible d'être démonté sur une seule ligne et sans doute les plastiques récupérés pour satisfaire des spécifications similaires. Pourtant, même les enveloppes des équipements montrent les possibilités de recyclage limitées en raison du grand nombre de types de résine utilisés ; en outre, les pièces en plastique ne sont pas souvent étiquetées en fonction de leur type de résine.

	ABS	ABS+BFR	HIPS	HIPS+BFR	PMMA	PC/ABS	SAN	PC/ABS+PFR	HIPS/PPE	HIPS/PPE+PFR
ABS	Vert									
ABS+BFR	Vert	Vert								
HIPS	Orange	Orange	Vert							
HIPS+BFR	Orange	Orange	Vert	Vert						
PMMA	Orange	Orange	Orange	Orange	Vert					
PC/ABS	Vert	Vert	Orange	Orange	Orange	Vert				
SAN	Vert	Vert	Orange	Orange	Orange	Vert	Vert			
PC/ABS+PFR	Vert	Orange	Orange	Orange	Orange	Vert	Vert	Vert		
HIPS/PPE	Orange	Orange	Vert	Vert	Orange	Jaune	Orange	Jaune	Vert	
HIPS/PPE+PFR	Orange	Orange	Vert	Orange	Orange	Jaune	Orange	Jaune	Vert	Vert

Figure. I.2. Compatibilité interne des résines plastiques avec et sans **BFRs** [41].

La plupart des résines et des additifs sont mutuellement incompatibles. La figure I.2 montre la compatibilité interne de résines plastiques, avec ou sans retardateurs de flamme bromés (*Brominated fire retardants BFR*). Une grande variété de retardateurs de flamme bromés est utilisée dans certains composants en plastique. Non seulement la résine et des additifs en particulier, mais aussi les types de retardateurs de flamme sont à prendre en compte. La présence de composés chlorés et bromés peut exiger des mesures pour la protection de la santé humaine dans les opérations où ces plastiques sont déchiquetés, convertis ou chauffés

Logiquement, le recyclage mécanique sera limité aux plastiques sélectionnés à des sources fiables. Une deuxième question est de trouver des débouchés appropriés. Déterminer quels marchés peuvent utiliser les plastiques trouvés dans l'électronique grand public, la valeur des matières plastiques sur ces marchés, et le niveau et la complexité de séparation nécessaire pour conduire à un recyclage viable. Si les plastics recyclés doivent être utilisés dans les produits haut de gamme, les propriétés physiques et mécaniques des résines récupérées doivent répondre à celles des résines vierges. En outre, une préoccupation majeure dans le recyclage des plastiques est la nécessité de séparer les types de plastique et d'identifier les additifs et les contaminants. Il peut être nécessaire de réduire le nombre de résines utilisées dans l'électronique tout comme dans l'industrie automobile pour rendre le recyclage possible [42].

Plusieurs fabricants d'équipements proposent l'équipement approprié pour séparer des plastiques dans les résines de densité différente ou par chargement triboélectrique. Les fournisseurs potentiels sont Galloo, Hamos, Sicon ... Buhler proposent des solutions de tri optique pour une variété de matières plastiques (PET et les flocons de HDPE, uPVC hors-coupures, PVB, PP, ABS, PS).

e) **RECYCLAGE EN MATIÈRES PREMIÈRES**

Ce type de recyclage convertit les DEEP en carburants, en monomères ou autres produits chimiques par décomposition thermique (pyrolyse) ou en gaz combustible par gazéification. La pyrolyse ne consomme que 10% de la teneur en énergie des DEEP [43], mais peut former le Mixed halogenated dioxins/furans (PXDD / F) [44-46].

Les produits de pyrolyse sont peu susceptibles d'être vendables. Les distributions de produits devraient être établies expérimentalement et sont influencées par une multitude de facteurs, tels que les impuretés. Le trioxyde d'antimoine augmente la formation de l'huile dans Br-HIPS pyrolyse, et diminue le rendement d'huile / cire d'un HIPS bromé (Br-HIPS) + mélange de polyoléfines [47].

I.2 SEPARATION TRIBO-ELECTROSTATIQUE DES MATERIAUX PLASTIQUES

Deux mécanismes physiques sont couramment employés pour charger les matériaux granulaires en vue de leur séparation dans un champ électrique intense : l'effet couronne [48,49], assurant la charge par « bombardement ionique » et l'effet triboélectrique, impliquant le transfert de charge entre deux corps en contact. L'effet triboélectrique est utilisé pour la séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants, grâce à l'aptitude de ses matériaux à garder la charge obtenue par effet triboélectrique le plus longtemps possible.

I.2.1 Mécanisme de charge triboélectrique [50]

Lorsque deux matériaux différents sont mis en contact (figure I.3) ils acquièrent des charges électriques dues au phénomène de triboélectrisation. À l'échelle atomique, le mouvement des électrons obéit aux lois de la mécanique quantique. Le concept de localisation ou de délocalisation a des conséquences sur la conductivité du matériau. Elles sont montrées dans la figure I.4. Les vibrations thermiques des atomes d'un cristal parfait entravent le déplacement des électrons et diminuent la conductivité ou augmentent la résistivité. Lorsque les électrons occupent des états localisés dans un matériau désordonné, les vibrations

thermiques peuvent fournir une énergie suffisante à l'électron, pour quitter son site par l'effet tunnel. Ici la conduction augmente avec la température (T°), contrairement à celle des solides ordonnés, c'est ce que l'on appelle la conduction par sauts. Comme le précise *Touchard* [51], ce processus de conduction par saut résulte d'un transfert d'électrons entre les états localisés, dans la bande interdite (E_g) au voisinage du niveau Fermi (E_f). En particulier, lorsque la densité d'état près du niveau Fermi est élevée, la mobilité des porteurs augmente de façon importante. Ce mécanisme s'observe parfaitement dans les solides isolants.

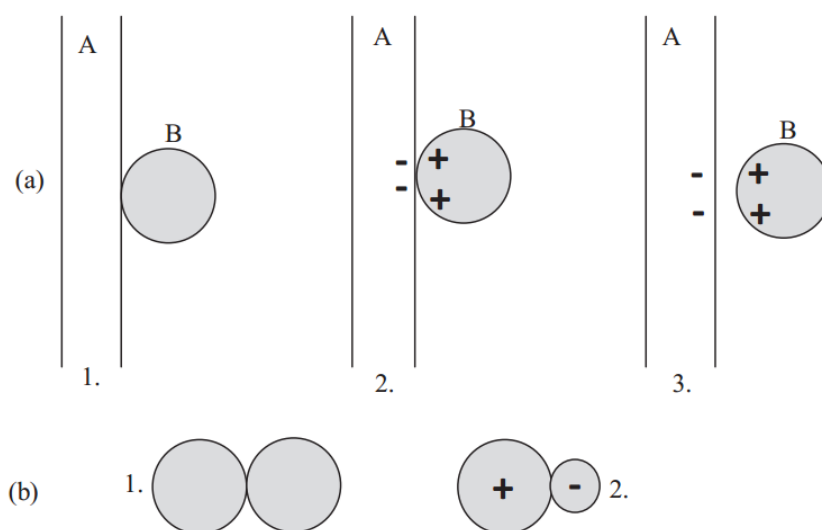


Figure I.3. L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux surfaces : (a) :1.Surface A neutre, particule B est neutre ; 2. La surface A et la particule B sont en contact ; 3.Après la séparation, la surface A a tendance à se charger négativement, et la particule B positivement ;(b) :1.Deux particules neutres de même taille en contact ; 2.les particules grandes ont la tendance à se charger positivement et les petites négativement.

Les travaux de *Liu* et *Bard* [52] ont proposé un modèle de transfert d'électrons, validé par des expériences sur la charge de téflon. En revanche, *Whitesides* et *McCarthy* [53] ont utilisé une série d'électrets ioniques qui contiennent des ions mobiles, afin de proposer que le transfert d'ions soit une explication possible pour la tribocharge des matériaux isolants.

La plupart des chercheurs ont supposé que la tribo électrisation des isolants implique également le transfert d'électrons [54], mais les observations expérimentales semblent contredire ce point de vue. La tribo électrisation des isolants n'est pas en corrélation avec les propriétés électroniques des matériaux, tels que la constante diélectrique, ou des propriétés atomiques, tels que l'énergie d'ionisation, affinité électronique, ou électronégativité. Des

considérations théoriques s'opposent aussi à un mécanisme faisant intervenir le transfert d'électrons. Plusieurs chercheurs ont remarqué que le processus de tribo électrisation est en corrélation avec l'acidité ou la basicité des matériaux isolants. En 1902, *Knoblauch* a fait observer que les solides organiques acides tendent se charger négativement, et les solides organiques basiques tendent à se charger positivement [55]. Il a proposé un mécanisme de transfert de proton pour l'effet tribo. *Diaz* a proposé qu'un mécanisme de transfert de proton puisse expliquer la tribo électrisation d'un large éventail de matériaux isolants [56]. Ces observations, que les propriétés acides ou basiques des matériaux sont en corrélation avec leurs propriétés tribo électriques, sont difficiles à concilier par un mécanisme qui implique le transfert d'électrons (figure I.5).

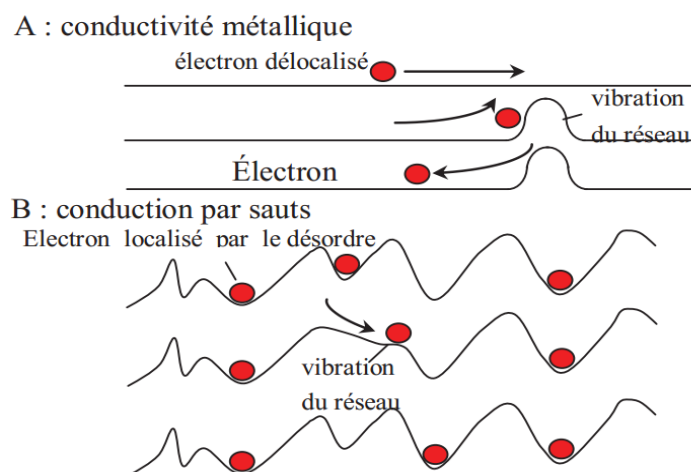


Figure 1.4. Effets de la localisation et de la délocalisation des électrons.

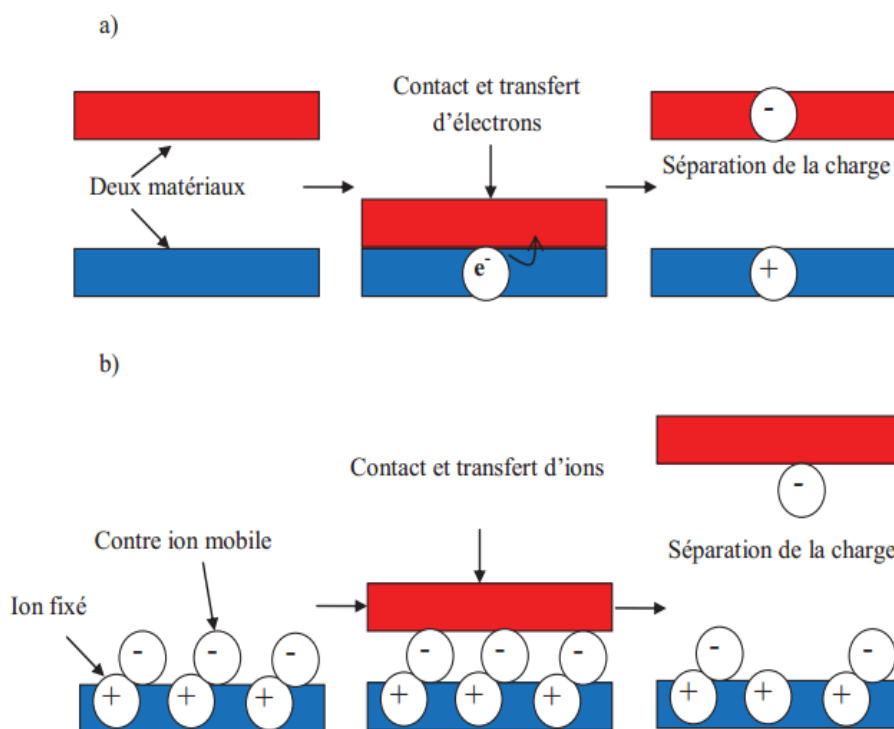


Figure I.5. Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ; b) Transfert d'ions.

I.2.2 Série triboélectrique

Deux corps frottés l'un sur l'autre s'électrisent l'un positivement et l'autre négativement [57]. On appelle série triboélectrique un classement des diverses matières dans un ordre tel que, de deux matières qui se suivent, la première est positive. Plus les deux matériaux frottés sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée. Certaines séries sont proposées de longues dates. *Wilcke* (1759), *Faraday* (1840), *Jamin* et *Bouty* donnent à peu près la même série [58].

Une série beaucoup plus étendue a été donnée par *Shaw* (1917) qui a mieux défini les échantillons employés [59] ; il a aussi étudié l'influence de la température qui peut produire des inversions, etc. Les séries triboélectriques varient en tout cas d'un chercheur à l'autre et chaque série reflète la culture matérielle de son moment historique. En effet une différence dans le frottement, des facteurs externes peuvent inverser les signes obtenus, il semble donc impossible de réaliser une liste avec un ordre fiable ; le fait que les signes peuvent s'inverser de manière si facile, est très surprenant.

Tableau I.4. Série triboélectrique

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

La série suivante (tableau I.4) a été réalisée par *Bill Lee* en (2009), c'est un tableau qui peut être utilisé pour prédire le signe des charges acquises par effet triboélectrique au contact entre deux matériaux [60]

Ce classement n'est donc que très approximatif et l'ordre des différents matériaux peut varier sous l'influence de facteurs tels que : la rugosité de la surface, les forces de contact, le travail de sortie...etc. En définitive ce diagramme n'est qu'un outil de comparaisons relatives entre les différents corps plutôt qu'une référence absolue.

I.2.3 Dispositifs de charge triboélectrique

L'acquisition de charge par effet triboélectrique se produit au niveau surfacique entre deux corps. La charge statique acquise se produit dans un système où généralement la conductivité du matériau est faible, ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés. Cette charge importante est nécessaire pour le tri des granules dans un champ électrique intense.

Multiples travaux ont été publiés sur les procédés de chargement triboélectrique utilisant : des ventilateurs, des tubes rotatifs, des lits fluidisés (créés par des souffleurs et des compresseurs), des micros-cyclones, des chargeurs statiques [61-69]. Nombreux dispositifs de tribochargement destinés à la séparation des mélanges granulaires ont été réalisés au sein de laboratoires *IRECOM* et *APELEC* de l'Université Djillali Liabes à Sidi Bel Abbes et l'Institut *PPrime*, Université de Poitiers, France dont :

CHARGEMENT PAR VENTILATEUR

Le dispositif de chargement type ventilateur (figure I.6) agite le mélange de plastique et donne des particules chargées par rotation. Les lames rotatives, qui peuvent fonctionner à vitesse élevée, sont faites de divers matériaux, afin de faciliter la charge triboélectrique des constituants du mélange. Ce chargeur a été utilisé dans la séparation du PA/PC et PS/ABS [61]. Le principal inconvénient est le traitement discontinu.

La charge non homogène à la sortie de ce type de dispositif et sa sensibilité aux changements climatiques ne permettent pas d'envisager une séparation électrostatique satisfaisante dans une installation industrielle.

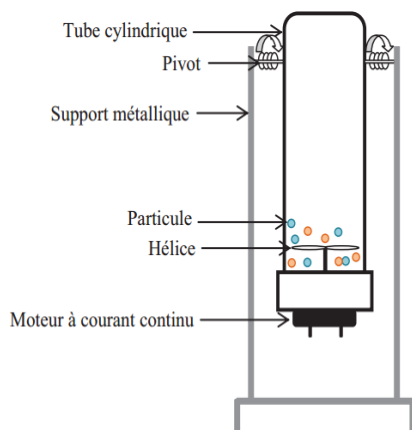


Figure I.6. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur

CHARGEMENT PAR CYCLONE

Le dispositif est constitué d'un cylindre isolant (figure I.7), disposé en position verticale. Les matériaux granulaires ou pulvérulents à charger sont introduits en direction radiale 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 [62, 63].

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.

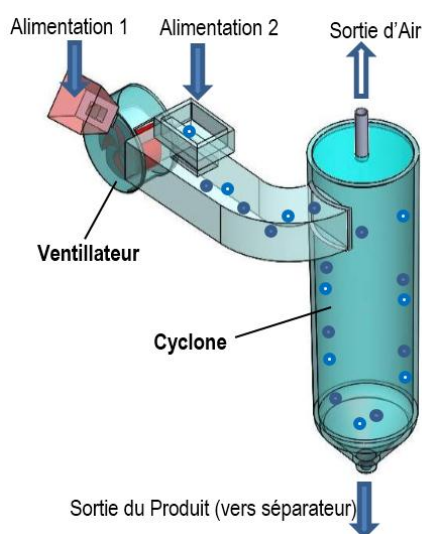


Figure I.7. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone

CHARGEMENT PAR VIBRO-TRANSPORTEUR

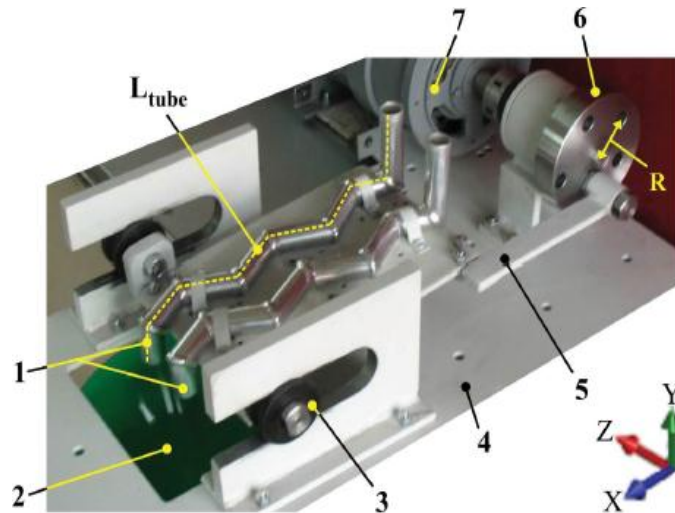


Figure I.8. Dispositif à vibrations ; 1 : tubes de charge ; 2 : sortie des particules chargées ; 3 : glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ; R : rayon ; X, Y, Z : direction du mouvement ; L_{tube} : longueur du tube.

Une autre solution pour charger les particules est représentée par le dispositif à vibrations. Cette installation a été développée par Blajan et al [64] (Figure I.8). Le matériau à charger glisse dans des canaux en Zig-Zag mis en mouvement vibratoire [65-67] sur les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique associé à un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif. En changeant la vitesse du moteur, il est possible de modifier le mouvement oscillant du dispositif de charge.

CHARGEMENT PAR LIT-FLUIDISE

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.9) [68].

- La vibration : pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le disperseur sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.
- La formation : le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques des fluides : ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation U_{mf} , le lit montre une certaine

expansion de la couche, on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules.

- Le bullage : à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage U_{mb} , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse de distribution de gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide à ébullition.
- 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.

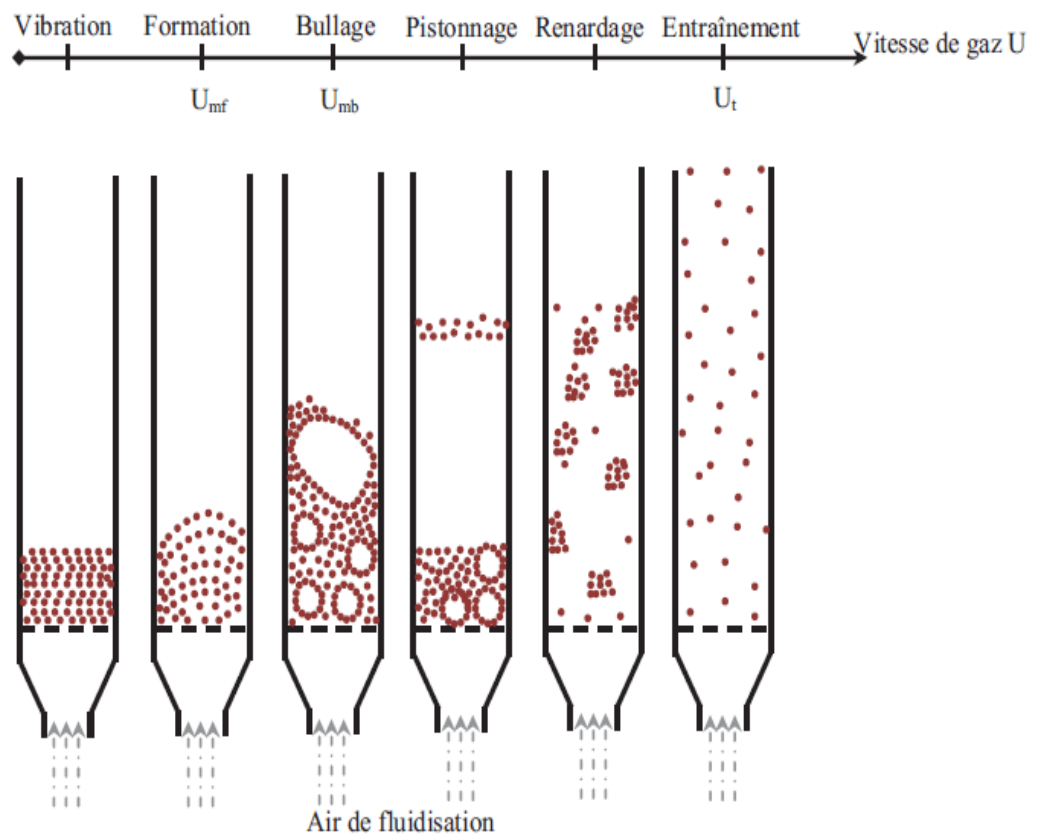


Figure I.9. Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation.

Le dispositif a souvent la forme d'un tube cylindrique isolant (figure I.10), 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 d'une soufflante connectée au bas du cylindre. Les particules fluidisées acquièrent des charges électriques de signes opposés grâce aux collisions entre elles. Le dispositif est particulièrement efficace pour les particules fines, car l'air de fluidisation empêche leur agglomération et favorise le chargement par effet triboélectrique.

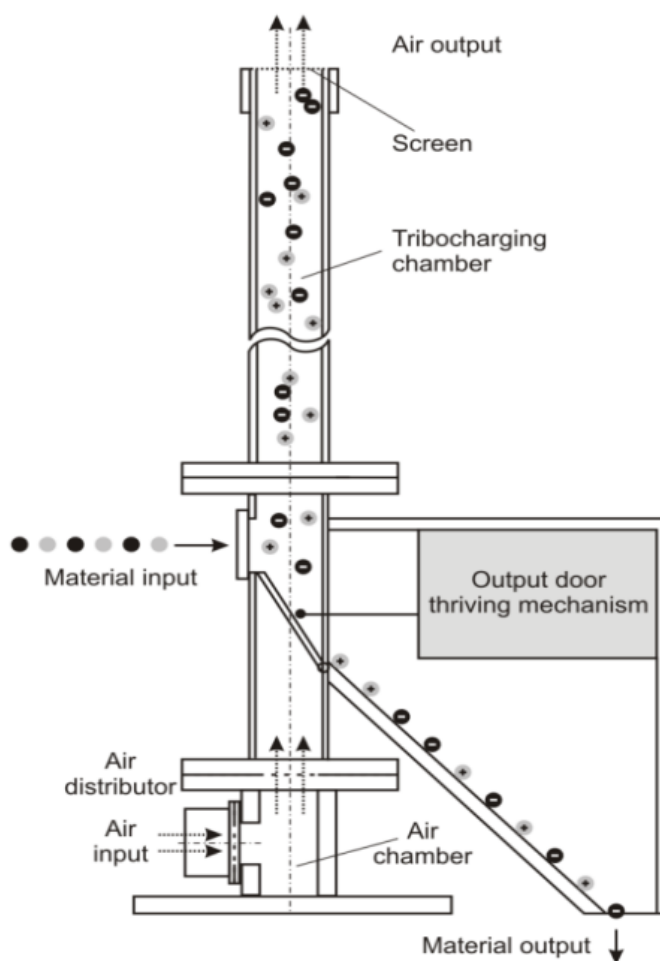


Figure I.10. Dispositif à lit fluidisé

Un article récent [69] décrit une combinaison de deux modes de chargement en cascade (figure I.11). 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.

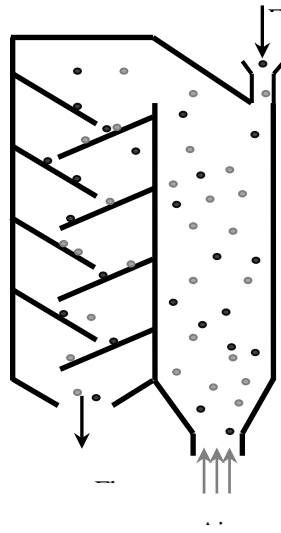


Figure I.11. Représentation schématique d'un dispositif composé d'un lit fluidisé et d'un chargeur statique.

I.2.4 Forces aérodynamiques et électrostatiques [50]

Le transport, le stockage, les mélanges, l'écoulement, la densification des matériaux pulvérulents sont influencés par les forces inter particulaires qui prennent naissance lors de la friction ou du simple contact.

Trois types de forces s'exercent sur les matériaux granulaires :

- A. Les forces de la pesanteur
- B. Les forces de London-Van der Waals
- C. Les forces électrostatiques.

FORCES DE LA PESANTEUR

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

$$P = mg \tag{I. 1}$$

Avec $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

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

FORCES DE LONDON –VAN DER WAALS

Il s'agit de forces attractives (figure I.12). Si on considère deux atomes distants de r , la force d'interaction F [N] entre moments dipolaires instantanés s'écrit :

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

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

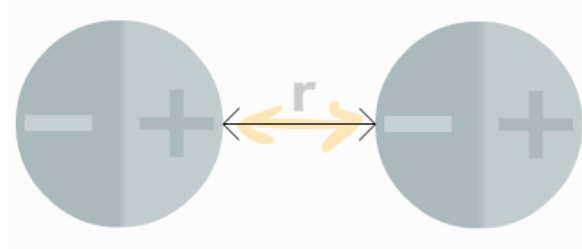


Figure I.12. La force attractive de London-Van der

La figure I.13 montre la force d'interaction entre deux sphères matérielles : c'est la somme de toutes les forces d'interaction de London-Van der Waals relatives aux paires constituées d'un atome dans chaque sphère.

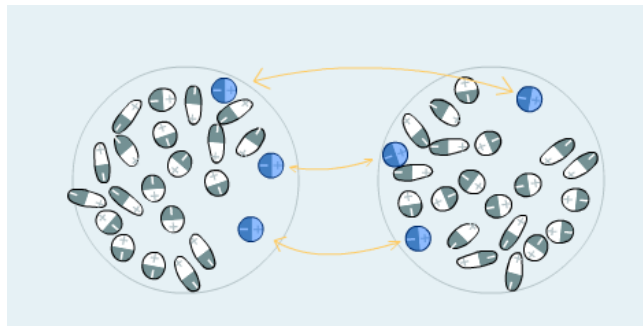


Figure I.13. Force attractive de London-Van der Waals entre deux sphères

Le calcul réalisé par *Hamaker* [70] pour 2 sphères identiques de rayon R séparés de r (distance centre à centre) et baignant dans le vide conduit à :

$$F_A = -\frac{A}{6(r-2R)} \left(\frac{2R^2}{r^2-4R^2} + \frac{2R^2}{r^2} + \ln \frac{r^2-4R^2}{r^2} \right) \quad (\text{I.3})$$

Où A est la constante de *Hamaker*.

Les forces de Van der Waals ne sont significatives (pour le processus d'agrégation) que si la distance inter-particulaire ($r-2R$) est inférieure à 100 nm ; l'équation donnée par Hamaker est donc suffisante.

FORCES DE COULOMB

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

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

Voici l'expression scalaire de la loi de Coulomb en électrostatique [71] :

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

Où :

F_e : Force électrique en newton (N) ;

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

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

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

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

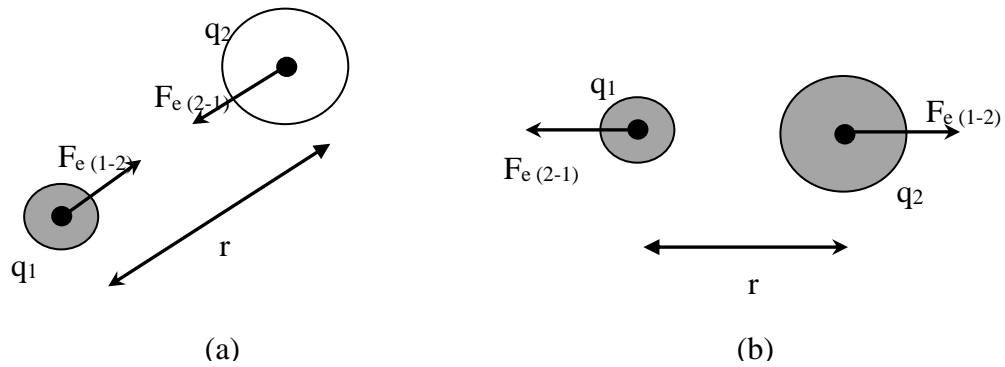


Figure I.14. Force de coulomb entre deux sphères chargées

(a) : attraction, charges de signes contraires ($q_1q_2 < 0$)

(b) : répulsion, charges de même signe ($q_1q_2 > 0$)

FORCES AERODYNAMIQUES

Afin de bien étudier les mouvements des particules dans les procédés de chargement triboélectrique, une bonne connaissance des forces aérodynamiques agissant sur ces particules s'impose.

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

$$F_i = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad (I.5)$$

Où :

F_i : la force d'inertie

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

F_a : la force aérodynamique et F_g la force gravitationnelle.

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

$$F_i = W(\rho_s - K_\rho) \frac{dv}{dt} \quad (I.6)$$

Où :

v : La vitesse de particule

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

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

ρ_s : Densité de l'air.

La force aérodynamique s'écrit :

$$F_a = \frac{C_d \pi R^2 \rho v_r^2}{2} \quad (\text{I.7})$$

C_d étant en fonction du nombre de Reynolds : $Re = \frac{V.L}{\nu_i}$

V : vitesse du fluide [m/s] ;

L : dimension du fluide [m] ;

ν_i : viscosité du fluide [m²/s] ;

v_r : vitesse relative d'une particule dans l'air [m/s].

La force de frottement avec l'air est dépendante de la vitesse, cette dépendance peut être très compliquée. Seuls des cas simples peuvent être traités analytiquement.

I.3 INSTALLATIONS DE SEPARATION TRIBO-ELECTROSTATIQUE

I.3.1 Séparateurs tribo-électrostatiques des mélanges granulaires

Multiples installations destinées à la séparation tribo-électrostatique des matériaux granulaires plastiques ont été conçues et construites. Le point commun entre ces dispositifs est la nécessité de réaliser deux opérations successives, le chargement triboélectrique des particules suivi de leur séparation.

A) SEPARATEUR TRIBOELECTRIQUE A TAPIS ROULANT

Le schéma de la figure I.15 explique le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant TBS (Tribocharged Belt Separator). Les particules sont tribo-électrisées par un dispositif de chargement statique, puis elles tombent sur un tapis roulant qui les transportent vers la zone de séparation.

La séparation est réalisée par une électrode haute tension qui attire les particules d'une polarité et repousse les particules de polarité opposée, grâce aux forces électriques de Coulomb [72,73].

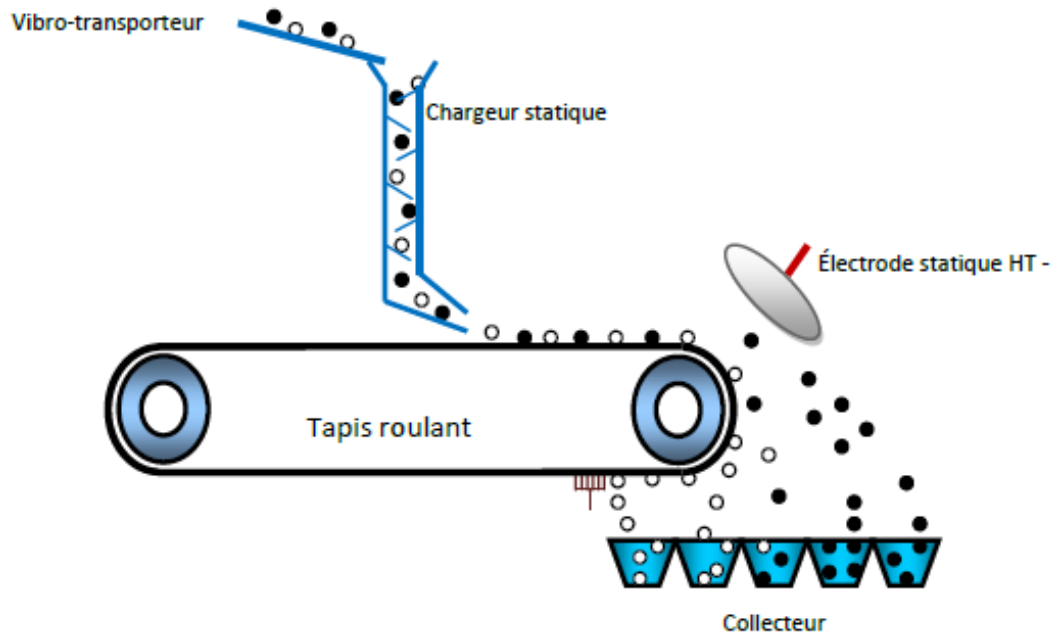


Figure I.15. Représentation schématique d'un séparateur TBS.

B) SEPARATEUR TRIBOELECTRIQUE A CHUTE LIBRE

Le séparateur électrostatique à chute libre STECL présenté sur la figure 1.16 a été conçu pour la recherche fondamentale et applicative dans le domaine de la triboélectrisation, de la séparation des matériaux granulaires plastiques [74,75] et de la purification des minerais [76].

Le mélange granulaire est préalablement chargé par un des différents dispositifs de chargement triboélectrique. Il est ensuite introduit dans la partie haute du STECL, sa chute libre l'entraîne dans une zone inter électrodes où le champ électrique est intense. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode de signe opposé à leur charge acquise.

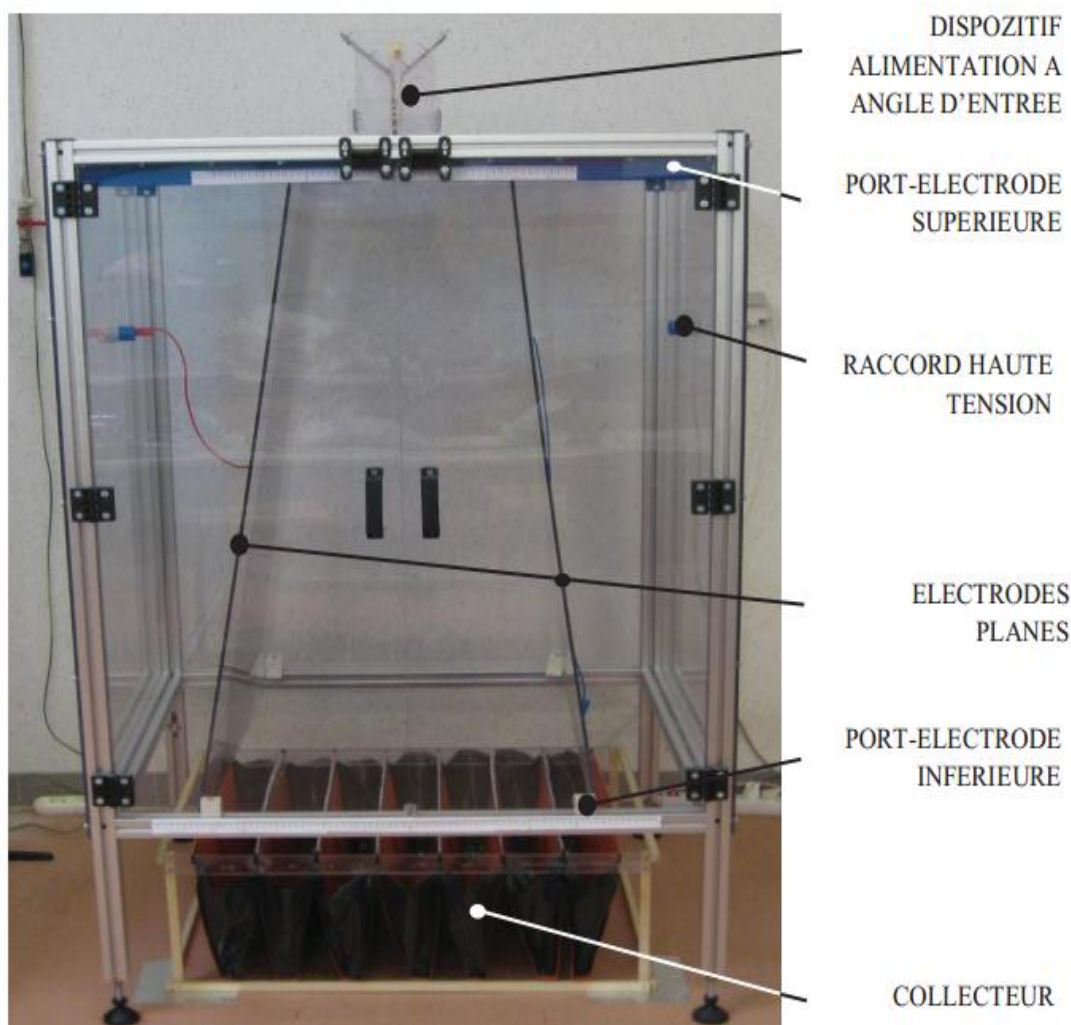


Figure 1.16. Séparateur tribo électrostatique à chute libre développé au sein du laboratoire d'Electrostatique d'Angoulême.

C) SEPARATEURS INDUSTRIELS

Hamos GmbH est un leader mondial dans le domaine de la séparation électrostatique des matériaux granulaires [77]. Son séparateur EKS (figure. I.17) est largement utilisé dans l'industrie du recyclage [78].

Le mélange de plastiques est introduit par un convoyeur vibrant dans l'unité de charge triboélectrique [80]. Le mélange de granules de plastiques chargés passe par un champ électrique intense où est réalisée la séparation électrostatique. Les particules chargées positivement sont attirées par une électrode négative, tandis que les particules chargées négativement ne sont pas attirées. Il est possible de séparer toutes sortes de mélanges

plastiques-, moyennant quelques modifications mineures de l'unité de chargement et de la position de la plaque de séparation [79].

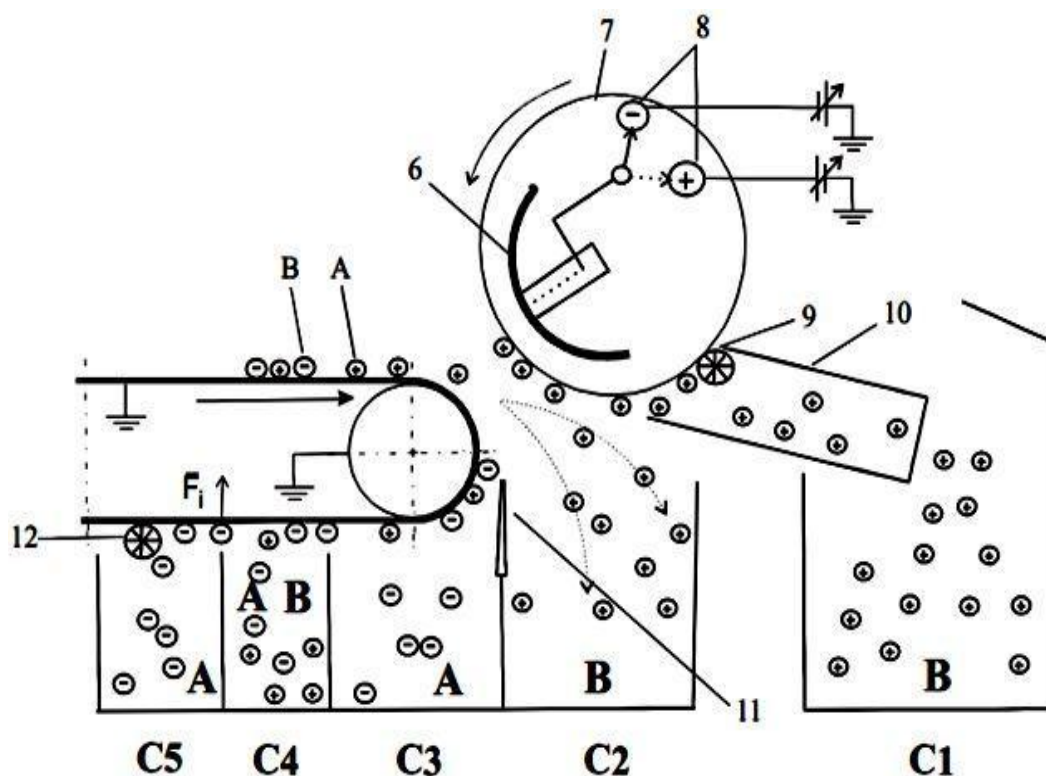


Figure I.17. Schéma de principe de la zone de séparation électrostatique du séparateur EKS HAMOS: A, B –granules en plastique; 6- électrode haute tension; 7- cylindre métallique rotatif; 8- contacts haute tension; 9,12- brosses pour enlever le matériau; 10- tube collecteur; 11- -déflecteur; C1,..., C5- collecteurs.

Le séparateur V Carpcó [81,82] (figure I.18), est un représentant du groupe des séparateurs tribo électrostatiques à chute libre, de grande capacité, pour la séparation de deux ou plusieurs matériaux. La nouvelle conception de cette installation est facilement adaptable à diverses applications, notamment à la séparation des minerais et des plastiques dont la taille varie de 1 mm à 1 cm). Le séparateur utilise un champ électrostatique produit par deux électrodes plaques, connectées à deux sources variables de haute tension, de polarités opposées, ajustables dans la gamme 0-60 kV.

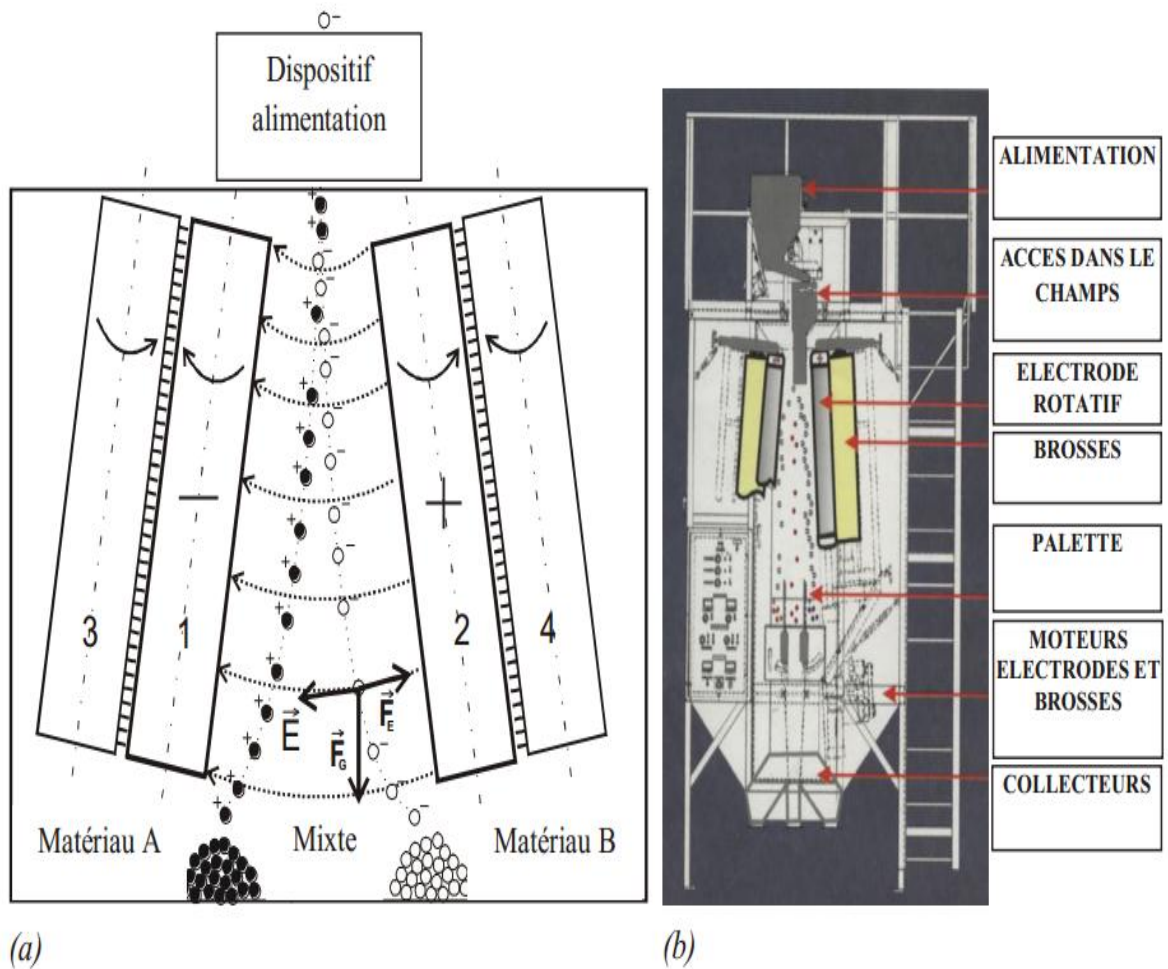


Figure I.18. Séparateur tribo électrostatique à chute libre Carpco.

I.3.2 Séparateurs tribo-aéro-électrostatique pour les mélanges granulaires [83]

Ces dispositifs évitent l'inconvénient des séparateurs "standard" tribo-électrostatique présentés dans la section précédente, par l'utilisation simultanée de l'effet de tribo-électrostatique, la force de Coulomb et la force d'image électrique [6, 84-86]. Dans de tels séparateurs, le chargement et la séparation sont combinées en une seule opération. Les granules sont chargés et séparés simultanément. Un des avantages de cette solution réside dans le fait que les particules moins chargées ne quitteront pas la zone active du séparateur jusqu'à ce qu'ils acquièrent une charge suffisante pour permettre aux forces électriques de les conduire à l'électrode de polarité opposée.

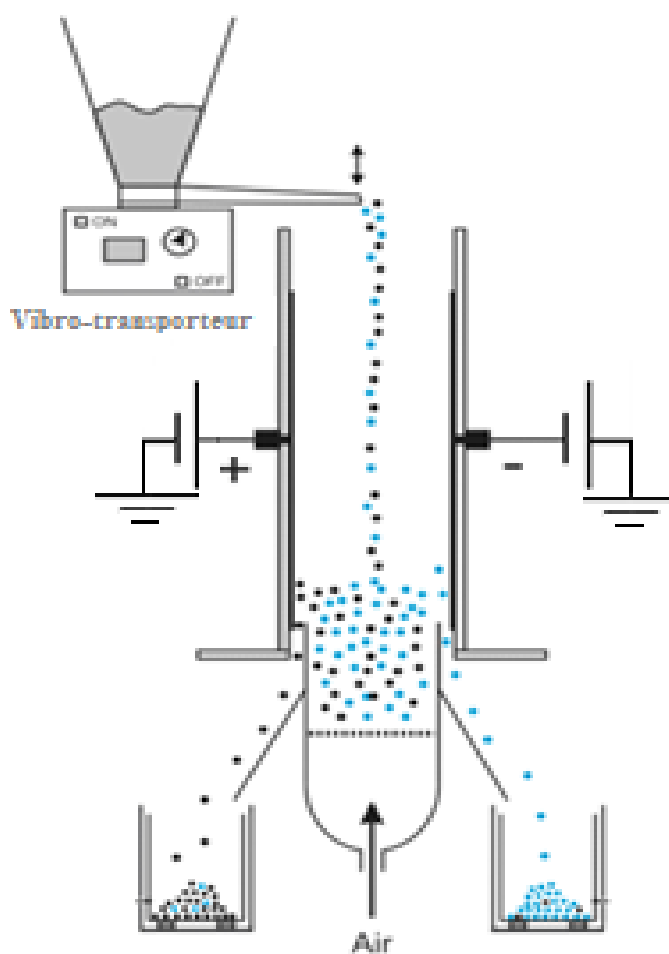


Figure I.19. Prototype de laboratoire séparateur tribo-aéro-électrostatique.

Le plus simple de ces séparateurs tribo aéro-électrostatique [87,88], est représenté dans la figure I.19 a, il est composé d'une chambre parallélépipédique (110 mm x 80 mm x 400 mm), avec deux parois verticales opposées en PMMA, et de deux plaques d'aluminium reliées à deux alimentations de haute tension continue de polarité positive et négative.

Un dispositif d'alimentation vibratoire introduit la matière granulaire par l'intermédiaire d'une goulotte dans la partie supérieure de la chambre triboélectrique. Les granules chargés par effet tribo-électrique dans le lit fluidisé sont attirés par les électrodes de polarités opposées et sortent de la chambre à travers les deux espaces sous les électrodes et tombent ensuite dans les deux collecteurs dédiés. La masse du produit collecté est mesurée de manière continue avec des balances électroniques positionnées sous les collecteurs et connectés à un ordinateur par l'intermédiaire de deux connecteurs RS232.

Les résultats montrent que le matériau majoritaire dans le mélange peut-être collecté à des puretés supérieures à 99% [87]. En revanche, les matériaux minoritaires récupérés après la séparation ont une pureté nettement plus faible, car des particules du matériau majoritaires sont plus nombreuses à être entraînées dans une mauvaise direction par l'air de fluidisation.

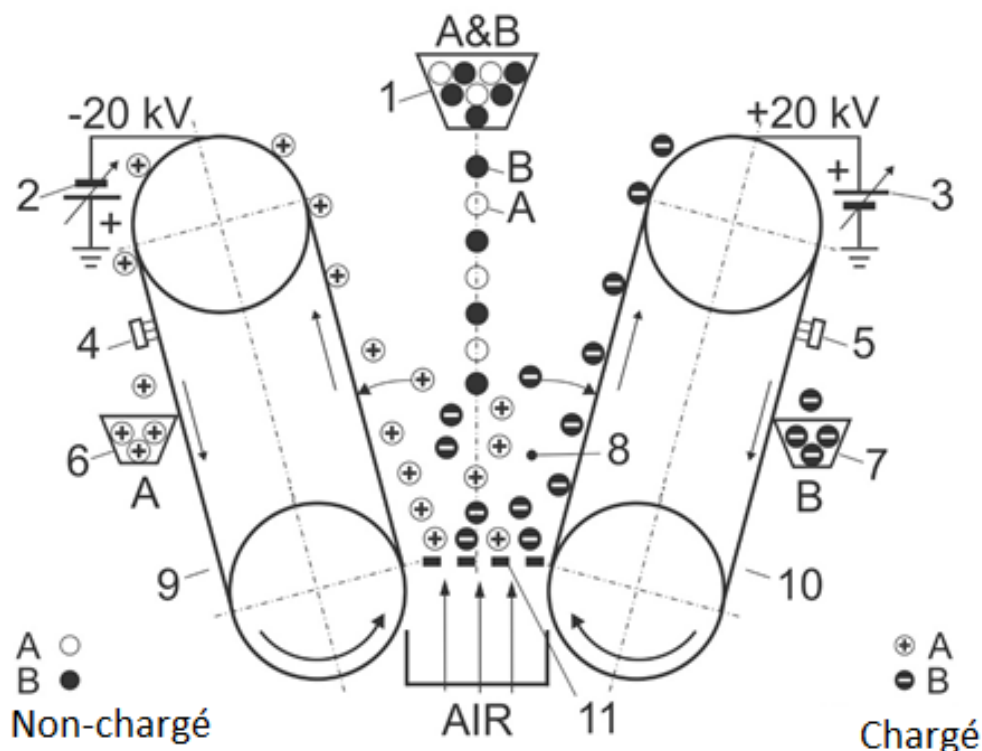


Figure I.20. Séparateur tribo-aéro-électrostatique pour les plastiques mixtes granulaires récemment breveté. 1: alimentation en produit; 2, 3: générateurs haute tension; 4, 5: brosses; 6, 7: collecteurs; 9, 10: électrodes haute tension (convoyeurs à bande métallique); 11: lit fluidisé.

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique breveté par *Calin* et *Dascalescu* [84,89-91] a la particularité que ses électrodes sont deux convoyeurs à bande métallique reliés à une alimentation haute tension (Figure I.20). La longueur active d'une électrode (à savoir, la distance entre les deux rouleaux de chaque transporteur) est de 500 mm. La distance moyenne entre les électrodes dans la zone du lit fluidisé étant de 20 cm, un champ électrique de 2 kV/cm peut être obtenu avec des électrodes alimentées à ± 20 kV. Les granules tribochargées dans le lit fluidisé sont attirés par les convoyeurs et plaqués par les forces électriques à la surface des bandes métalliques qui les transportent vers la trémie de collecte. Le débit d'alimentation du séparateur est ajusté à une valeur qui est égale à la somme de la masse des produits collectés par unité de temps.

Comme aucune particule non chargée ne peut quitter la chambre de séparation, la pureté des produits collectés est proche de 100%. D'autre part, chaque particule ne passe dans le séparateur que le temps nécessaire à l'acquisition d'une charge suffisante pour qu'elle soit recueillie au niveau des électrodes. Si l'état de surface des matériaux granulaires et les conditions ambiantes sont adéquats, alors les particules sont rapidement attirées par les électrodes et l'installation peut fonctionner à des vitesses d'alimentation élevées. Dans des conditions défavorables de tribochargement, le débit d'alimentation est réduit de sorte que les particules séjournent plus longtemps dans la zone active du séparateur.

Un autre défi pour la séparation tribo-électrostatique consiste à traiter des mélanges de trois ou plusieurs types de matières plastiques. Une séparation en deux étapes est une solution pour le traitement de mélanges de matières plastiques ternaires [92-93]. Combinés avec d'autres procédés de séparation mécanique telle que des techniques de gravimétrie, des mélanges plus complexes peuvent également être traités [94].

Une autre solution au problème du recyclage des mélanges de ABS / HIPS / PVC est donnée par une nouvelle conception [8, 95-97], qui combine deux techniques de charge et deux procédés de séparation électrostatiques (figure I.21 a). Le premier module de la nouvelle installation est un séparateur électrostatique à lit fluidisé, les deux électrodes sont reliées à deux alimentations haute tension de polarités opposées, qui créent un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules chargés par effet tribo-électrique et les séparer. Deux enceintes de PMMA, avec des parois intérieures en aluminium, transfèrent respectivement les particules chargées positivement et négativement vers deux tribochargeurs statiques inclinés. Ils modifient la charge des granules pour faciliter leur tri. Les granules tombent ensuite librement entre les plaques électrodes des deux séparateurs électrostatiques à chute libre qui effectuent un second tri sélectif des matériaux. Les produits séparés sont récupérés dans deux collecteurs identiques, chacun divisé en quatre compartiments, comme le montre la figure I.21 b.

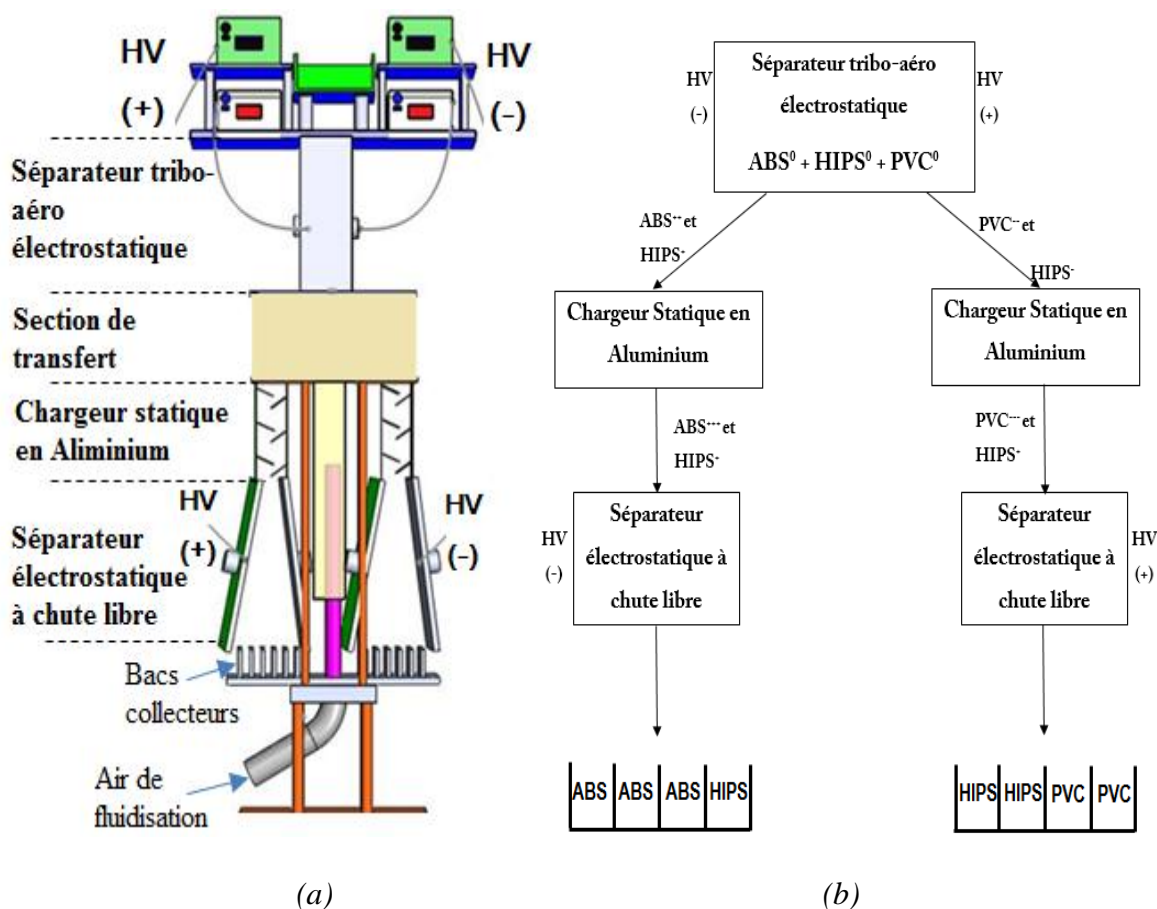


Figure I.21. Séparateur tribo-aero-électrostatique à deux étages (a) et Schéma de séparation ABS / HIPS / PVC (B) [8, 95].

I.3.3 Séparateurs tribo-électrostatique pour les mélanges poudreux

Les séparateurs électrostatiques présentés dans les sections précédentes de ce chapitre ont largement prouvé leur efficacité dans le tri sélectif des granules de taille millimétrique provenant de différents DEEE. Cependant, ces séparateurs semblent être inappropriés pour le traitement des déchets finement broyés, principalement en raison de la difficulté de contrôler les trajectoires des particules, et les forces qui entrent en considération pour ce type des particules (adhésion, cohésion, agglomération...). Peu de travaux ont été menés dans ce domaine.

A) SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE A CONVOYEUR

Le séparateur électrostatique à convoyeur (Figure I.22), conçu par l'Institut PPRIME, à Angoulême, en France [16, 98 -101], est capable de trier des matériaux micronisés. Pour cela, un des dispositifs de charge par effet tribo-électrique cités précédemment (lit fluidisé, ventilateur ou Vibro-transporteur, etc.), viendra se positionner en amont du séparateur. Ainsi,

après le chargement des particules, celles-ci sont déposées en monocouche sur la surface du convoyeur à bande métallique (1) (longueur : 700 mm ; largeur : 70 mm), qui est connecté à la terre et entraîné en par un moteur (2) lui-même relié à un variateur de vitesse électronique

Même remarque pour (3) et (4) Une électrode cylindrique tournante (3) (acier inoxydable ; diamètre : 30 mm ; longueur : 70 mm) est connectée à un générateur de haute tension (4) réversible (positive ou négative).

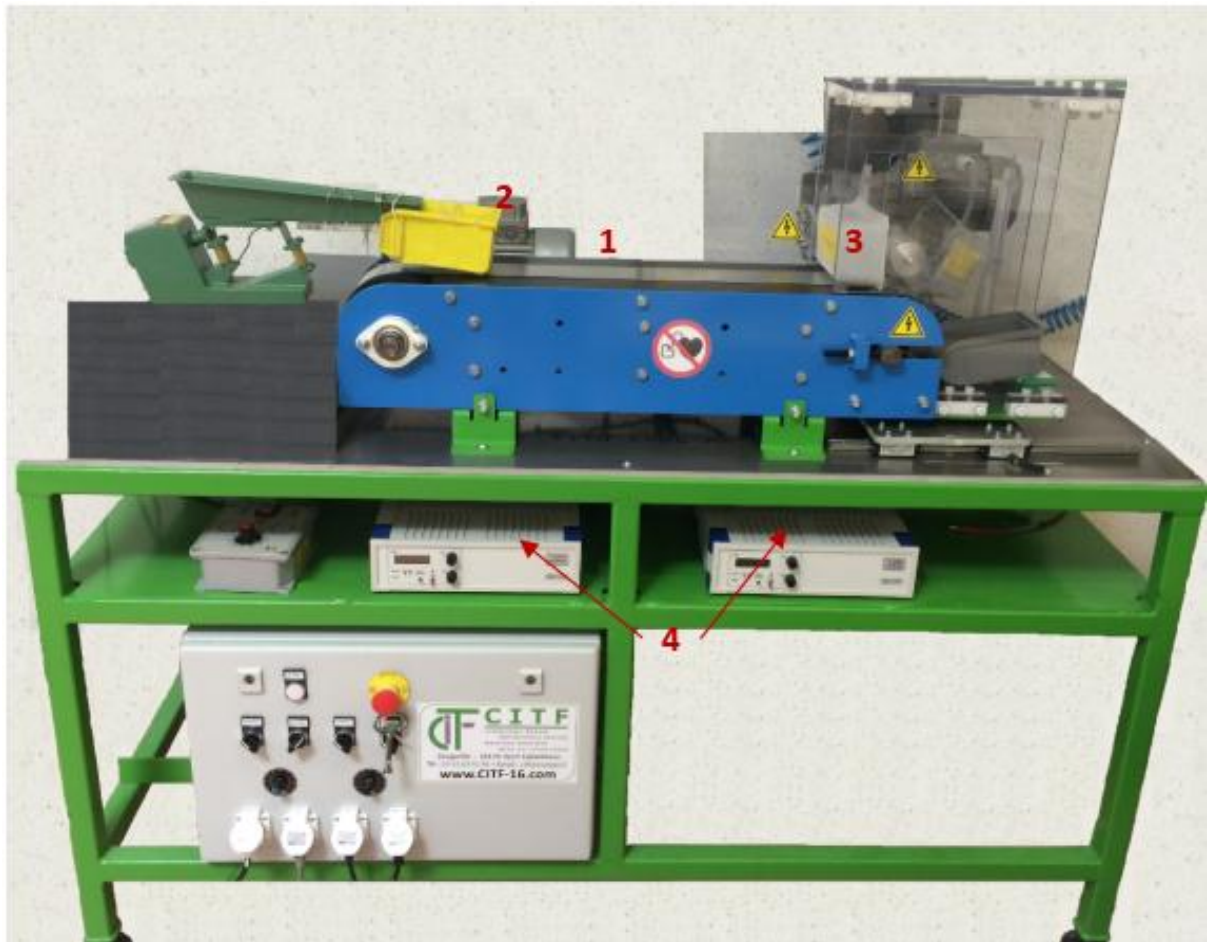


Figure I.22. Séparateur électrostatique à tapis roulant.

Une zone de champ électrique intense est créée entre cette électrode et la bande métallique du convoyeur reliée à la terre (Figure I.23). L'électrode haute tension attire les particules d'une polarité (produit B) et repousse les particules de polarité opposée (produit A), permettant ainsi la séparation.

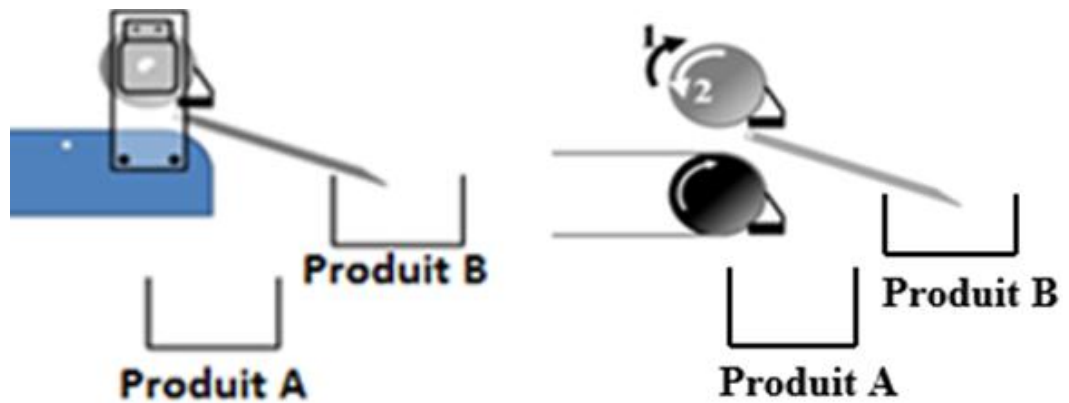


Figure I.23. Schéma descriptif du collecteur de produits.

B) SEPARATEUR TRIBO-AERO-ELECTROSTATIQUE A CHUTE LIBRE

Ce séparateur électrostatique (figure I.24), utilisé par l'INRA de Montpellier, 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 [12, 102].



Figure I.24. Photographie d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique (INRA).

Le mélange est chargé par la triboélectricité (Figure I.25), il tombe ensuite dans un fort champ électrique horizontal produit entre deux électrodes et situé dans une chambre isolante. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge.

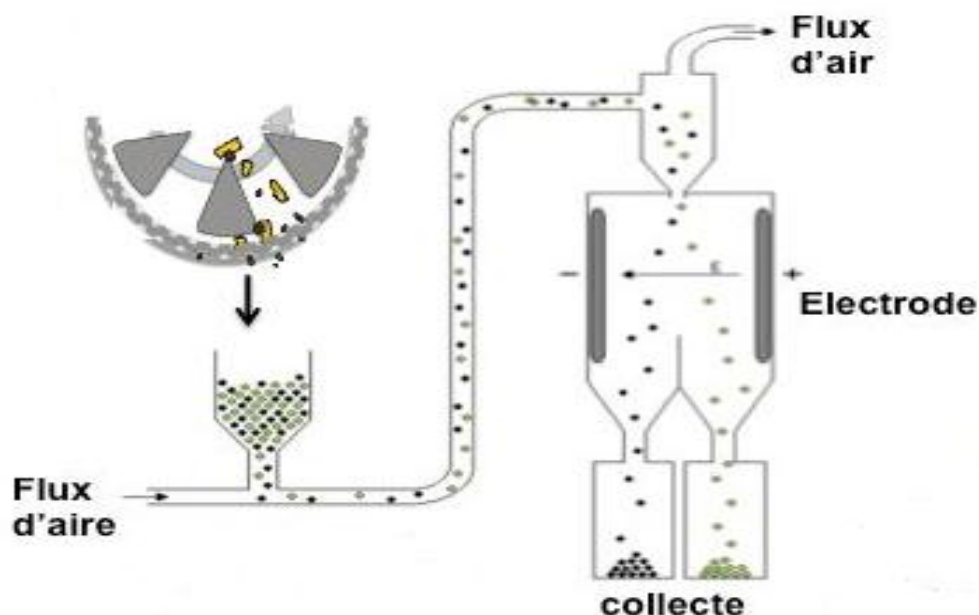


Figure I.25. Schéma descriptif du séparateur électrostatique.

C) SEPARATEUR TRIBO-AERO-ELECTROSTATIQUE A DEUX ELECTRODES VERTICALES

Le nouveau séparateur tribo-aéro-électrostatique [18, 103] (figure I.26) est conçu pour le traitement des mélanges de matériaux isolants fins (taille moyenne : 10-100 micromètres). Le dispositif se compose de deux électrodes verticales à plaques de dimensions 20 cm x 30 cm, reliées à deux alimentations haute tension continue de polarités opposées. Les deux électrodes effectuent des mouvements de va-et-vient à l'intérieur du lit fluidisé contenant les matériaux micronisés à séparer. La fluidisation est réalisée par injection d'air en utilisant un souffleur d'air à vitesse variable.

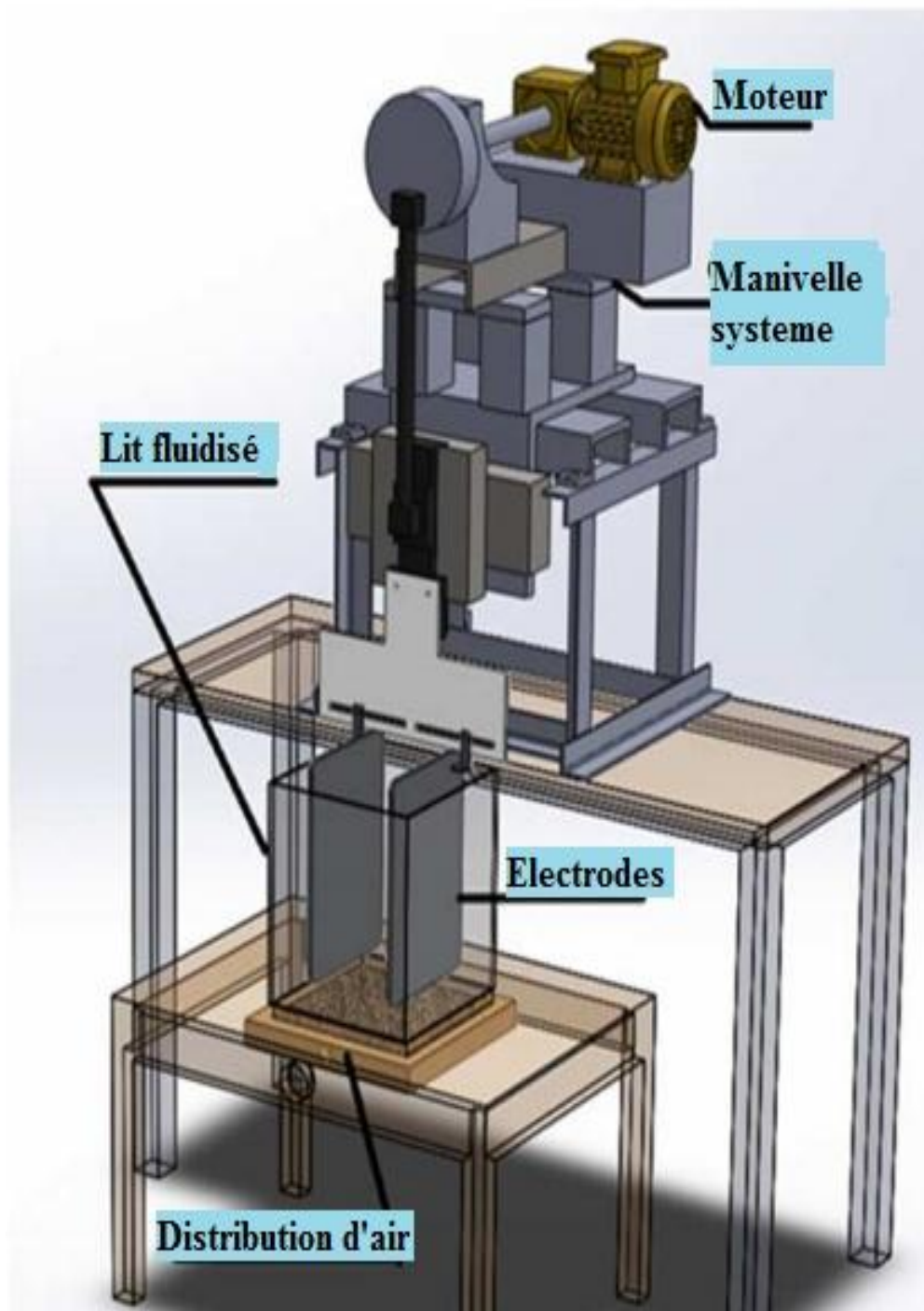


Figure I.26. Séparateur tribo-aéro électrostatique à deux électrodes verticales.

L'étude expérimentale est réalisée avec des échantillons de PVC blanc et PVC gris ayant une taille moyenne de 50 micromètres, et permet l'analyse des effets de divers facteurs sur l'efficacité de la séparation : la vitesse linéaire des électrodes, le champ électrique, la masse des matières traitées et le débit d'air de fluidisation. Le nouveau processus de séparation se

caractérise par des taux de récupération élevés. La pureté des produits séparés, estimée par examen visuel, est supérieure à 90% dans toutes les expériences.

D) SEPARATEUR TRIBO-AERO-ELECTROSTATIQUE A DISQUES TOURNANTS

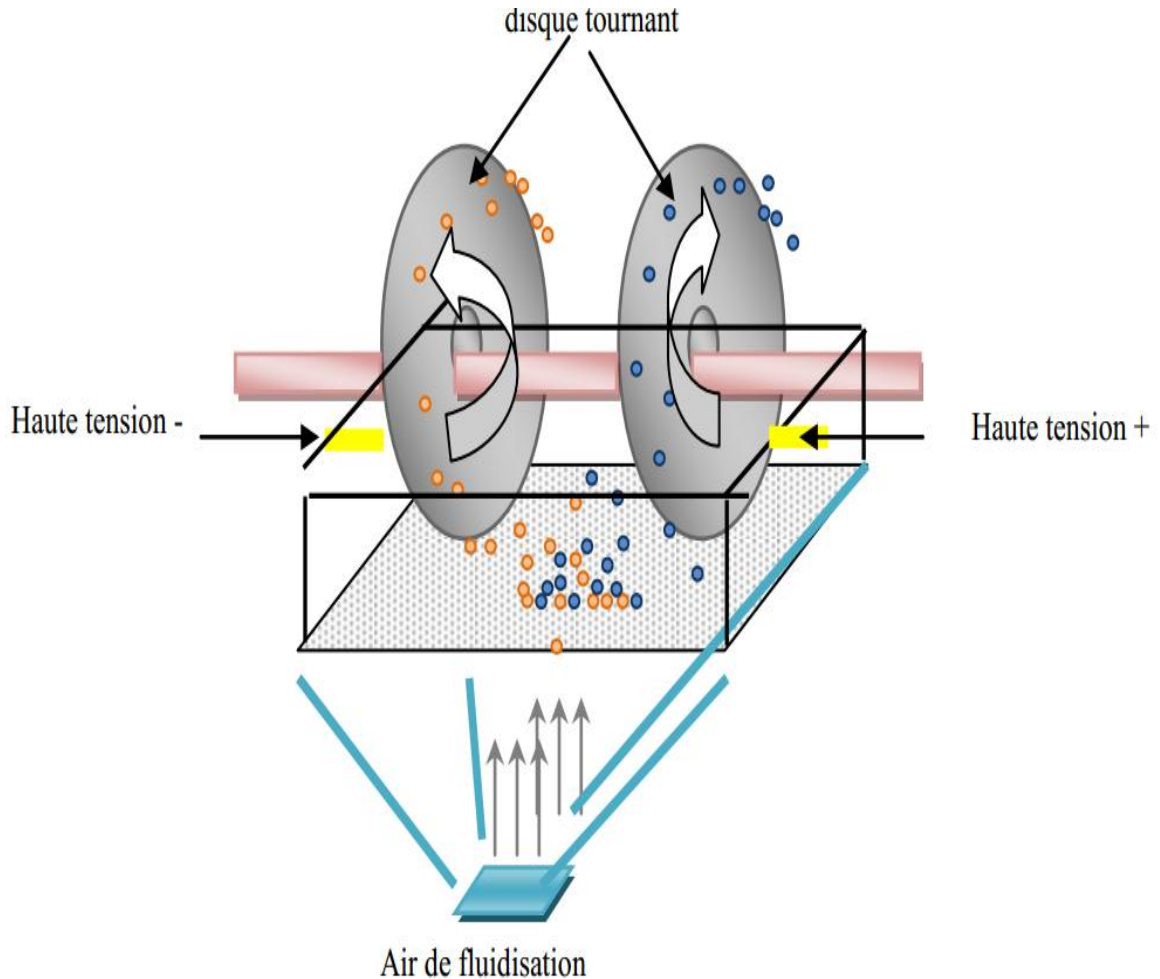


Figure I.27. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants.

C'est une installation particulièrement adaptée à la séparation des particules fines de plastique. Deux disques métalliques sont montés sur le même arbre (figure I.27), entraîné par un moteur électrique, afin de les tourner dans un mélange de particules fluidisé. Les deux disques qui sont alimentés par deux sources de haute tension de polarités opposées, soulèvent les particules chargées. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques [17, 104].

I.4 CONCLUSION

L'augmentation permanente de l'utilisation des équipements électriques et électroniques est suivie par une croissance rapide des DEEE, ceci nécessite le développement de techniques de recyclage adéquates pour la réutilisation des matériaux provenant de ses déchets et la protection de l'environnement.

La séparation triboélectrique présente une solution pour le traitement des plastiques provenant de ces déchets, ou plusieurs travaux ont été effectués sur la séparation électrostatique des matériaux isolants plastiques de taille millimétrique, et beaucoup de prototype industriel ou de laboratoire ont prouvé leur efficacité dans la séparation des déchets plastiques

Peu de recherches ont visé la séparation triboélectrique des matériaux de taille plus fine à cause de la difficulté du contrôle des trajectoires de ses particules, sachant qu'une quantité importante de matériaux et de taille inférieur à 1 mm, ce qui exige le développement des nouvelles technologies de séparation électrostatique pour cette catégorie de matériaux.

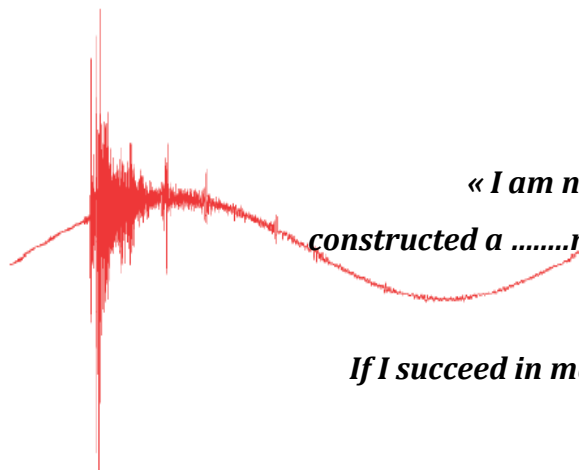
La séparation tribo-aéro-électrostatique représente une technique récente qui peut minimiser les durées de traitement et les coûts à échelle industrielle.

Les points mis en évidence dans le présent chapitre seront utiles pour la compréhension des étapes suivante des travaux de cette thèse.

CHAPITRE II

CHARGEMENT

TRIBOELECTRIQUE DES MATERIAUX ISOLANTS



*« I am never content until I have
constructed amodel of the subject I am
studying.*

If I succeed in making one, I understand;

otherwise I do not »

Lord Kelvin

L'effet triboélectrique permet le chargement électrique des matériaux isolants granulaires ou pulvérulents à l'aide d'une grande variété de dispositifs mécaniques ou aérodynamiques (alimentations vibrantes, tubes rotatifs, lits fluidisé, ...).

Nous présentons dans ce chapitre la procédure de mise en œuvre expérimentale conduisant à la séparation des matériaux granulaires. Le dispositif de tribocharge utilisé ici est de type hélice [105, 106], constitué d'une chambre cylindrique en polychlorure de vinyle (PVC). A son extrémité supérieure, la chambre est munie d'une ou plusieurs hélices coaxiales en aluminium, entraînée(s) par un moteur électrique à courant continu à vitesse variable. Ce dispositif entraîne les matériaux granulaires qui s'entrechoquent dans un mouvement hélicoïdal favorisant ainsi leur chargement triboélectrique. Les collisions sont multiples : granule-hélice, granule-paroi du cylindre et granule-granule. Le signe et l'intensité de la charge acquise par chaque granule sont déterminés par l'action combinée de ces trois natures de collisions.

Le but de ce chapitre est triple :

- évaluer le chargement triboélectrique de quatre types de matières plastiques granulaires par le dispositif de type hélice.
- valider la possibilité d'utiliser cette tribocharge pour la séparation électrostatique de mélanges de plusieurs de ces matériaux
- étudier la particularité de chargement triboélectrique des matériaux poudreux.

II.1 – MISE EN ŒUVRE EXPERIMENTALE

II.1.1. DISPOSITIF DE TRIBOCHARGE DE TYPE HELICE

Le tribochargeur de type hélice pour les matériaux isolants granulaires est présenté dans la figure II.1. Les matériaux granulaires sont introduits dans le tribochargeur par un dispositif d'alimentation dont nous contrôlons le débit d'alimentation. Le tribochargeur se compose d'un tuyau en PVC de diamètre 140 mm et deux hélices en aluminium de diamètres 80 mm. Les hélices sont entraînées en rotation par un moteur à courant continu à vitesse variable (figure (II.1)).

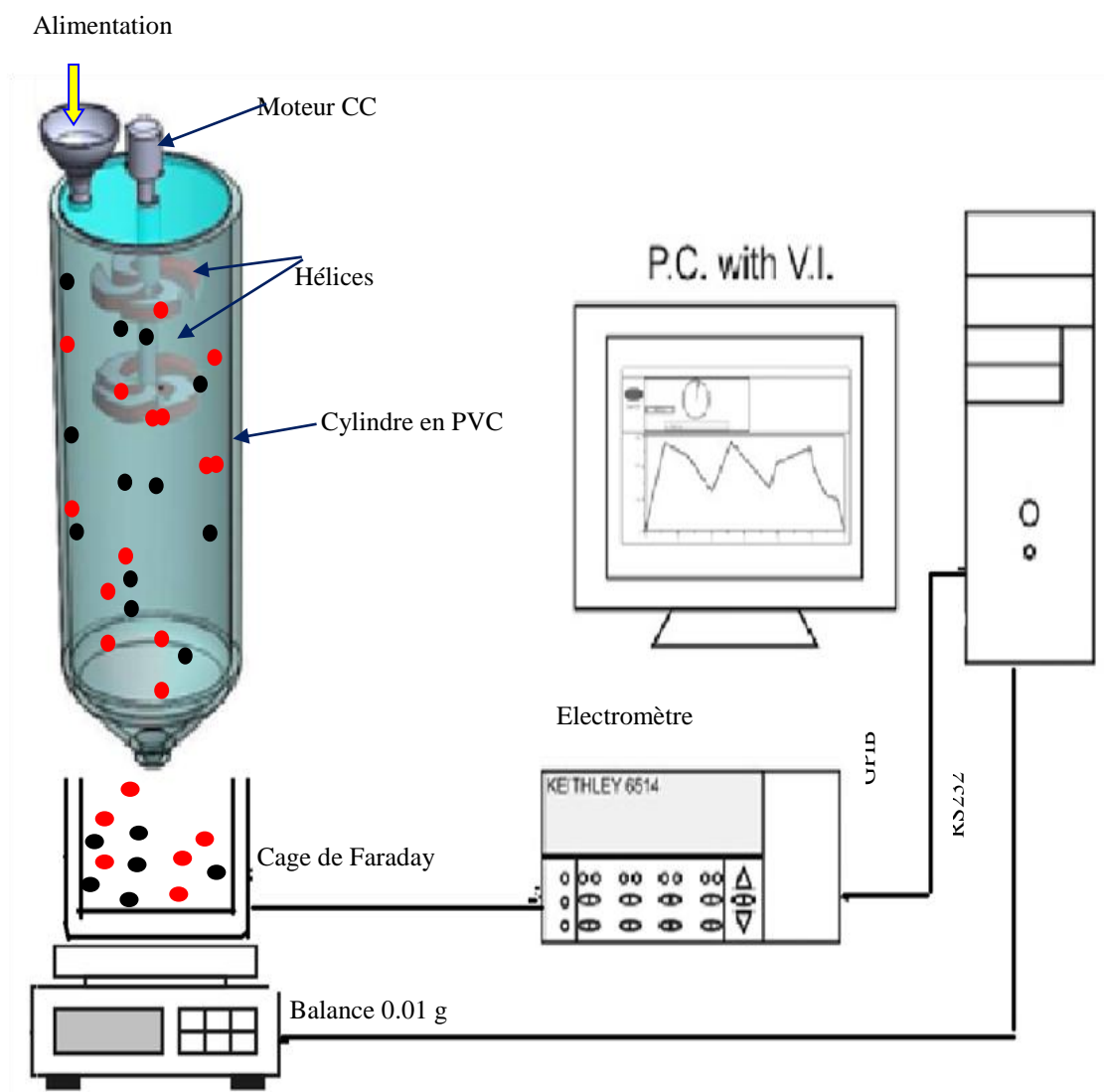


Figure II.1. Représentation schématique du tribochargeur type hélice et du dispositif expérimental.

La matière granulaire introduite dans le tribochargeur a un premier impact avec les pales des hélices en aluminium. Ensuite, les forces aérodynamiques générées par les hélices projettent les particules vers les parois du tuyau en PVC. Les impacts multiples avec les pales des hélices, la paroi du tuyau en PVC et entre granules chargent les particules par effet triboélectrique. Les particules chargées tombent ensuite librement dans une cage de Faraday reliée à un électromètre KEITHLEY 6514 et placée sur une balance électronique de résolution 0,1 g. La balance électronique et l'électromètre sont connectés à un PC via une sortie RS232 et des câbles GPIB. La charge et la masse mesurées par les deux instruments sont enregistrées en utilisant un programme d'acquisition de données LabView conçu pour la mesure virtuelle.

Le rapport charge / masse est ensuite calculé, pour évaluer la charge triboélectrique de chaque matériau.

A) DISPOSITIF DE SEPARATION ELECTROSTATIQUE

Les expériences de séparation électrostatique sont effectuées à l'aide d'un séparateur électrostatique à chute libre (Figure II.2). Le mélange granulaire à séparer est d'abord chargé par le dispositif de type à hélice. Ensuite, les particules tribochargées tombent librement dans le champ électrique généré entre les deux électrodes à plaque (longueur : 1250 mm largeur : 540 mm) du séparateur électrostatique. Les particules positivement et négativement chargées sont respectivement attirées par les électrodes de polarités négative (-30 kV) et positive (+30kV).

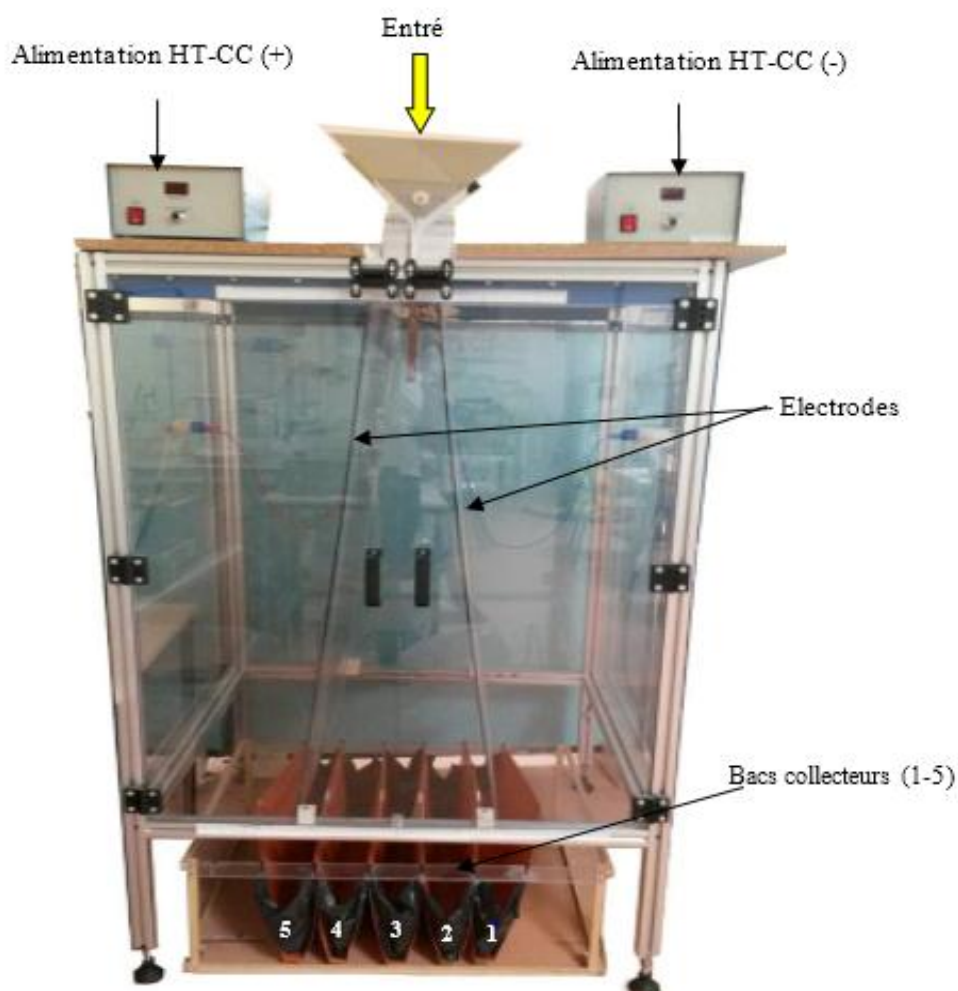


Figure II.2. Séparateur Tribo Electrostatique à chute libre STECL.

La distance entre les bords supérieurs des électrodes est de 120 mm pour obtenir un champ électrique maximal dans cette zone d'entrée du séparateur. Les électrodes sont inclinées selon un angle de 5° par rapport à la verticale, de sorte à moins interférer avec les trajectoires de séparation des particules.

Le produit séparé est récupéré dans un collecteur à cinq bacs. Les particules chargées négativement sont collectées dans les bacs 1 et 2 situés à gauche et les particules chargées positivement dans les bacs 4 et 5 de droite. Les particules insuffisamment chargées s'accumulent dans le bac central 3.

II.1.2 Instrumentation

A) MESURE DE L'HUMIDITE RELATIVE ET DE LA TEMPERATURE

Le chargement triboélectrique est un processus très sensible aux conditions ambiantes d'humidité et de température. Il est primordial de débiter les expériences par la mesure de l'humidité relative dont le taux impacte significativement les résultats obtenus. Lorsque l'air est sec, la charge acquise est plus importante, en revanche quand le taux d'humidité relative est élevé, certains matériaux peuvent l'absorber. Dans ce cas, la surface peut devenir semi-conductrice. La charge statique reste donc faible et peut même disparaître à cause de cet état de surface humide. Ainsi, la qualité des résultats et donc de la séparation est directement corrélée au taux d'humidité qui doit rester bas, donc toute mesure faite dans des taux inconvenables est écartée. Le thermo-hygromètre numérique Testo 608-H1 utilisé est représenté sur la figure.II.3.



Figure II.3. Hygromètre numérique Testo 608-H1.

B) MESURE DE LA CHARGE ELECTRIQUE

La méthode utilisée au sein de laboratoire pour déterminer la polarité ainsi que la valeur de la charge électrique que portent les granules chargés, est établie sur le principe de base : un capteur « cage de Faraday » relié à un appareil de mesure de type « électromètre ».

Dans notre installation, la mesure de la charge des granules récupérées durant la séparation est directe et continue. La cage de Faraday, posée sur une balance à la sortie du chargeur (figure II.4) est reliée à un électromètre. Cette méthode nous permet d'obtenir des mesures instantanées et précises.

La cage de Faraday est constituée de deux récipients métalliques (conducteurs) emboîtés l'un dans l'autre et isolés électriquement. Le récipient extérieur, relié à la terre, fait office de blindage contre les parasites extérieurs.

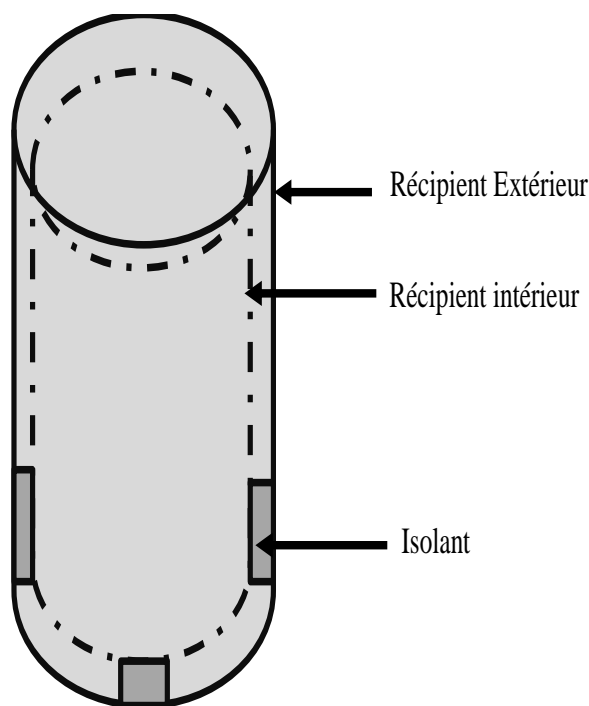


Figure II.4. Cage de FARADAY.

Pour mesurer la charge électrique des granules chargés, ils sont introduits, en évitant tout contact prématuré, dans le récipient intérieur qui est relié au dispositif de mesure. On mesure alors une charge globale, résultante algébrique des charges de toutes les particules.

L'électromètre utilisé durant les expériences est un instrument numérique de marque Keithley, modèle 6514 (figure. II.5)



Figure II.5. Electromètre KEITHLEY 6514.

C) MESURE DE MASSE GRANULAIRE



Figure II.6. Balance électronique KERN 440-47N.

Il est nécessaire de mesurer les masses granulaires avant et durant chaque expérience. Nous avons utilisé une balance électronique Kern 440-47N (figure II.6) d'une résolution de 0.1g et portée 2000g.

II.1.3 Instrumentation virtuelle

La mesure de la charge électrique est un processus fortement influencé par les conditions environnementales et sujet à de nombreuses erreurs de traitement. Une bonne

interprétation des résultats nécessite une bonne compréhension des processus physiques et des hypothèses formulées.

L'instrumentation virtuelle est une solution fiable et efficace pour surveiller les variables d'entrée et de réponses des procédés électrostatiques complexes, où la charge électrique est le paramètre de base dans ses procédés. L'équipe de l'électrostatique appliquée du laboratoire Pprime basée à l'IUT d'Angoulême, possède tout l'équipement nécessaire pour mettre en œuvre cette instrumentation virtuelle. Nous avons utilisé une carte d'acquisition de données GPIB, une carte d'acquisition externe MEILHAUS REDLAB 108, et les logiciels TracerDAQ et LabVIEW 6.

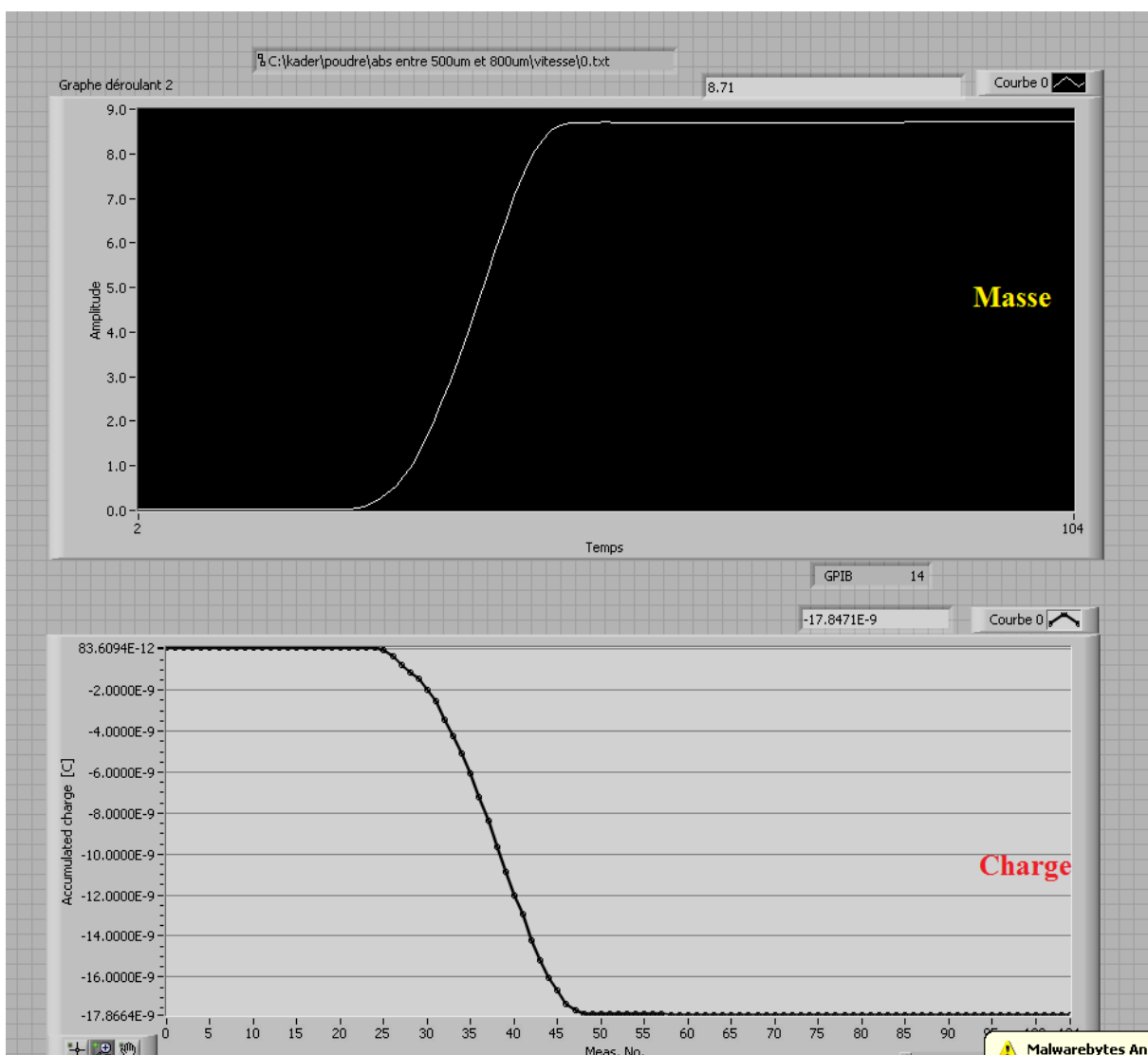


Figure II.7. Interface graphique de l'instrumentation virtuelle

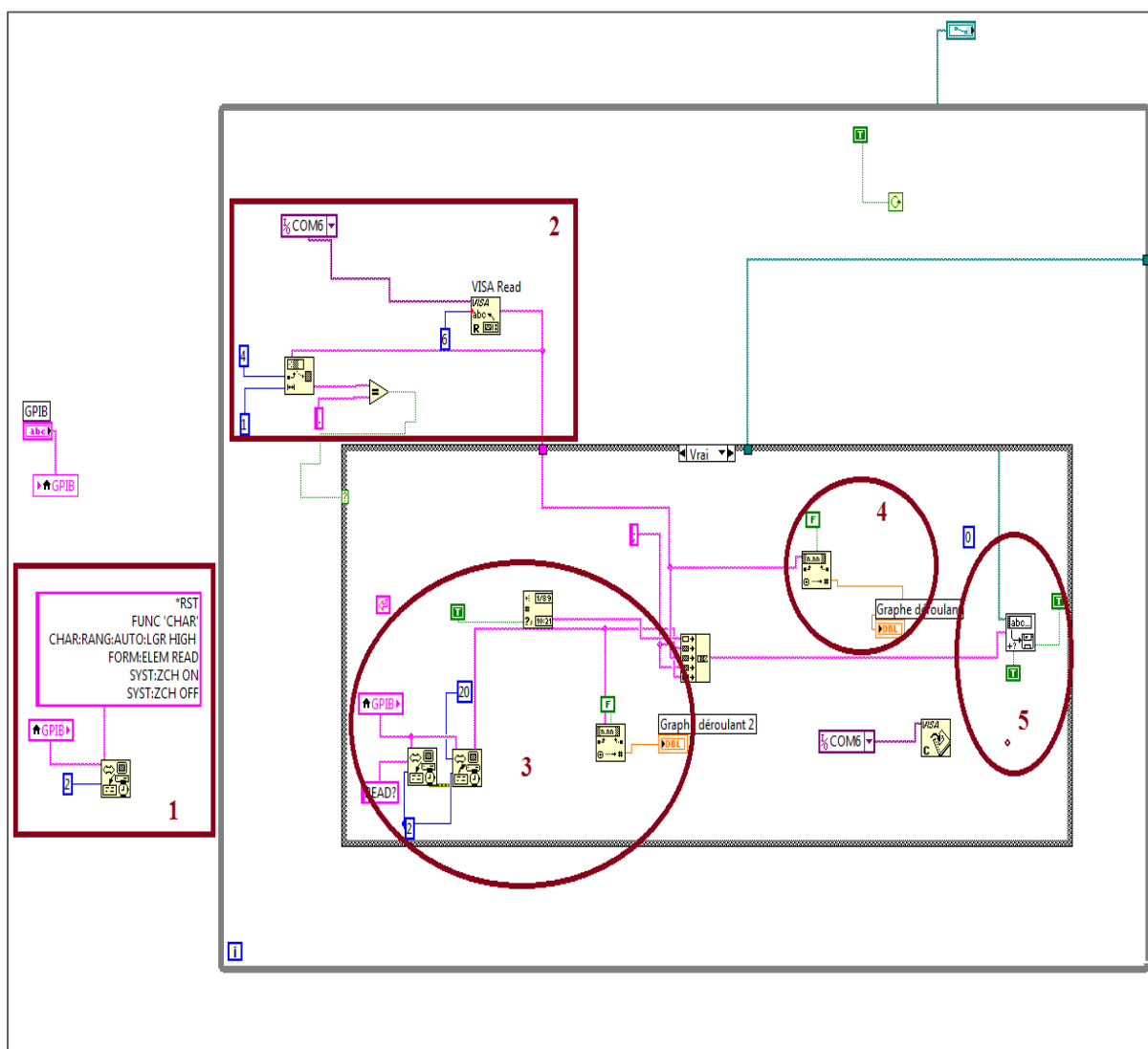


Figure II.8. Le diagramme d'instructions de l'instrument virtuel VI.

Mihalcioiu [107, 108] a mis au point un instrument virtuel capable d'acquérir des données à une fréquence d'échantillonnage variable à partir d'une cage de Faraday reliée à un électromètre. Le processus a été mis au point par Bilici [109] qui a développé un programme sous LabVIEW [110] (Figure II.7) qui permet d'acquérir des données de charge et de masse instantanément à partir d'une balance connectée avec RS232 et d'un électromètre connecté par GPIB.

L'interface graphique présente deux graphes déroulants qui décrivent les acquisitions des évolutions de la masse et de la charge électrique. Les acquisitions continues sont aussi enregistrées dans un fichier (*.txt) en vue d'un post traitement pour le calcul de la charge massique par exemple.

Le diagramme d'instructions (Figure II.8) peut-être devisé en cinq sections principales :

- Section 1 : Déclaration et initialisation de à l'aide de mots-clés spécifiques du protocole GPIB ;
- Section 2 : Acquisition des données de la balance numérique et conversion des bits du signal de la balance en données numériques exploitable sur le PC ;
- Section 3 : Acquisition des données de l'électromètre, remise à zéro pour une nouvelle mesure et affichage sur le graphe déroulant 2.
- Section 4 : Affichage des mesures de la balance sur le graphe déroulant 1 ;

Section 5 : Enregistrement des mesures de la balance et de l'électromètre dans un fichier .txt.

II.2 CHARGEMENT DES MATERIAUX GRANULAIRES

II.2.1 Description des matériaux

Les matériaux granulaires qui font l'objet de la présente étude sont 5 polymères différents : polypropylène (PP), polystyrène à haut impact (HIPS), le polyéthylène haute densité (HDPE), le polychlorure de vinyle (PVC), et Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) originaires des DEEE traités par la société APR2, France. Le diamètre des particules est compris entre 1 mm et 6 mm, comme illustré sur la Figure II.9, sauf pour l'ABS qui a une classe de tailles comprise entre 500 μm et 800 μm (figure II.10).

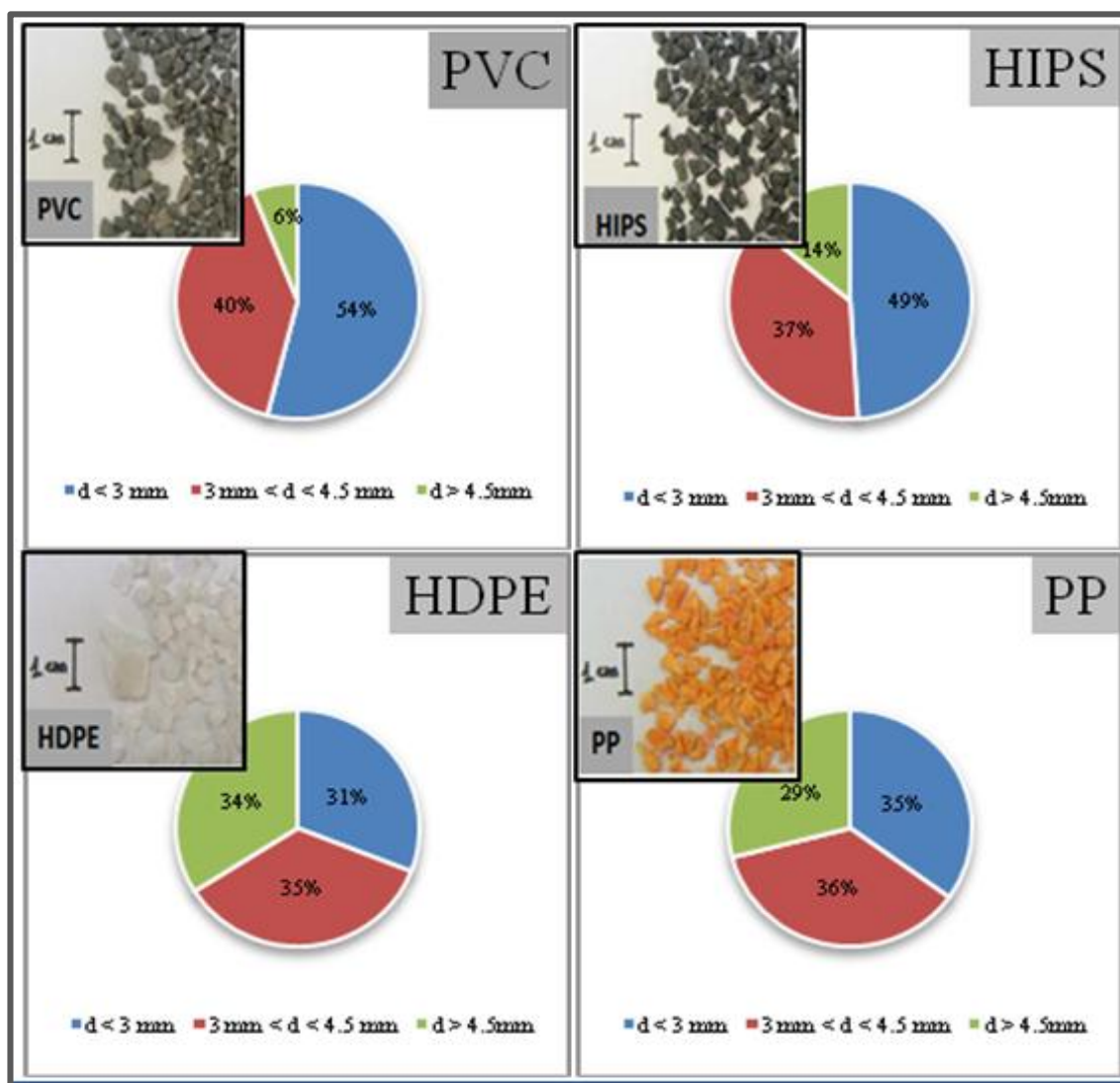


Figure II.9. La distribution de la taille des matériaux millimétriques PVC, HDPE, PP, et HIPS.

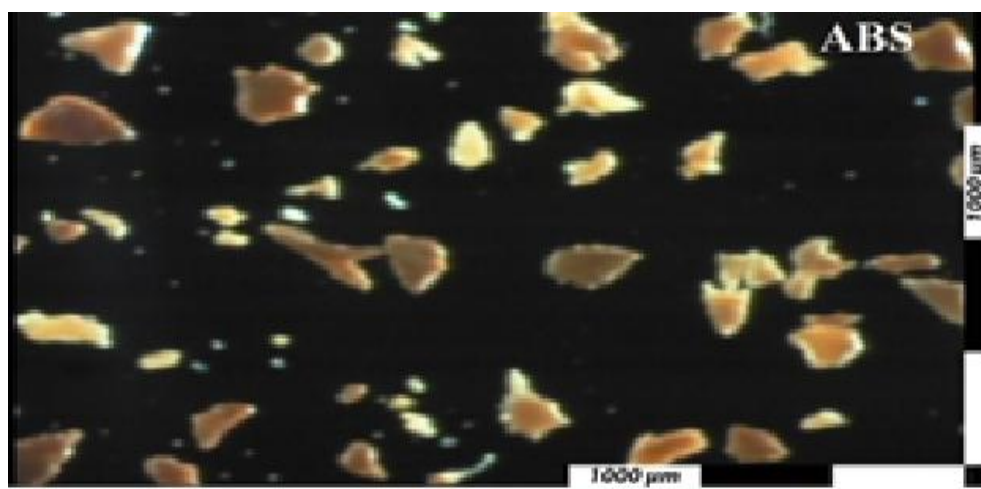


Figure II.10. Photo par microscope de l'ABS marron.

II.2.2 Etude des facteurs influents – matériaux millimétriques-

Le programme d'acquisition LABVIEW décrit précédemment permet la mesure en continu de la charge et la masse des particules collectées dans la cage de Faraday, en fonction du temps.

Dans la première série d'expériences, réalisée avec chacun des quatre types de matières plastiques de tailles millimétriques, la vitesse de rotation des hélices varie de 0 à 4000 tr/min.

La deuxième série d'expériences est réalisée à la vitesse des hélices constante $n = 4000$ tr/min, avec 3 tailles différentes de particules PEHD.

Les conditions ambiantes sont relativement stables : humidité relative $HR = 45-55\%$ et température comprise entre 18 °C et 21 °C , et les résultats sont présentés en fonction du rapport charge / masse.

Au cours de toutes les expériences, le débit d'alimentation en produit est maintenu constant de l'ordre de 3 g/s .

A) PROCEDURE DE MESURE

Nous avons préalablement réglé la tension d'alimentation du moteur à courant continu pour avoir une vitesse de rotation souhaité. Nous commençons par mettre en route le programme d'acquisition. Nous mettons ensuite le produit dans le vibro-transporteur, où il va être transporté vers le chargeur. A la fin de l'expérience, on arrête le moteur et le programme d'acquisition, et on nettoie le chargeur et la cage de Faraday pour l'expérience qui suit.

Les résultats d'une expérience de chargement réalisé sur un échantillon de PVC de 20 g , avec des hélices tournant à 4000 tr/min , sont présentés dans les Figures. II.11 et II.12. Les discontinuités sur les courbes de la charge et de la masse en fonction du temps correspondent au moment où les hélices sont arrêtées la quantité de matière restée dans le chargeur tombe librement dans la cage de faraday.

Il faut noter que près de $1,5\text{ g}$ de particules restent attachés aux parois du tribochargeur, ce qui explique pourquoi la masse du produit recueilli dans la cage de Faraday est inférieure à 20 g . Le rapport charge / masse calculée à partir des données expérimentales est également représenté en fonction du temps, sur la Figure II.13 Sa valeur est pratiquement constante pendant l'expérience.

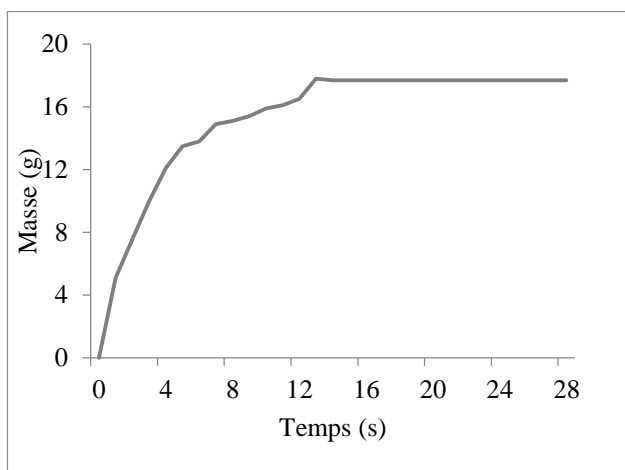


Figure II.11. Variation de la masse en fonction du temps.

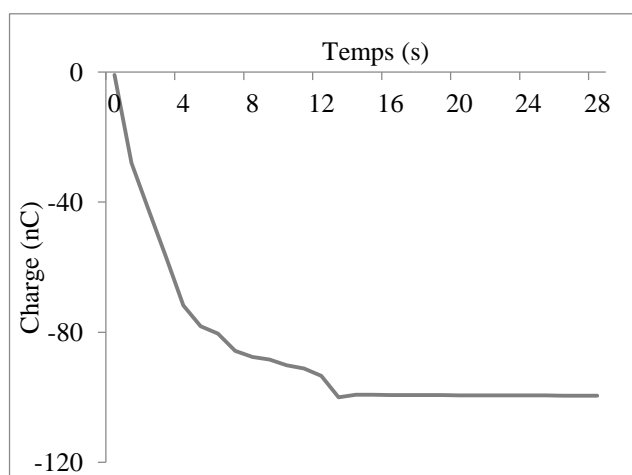


Figure II.12. Variation de la charge en fonction du temps.

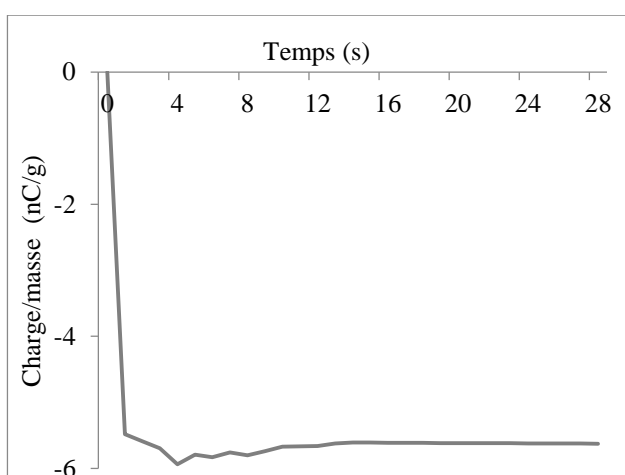


Figure II.13. Variation du rapport charge / masse en fonction du temps.

Des résultats similaires sont obtenus pour les trois autres polymères : PEHD, PP et HIPS. Leurs capacités de chargement sont analysées en relation avec les valeurs du rapport charge / masse calculée pour chaque expérience.

B) INFLUENCE DE LA VITESSE DE ROTATION DES HELICES

La figure II.14 montre qu'en augmentant la vitesse de rotation, l'échange d'énergie entre les particules et les pales des hélices et la paroi en PVC augmentent et, par conséquent, le rapport charge / masse augmente. Dans ce tribochargeur, les particules de PP et de HIPS sont chargées positivement, et les particules de PEHD et de PVC négativement. Une série triboélectrique peut être établie comme suit :

(-) PVC – HDPE – PP – HIPS (+)

Domage que nous n'avons pas plus de points de mesures pour avoir des courbes plutôt que des histogrammes. A première vue, les équations de ces « courbes » seraient faciles à obtenir.

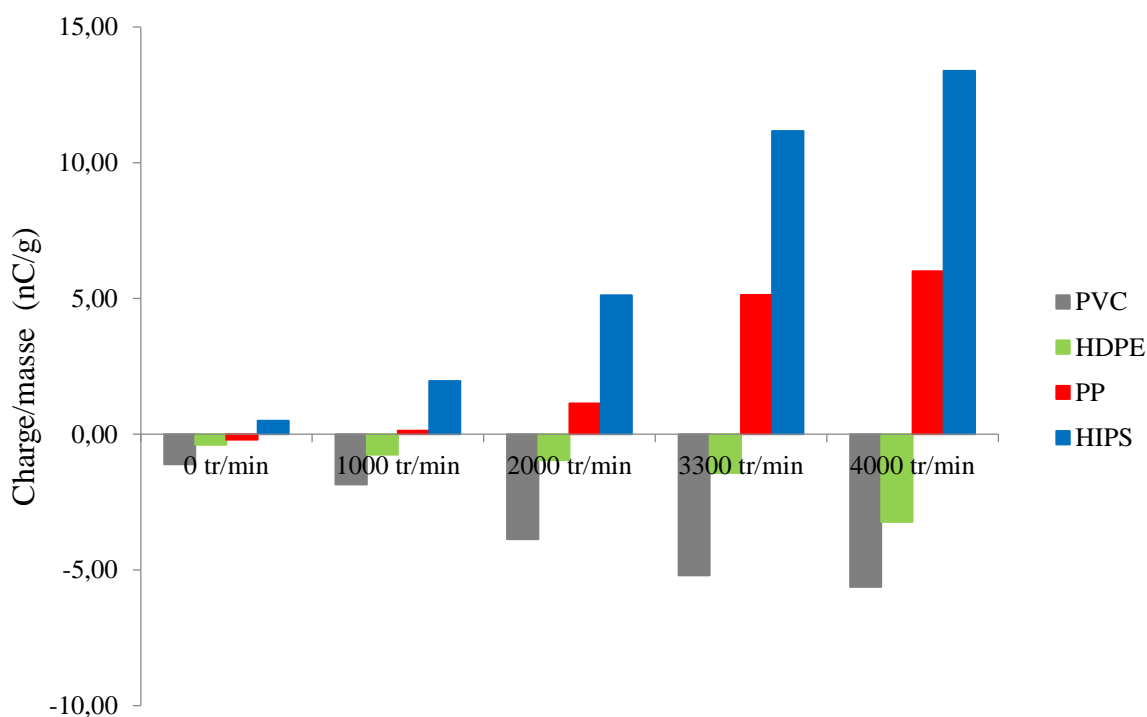


Figure II.14. Variation du rapport charge / masse en fonction de la vitesse de rotation des hélices.

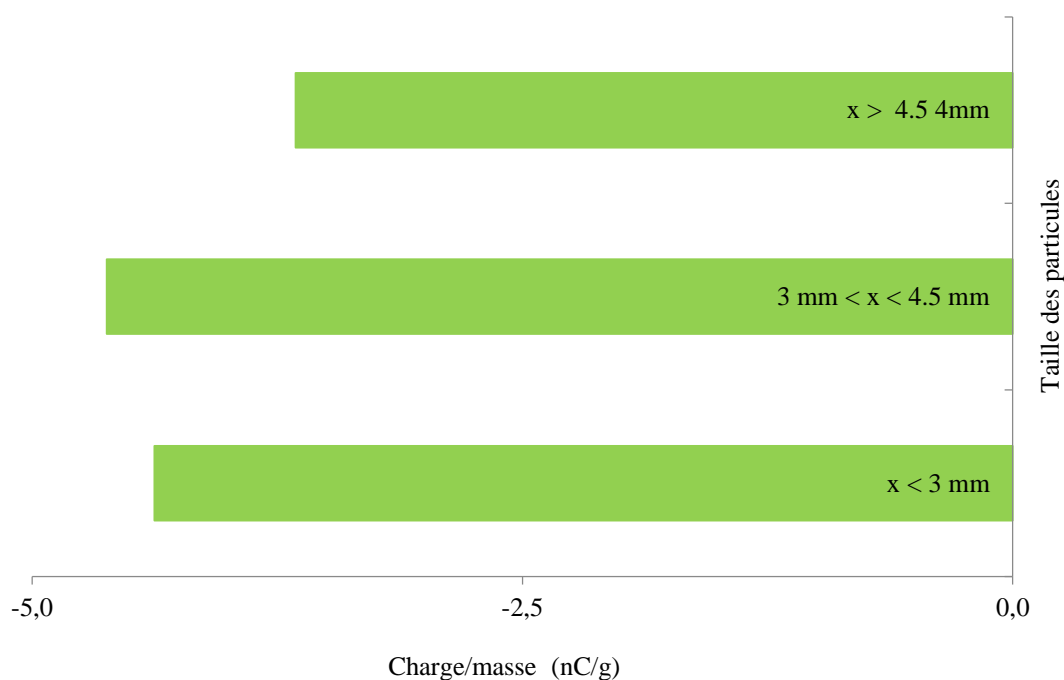
C) INFLUENCE DE LA TAILLE DES PARTICULES

Figure II.15. L'influence de la taille des particules sur le rapport charge / masse pour les particules de HDPE.

Les résultats présentés sur la Figure II.15 montrent que les particules de HDPE de moins de 4,5 mm de diamètre ont une charge légèrement plus élevée que celles supérieures à 4,5 mm. Ceci peut être expliqué par le fait que le chargement triboélectrique est un phénomène lié à la surface et que les particules plus grosses ont tendance à passer moins de temps dans le tribochargeur (et ont moins de collisions avec les pales de l'hélice et les parois du tuyau).

Les particules moins de 3 mm et les particules entre 3 mm et 4,5 mm ont à peu près la même charge massique avec une différence légère qui peut être liée à l'erreur expérimentale.

II.2.3 Etude de chargement de l'ABS poudreux

Dans la série d'expériences, réalisée avec l'ABS poudreux, la vitesse de rotation des hélices varie de 0 à 4000 tours par minute.

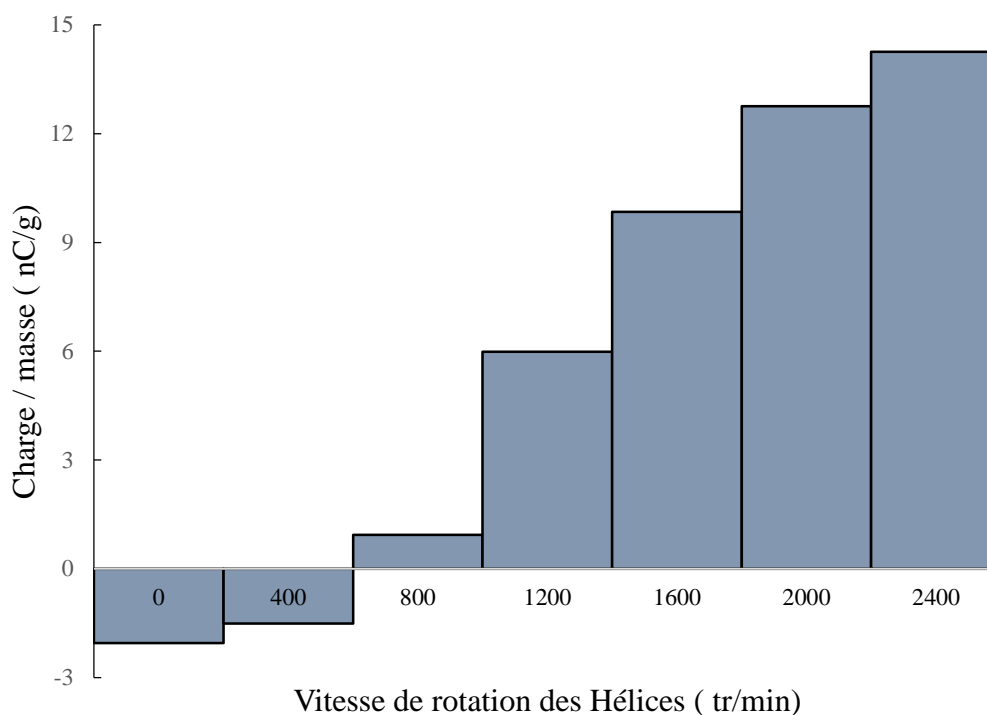


Figure II.16. Variation du rapport charge / masse en fonction de la vitesse de rotation des hélices.

Les conditions ambiantes sont relativement stables : humidité relative HR = 44-46% et température de l'ordre de 19 ° C-20 ° C, et la masse de chaque échantillon $m = 10$ g. Les résultats sont présentés en fonction du rapport charge / masse.

Au cours de toutes les expériences, le débit d'alimentation en produit est maintenu constant de l'ordre de 3 g / s.

La figure II.16 montre qu'en augmentant la vitesse de rotation, l'échange d'énergie entre les particules et les pales des hélices et la paroi en PVC augmente et, par conséquent, le rapport charge / masse augmente.

On remarque que pour des vitesses faibles la charge est négative, et après une vitesse de 800 tr / min la charge devient positive, ce qui est expliqué par la nature des corps qui rentrent en frottement. En effet, à de faibles vitesses les collisions des particules sont plus nombreuses avec les hélices en aluminium d'où leurs charges négatives. En augmentant la vitesse de rotation les collisions particule – paroi PVC sont majoritaires ; l'ABS se charge ainsi positivement.

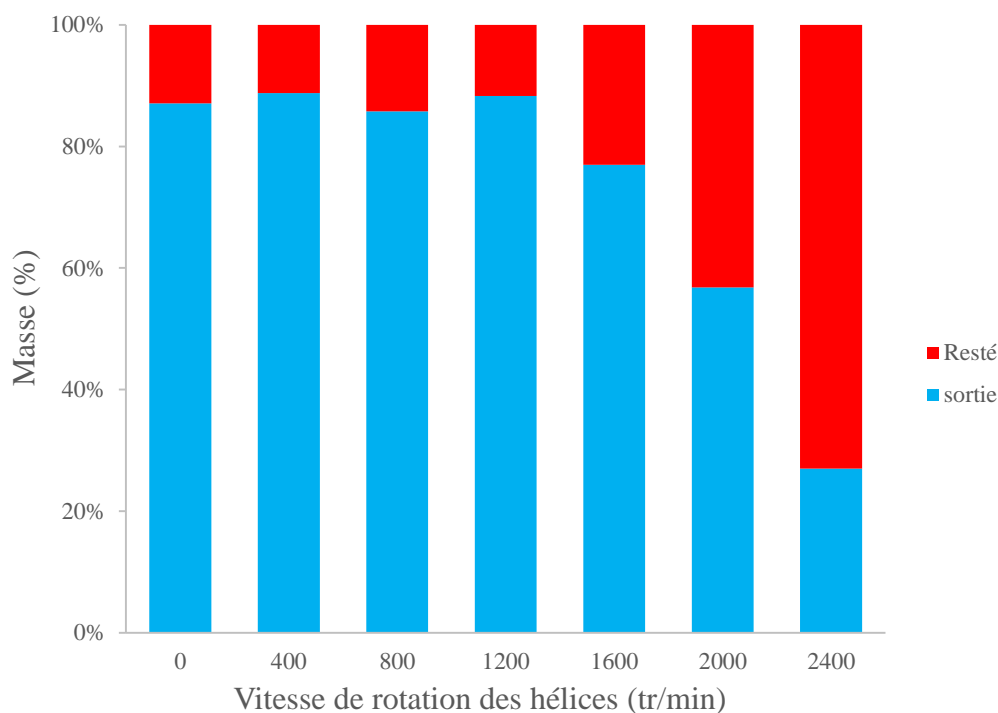


Figure II.17. Variation de la masse sortie et la masse restée en fonction de la vitesse de rotation des hélices.

En analysant les résultats présentés sur la figure II.17, nous constatons clairement une augmentation de la vitesse de rotation des hélices engendre au-delà de 12000 tr/min engendre une augmentation de la masse des particules restées collées à la surface de la paroi en PVC à cause de leur charge très importante et de leur masse très faible.

D'après cette expérience, nous pouvons conclure que pour les matériaux poudreux l'augmentation de la charge des particules fines fait croître les pertes en rapport de masse du produit à charger.

On propose comme solution pour ce type de particules l'utilisation d'un séparateur où les opérations de chargement et de séparations sont simultanées. Il s'agit des séparateurs tribo-aéro-électrostatique qui seront décrits dans les chapitres suivants.

II.3 SEPARATION DES MATERIAUX GRANULAIRES

Trois expériences de séparation électrostatique sont effectuées avec des échantillons de 200 g de matières plastiques granulaires. Dans chaque échantillon, le PVC représente 50% de la masse. L'autre matériau est le HDPE, le PP ou HIPS. Les expériences ont pour but de

valider l'efficacité du nouveau tribochargeur dans le chargement des matériaux granulaires de taille millimétrique.

Elles sont réalisées dans des conditions climatiques relativement stables : humidité relative HR entre 40% et 50% et température de l'ordre de 18 °C à 19.5 °C.

Les particules de PVC chargées négativement sont collectées dans le bac 1 et 2 du séparateur, et les particules chargées positivement accumulent dans les bacs 4 et 5. Les particules mal chargées tombent dans le bac 3.

La pureté et la récupération des produits sont déterminées pour chaque expérience. Le produit dans chaque bac est également tamisé pour identifier la distribution de la taille des particules (exprimée en pourcentage).

Les résultats des expériences de séparation électrostatiques sont résumés dans le tableau 1. La meilleure séparation est obtenue pour le mélange HIPS / PVC ; ces matériaux étant les plus éloignés dans les séries triboélectriques. Pour les matériaux qui sont plus proches dans la série, la qualité de la séparation est faible.

Tableau. II.1. Résultats des expériences de la séparation.

Mélange	PVC		Produit 2	
	Rec (%)	Pureté (%)	Rec (%)	Pureté (%)
PVC/HDPE	69,00	87,18	34,53	95,12
PVC/PP	72,13	96,46	81,51	97,95
PVC/HIPS	94,74	97,91	93,08	97,92

Les particules de PVC sont toujours chargées négativement et récupérées dans les bacs 1 et 2. Dans le bac 1 la taille des particules est principalement inférieure à 3 mm, en raison de la densité plus élevée de PVC. Les particules de PVC sont plus lourdes que les autres, de sorte que l'électrode positive attire principalement les particules qui sont plus petites que 3 mm. ,

peu de particules plus grandes de 4,5 mm sont collectées dans les bacs 1 et 5 (fig. II.18 à II.20).

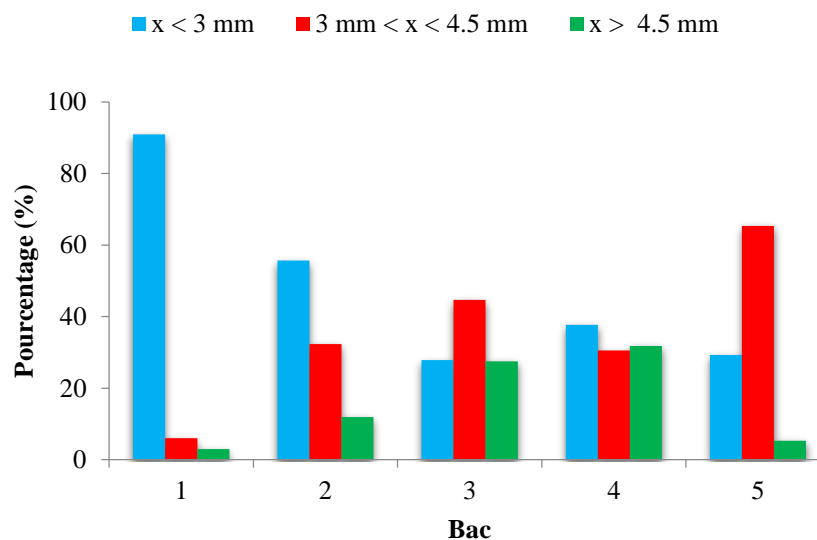


Figure II.18. Distribution de la taille des particules dans chaque boîte de collecte pour un échantillon de 50% de PVC / 50% de PEHD.

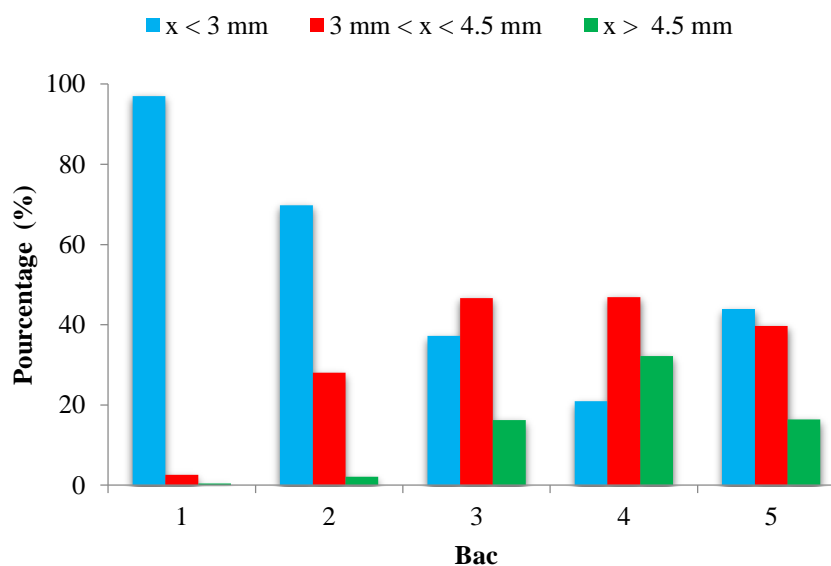


Figure II.19. Distribution de la taille des particules dans chaque boîte de collecte pour un échantillon de 50% de PVC / 50% de PP.

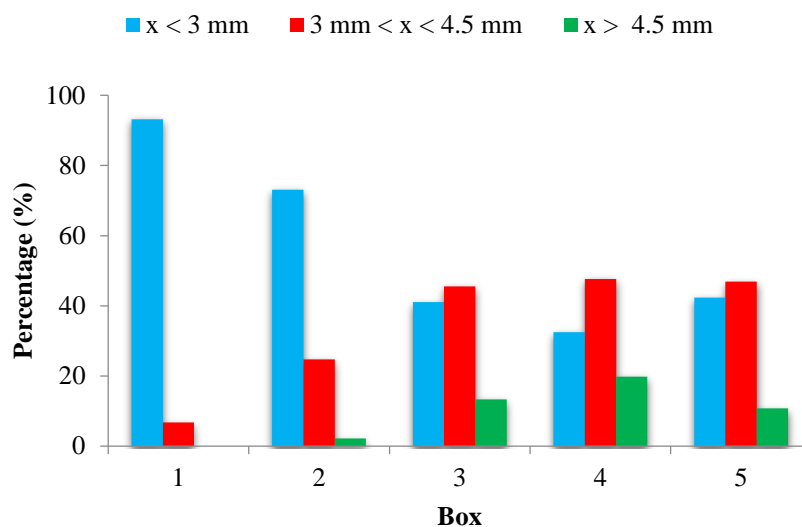


Figure II.20. Distribution de la taille des particules dans chaque boîte de collecte pour un échantillon de 50% de PVC / 50% de HIPS.

II.4 CONCLUSIONS

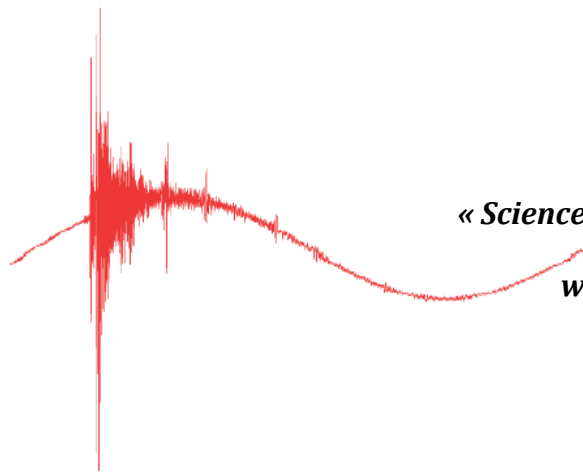
Le chargeur triboélectrique de type hélice est très efficace dans le traitement des matériaux plastiques granulaires de taille millimétrique. Les expériences ont prouvé que la charge acquise par ces matériaux granulaires est en relation avec l'échange d'énergie au cours des collisions avec les pales de l'hélice et les parois du tribochargeur. Les meilleurs résultats de chargement triboélectrique sont obtenus à une vitesse élevée des hélices.

La combinaison du tribochargeur de type hélice avec un séparateur à chute libre donne les meilleurs résultats lorsque les matériaux qui composent le mélange sont les plus éloignés dans la série triboélectrique. Les particules de plus grandes dimensions sont mal séparées en raison du faible rapport entre les forces électriques et de gravitation qui agissent sur eux.

Un chargement excessif des matériaux plastiques poudreux de taille inférieure à 1 mm engendre un collage des particules sur la paroi du tribochargeur, ce qui augmente les pertes dans le processus de séparation. Le chargement et la séparation de ses particules doivent être simultanés pour éliminer la tendance de collage des particules sur la paroi du chargeur. Dans le chapitre suivant, nous proposons un séparateur tribo-aéro électrostatique pour la séparation des particules de taille fines afin de solutionner les problèmes de la perte du produit tout en contrôlant les actions des forces électrostatique et aérodynamique qui sont plus intenses que la force gravitationnelle.

CHAPITRE III

SÉPARATEUR TRIBO-AÉRO- ELECTROSTATIQUE A DEUX ELECTRODES CYLINDRIQUES



*« Science..... never solves a problem
without creating ten more »*

George Bernard Shaw

L'objectif de cette partie du travail est l'optimisation d'un nouveau séparateur tribo-aéro-électrostatique pour les mélanges de matériaux isolants poudreux, avec une application au recyclage des équipements électriques et électroniques. Les deux électrodes cylindriques rotatives connectées à deux alimentations hautes tensions de polarités opposées sont partiellement immergées dans un lit fluidisé contenant le mélange à séparer. Les variables de contrôle du procédé de séparation sont la haute tension appliquée aux électrodes, la vitesse de rotation de la soufflante de l'air de fluidisation et le débit d'alimentation du séparateur. La méthodologie des plans d'expérience [111] est utilisée pour la modélisation du processus de séparation. Ceci permet à la détermination des valeurs de ces variables qui assurent l'état de fonctionnement optimal de l'installation

III.1 MATERIELS ET METHODE

III.1.1 Matériaux

Le polychlorure de vinyle ou PVC est le nom technique pour le vinyle, un polymère développé dans les années 1920. Le polychlorure de vinyle non plastifié-ou uPVC est le même produit que le PVC sauf, comme son nom l'indique, il est fait sans l'utilisation de tous les plastifiants au cours du processus de fabrication.

Les produits poudreux (figure III.1) utilisés pour ce travail sont deux types de polychlorure de vinyle (PVC) de couleurs différentes, provenant du post-traitement des déchets d'un fabricant industriel de tuyaux en plastique, CHIALI Groupe, Sidi Bel Abbès, Algérie. La taille des particules est généralement comprise entre 150 et 250 μm . Le PVC de couleur grise est un PVC plastifié, alors que le PVC de couleur blanche est un PVC du type U (uPVC) qui ne contient pas des plastifiants qui modifient les caractéristiques physico-chimiques du polymère. Ces modifications sont accompagnées par des différences dans les propriétés de charge triboélectrique des deux matériaux, qui feront l'acquisition des charges de signes opposés en entrant en collision les uns avec les autres dans le lit fluidisé.

Les deux types de polychlorure de vinyle, le PVC et le uPVC, sont deux matières plastiques utilisées dans une large gamme de matériaux. L'ajout de plastifiants dans le PVC le ramolli, les produits élaborés sont alors plus souples.

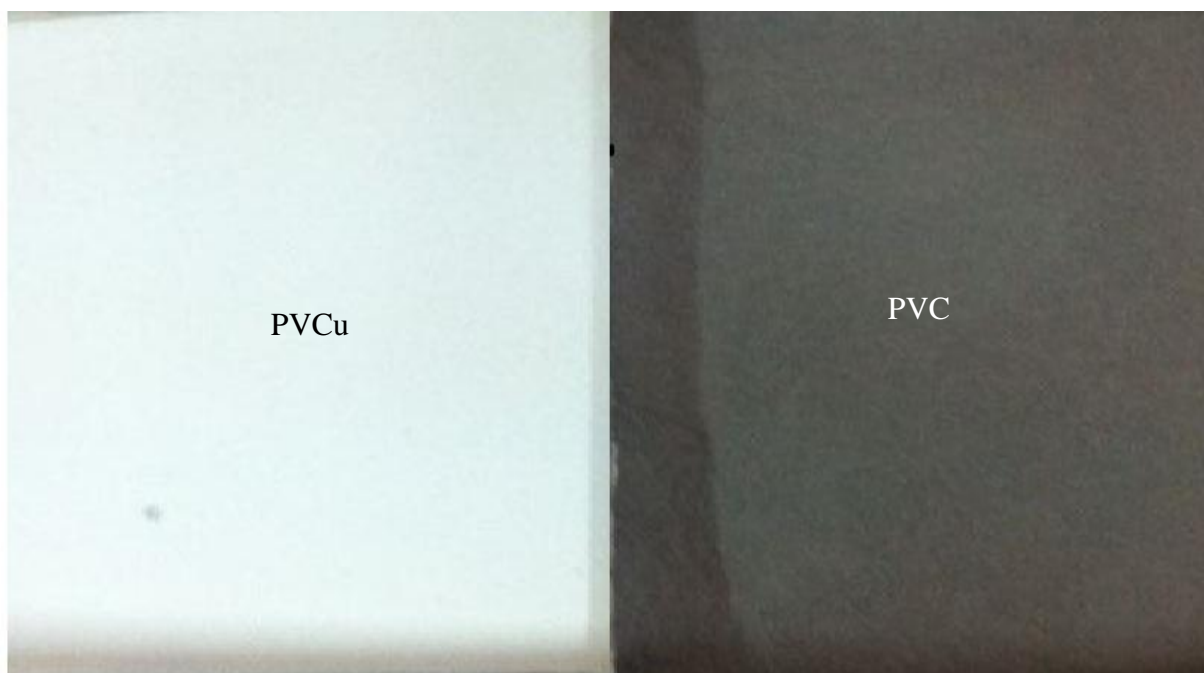


Figure III.1. Photographie des produits utilisés dans l'étude : poudre blanche (uPVC) ; poudre gris (PVC).

A) CARACTÉRISTIQUES DU PVC

Le PVC est souple, peu coûteux et durable. Il est couramment utilisé dans les tuyaux, l'isolation des câbles électriques, des jouets et des vêtements. Le degré de flexibilité peut être contrôlé par la quantité et les caractéristiques des plastifiants ajoutés à la formule. La diminution des plastifiants permet la création de tuyauterie rigide, tandis que davantage de plastifiants créent un matériau souple pour l'isolation ou les vêtements ou encore les rideaux en plastique. Ce matériau est facile à couper proprement et adhère bien aux adhésifs.

B) CARACTÉRISTIQUES DE PVCu

Le PVCu, parfois mentionné comme uPVC, est raide, rigide, solide et cassant. Ce matériau est élaboré sans ajout de plastifiants. Il est utilisé dans les tuyaux, les châssis de fenêtres, en remplacement du bois dans la construction et dans les appareils médicaux ou dentaires. On le trouve souvent à l'extérieur de la maison, c'est un plastique durable qui ne changera pas de forme lorsqu'il est exposé aux éléments physiques. Il est également utilisé dans les tuyaux en plastique ; le PVCu propose des parois intérieures lisses pour une meilleure circulation de l'eau et il est résistant à l'érosion chimique.

III.1.2 Installation expérimentale

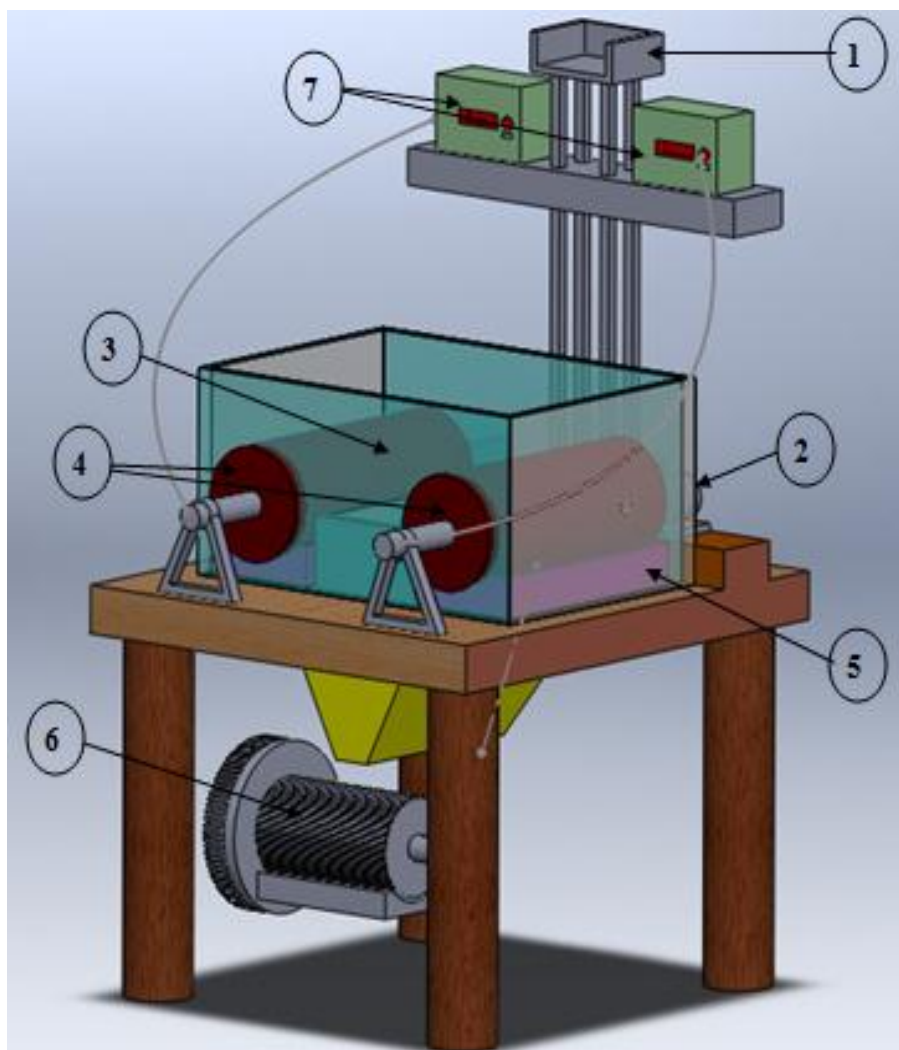


Figure III.2. Représentation schématique du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes ; 1 : Vibro-transporteur ; 2 : Moteur CC ; 3 : Chambre de séparation ; 4 : Electrodes cylindriques tournantes ; 5 : Bacs collecteurs ; 6 : Soufflante ; 7 : Alimentations haute tension CC.

Le nouveau séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques rotatives [112-116] est présenté sur les figures III.2 et III.3. Il a été conçu par les membres du groupe électrostatique, laboratoire IRECOM, Université de Sidi Bel-Abbés. Il est capable de trier les matériaux granulaires ou poudreux par l'utilisation de l'effet triboélectrique comme mécanisme physique de charge électrique. Jusqu'à 600 g de matières poudreuses peuvent être introduits dans le lit fluidisé généré à l'intérieur de la chambre de séparation de dimensions $230 \times 80 \times 70 \text{ mm}^3$, en parois transparentes de PMMA. L'air de fluidisation est fourni à

vitesse variable par une soufflante de 1,1 kW. Le lit fluidisé a une hauteur maximale de 80 mm au-dessus de la plaque poreuse qui distribue uniformément l'air dans la chambre de séparation.

La triboélectrisation des matériaux à l'intérieur du lit fluidisé est dû aux multiples collisions particules-particules et particules-paroi. Le champ électrique est généré entre deux électrodes-cylindriques (acier inoxydable, diamètre : 160 mm ; largeur : 300 mm), dont les génératrices les plus proches sont distantes de 80 mm et qui sont localisées dans la chambre de séparation. Les cylindres sont connectés à deux alimentations haute tension de polarités opposées, et entraînés à vitesse variable par des moteurs électriques. Les produits séparés sont récupérés dans les deux bacs collecteurs placés de part et d'autre de la chambre de séparation.

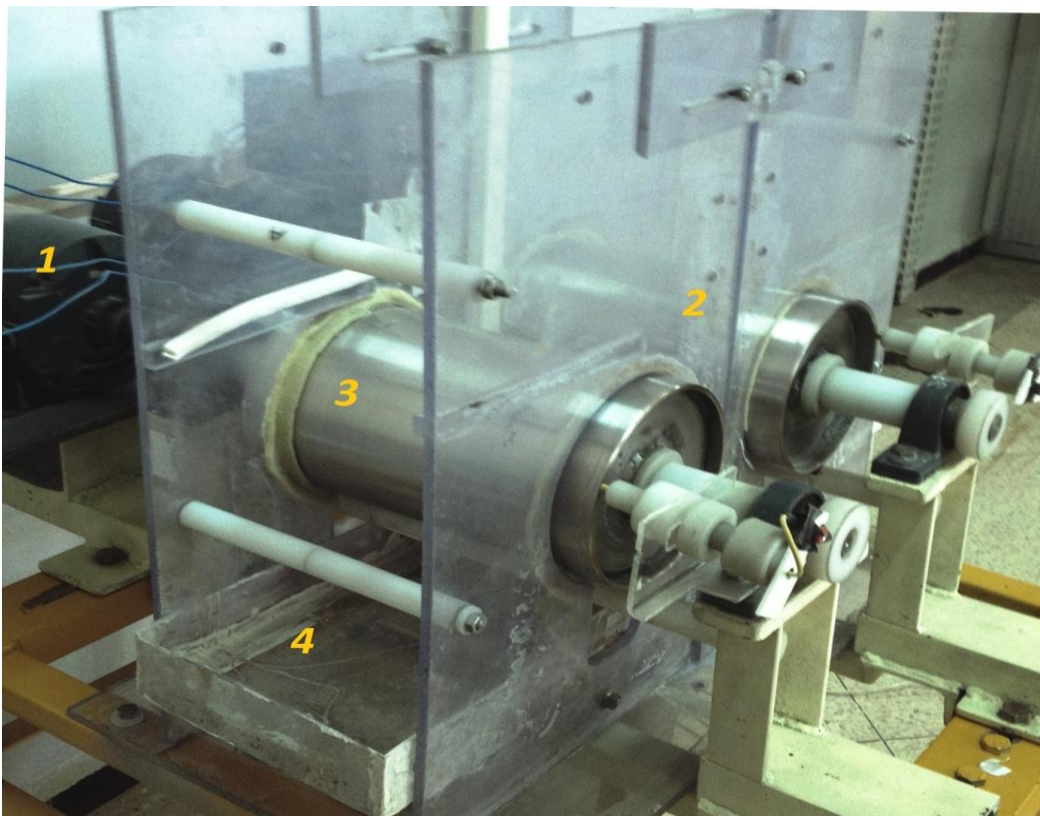


Figure III.3. Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes tournantes ; 1 : Moteur CC ; 2 : Chambre de séparation ; 3 : Electrodes cylindriques tournantes ; 4 : Bacs collecteurs.

III.1.3 Méthodologie expérimentale

Pour chaque expérience, un échantillon de 600 g contenant 50% de PVC et 50% uPVC est utilisé. Après chaque expérience, la masse du produit récupéré dans chaque boîte du collecteur est mesurée à l'aide d'une balance électronique (résolution : 0,1 g). Pour chaque essai, les expériences sont répétées deux fois, et la valeur moyenne est indiquée sur le graphe.

Le processus est multifactoriel, et l'analyse expérimentale est effectuée en tenant compte de tous les facteurs présents: le niveau de la haute tension U [kV], la vitesse de l'air de fluidisation v [m/s], la vitesse de rotation des électrodes cylindriques n [tr/min], la masse du mélange à séparer m [g], et le temps de séparation t [s].

La méthodologie des plans d'expériences permet la modélisation du processus de séparation, en mettant en œuvre un nombre minimum d'expériences. Dans ce chapitre on va utiliser un plan d'expériences complet (modèle premier degré). En utilisant ce plan, la réponse y du processus est exprimé comme un polynôme de premier degré des variables d'entrée x_1 , x_2 , x_3 , les coefficients a_i , et a_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$, étant calculés à partir des résultats des expériences [117].

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 \quad (\text{III.1})$$

Si l'hypothèse de la linéarité du modèle est rejetée, il va falloir utiliser un plan d'expériences composite (modèle de deuxième degré). En utilisant ce plan, la réponse y du processus est exprimée comme un polynôme de deuxième degré des variables d'entrée x_1 , x_2 , x_3 , les coefficients a_i , et a_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$, étant calculés à partir des résultats des expériences.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 \quad (\text{III.2})$$

Plusieurs expériences ont été réalisées en premier lieu pour identifier le domaine de variation des quatre facteurs mentionnés plus haut. Trois de ces facteurs seront ensuite pris en compte dans le modèle : le niveau de la haute tension U [kV], la vitesse de l'air de fluidisation v [m/s], et la masse du mélange à séparer m [g]. La vitesse de rotation des électrodes cylindriques n [tr/min] s'est avérée ne pas avoir un effet significatif sur la séparation.

Les réponses du processus sont définies comme suit :

$$M_k[\%] = \left[\frac{(\text{masse du produit collecté dans le bac } k)}{(\text{masse totale du produit } k)} \right] \times 100 \quad (\text{III.3})$$

Qui est désignée comme la masse relative du produit k , avec $k = 1$ pour le PVC blanc (uPVC), et $k = 2$ pour le PVC gris (PVC). La troisième réponse du processus est :

$$Rst[\%] = \left[\frac{(\text{masse du produit non collecté})}{(\text{masse totale du produit})} \right] \times 100 \quad (\text{III.4})$$

L'objectif est de maximiser les masses relatives M_k des produits collectés, et de minimiser la masse de produit non séparé qui reste dans la chambre de fluidisation Rst .

Toutes les expériences sont réalisées dans des conditions climatiques relativement stables : $RH = 50-60 \%$, $T = 17-20 \text{ }^\circ\text{C}$.

III.2 MODELISATION EXPERIMENTALE

III.2.1 Etude préliminaire

L'objectif de cette étude est de définir l'intervalle d'étude de chaque facteur, et d'éliminer les facteurs non-significatifs. Pour cela, des expériences à un « un-facteur-à-la-fois » ont été effectuées.

- Varier le niveau de la haute tension entre 4 kV et 36 kV par pas de 4 kV, pour $v = 9$ m/s, $n = 60$ tr/min, $m = 600$ g, et $t = 25$ s.
- Varier la vitesse de l'air de fluidisation entre 9 m/s et 19 m/s par pas de 2 m/s, pour $U = 28$ kV, $n = 60$ tr/min, $m = 600$ g, et $t = 25$ s.
- Varier la vitesse de rotation des électrodes cylindriques entre 40 tr/min et 140 tr/min par pas de 20 tr/min, pour $U = 28$ kV, $v = 9$ m/s, $m = 600$ g, et $t = 25$ s.
- Varier la masse du mélange à séparer entre 600 g et 1400 g par pas de 200 g, pour $U = 28$ kV, $v = 9$ m/s, $n = 60$ tr/min.

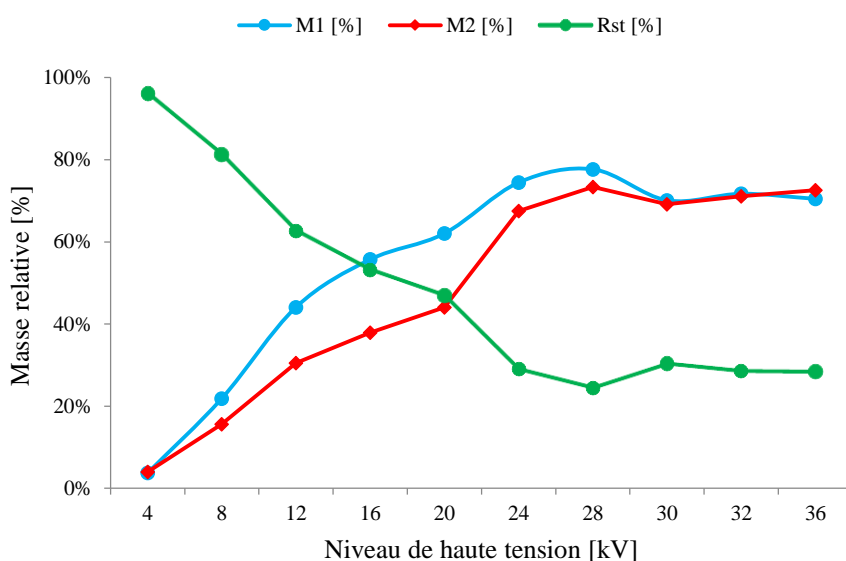


Figure III.4. Variation de la masse relative de uPVC (blanc), de PVC (gris), et de reste (Rst) en fonction du niveau de la haute tension.

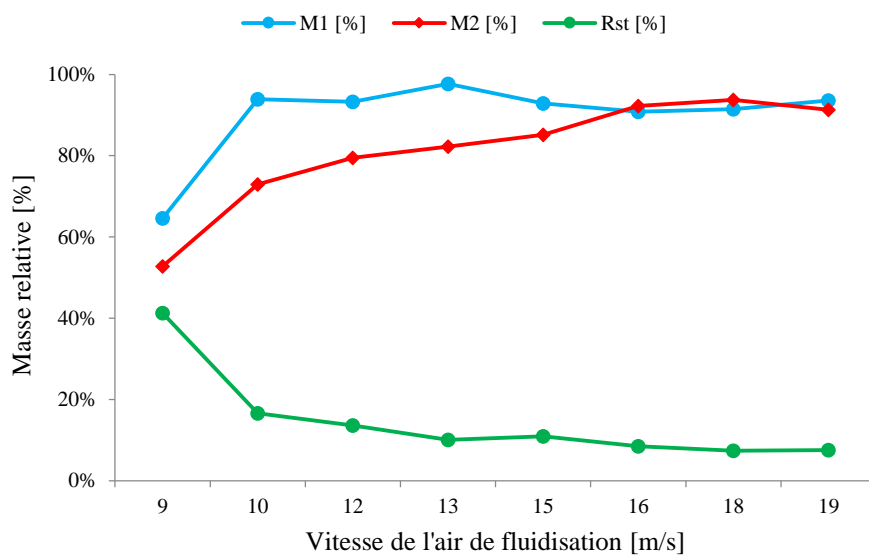


Figure III.5. Variation de la masse relative de uPVC (blanc), de PVC (gris), et de reste (Rst) en fonction de la vitesse de l'air de fluidisation.

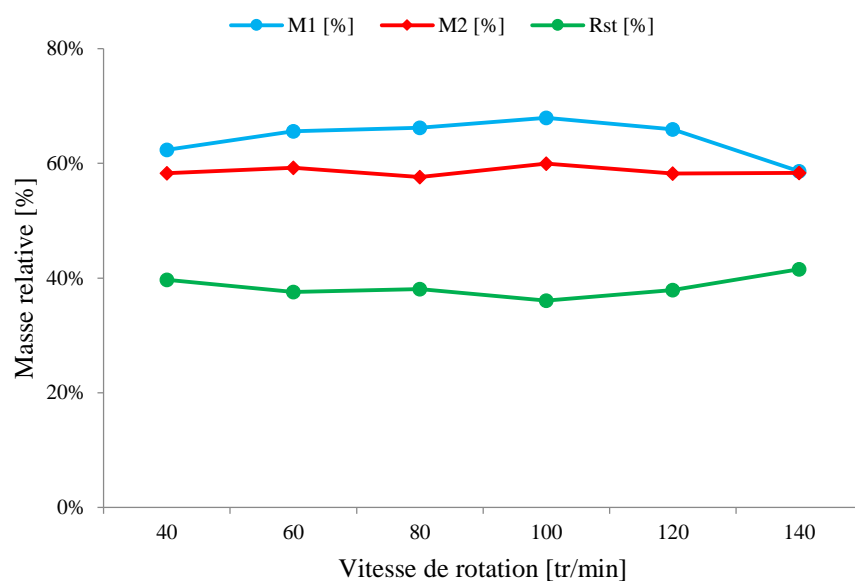


Figure III.6. Variation de la masse relative de uPVC (blanc), de PVC (gris), et de reste (Rst) en fonction de la vitesse de rotation des électrodes.

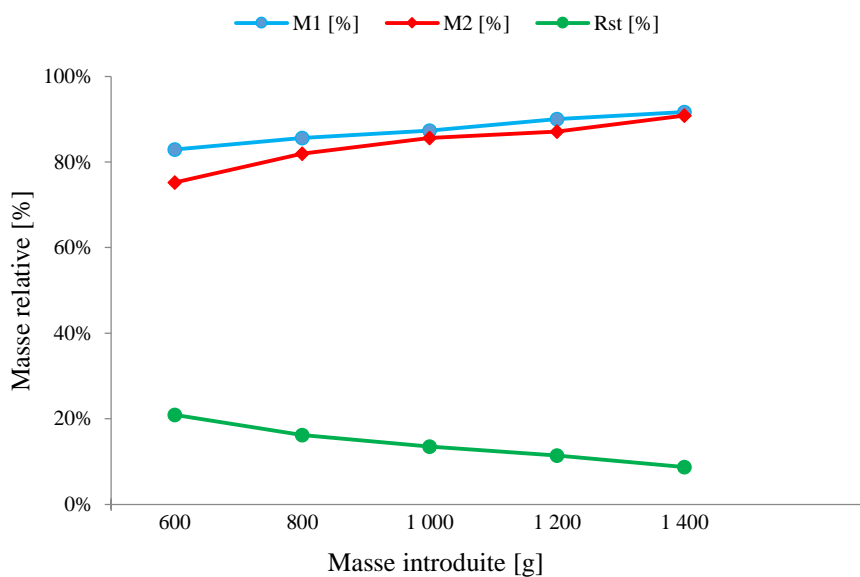


Figure III.7. Variation de la masse relative de uPVC (blanc), de PVC (gris), et de reste (Rst) en fonction de la masse du produit à séparer.

Le niveau de la haute tension U a un effet significatif sur les masses relatives M_k des produits collectés. L'augmentation de la tension U augmente les forces du champ électrique agissant sur les particules, et influe fortement sur les masses relatives M_k . Toutefois, pour $U >$

28 kV, les réponses deviennent constantes (voir Figure III.4). Cette observation suggère les limites suivantes pour la variation de la tension appliquée : $U_{min} = 20$ kV and $U_{max} = 30$ kV.

L'augmentation de la vitesse de l'air de fluidisation v améliore les niveaux de charge des particules et a un effet positif sur les masses relatives des produits collectés M_k (voir Figure III.5). Au-delà de $v = 16$ m/s, les réponses sont devenues constantes. Sur la base de cette expérience, $v_{min} = 10$ m/s et $v_{max} = 16$ m/s.

La vitesse de rotation des électrodes n n'a pratiquement aucun effet sur les masses relatives M_k (voir figure III.6). Par conséquent, ce facteur n'a pas été pris en compte dans la modélisation du processus.

La masse du mélange à séparer m influence les niveaux de charge des particules dans le lit fluidisé et a un léger effet positif sur les masses relatives des produits collectés M_k (voir Figure III.7). Sur la base des résultats de ces expériences, le domaine de variation de ce facteur a été choisi comme suit : $m_{min} = 800$ g et $m_{max} = 1400$ g.

III.2.2 Evaluation de la signification des facteurs

Après une première étude des différents facteurs qui ont une influence sur les critères de performance du séparateur tribo-aéro électrostatique à deux électrodes cylindriques, nous allons maintenant essayer d'établir une relation entre les grandeurs d'entrée (niveau de haute tension U ; vitesse de l'air de fluidisation v ; et masse du produit à séparer m) et les grandeurs de sortie (les masses relatives M_k et le reste Rst), pour cela nous proposons en premier lieu le plan factoriel complet, nous allons évaluer la signification de effets et la validité du modèle linéaire. Si celui-ci n'est pas valide, nous passerons par la suite à un plan composite à faces centrées, qui offre une modélisation par des surfaces de réponse (RSM), utilisant un modèle quadratique.

A) PLAN D'EXPERIENCE COMPLET ET MODELE DE PREMIER DEGRE

Tableau. III.1. Résultats du plan d'expériences complet (modèle 1^{er} degrés).

Expérience	Facteurs			Réponses		
	U	v	m	M_1	M_2	R_{st}
	[kV]	[m/s]	[g]	[%]	[%]	[%]
1	20	10	800	86,07	85,41	14,26
2	30	10	800	96,5	88,9	7,3
3	20	16	800	96,89	88,56	7,28
4	30	16	800	107,37	79,65	6,49
5	20	10	140	87,15	83,73	14,56
6	30	10	140	92,17	90,15	8,84
7	20	16	140	94,03	92,97	6,5
8	30	16	140	98,41	86,46	7,57
9	25	13	110	95,31	93,71	5,49
10	25	13	110	94,82	92,92	6,13
11	25	13	110	95,2	93,3	5,75

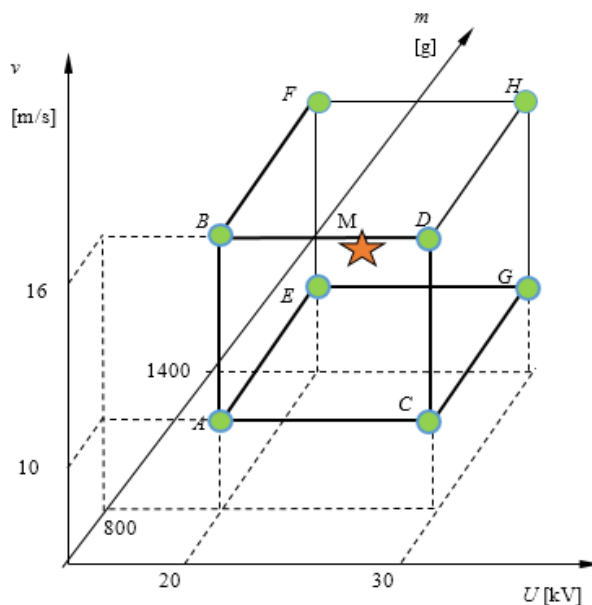


Figure III.8 Diagramme d'un plan factoriel des essais réalisés.

Pour ce plan, le nombre des niveaux de chaque facteur est restreint à deux, en ajoutant 3 répétitions pour le point central (figure III.8). Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation.

Le nombre d'expérience à réaliser est de 8 aux niveaux supérieurs et inférieurs des facteurs, et 3 essais au point central (tableau III.1).

La matrice d'expériences des effets pour la masse relative du produit uPVC de couleur blanche M_l est décrite dans le tableau III.2.

Tableau. III.2. Matrice d'expériences du plan factoriel complet pour la masse relative d'uPVC.

Essais à réaliser								
N° Essai	A	U	v	m	$U*v$	$U*m$	$v*m$	M_l [%]
1 (A)	1	-1	-1	-1	1	1	1	86,07
2 (B)	1	1	-1	-1	-1	-1	1	96,5
3 (C)	1	-1	1	-1	-1	1	-1	96,89
4 (D)	1	1	1	-1	1	-1	-1	107,37
5 (E)	1	-1	-1	1	1	-1	-1	87,15
6 (F)	1	1	-1	1	-1	1	-1	92,17
7 (G)	1	-1	1	1	-1	-1	1	94,03
8 (H)	1	1	1	1	1	1	1	98,41
9 (M)	1	0	0	0	0	0	0	95,31
10 (M)	1	0	0	0	0	0	0	94,82
11 (M)	1	0	0	0	0	0	0	95,2
Domaine d'étude								
	Haute tension appliquée U		Vitesse de l'air v		Masse à séparer m			
Niveau -1	20 kV		10 m/s		800 g			
Niveau +1	30 kV		16 m/s		1400 g			

Nous avons procédé à l'estimation des erreurs et des effets significatifs sur les quatre réponses obtenues après séparation. Un effet sera significatif au risque de 5% avec $v=N(r-1)=1(3-1)=2$ $t_{crit}(0.05 ;2)=4.303$ (voir l'annexe), si son test statistique « t_i » est supérieur à $t_{crit} = 4.303$. Nous obtenons le tableau III.3 pour la masse relative M_1 , où:

N : est le nombre de lignes de la matrice du plan d'expérience.

r : est le nombre de répétitions.

Tableau. III.3. Analyse de chaque effet du modèle pour la masse relative M_1 d'uPVC blanc.

Variables	Effets	t_i	Résultats
Constante	94,902		
U	3,788	41,289	Significatif
v	4,351	47,419	Significatif
m	-1,884	20,528	Significatif
$U*v$	-0,0737	0,8037	Non significatif
$U*m$	-1,439	15,679	Significatif
$v*m$	-1,071	11,674	Significatif

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

Tableau. III.4. Analyse de la variance pour la masse relative M_1 d'uPVC blanc.

Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré Moyen	F (obs)
Liaison	320,476	6	53,413	576,673
Résidus	0,370	4	0,093	
Total	320,847	10	32,085	

La table de *Fisher-Snédecor* (voir l'annexe) donne pour $v_1=6$ et $v_2=4$, F (crit)=6.163, pour un risque de 5%. On a : $(F_{obs}=576.673) > (F_{crit}=16.16)$ donc l'hypothèse de linéarité du modèle est acceptable.

En effectuant le même calcul pour les autres réponses (masse relative de PVC gris M_2 , le taux du produit non-séparer Rst), on trouve les tableaux III-5 et III-6.

Tableau. III.5. Analyse de chaque effet du modèle pour la masse relative M_2 de PVC gris.

Variables	Effets	t_i	Résultats
Constante	88,705		
U	-0,689	0,488	Non significatif
v	-0,0687	0,049	Non significatif
m	1,349	0,955	Non significatif
$U*v$	-3,166	2,241	Non significatif
$U*m$	0,666	0,472	Non significatif
$v*m$	1,456	1,031	Non significatif

Tableau. III.6. Analyse de la variance pour la masse relative M_2 de PVC gris.

Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré Moyen	F (obs)
Liaison	119,103	6	19,851	0,904
Résidus	87,805	4	21,951	
Total	206,908	10	20,691	

Tableau. III.7. Analyse de chaque effet du modèle pour le taux du produit non-séparer R_{st} .

Variables	Effets	t_i	Résultats
Constante	8,20		
U	-1,55	2,09	Non significatif
v	-2,14	2,89	Non significatif
m	0,27	0,36	Non significatif
$U*v$	1,62	2,19	Non significatif
$U*m$	0,39	0,52	Non significatif
$v*m$	-0,19	0,26	Non significatif

Tableau. III.8. Analyse de la variance pour le taux du produit non-séparer R_{st} .

Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F (obs)
Liaison	78,922	6	13,154	2,178
Résidus	24,159	4	6,04	
Total	103,082	10	10,308	

On a dans les deux cas de réponse (M_2 et R_{st}) : $F_{obs} < F_{crit} = 6.16$, l'hypothèse de linéarité des deux modèles est donc rejetée.

La conclusion de cette étude est que l'on doit rejeter les deux modèles linéaires pour exprimer la masse relative de produit PVC (M_2) et le taux du produit non-séparer (R_{st}). Il faudrait refaire l'étude en utilisant un modèle polynomial du second degré, et par conséquent un autre plan d'expérience appelé plan composite.

B) PLAN D'EXPERIENCES COMPOSITE ET MODELE DE DEUXIEME DEGRE

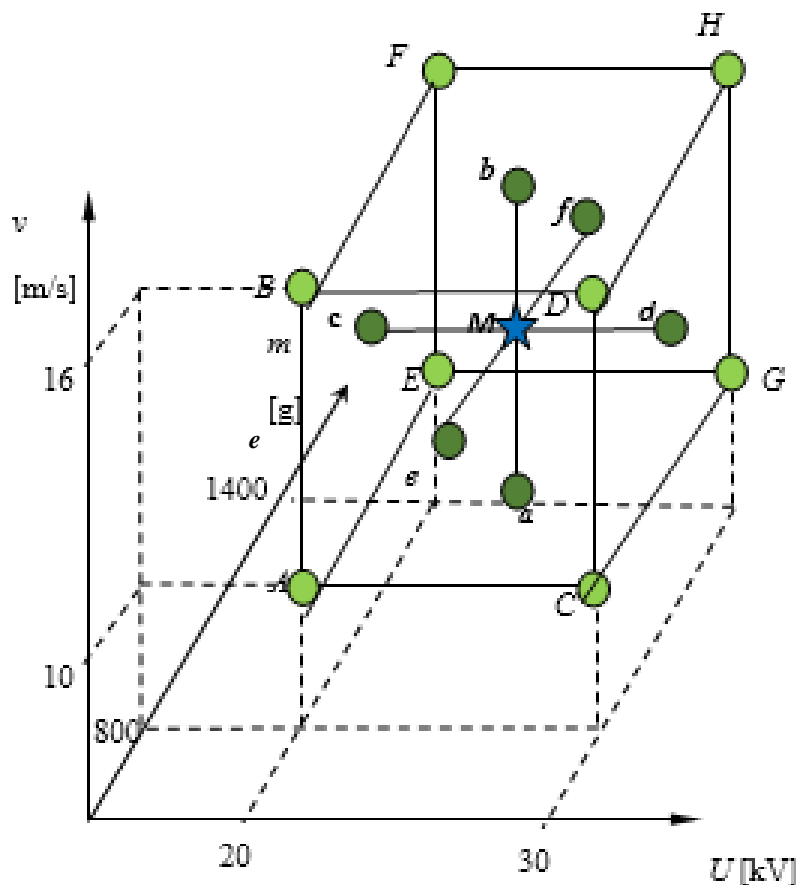


Figure III.9 Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite.

L'intérêt des plans composites réside dans le fait qu'ils prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont inexplicables par un modèle du premier degré. Il suffit d'effectuer les expériences qui correspondent aux points en étoile, situés au centre de chacune des 6 faces, et de faire les calculs sur l'ensemble des expériences. Dans ce plan on doit faire 17 expériences composites données sur la figure III.9

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

Un effet sera significatif au risque de 5% avec $v=N(r-1)=1(3-1)=2$, $t_{crit}(0.05 ; 2)=4.303$ (voir l'annexe), si son test statistique « t_i » est supérieur à 4.303. On obtient les tableaux III.10 à III.12.

Tableau. III.9. Résultats du plan d'expériences composite (modèle 2^{er} degrés).

Expérience	Facteurs			Réponses		
	U	v	m	M_1	M_2	Rst
	[kV]	[m/s]	[g]	[%]	[%]	[%]
1	20	10	800	86,07	85,41	14,26
2	30	10	800	96,5	88,9	7,3
3	20	16	800	96,89	88,56	7,28
4	30	16	800	107,37	79,65	6,49
5	20	10	1400	87,15	83,73	14,56
6	30	10	1400	92,17	90,15	8,84
7	20	16	1400	94,03	92,97	6,5
8	30	16	1400	98,41	86,46	7,57
9	20	13	1100	92,59	89,87	8,77
10	30	13	1100	99,92	87,09	6,5
11	25	10	1100	91,34	90,59	9,03
12	25	16	1100	100,51	89,67	4,91
13	25	13	800	94,31	91,2	7,25
14	25	13	1400	90,31	95,16	7,76
15	25	13	1100	95,31	93,71	5,49
16	25	13	1100	94,82	92,92	6,13
17	25	13	1100	95,2	93,3	5,75

Tableau. III.10. Analyse de chaque effet du modèle pour la masse relative M_1 d'uPVC blanc.

Variables	Effets	t_i	Résultats
Constante	94,985		
U	3,764	62,696	Significatif
v	4,398	73,256	Significatif
m	-1,907	31,764	Significatif
U^2	1,3634	22,709	Significatif
v^2	1,0334	17,213	Significatif
m^2	-2,5816	43,001	Significatif
$U*v$	-0,074	1,228	Non significatif
$U*m$	-1,439	23,965	Significatif
$v*m$	-1,071	17,843	Significatif

Tableau. III.11. Analyse de chaque effet du modèle pour la masse relative M_2 de PVC gris.

Variables	Effets	t_i	Résultats
Constante	92,902		
U	-0,829	5,118	Significatif
v	-0,147	0,907	Non significatif
m	1,475	9,106	Significatif
U^2	-4,117	25,414	Significatif
v^2	-2,467	15,228	Significatif
m^2	0,583	3,601	Non significatif
$U*v$	-3,166	19,546	Significatif
$U*m$	0,666	4,113	Non significatif
$v*m$	1,456	8,990	Significatif

Tableau. III.12. Analyse de chaque effet du modèle pour le taux du produit non-séparer Rst.

Variables	Effets	t_i	Résultats
Constante	6,112		
U	-1,467	14,415	Significatif
v	-2,124	20,870	Significatif
m	0,265	2,6039	Non significatif
U^2	1,281	12,588	Significatif
v^2	0,616	6,0533	Significatif
m^2	1,151	11,310	Significatif
$U*v$	1,620	15,918	Significatif
$U*m$	0,388	3,808	Non significatif
$v*m$	-0,193	1,891	Non significatif

Et pour l'analyse de la variance, on obtient les tableaux III.13 à III. 15

Tableau. III.13. Analyse de la variance pour la masse relative M_1 d'uPVC blanc.

Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F (obs)
Liaison	416,507	9	46,279	755,282
Résidus	0,429	7	0,061	
Total	416,936	16	26,058	

Tableau. III.14. Analyse de la variance pour la masse relative M_2 de PVC gris.

Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré Moyen	F (obs)
Liaison	252,543	9	28,060	62,906
Résidus	3,122	7	0,446	
Total	255,666	16	15,979	

Tableau. III.15. Analyse de la variance pour le taux du produit non-séparer Rst .

Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré Moyen	F (obs)
Liaison	116,197	9	12,911	73,325
Résidus	1,233	7	0,176	
Total	117,429	16	7,339	

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

Nous avons dans les trois réponses : $F_{obs} > (F_{crit}=3.68)$, l'hypothèse H_1 de linéarité du modèle est donc retenu.

Nous avons éliminé les effets non significatifs, on obtient ainsi, les modèles mathématiques suivants :

$$M_1 = 95 + 3.76U^* + 4.4v^* - 1.91m^* + 1.36U^{*2} + 1.03v^{*2} - 2.58m^{*2} - 1.44U^*m^* - 1.07v^*m^* \quad (III.5)$$

Avec : $R^2 = 99,9 \%$; $Q^2 = 99,25 \%$.

$$M_2 = 92.9 - 0.83U^* + 1.47m^* - 4.11U^{*2} - 2.47v^{*2} - 3.17U^*v^* + 1.46v^*m^* \quad (III.6)$$

Avec : $R^2 = 98,78 \%$; $Q^2 = 92,51 \%$.

$$Rst = 6.11 - 1.47U^* - 2.12v^* + 1.28U^{*2} + 0.62v^{*2} + 1.15m^{*2} + 1.62U^*v^* \quad (\text{III.7})$$

Avec : $R^2 = 98,95 \%$; $Q^2 = 94,52 \%$.

On note aussi que U^* , v^* , m^* sont les valeurs centrés normalisés des facteurs U , v , m respectivement.

III.2.3 Optimisation

Les réponses M_1 , M_2 et Rst prédites par MODDE 5.0 (Umetrics, Suède) [118] sont représentés sur les figures. III.10 et III.11 qui illustrent l'influence de chaque facteur (U , v , et m) sur les résultats du processus. De manière assez surprenante, les effets de ces facteurs semblent être différents sur les deux sortes de matières plastiques. Ceci peut être expliqué par le fait que le PVC de couleur grise se charge mieux que le uPVC de couleur blanche en contact avec les parois de PMMA de la chambre de fluidisation. Ainsi, les particules de PVC de couleur grise bien chargées sont beaucoup plus facilement déviées par le champ électrique que les particules de uPVC de couleur blanche. L'augmentation de la tension appliquée U engendrerait des impacts plus forts des particules de PVC (gris) avec les électrodes ; elles sont alors déviées dans le compartiment de uPVC (blanc). , Ceci explique pourquoi M_1 dépasse les 100% dans ce cas ; mais la pureté du produit est inférieure à 95%. Afin d'éviter cette situation, il est préférable d'opérer à faible U (pour réduire le champ électrique) et faible v (pour réduire la charge).

Cependant, selon la simulation prédite par le logiciel MODDE 5.0, la meilleure séparation est obtenue pour les valeurs suivantes des variables de contrôle : $U = 23.4$ kV, $v = 16$ m/s et $m = 1380$ g. Les réponses prévues pour ces conditions de fonctionnement sont $M_1 = 94,78 \%$, $M_2 = 94,18 \%$, $Rst = 5,63 \%$, en bon accord avec les valeurs expérimentales : $M_1 = 94,66 \%$, $M_2 = 93.71 \%$, $Rst = 5,82 \%$.

Cette petite différence entre les masses prédites et les masses mesurées des produits récupérés confirme l'excellente qualité du modèle mathématique établi par la méthode des plans d'expériences pour le séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes cylindriques.

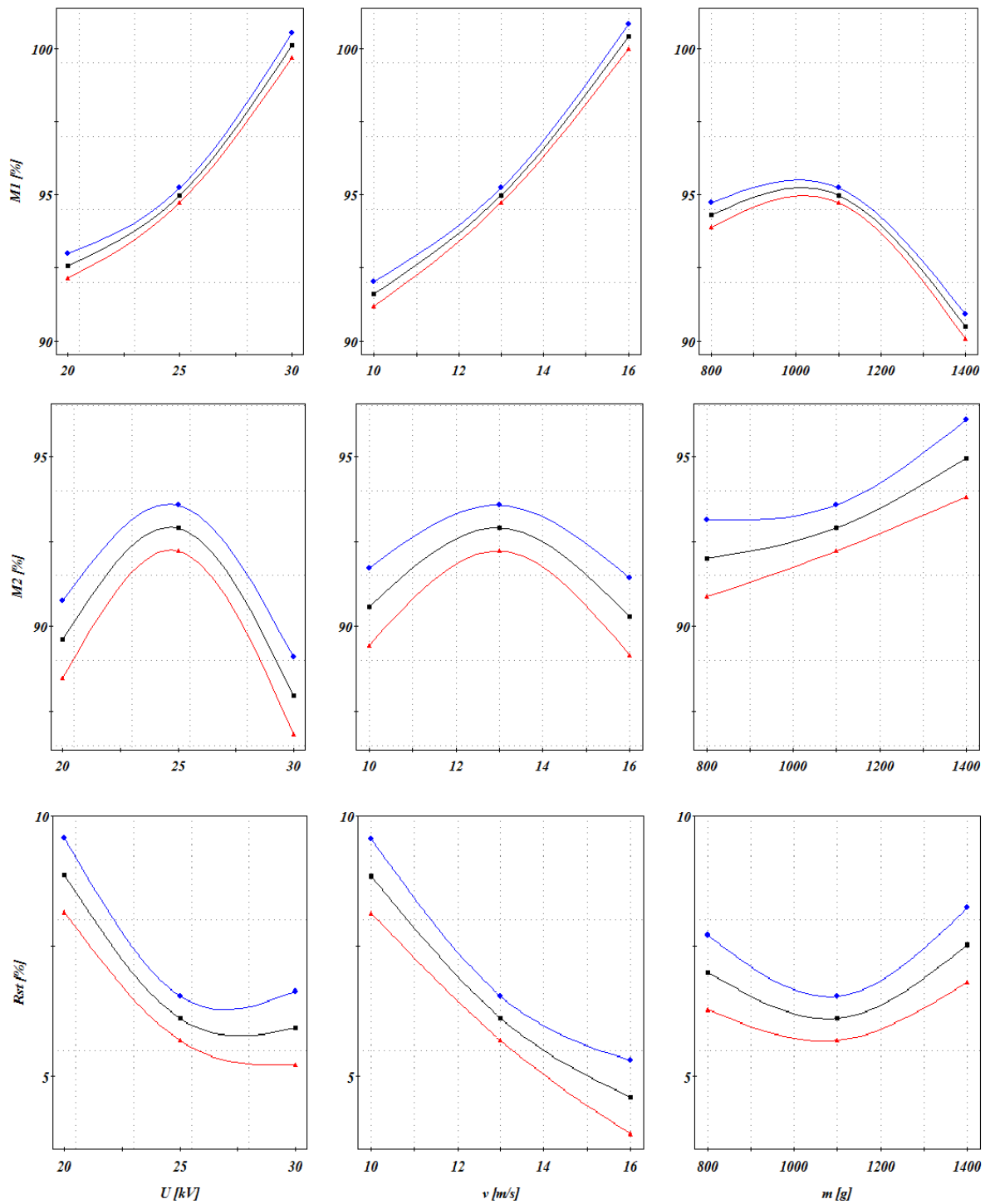


Figure III.10 MODDE 5.0 - Les réponses prédites en fonction de variables de commande U, V, m.

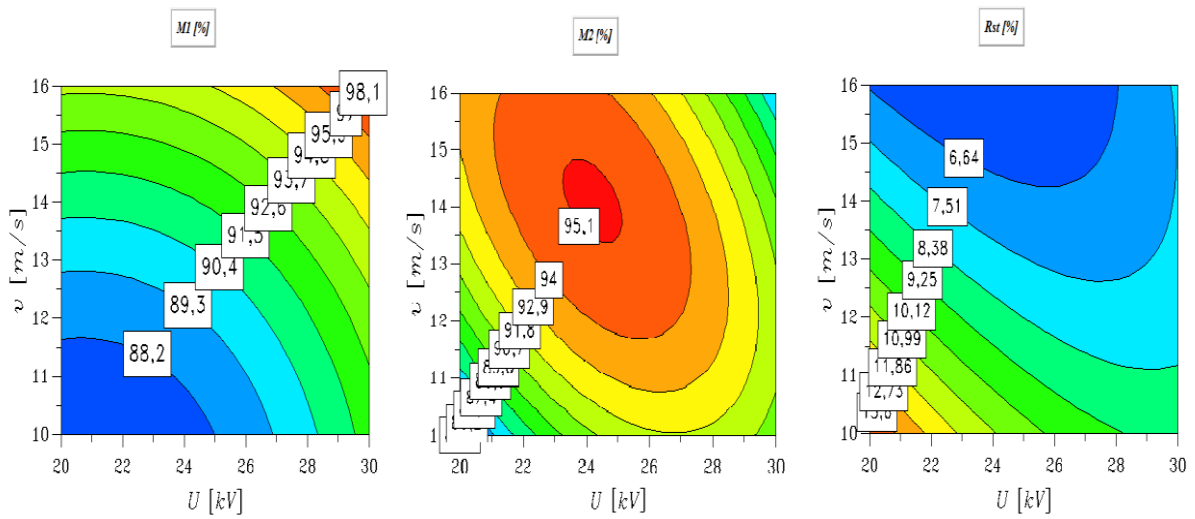


Figure III.11 Contour des réponses de processus prédites par le logiciel MODDE 5.0.

III.3 CONCLUSIONS :

Le nouveau séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes, présenté dans ce chapitre a prouvé son efficacité dans la séparation de mélanges poudreux des déchets de plastiques.

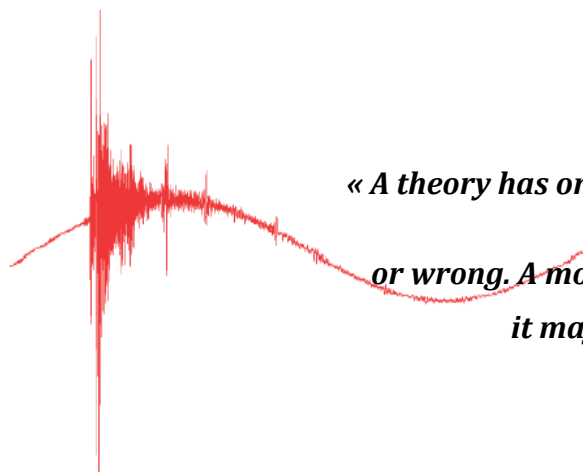
Le processus est multifactoriel ; il dépend de la tension U (kV) appliquée aux électrodes, de la vitesse v (m/s) de la soufflante de l'air de fluidisation et de la masse m (g) du mélange poudreux introduit dans la chambre de séparation.

La méthodologie des plans d'expériences permet la modélisation mathématique du processus de séparation et la prédiction de ses réponses pour toutes les valeurs des facteurs de contrôle. Il est ainsi possible de trouver un ensemble de valeurs qui optimisent le fonctionnement de la machine.

Les résultats obtenus sont satisfaisants et incitent l'étude du chargement et de la séparation tribo-aéro-électrostatique de particules plastique poudreuses.

CHAPITRE IV

SEPARATEUR TRIBO-AERO- ELECTROSTATIQUE A DEUX ELECTRODES-DISQUES TOURNANTES



*« A theory has only the alternative of being
right
or wrong. A model has a third possibility:
it may be right, but irrelevant »*

Le but de cette partie est d'évaluer les effets de plusieurs facteurs qui influent sur le tri sélectif des particules fines dans un séparateur à deux électrodes-disques tournantes de type tribo-aéro-électrostatique. Les expériences sont effectuées sur un mélange synthétique composé de 50% d'Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et 50% de Polystyrène (PS) de différentes tailles. Les cinq facteurs à l'étude sont la haute tension, la vitesse de rotation des disques, la durée pré charge du mélange, le débit d'air de fluidisation et la masse initiale du mélange granulaire à traiter. La performance du séparateur est évaluée par la mise en place d'un système de mesure permettant l'enregistrement en continu et simultanée des charges et des masses des produits séparés. Les conclusions de cette étude serviront à la conception optimale d'un séparateur électrostatique industriel pour le recyclage des plastiques poudreux à partir de déchets d'équipements électriques et électroniques.

IV.1 MATERIEL ET METHODE

IV.1.1 Matériaux

Le mélange de matériaux pulvérulent utilisé dans la présente étude comprend deux types de polymères, l'Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) de couleur marron et le Polystyrène (PS) de couleur blanche, fournis par la société APR2, France, spécialisée dans le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). La taille de ses particules est typiquement comprise entre 250 μm et 2000 μm que nous avons divisé en 3 classes de tailles: #1: $x > 1000 \mu\text{m}$; #2: $500 \mu\text{m} < x < 1000 \mu\text{m}$; #3: $250 \mu\text{m} < x < 500 \mu\text{m}$, où x est le diamètre moyen de la particule (figure IV.1).

Les différences dans les propriétés de charge triboélectrique des deux matériaux, feront l'acquisition des charges de signes opposés en entrant en collision les uns avec les autres dans le lit fluidisé.

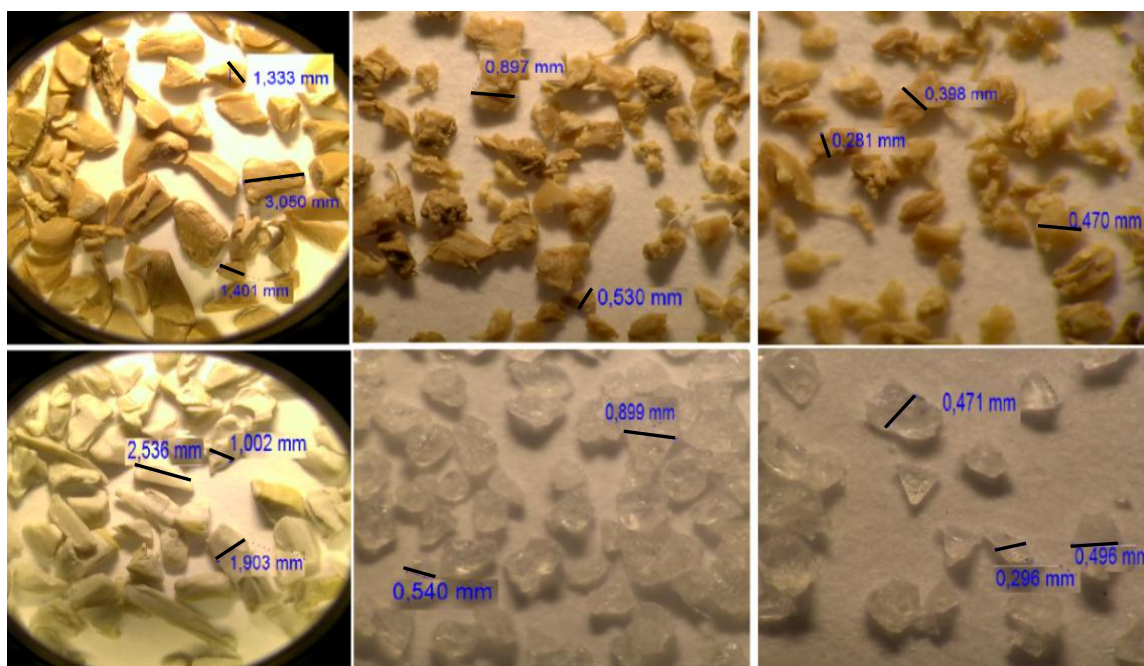


Figure IV.1. Photographie microscopique des produits ABS et PS utilisés dans l'étude : (a) : ABS > 1000 μm ; (b) : 500 μm < ABS < 1000 μm ; (c) : 250 μm < ABS < 500 μm ; (d) : PS > 1000 μm ; (e) : 500 μm < PS < 1000 μm ; (f) : 250 μm < PS < 500 μm .

A) CARACTERISTIQUES DE L'ABS

L'acrylonitrile butadiène styrène ou ABS (figure IV.2) est un polymère thermoplastique présentant une bonne tenue aux chocs, relativement rigide, léger et pouvant être moulé. Il appartient à la famille des polymères styréniques.

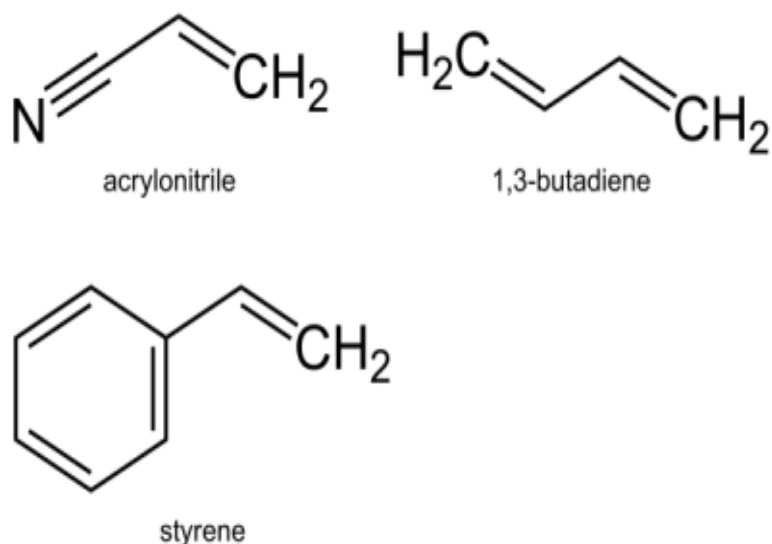


Figure IV.2. Formules chimiques des monomères de l'ABS.

Les applications types de l'ABS sont les suivantes :

- Grand public : jouets, biens de consommation, téléphones, casques de sécurité.
- Automobile : panneaux intérieurs de portière, montants, garnitures de sièges, grilles, tableaux de bord, boîtiers de rétroviseurs.
- Electroménager : habillages d'appareils de cuisine, boîtiers d'aspirateurs, panneaux de commande de produits blancs.
- Extrusion : feuilles, receveurs de douche, toits de tracteurs, chants de meubles, revêtements de réfrigérateurs, bagagerie.

B) CARACTERISTIQUES DU PS

Le Polystyrène ou PS (figure IV.3) est, avec le polyéthylène, l'un des plastiques industriels les plus courants dans la vie quotidienne. Ce matériau aux multiples applications est notamment utilisé sous forme expansée pour l'emballage et l'isolation. Ce matériau est surtout connu du grand public sous sa forme expansée (parfois appelée "frigolite"), qui sert à emballer les appareils électroménagers ou HI-FI sensibles aux chocs. Cependant, il peut aussi se présenter sous la forme d'un Plastique transparent et dur utilisé pour les boîtes et boîtiers.

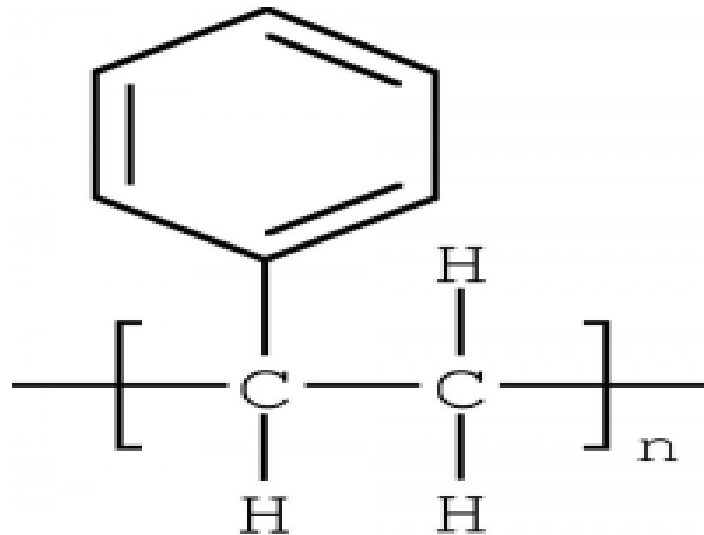


Figure IV.3. Formule chimique du PS.

Les principales utilisations du PS dans la vie courante sont :

- Les boîtiers de CD en PS cristal.
- Les couverts et verres en Plastique en PS choc.

- Les emballages alimentaires (comme les pots de yaourt).
- Les emballages des appareils fragiles en PSE.
- L'isolation thermique des bâtiments sous forme expansée ou extrudée.

IV.1.2 Installation expérimentale

Le nouveau séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques tournantes [119-121] (Figure IV.4), destiné premièrement au traitement des mélanges de matériaux isolants de taille sous-millimétrique, a été conçu par l'équipe de l'électrostatique appliquée à l'Institut Pprime, Univ de Poitiers-France-, qui a aussi piloté sa fabrication par la société CITF, Saint Cybardeaux, France.

Le mélange pulvérulent est introduit dans la chambre de fluidisation qui sert aussi de chambre de séparation. Celle-ci a les dimensions suivantes : 160 mm ×160 mm ×240 mm ; ses parois sont réalisées en PMMA transparent. L'injection de l'air à vitesse variable est assurée par une soufflante de 1.5 kW/ 4000 tr.min⁻¹ / 166 m³.h⁻¹. Le triboélectrisation des matériaux à l'intérieur du lit fluidisé est dû aux multiples collisions particules-particules et particules-parois.

Le champ électrique est généré entre deux disques en acier inoxydable (diamètre : 220 mm ; épaisseur : 2 mm) qui sont éloignés de 120 mm et situés dans la chambre de séparation. Ces électrodes-disques sont alimentées par deux alimentations haute tension continue de polarités opposées, leur entraînement à vitesses variables étant réalisé par deux moteurs à courant continu.

La récupération des particules sur les électrodes est assurée par des racleurs qui viennent lécher les particules sur les surfaces des disques (Figure IV.5). Les produits séparés sont récupérés dans deux bacs collecteurs sous formes de cages de Faraday connectées à deux multimètres (KEITHLEY, modèle 6514), et posées sur deux balances électroniques d'une résolution de 0.1 g et de portée maximale 2 kg. Le multimètre et les deux balances sont connectés à un PC par GPIB et RS232. Les charges et les masses mesurées par ses instruments sont enregistrées en utilisant un programme d'acquisition de données piloté par LabView.

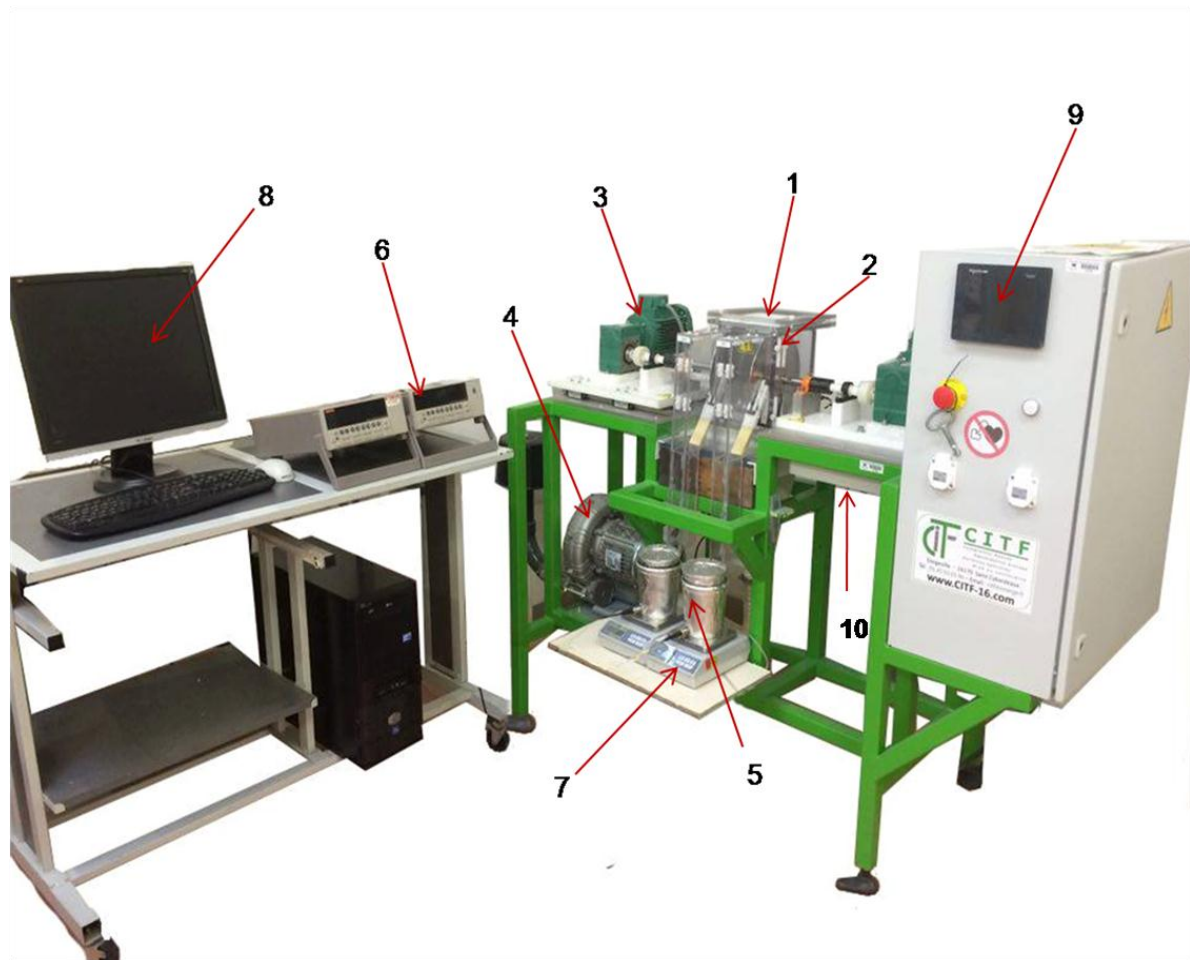


Figure IV.4. Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques ;
1 : Chambre de séparation ; 2 : Disques métallique ; 3 : Moteur CC ; 4 : Soufflante ; 5 : Cage de Faraday ; 6 : Multimètre Keithley 6514 ; 7 : Balance électronique 0.1g ; 8 : PC avec Instrumentation Virtuelle ; 9 : Panneau de commande ; 10 : Source de haute tension continu

Ce séparateur est équipé d'un panneau de commande 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 réalisée selon les normes de sécurité en vigueur.



Figure IV.5. Collecte des particules isolantes dans le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux-électrodes-disques-tournante.

IV.1.3 Méthodologie expérimentale

Le processus de séparation est multifactoriel, et l'analyse expérimentale est effectuée en tenant compte de tous les facteurs possibles: la valeur de la haute tension U [kV], la vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes ν [tr/min], la durée du processus de charge tribo-électrique t [s], le débit d'air de la soufflante n [m³/h] et la masse initiale du mélange pulvérulent à séparer m [g].

Un système de mesure virtuelle mesure continûment la charge et la masse durant le processus de séparation. Le produit récupéré sortant de la chambre de séparation, est collecté dans deux bacs sous forme de cages de Faraday connectées à deux multimètres Keithley 6514. Les deux cages de Faraday sont posées sur deux balances électroniques (KERN, modèle PCB 2000-1) d'une résolution de 0,1 g qui mesurent les masses dans chaque bac.

À l'aide d'une carte d'acquisition GPIB, et d'un câble RS232, les deux électromètres ainsi que les deux balances sont reliés à un ordinateur équipé du logiciel LabView 6. Un programme écrit en LabView permet la mesure instantanée de la charge et la masse en fonction du temps. Les résultats sont affichés sur l'écran de l'ordinateur (figure IV.6) et sont enregistrés sous un fichier (*.txt).

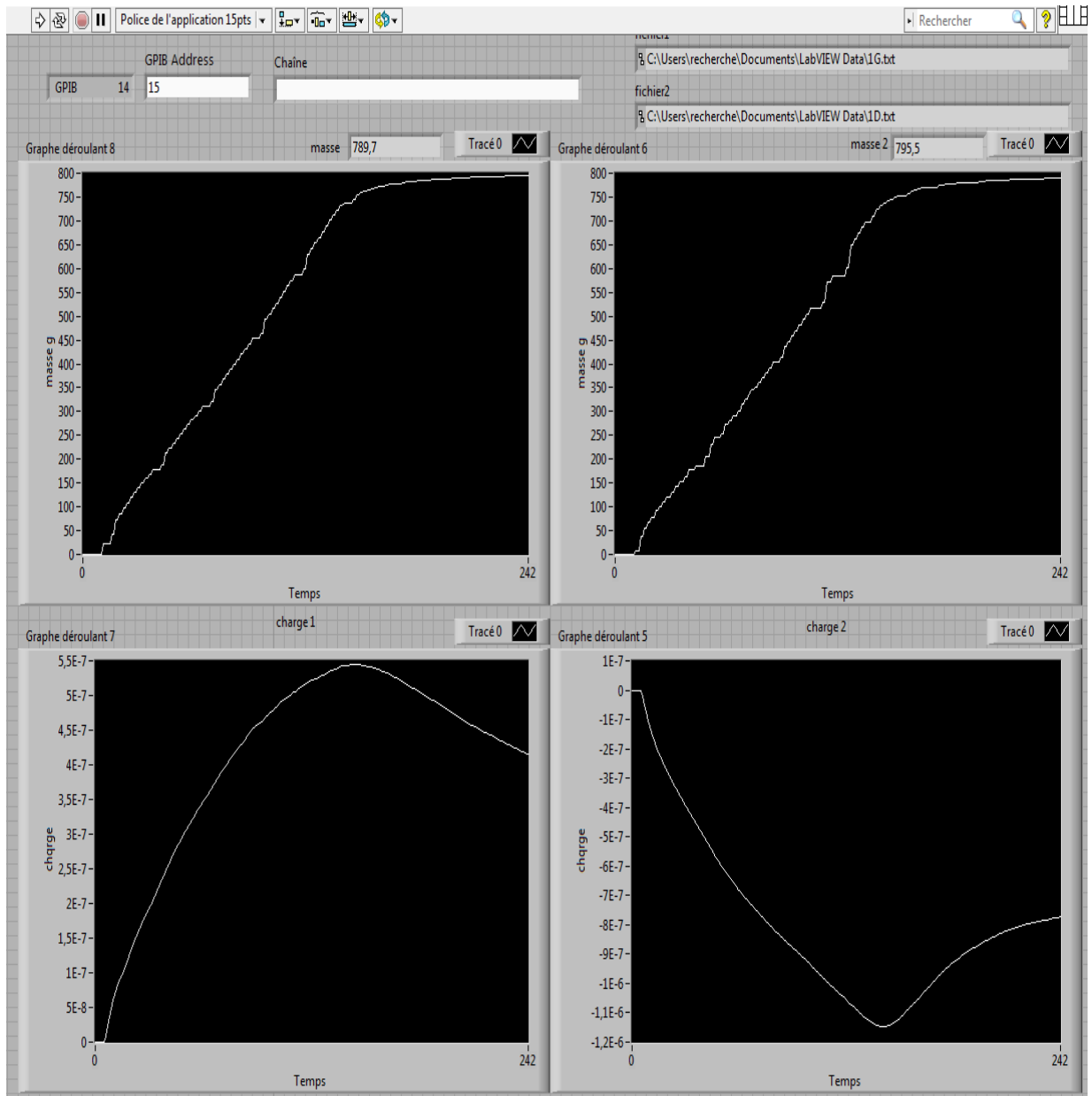


Figure IV.6. Interface du logiciel LabView, pour les mesures des charges électriques et des masses des particules d'ABS et de PS collectées dans les deux collecteurs

Pour chaque expérience de séparation, une démarche de travail a été élaborée et scrupuleusement respectée :

- Dépôt du mélange poudreux de particules d'ABS et de PS dans la chambre de séparation.
- Mise sous tension des appareils de mesure : balances électroniques et électromètres connectés à des cages de Faraday.
- Mise en marche des moteurs électriques et alimentations haute tension.
- Mise en marche de la soufflante et démarrage de l'acquisition des données, par le programme écrit sous LabView 6.
- Mise à l'arrêt des équipements électrique, mécanique, et d'acquisition des données.
- Nettoyage du séparateur tribo aéro électrostatique, et remise à zéro des balances électroniques et les multimètres.

Un colorimètre portable (3nh Focus on Color, modèle NH310) présenté sur la Figure IV.7a, a permis la mesure de la pureté du produit séparé. Grâce à l'étalonnage blanc et noir au démarrage, le colorimètre portable NH310 facilite la mesure. L'ouverture de mesure de 8 mm et 4 mm permet au colorimètre NH310 de s'adapter à de nombreuses applications telles que l'impression, le textile, le plastique, la nourriture, la peinture, etc. La mesure de la pureté des produits poudreux est impossible par le tri manuel à cause de la taille très petite des particules. Le colorimètre NH310 apporte une bonne solution pour avoir une quantification de pureté des matériaux poudreux, et 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 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 IV.7b). Ensuite, des échantillons sont prélevés dans chaque bac collecteur après séparation et font l'objet de plusieurs mesures par le colorimètre. Les informations données par colorimètre sont ensuite comparés avec les données de la table d'étalonnage pour déduire le domaine de la pureté de chaque produit.

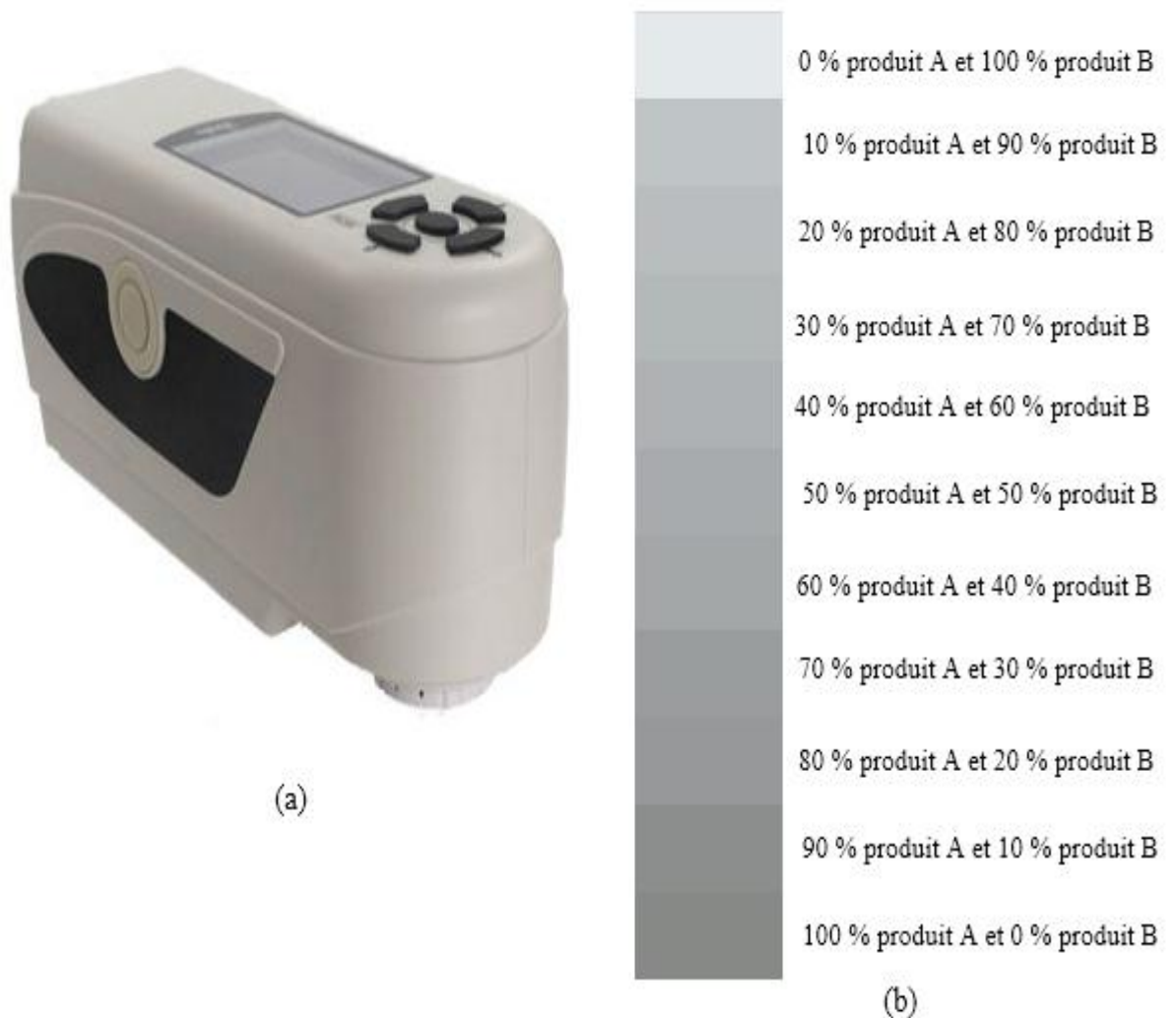


Figure IV.7. Colorimètre NH310 potable (a), Table d'étalonnage (b)

L'étude expérimentale a été réalisée en deux parties

a. Première partie

Un ensemble d'expériences a été réalisé, pour l'étude de l'influence de chaque facteur sur la séparation électrostatique d'un mélange de particules poudreux contenant 50% d'ABS et 50 % de PS de tailles comprises entre 500 μm et 1000 μm .

- La valeur de la haute tension U a été variée de $\pm 4 \text{ kV}$ à $\pm 20 \text{ kV}$, à $n = 7$ m^3/h , $v = 30 \text{ tr}/\text{min}$, $m = 200 \text{ g}$ et $t = 0 \text{ s}$.
- La deuxième série d'expériences a été réalisée à champ électrique constant 2 kV/cm , pour trois variantes d'alimentation des deux

électrodes (± 12 kV, $+24$ kV-Terre, -24 kV-Terre), à $n = 7$ m³/h, $v = 30$ tr/min, $m = 200$ g et $t = 0$ s.

- L'effet de la durée du processus de charge tribo-électrique t a été étudiée dans la troisième expérience. Le temps t a été successivement de 0 s, 10 s et 20 s, à $U = \pm 12$ kV, $v = 30$ tr/min, $m = 200$ g et $n = 7$ m³/h.
- Dans la quatrième expérience, le débit d'air de la soufflante n a été varié entre 7 m³/h et 8 m³/h, à $U = \pm 12$ kV, $v = 30$ tr/min, $m = 200$ g et $t = 0$ s.
- La vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes v a été variée entre 15 tr/min et 60 tr/min, à $U = \pm 12$ kV, $n = 7$ m³/h, $m = 200$ g et $t = 0$ s.
- La masse du produit initiale m a été variée entre 100 g et 500 g, à $U = \pm 12$ kV, $v = 30$ tr/min, $n = 7$ m³/h et $t = 0$ s.

b. Deuxième partie

Chaque échantillon du mélange utilisé pour cette étude contenait 150 g ABS et 150 g PS appartenant à l'une des classes de tailles #1: $x > 1000$ μm ; #2: 500 $\mu\text{m} < x < 1000$ μm ; #3: 250 $\mu\text{m} < x < 500$ μm , avec x étant le diamètre moyen de la particule.

Un ensemble de quatre expériences été réalisé, à une distance constante entre les disques électrodes, $v = 40$ tr/min, et $t = 0$ s.

- Variation du débit d'air de la soufflante n entre 8 m³/h et 14.2 m³/h pour la classe de taille #1 ($x > 1000$ μm), à $U = \pm 12$ kV.
- Variation du débit d'air de la soufflante n entre 6.4 m³/h et 8 m³/h pour les classes de tailles #2 (500 $\mu\text{m} < x < 1000$ μm) et #3 (250 $\mu\text{m} < x < 500$ μm), à $U = \pm 12$ kV.
- Variation de la haute tension U des électrodes entre ± 6 kV et ± 18 kV pour les trois classes de tailles, à $n = 8$ m³/h.
- Variation de la haute tension U des électrodes entre ± 6 kV et ± 18 kV pour un mélange de 50% ABS + 50% PS composé de 33% de chacune des trois classes de tailles, à $n = 8$ m³/h.

Toutes les expériences sont réalisées dans des conditions climatiques relativement stables : RH = 44-56 %, T° = 18-21 °C.

IV.2 ÉTUDE DES FACTEURS

Les résultats des premières expériences, réalisées à des valeurs différentes de la tension d'alimentation sont représentés sur la figure IV.7.

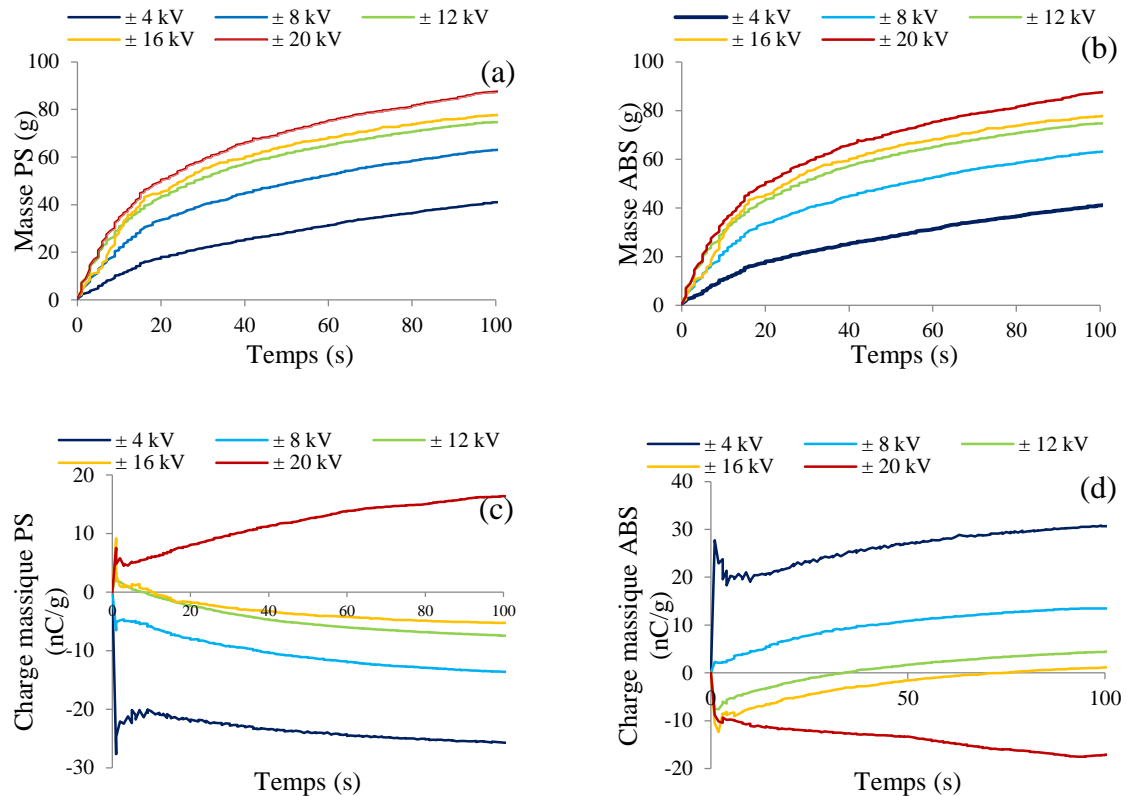


Figure IV.7. Masse PS (a), masse ABS (b), charge massique PS (c) et charge massique ABS (d) en fonction du temps, pour des hautes tensions appliquées allant de ± 4 kV jusqu'à ± 20 kV avec un pas de ± 4 kV

Comme prévu, la masse collectée croît avec l'augmentation de la haute tension appliquée aux électrodes (figure IV.7 a et b). Cette augmentation renforce la force électrique s'exerçant sur chaque particule, ce qui facilite le déplacement des particules dans le champ électrique. En revanche, les résultats de la charge massique sont assez surprenants. La charge massique diminue avec l'augmentation de la haute tension appliquée, et pour des hautes tensions très élevés (± 20 kV), les particules changent leurs signes (figure IV.7 c et d). Pour

des valeurs de tensions de ± 12 kV et de ± 16 kV nous obtenons une bonne séparation et le produit collecté présente une faible charge (phénomène de neutralisation).

Pour des valeurs de haute tension élevées, un effet couronne peut avoir lieu aux bords des électrodes-disque de forme pointus. Les particules changent de signe de charge en traversant cette zone de décharge couronne, notons que la plupart des particules sont attachées aux bords des électrodes cylindriques où le champ est très intense.

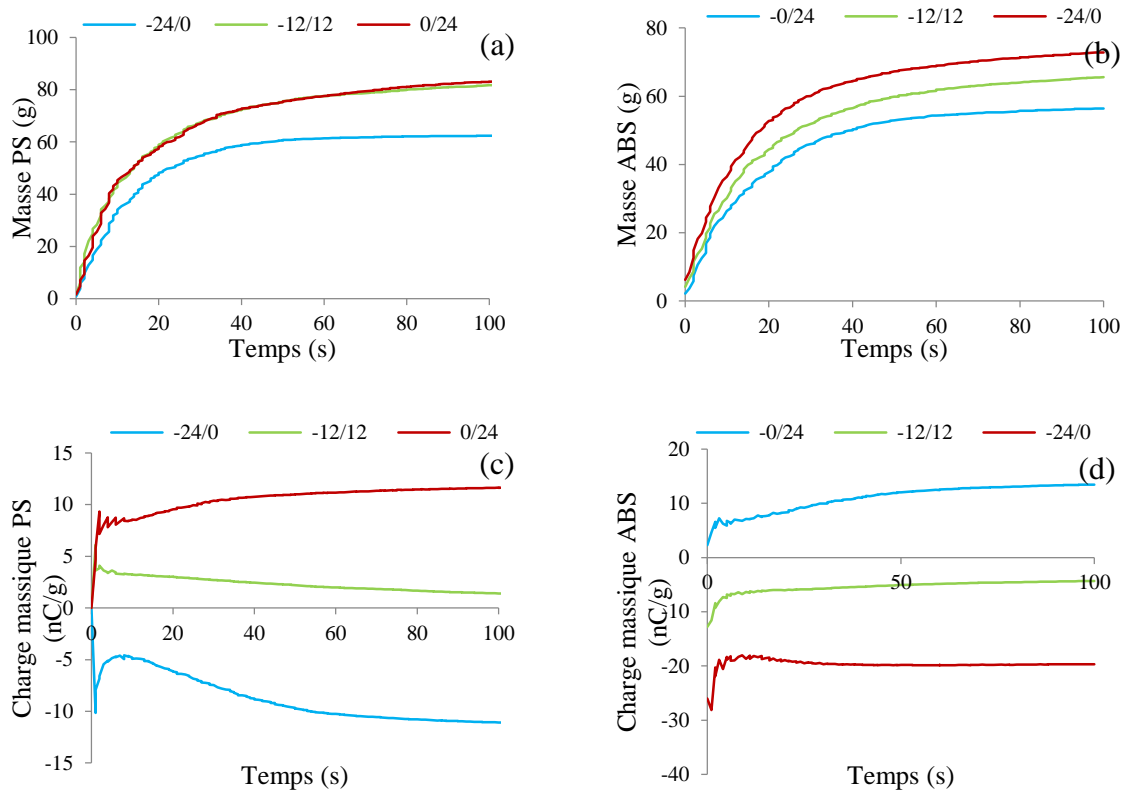


Figure IV.8. Masse PS (a), masse ABS (b), charge massique PS (c) et charge massique ABS (d) en fonction du temps, pour des potentiels électrique de -12 kV/+12 kV, -24 kV/0 kV et 0 kV/+24 kV avec un champ électrique de 2 kV/cm

La deuxième série d'expériences, réalisées pour un champ électrique constant, montre l'importance du potentiel électrique de chaque électrode. L'électrode connectée à un potentiel électrique plus élevé en valeur absolue récupère mieux le produit (figure IV.8 a et b). Ainsi les particules d'ABS sont mieux collectées avec une électrode connectée à un potentiel négatif de -24 kV, tandis que la récupération du PS est favorisée par l'utilisation d'une électrode ayant un potentiel positif de 24 kV. Les courbes représentées sur la figure IV.8.c et IV.8.d

montrent que l'augmentation du potentiel électrique d'une électrode conduit à une diminution, voire à un changement de signe de la charge massique des particules collectées par celle-ci. Ce phénomène mériterait une étude approfondie, afin de pouvoir établir les conditions d'alimentation optimale des électrodes.

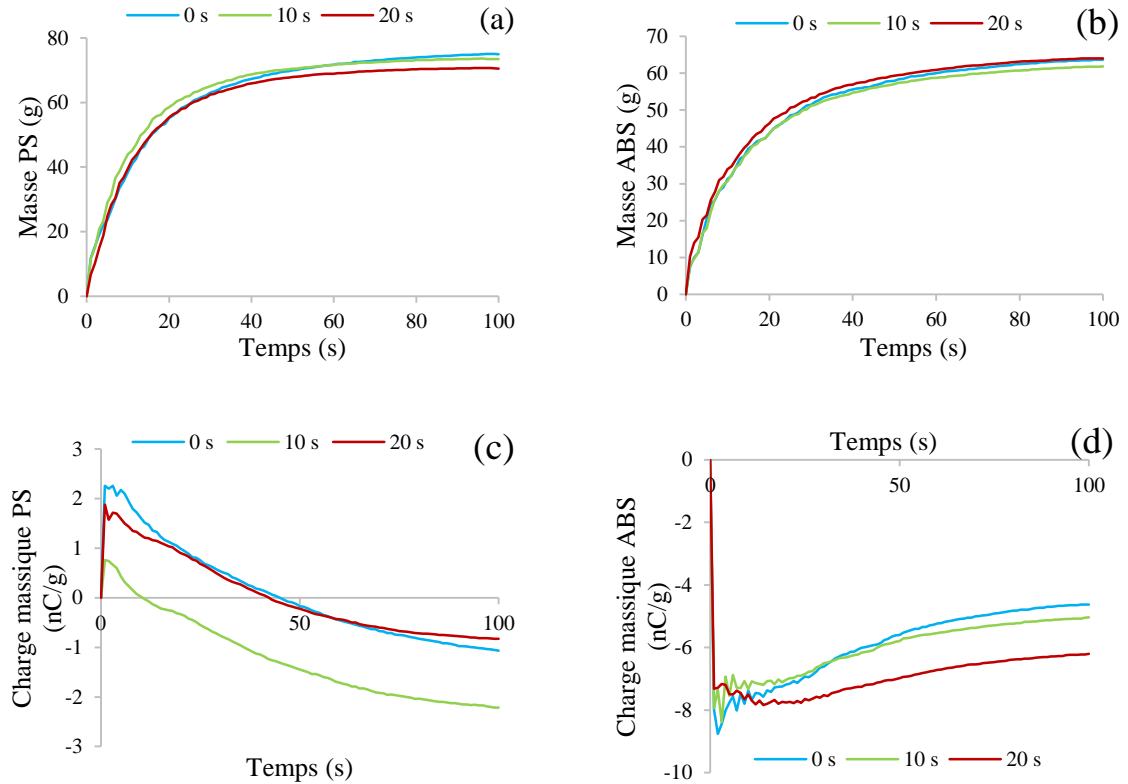


Figure IV.9. Masse PS (a), masse ABS (b), charge massique PS (c) et charge massique ABS (d) en fonction du temps, pour des durées de pré-chargement triboélectrique de 0 s, 10 s et 20 s.

La durée du processus de pré-chargement triboélectrique du mélange poudreux à un effet négligeable sur le processus de séparation (figure IV.9). Le taux des masses collectées est sensiblement similaire pour les trois durées de pré-chargement triboélectrique (figure IV.9 a et b) ainsi que la charge massique des deux matériaux (figure IV.9 c et d). 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.

La vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes a peu d'effet sur le processus de séparation. La quantité des produits récupérée diminue légèrement avec l'augmentation de

la vitesse de rotation des électrodes (figure IV.10 a et b). Ceci s'explique par le fait que la force centrifuge augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation des électrodes ; ce qui fait que le disque évacue certaines particules qui ont une charge inférieure aux autres. Les courbes de la charge massique représentée sur la figure IV. 10 c et IV.10 d), montrent qu'avec l'augmentation de la vitesse de rotation des électrodes tournante, les particules séparées sont plus chargées (le PS se charge plus négativement et l'ABS plus positivement). On peut donc dire que l'augmentation de la vitesse de rotation engendre une augmentation de la force centrifuge ; et par conséquent les particules ne peuvent pas être collées aux disques si elles n'ont pas suffisamment de charge pour éliminer l'effet de la force centrifuge.

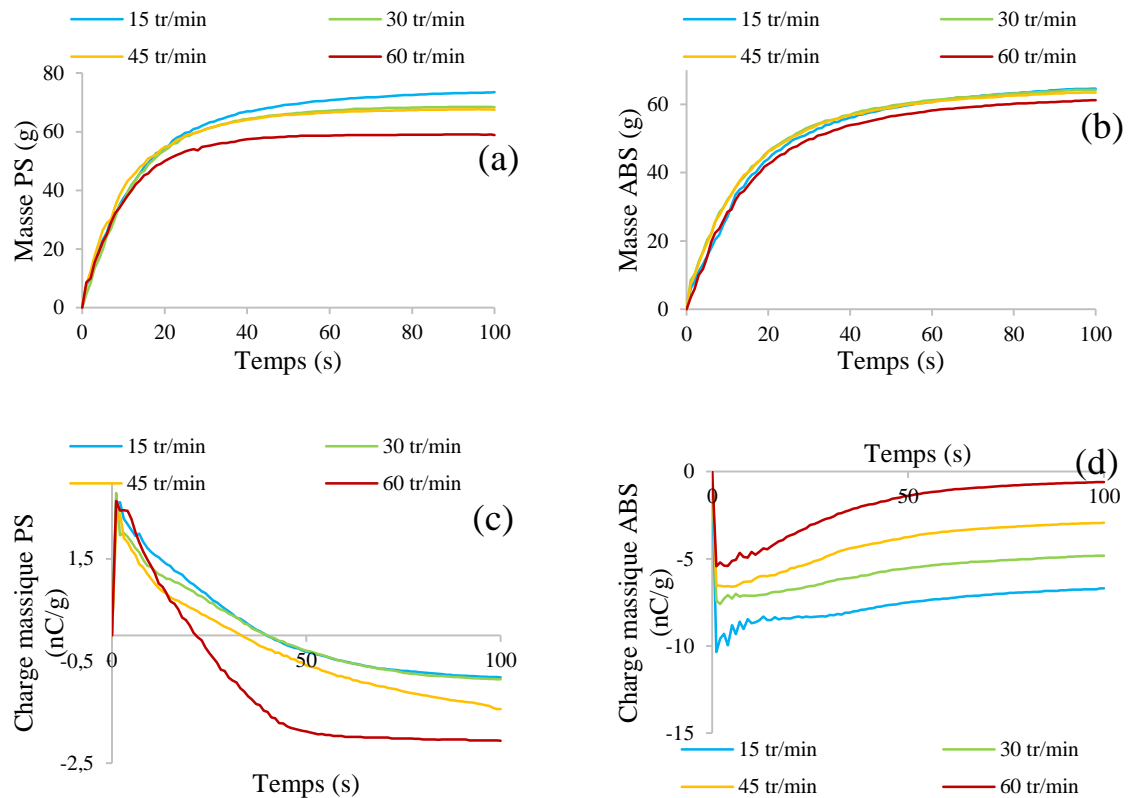


Figure IV.10. Masse PS (a), masse ABS (b), charge massique PS (c) et charge massique ABS (d) en fonction du temps, pour des vitesses de rotation des électrodes cylindriques allant de 15 tr/min jusqu'à 60 tr/min, avec un pas de 15 tr/min

Le débit d'air influence considérablement les conditions de charge des particules et impacte donc le temps de séparation et de collecte des produits (Figure IV.11). L'augmentation du débit d'air modifie l'aspect du lit fluidisé et augmente le nombre et l'intensité des collisions entre les particules. Ainsi, la charge massique atteint sa valeur élevée

(le PS se charge plus négativement et l'ABS plus positivement) ce qui favorise une séparation rapide et importante des particules (Figure IV.11 c et d). 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 le maintien des particules à la surface des électrodes plus difficile. Elles doivent avoir une charge plus importante pour que la force d'image électrique les attache aux électrodes.

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.12 a et b). La charge massique des produits collectés augmente avec l'augmentation la masse initiale dans la chambre de séparation (le PS plus négative et l'ABS plus positive). En effet, le nombre des particules augmente pour une masse initiale élevée, et donc le nombre de collisions dans le lit fluidisé devient plus important ce qui engendre des meilleures conditions de charge.

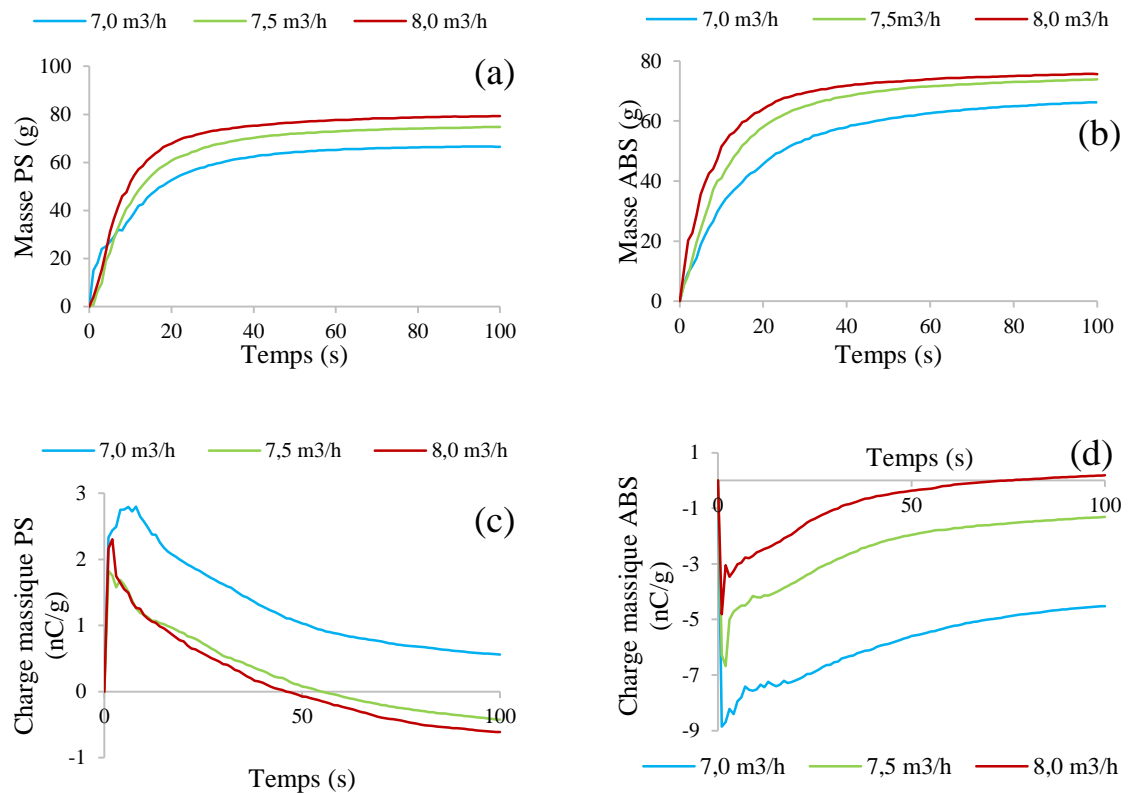


Figure IV.11. Masse PS (a), masse ABS (b), charge massique PS (c) et charge massique ABS (d) en fonction du temps, pour des débits d'air de la soufflante de $7 \text{ m}^3/\text{h}$, $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $8 \text{ m}^3/\text{h}$.

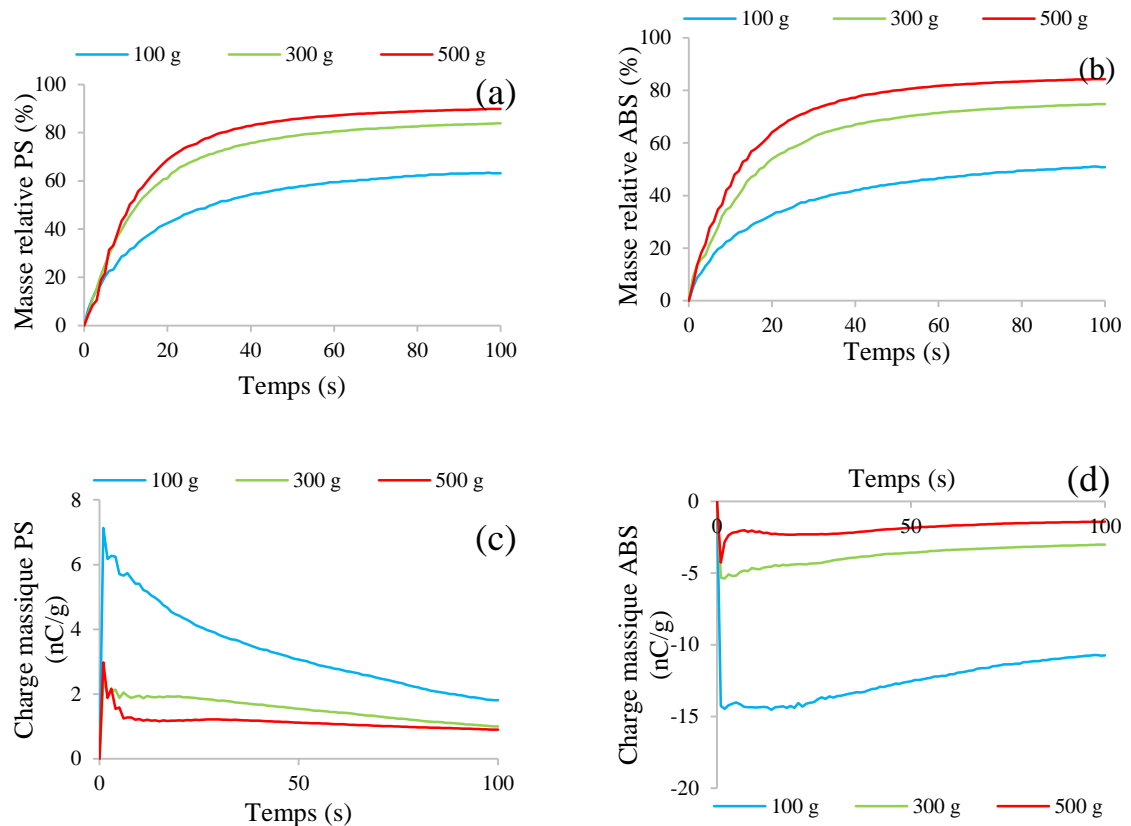


Figure IV.12. Masse PS (a), masse ABS (b), charge massique PS (c) et charge massique ABS (d) en fonction du temps, pour des masses de mélange introduit dans la chambre de séparation de 100 g, 300 g, 500g.

IV.3 ÉTUDE DE LA TAILLE DES PARTICULES

Les résultats de la première série d'expériences réalisées avec un mélange à 50% d'ABS + 50% de PS constitué de granulés de taille-classe #1 montrent que la séparation s'améliore avec l'augmentation du débit d'air de fluidisation. Les courbes de la Figure IV.13 illustrent l'évolution dans le temps de la masse des granules de PS collectés. Des courbes similaires ont été obtenues pour l'ABS.

Dans le cas des échantillons de la classe de taille #1, les granules de PS de forme plus plate (voir leur aspect sur la figure IV.1) sont plus facilement fixés à la surface des électrodes de disque rotatives et sont plus rapidement retirés du lit fluidisé (figure IV.14 a). Une tendance similaire peut être observée pour la classe de taille #2 (figure IV.14 b), mais elle est moins visible pour les particules plus fines dans la classe de taille # 3 (figure IV.4 c). Comme

les particules deviennent plus petites, les forces du champ électrique sont assez fortes pour les fixer fermement aux électrodes, quelle que soit leur forme.

Comme prévu, la fluidisation des granules plus grosses nécessite des débits plus élevés. La séparation du mélange granulaire de la classe de taille #1 est mauvaise : seulement 30% de PS et moins de 15% d'ABS sont recueillis après 100 s de fonctionnement du lit fluidisé (figure IV.14 a). Au même débit de fluidisation-air, plus de 90% de PS et 70% d'ABS sont séparés à la fin d'une expérience de 100 s réalisée avec les classes de tailles # 2 et # 3, comme illustré sur les Figures IV.14 b et c.

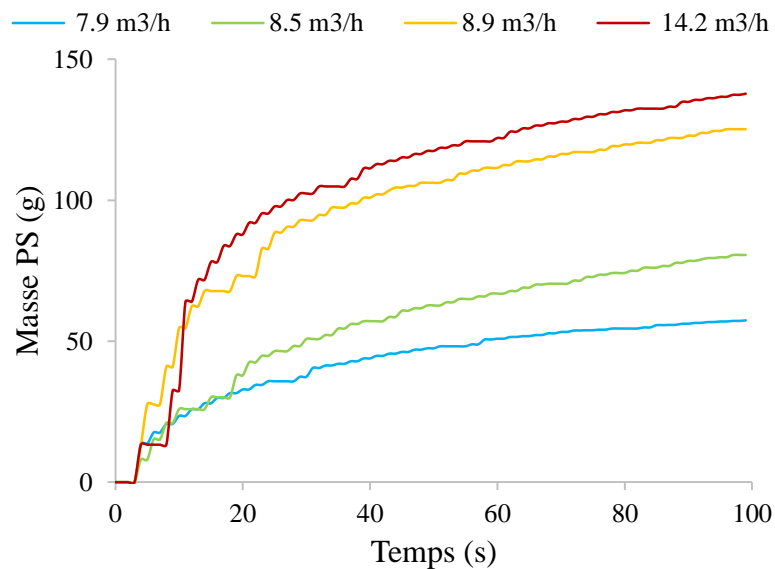


Figure IV.13. Variation de la masse collectée des granules de PS en fonction du temps.

Expériences effectuées pour la classe de taille#1 ($x > 1000 \mu\text{m}$), pour différents débits de fluidisation $n = 7,9; 8,5; 8,9; 14,2 \text{ m}^3/\text{h}$, et une haute tension appliquée $U = \pm 12 \text{ kV}$.

L'analyse des données révèle que la récupération de 2/3 des granules de PS nécessite environ 40 s pour la classe de taille # 1, à $n = 8,9 \text{ m}^3 / \text{h}$ (figure IV.14 a), mais seulement 15 s, pour la classe de taille # 2 (Figure IV.14 b) et inférieure à 10 s, pour la classe de taille #3 (figure IV.14 c), à un débit d'air inférieur $n = 7,9 \text{ m}^3 / \text{h}$. Plus les granules sont fins, plus la séparation est rapide.

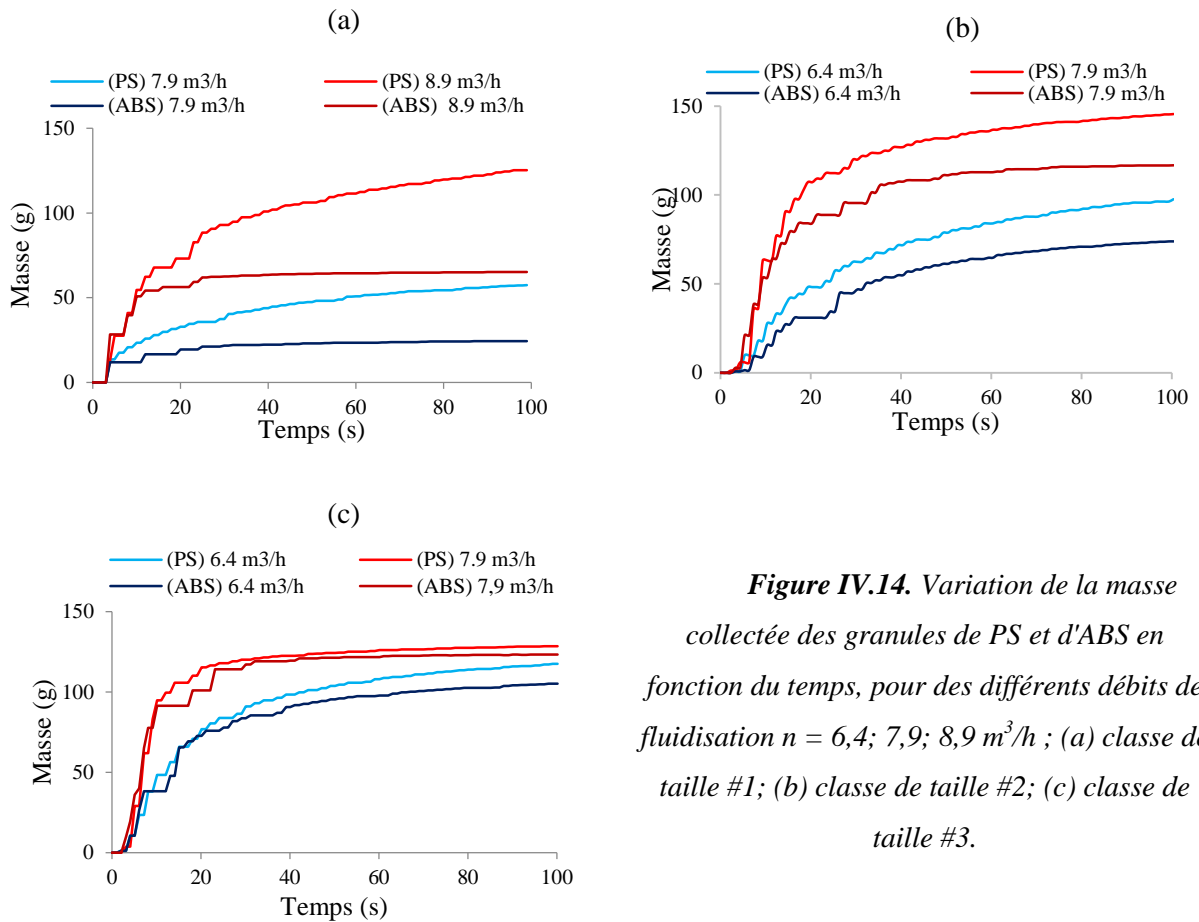


Figure IV.14. Variation de la masse collectée des granules de PS et d'ABS en fonction du temps, pour des différents débits de fluidisation $n = 6,4; 7,9; 8,9 \text{ m}^3/\text{h}$; (a) classe de taille #1; (b) classe de taille #2; (c) classe de taille #3.

La charge électrique totale des granules accumulés dans les deux compartiments du collecteur pour différents débits d'air n peut être examinée sur la Figure IV.15 a. Les granules d'ABS chargés positivement et les granules de PS chargés négativement, sont en bon accord avec les positions des deux polymères dans la plupart voire dans toutes les séries triboélectriques. Avec le même débit d'air $n = 7,9 \text{ m}^3/\text{h}$ (ce qui ne signifie pas des conditions de fluidisation similaires), les granules plus fins (taille-classe # 3) obtiennent une charge plus élevée que les granules plus grosses. Leur surface spécifique [m^2/kg] est plus grande que celle des granules plus grosses et la tribocharge est connue pour être un processus superficiel. Pour des particules appartenant à la même classe de taille, l'amélioration du débit d'air améliore les conditions de la tribocharge, comme le montrent les valeurs plus élevées de la charge mesurée à la fin du processus de séparation.

L'effet de la haute tension appliquée aux électrodes-disques U sur la charge électrique des particules collectées est illustré par les résultats représentés sur la Figure IV.15 b, pour la classe de taille # 3. Ainsi, plus la valeur de la haute tension appliquée aux électrodes-disques

U est élevée, plus le champ électrique est intense dans la zone de séparation et plus la charge portée par les granules pour être extraite du lit fluidisé par la force de Coulomb est faible. Un effet similaire a également été observé pour les deux autres classes de tailles.

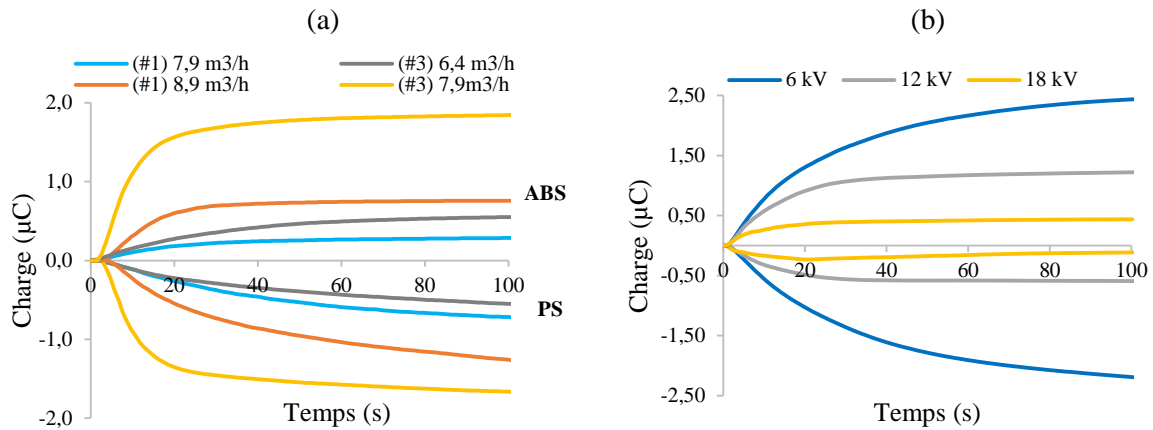


Figure IV.15. Variation de la charge de PS et d'ABS en fonction du temps, pour : (a) des différents débits de fluidisation $n = 6,4; 7,9; 8,9 \text{ m}^3/\text{h}$, et les classes de tailles #1 et #3; (b) haute tension appliquée aux électrodes $U = \pm 6; \pm 12; \pm 18 \text{ kV}$, et classe de taille #3.

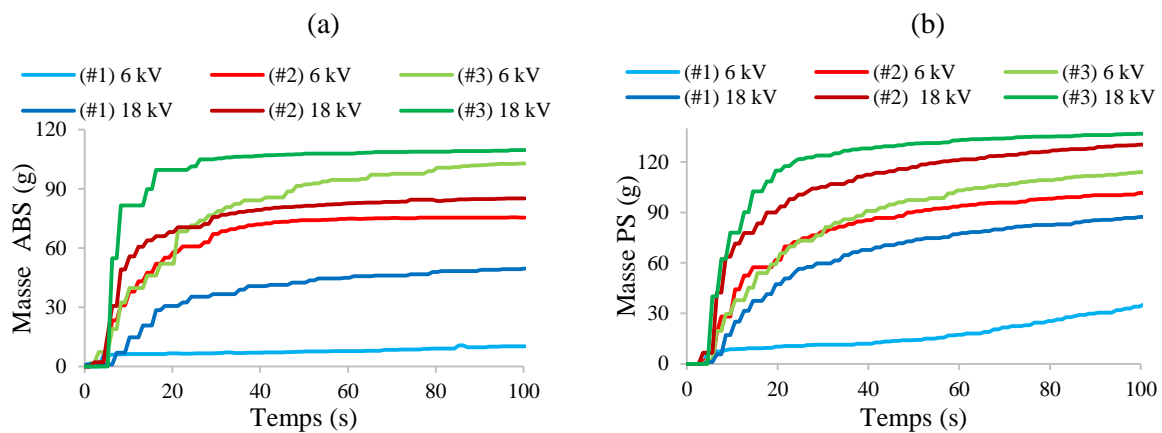


Figure IV.16. Variation de la masse des produits séparés en fonction du temps, pour deux valeurs de haute tension appliquée aux électrodes $U = \pm 6; \pm 18 \text{ kV}$, et les trois classes de taille; (a) ABS; (b) PS.

La haute tension appliquée aux électrodes-disque U a également un effet significatif sur la masse des granules collectés (figure IV.16). Des valeurs plus élevées de la haute tension appliquée U favorisent la séparation rapide des deux produits. Cela est vrai pour chacune des trois classes de tailles, mais est critique pour les plus grosses. En effet, seulement environ

10% de l'ABS et 20% du PS dans la classe de taille # 1 sont séparés en appliquant une haute tension de $U = \pm 6$ kV aux deux électrodes.

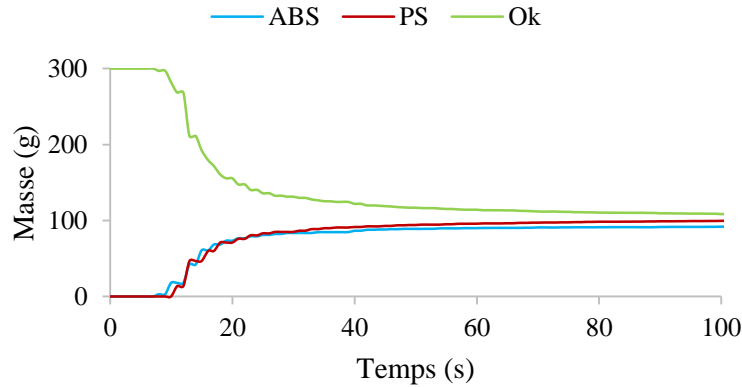


Figure IV.17. Variation de la masse des granules de PS et d'ABS collectés par les électrodes-disques, ainsi que de ceux qui sont restés dans la chambre de fluidisation (désignés comme "Ok" dans le graphe), en fonction du temps, pour un mélange de 50% d'ABS et de 50% de PS composé de 33% de chacune des trois classes de tailles, à $n = 7,9$ m³/h et $U = \pm 12$ kV.

Les résultats de la dernière expérience, réalisée avec un mélange granulaire de 50% d'ABS et de 50% de PS constitué de 33% de chacune des trois classes de tailles, à $n = 7,9$ m³/h et $U = \pm 12$ kV, sont représentés sur la Figure IV.17. La séparation est médiocre. Plus de 1/3 de la masse initiale reste dans le lit fluidisé après 100 s de fonctionnement, car les grosses granules ne sont pas suffisamment chargées pour adhérer aux électrodes. L'analyse des granules dans les deux collecteurs (Figure IV.18) a montré que 42,3% de la masse de PS était représentée par des granules dans la classe de taille # 3 et 41,9% par la classe de taille # 2.

De même, la masse des granules d'ABS des classes de tailles #3 et #2 représente respectivement 46,1% et 44,9% du produit recueilli sur l'électrode négative. Ces résultats confirment l'observation précédente concernant la difficulté de séparer les granules d'ABS de classe de taille # 1, par rapport aux granules de PS plus lisses.

La majeure partie de la masse restante dans le lit fluidisé (71,6%) était composée de granules de classe de taille #1 ($x > 1000$ μm). L'homogénéité granulométrique des granules qui composent le mélange à séparer est une condition préalable pour une bonne séparation tribo-aéro-électrostatique.

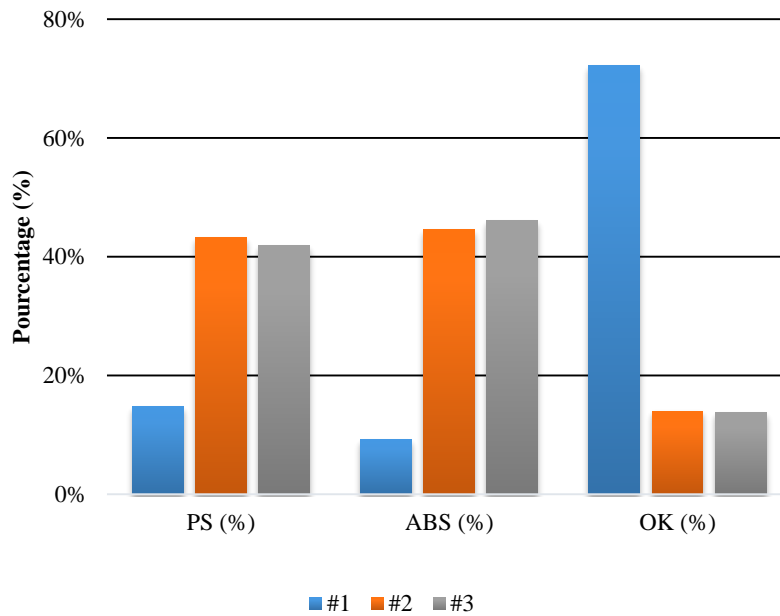


Figure IV.18. L'analyse de la granulométrie dans chaque bac collecteur de PS et d'ABS, ainsi que de ceux qui sont restés dans la chambre de fluidisation (désignés comme "Ok" dans le graphe).

IV.4 CONCLUSIONS

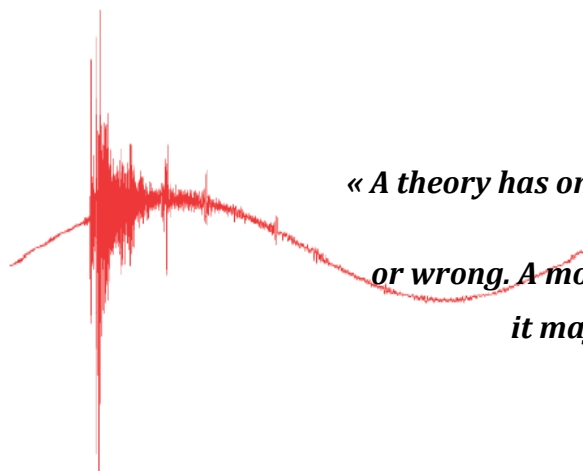
1. Les essais effectués sur le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques tournantes ont prouvé l'efficacité de ce séparateur dans le traitement des mélanges poudreux isolants issus des DEEE.
2. Les facteurs les plus influents sur le processus de séparation tribo-aéro-électrostatique sont : la haute tension appliquée U [kV], le débit d'air n [m³/h] et la masse initiale du produit à séparer m [g]. La durée de pré chargement tribo-électrique et la vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes n'ont qu'une faible influence sur le processus de la séparation.
3. Le pilotage des instruments de mesure de la masse et de la charge électrique des produits collectées permet d'extraire le maximum d'informations concernant les résultats obtenus, facilitant ainsi l'analyse de l'effet de chaque facteurs influent sur le processus de séparation.
4. La séparation est meilleure pour les matériaux plus finement broyés (classes de tailles # 2: $500 \mu\text{m} < x < 1000 \mu\text{m}$, et # 3: $250 \mu\text{m} < x < 500 \mu\text{m}$). Néanmoins, le séparateur tribo-aéro-

électrostatique peut également traiter, avec des efficacités moindres, des mélanges de matières plastiques caractérisés par une distribution granulométrique plus hétérogène.

5. La conception du séparateur tribo-électrostatique industriel doit être adaptée au traitement continu des poudres fines : étanchéité parfaite de toutes les pièces de la machine en contact avec les matériaux, débit d'alimentation du produit entièrement contrôlable et débit d'air totalement réglable.

CHAPITRE V

FONCTIONNEMENT EN CONTINU DU SEPARATEUR TRIBO-AERO- ELECTROSTATIQUE A DEUX ELECTRODES-DISQUES



*« A theory has only the alternative of being
right
or wrong. A model has a third possibility:
it may be right, but irrelevant »*

L'objectif de ce dernier chapitre est de mettre en évidence les particularités du régime de fonctionnement continu d'un nouveau séparateur tribo-aéro-électrostatique pour le recyclage des matières plastiques contenues dans les déchets micronisés d'équipements électriques et électroniques. Les essais sont réalisés avec un mélange poudreux ABS/PS.

Les particules se chargent par effet triboélectrique dans un lit fluidisé, en présence d'un champ électrique, créé entre deux électrodes disques connectées à des alimentations haute tension de polarités opposées. L'installation décrite dans le chapitre précédent dispose de plusieurs variables de contrôle : la haute tension, la masse du mélange introduit initialement dans le lit fluidisé, le débit d'air de fluidisation et la vitesse de rotation des électrodes-disques.

L'influence de chaque variable de contrôle de la machine sur le rendement de la séparation a été étudiée dans le chapitre précédent en mesurant simultanément et continûment la masse et la charge électrique des produits collectés. Une étude des paramètres du fonctionnement en continu (le débit d'alimentation en produit ; la masse du mélange introduit ; la composition du mélange ABS/PS) a aussi été présentée. La qualité des produits obtenus et les débits horaires élevés recommandent ce type d'installation pour une utilisation industrielle.

V.1 ETUDE DES FACTEURS EN REGIME CONTINU

V.1.1 Procédure expérimentale

Dans la présente étude, le nouveau séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques décrit dans le § **IV.1.2** est utilisé en ajoutant un vibro-transporteur qui permis l'alimentation continue de la chambre de séparation en produit pulvérulent en débit fixe (Figure V.1 et V.2). Le mélange pulvérulent est introduit par un vibro-transporteur dans la chambre de fluidisation qui sert aussi de chambre de séparation.

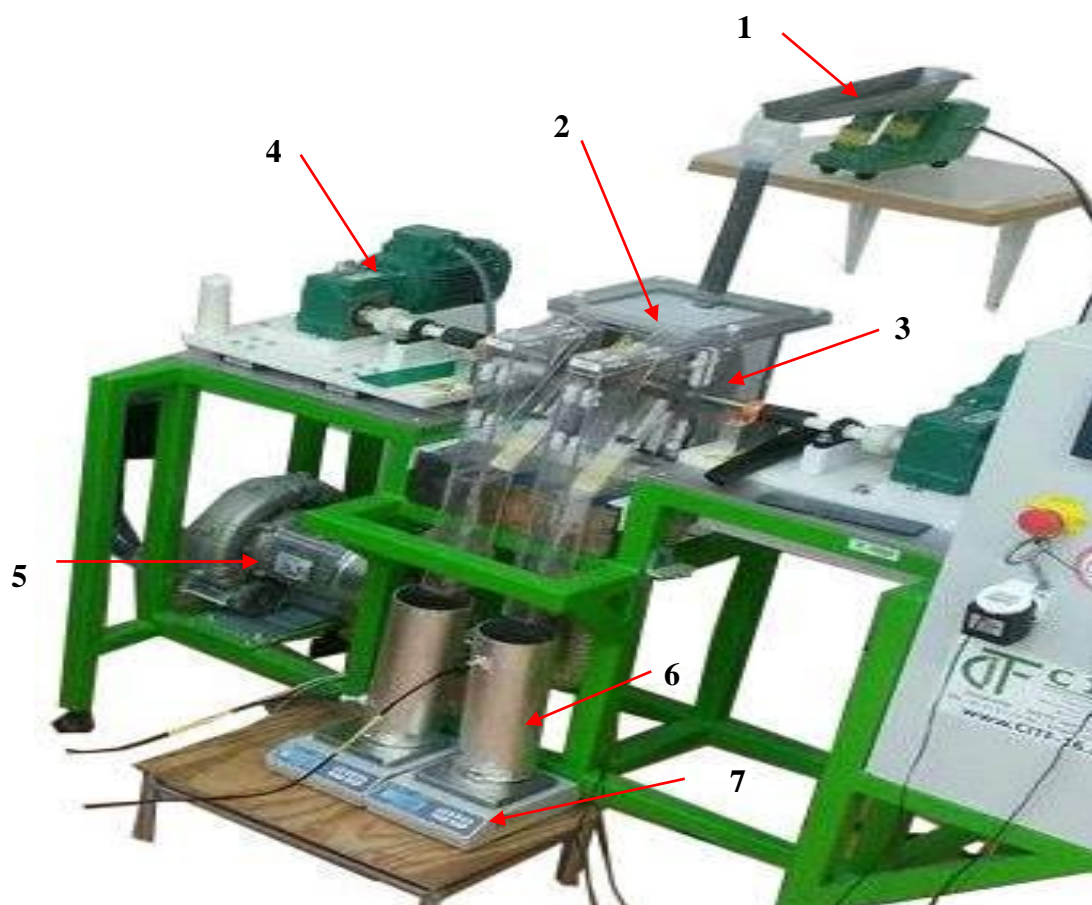


Figure V.1. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques tournantes ; 1 : Vibro-transporteur ; 2 : Chambre de fluidisation ; 3 : Disque électrode ; 4 : Moteur électrique d'entraînement des électrodes tournantes ; 5 : Soufflante ; 6 : Cage de Faraday ; 7 : Balance.

Le mélange de matériaux pulvérulents utilisé dans la présente étude comprend deux types de polymères, un ABS de couleur marron et un PS de couleur blanche, fournis par la société APR2, France, spécialisée dans le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). La taille de ses particules est typiquement comprise entre 500 μm et 1000 μm . Leurs formes variées peuvent être examinées sur la Figure V.3.

Les expériences ont été effectuées dans des conditions climatiques relativement stables : RH = 40-50% et température 17-21°C. Notons que, conformément à leur positionnement dans la série triboélectrique, l'ABS se charge positivement et le PS négativement et ils seront donc collectés respectivement par les électrodes négative et positive du séparateur, sous l'action des forces électriques. Nous présentons ci-après les conditions de réalisation des essais en modes cyclique et continu.

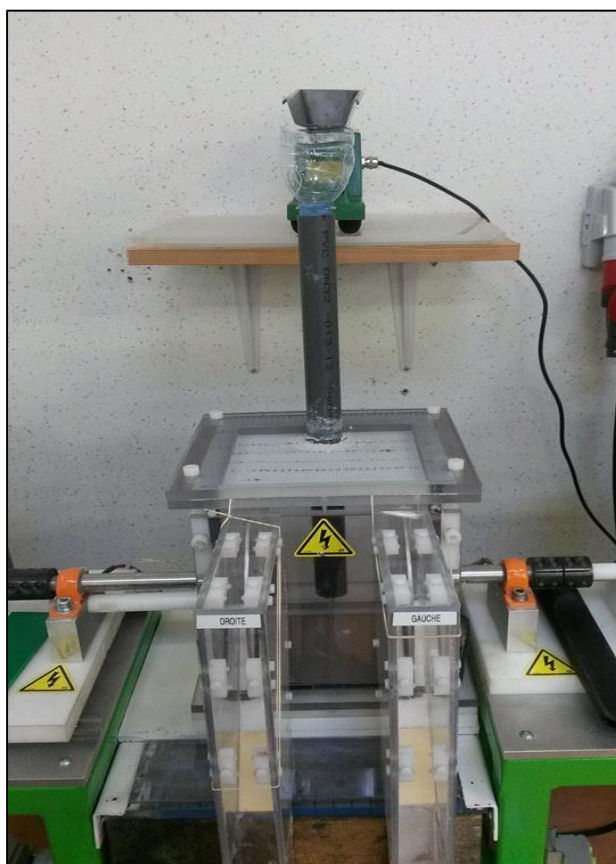


Figure V.2. Zone de séparation des particules dans le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes disques.

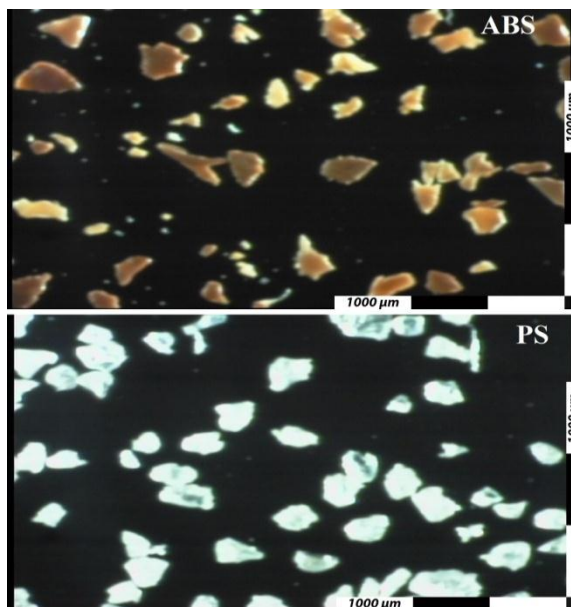


Figure V.3. Micrographies des particules d'ABS et de PS constituant les produits faisant l'objet de l'étude.

Les expériences ont été effectuées pour une masse totale de 1700 g composée de 50% ABS et 50% PS, sauf pour les essais qui ont visé l'étude de différentes compositions du mélange granulaire, où la quantité de produits utilisée a été de 1000 g. Les situations étudiées sont décrites ci-dessous :

- Reproductibilité des expériences : chaque essai est répété trois fois avec $m = 1700$ g (300 g masse initiale + 1400 g sur la goulotte oscillante du vibro-transporteur), $v = 30$ tr/min, $n = 7$ m³/h, $U = \pm 12$ kV.
- Variation du débit d'alimentation en produit entre 0.25 g/s et 20 g/s, pour $m = 1700$ g (300 g + 1400 g), $v = 30$ tr/min, $n = 7$ m³/h, $U = \pm 12$ kV.
- Variation de la masse initiale dans la chambre de séparation entre 100 g et 600 g pour $m = 1700$ g, $v = 30$ tr/min, $n = 7$ m³/h, $U = \pm 12$ kV.
- Variation de la composition du mélange ABS/PS à séparer : 50%/50% ; 30%/70% et 70%/30% ; pour $m = 1700$ g, $v = 30$ tr/min, $n = 7$ m³/h, $U = \pm 12$ kV

V.1.2 Résultats et discussions

Dans le cas d'un mélange équilibré 50% ABS / 50% PS, les masses collectées sont quasiment identiques pour les deux produits et les résultats des expériences de séparation sont reproductibles (Figure V.4).

La figure V.5 a et b montre que l'augmentation du débit d'alimentation s'accompagne d'une augmentation de la vitesse de récupération des produits de la séparation. En effet, la somme des débits de produits sortants est quasiment égale au débit d'alimentation en matière. Dans ce mélange ABS / PS, le PS se charge négativement et se trouve donc attiré par l'électrode positive, tandis que l'ABS se charge positivement et se dirige vers l'électrode négative. Cependant, la charge globale des particules de PS collectées dans la cage de Faraday, à la sortie du séparateur, est positive confirmant ainsi les précédentes observations concernant le changement de signe (voir § IV.2). A faible débit (0,25 g/s), le produit de la séparation est collecté sous la forme d'une monocouche, ce qui crée les conditions de changement de signe pour pratiquement toutes les particules. A débit élevé (20 g/s), les particules forment plusieurs couches à la surface de l'électrode collectrice ; une partie d'entre elles garde la charge initiale et, par conséquent, la charge globale du produit collecté est proche de zéro (Figure V.5 c et d).

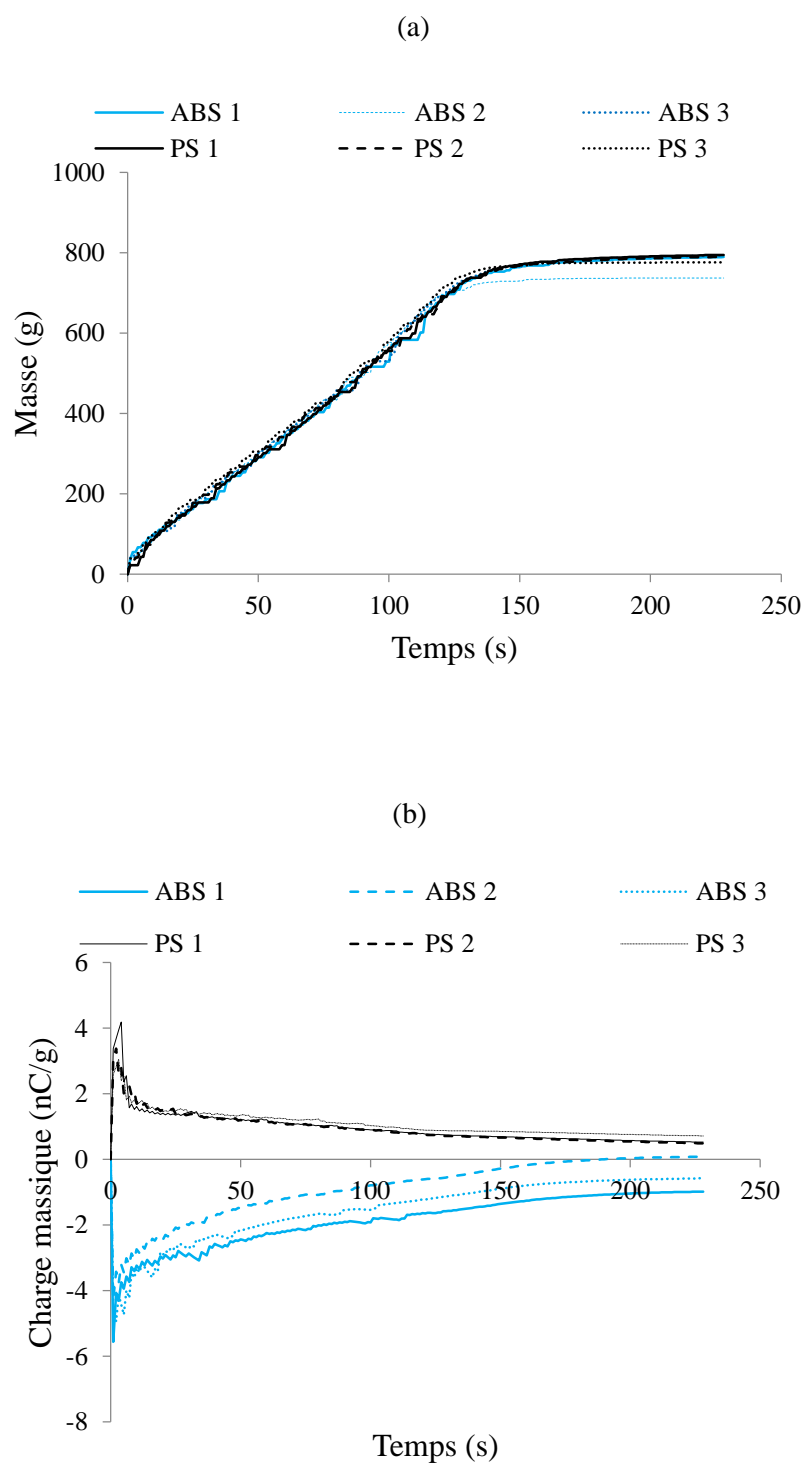


Figure V.4. *Reproductibilité des résultats en régime continu pour $m = 1700$ g, $U = \pm 12$ kV, $v = 30$ tr/min, $n = 7$ m³/h.*

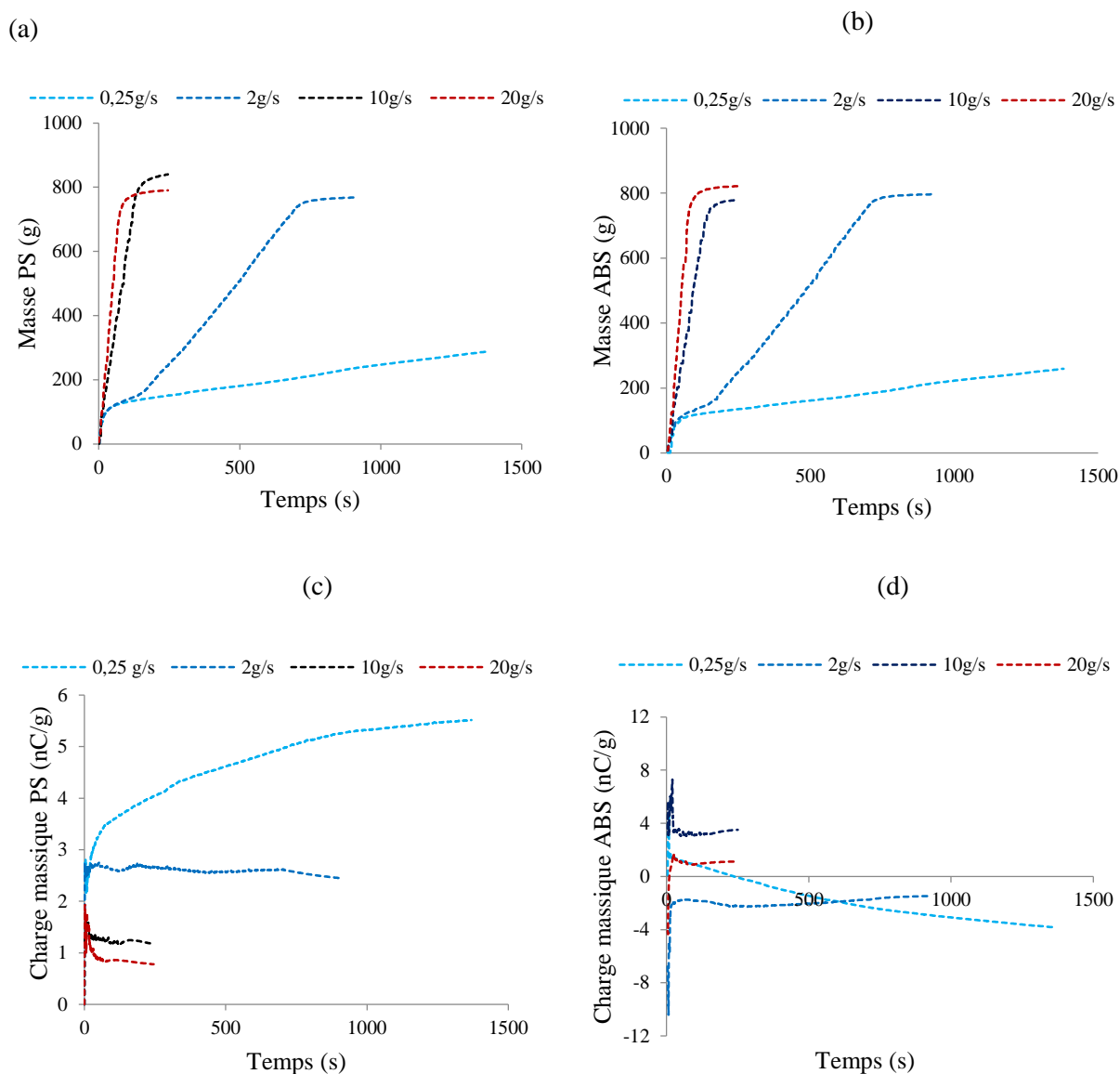


Figure V.5. masses de PS (a) et d'ABS (b) et charge massique du PS (c) et l'ABS (d) en fonction du temps, pour plusieurs valeurs du débit d'alimentation en produit ($m = 1700$ g, $v = 30$ tr/min, $U = \pm 12$ kV, $n = 7$ m³/h).

Le débit d'air, générateur du lit fluidisé dans la chambre de séparation, est à mettre en corrélation avec la masse du mélange à séparer. En effet, pour un débit d'air donné, les particules vont plus ou moins entrer en collision selon la masse du mélange présente dans la chambre de séparation. Une masse trop importante dans le lit fluidisé laissera les 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 V.6

indique une séparation plus rapide pour une masse de 600 g dans la chambre et quasiment identique pour 100 g et 300 g.

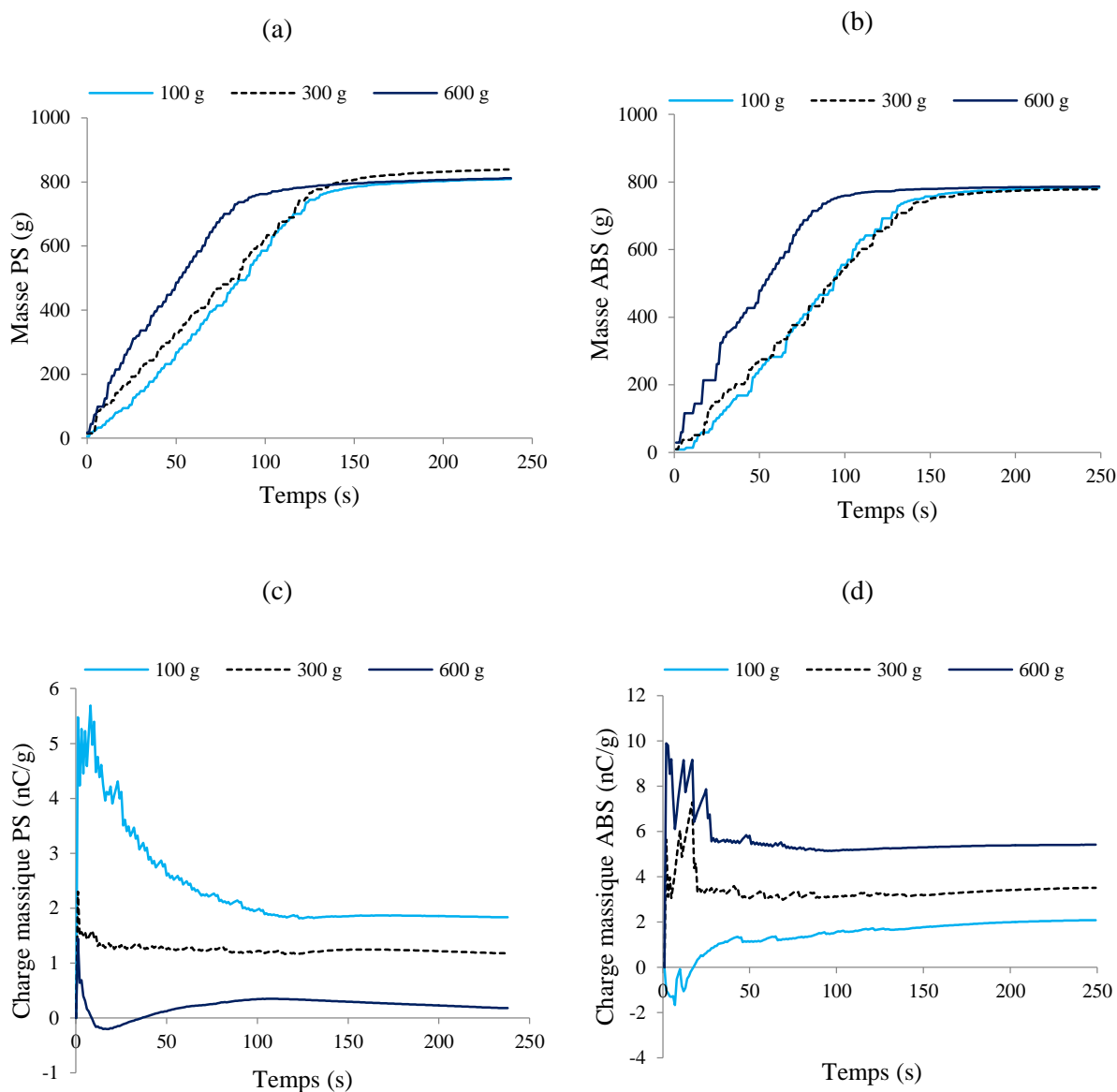


Figure V.6. Influence de la masse initiale dans la chambre de séparation sur la variation dans le temps de la masse collectée de PS (a) et d'ABS (b) ; et de la charge massique du PS (c) et de l'ABS (d) ($m = 1700 \text{ g}$, $v = 30 \text{ tr/min}$, $U = \pm 12 \text{ kV}$, $n = 7 \text{ m}^3/\text{h}$).

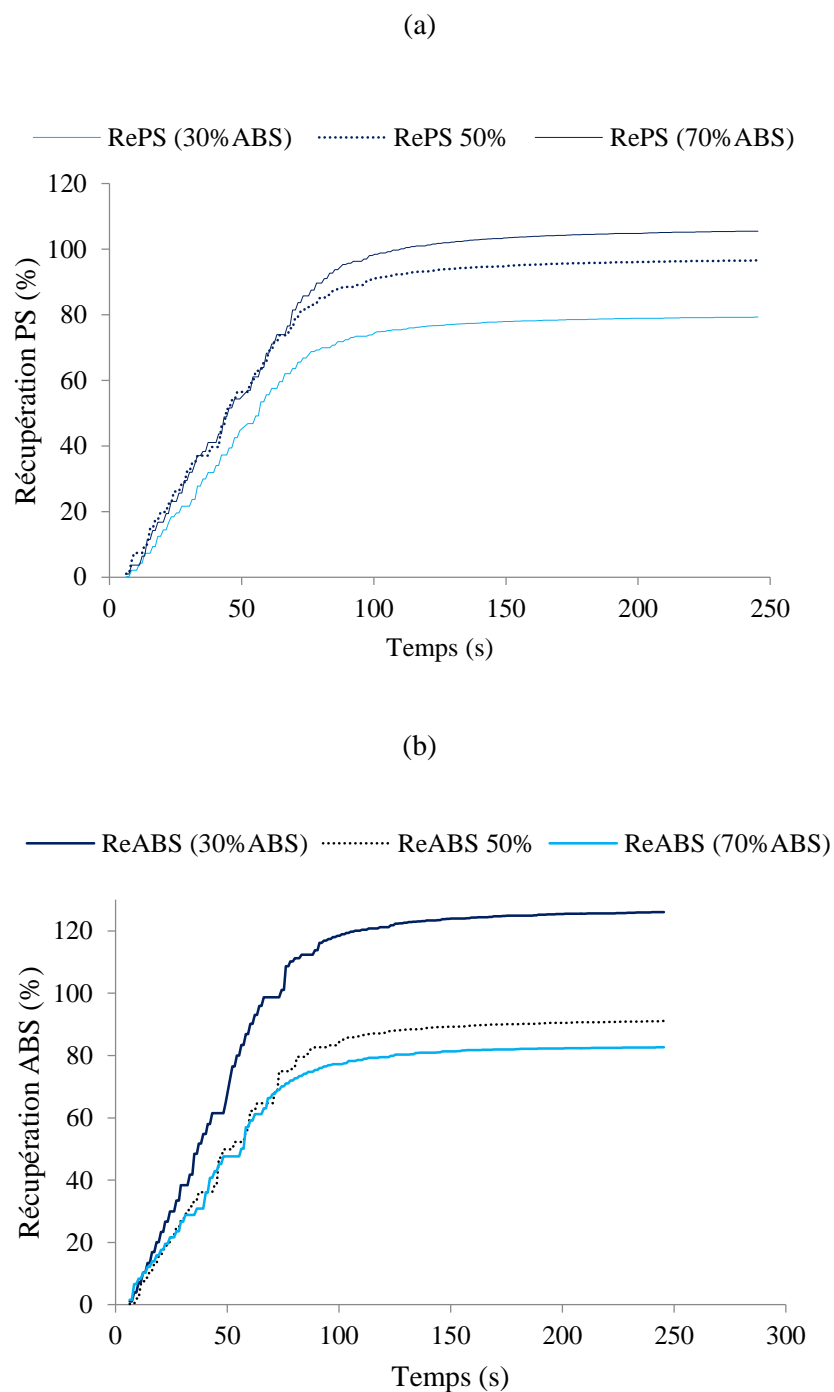


Figure V.7. Influence du ratio de mélange sur la récupération du PS pour $m = 1000$ g, $U = \pm 12$ kV, $v = 30$ tr/min, $n = 7$ m³/h.

Avec une masse initiale plus grande, le niveau supérieur du lit fluidisé est plus élevé. Par conséquent, les particules sont plus proches des disques collecteurs, 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.

Le débit d'air modifie l'aspect du lit fluidisé. Une étude plus poussée devrait être menée afin de déterminer la masse optimale dans la chambre en fonction de ce facteur.

La figure 8 présente les résultats de la séparation de plusieurs mélanges déséquilibrés de masse $m = 1000$ g. Les particules du produit minoritaire entrent rapidement en collision avec les particules antagonistes et se chargent plus facilement. Elles se trouvent alors très vite collectées, et sont récupérées à des taux très élevés. Cependant, la pureté du produit de la séparation est moindre. En effet, certaines particules du produit majoritaire peuvent porter des charges de même signe que le produit minoritaire, suite à des collisions répétées entre elles ou avec les parois de la chambre de séparation. Relativisons toutefois cette constatation dans la mesure où les puretés demeurent supérieures à 80 % pour le produits minoritaires et supérieures à 98 % pour le majoritaire mais avec une récupération qui dépasse à peine les 70%.

V.2 ETUDE DE L'EFFET LA TAILLE DES PARTICULES

Les performances de n'importe quelle méthode de séparation électrostatique sont liées au rapport entre les forces électriques et les forces de gravitation. Plus les granules sont petits et légers, plus ce rapport est élevé ce qui conduit donc à de meilleurs résultats de séparation. Malheureusement, le déchiquetage, le broyage et la micronisation des DEEE génèrent des mélanges granulaires caractérisés par une distribution hautement hétérogène des granulométries. Cette hétérogénéité affecte sévèrement l'efficacité de la séparation.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'effet de la granulométrie sur le tri sélectif de mélanges de polymères finement broyés dans un séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes-disques rotatives. L'étude est réalisée sur trois classes granulométriques de deux polymères représentatifs des DEEE: un Acrylonitrile Butadiène Styène (ABS) et un Polystyrène (PS). La variable de contrôle de processus considérée dans l'étude est le débit d'alimentation en produit.

V.2.1 Procédure expérimentale

Les expériences sont effectuées sur un mélange synthétique composé de 50% d'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et 50% de particules de polystyrène (PS) de taille 250 à 2000 micromètres (figure IV.1 du- chapitre IV), appartenant à l'une des classes de tailles :

- # 1: $x > 1000 \mu\text{m}$,
- # 2: $500 \mu\text{m} < x < 1000 \mu\text{m}$,
- # 3: $250 \mu\text{m} < x < 500 \mu\text{m}$.

x étant le diamètre moyen de la particule.

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques tournantes (Figure V.1) a été utilisé dans la présente étude, le mélange ABS/PS est introduit avec un débit d'alimentation contrôlé précisément dans la chambre de séparation par un vibro-transporteur (voir § V.1.1). La performance de ce séparateur est évaluée par la mise en place d'un système de mesure qui permet l'enregistrement continu et simultané des charges et des masses des produits séparés. Les conclusions de cette étude serviront à la conception optimale d'un séparateur électrostatique industriel pour le recyclage des plastiques micronisés à partir des DEEE.

Un ensemble de quatre expériences a été réalisé, à une distance constante entre les électrodes disques, $v = 40 \text{ tr/min}$, $t = 0 \text{ s}$, $n = 7,9 \text{ m}^3/\text{h}$, et $U = \pm 12 \text{ kV}$.

- Varier le débit d'alimentation en produit entre 3 g/s et 10 g/s pour la classe de taille #1 ($x > 1000 \mu\text{m}$), pour $m = 1200 \text{ g}$ (300 g masse initiale + 900 g sur la goulotte oscillante du vibro-transporteur).
- Varier le débit d'alimentation en produit entre 3 g/s et 8 g/s pour la classe de taille #2 ($500 \mu\text{m} < x < 1000 \mu\text{m}$), pour $m = 1200 \text{ g}$ (300 g masse initiale + 900 g sur la goulotte oscillante du vibro-transporteur).
- Varier le débit d'alimentation en produit entre 3 g/s et 8 g/s pour la classes de taille #3 ($250 \mu\text{m} < x < 500 \mu\text{m}$), pour $m = 1200 \text{ g}$ (300 g masse initiale + 900 g sur la goulotte oscillante du vibro-transporteur).
- Séparer un mélange composé de 33% de chacune des trois classes de tailles, pour un débit d'alimentation en produit de 6 g/s et une masse $m = 1500 \text{ g}$ (300 g masse initiale + 1200 g sur la goulotte oscillante du vibro-transporteur).

Toutes les expériences sont réalisées dans des conditions climatiques relativement stables: $RH = 33-41 \%$, $T^\circ = 20-23 \text{ }^\circ\text{C}$.

V.2.2 Résultats et discussions

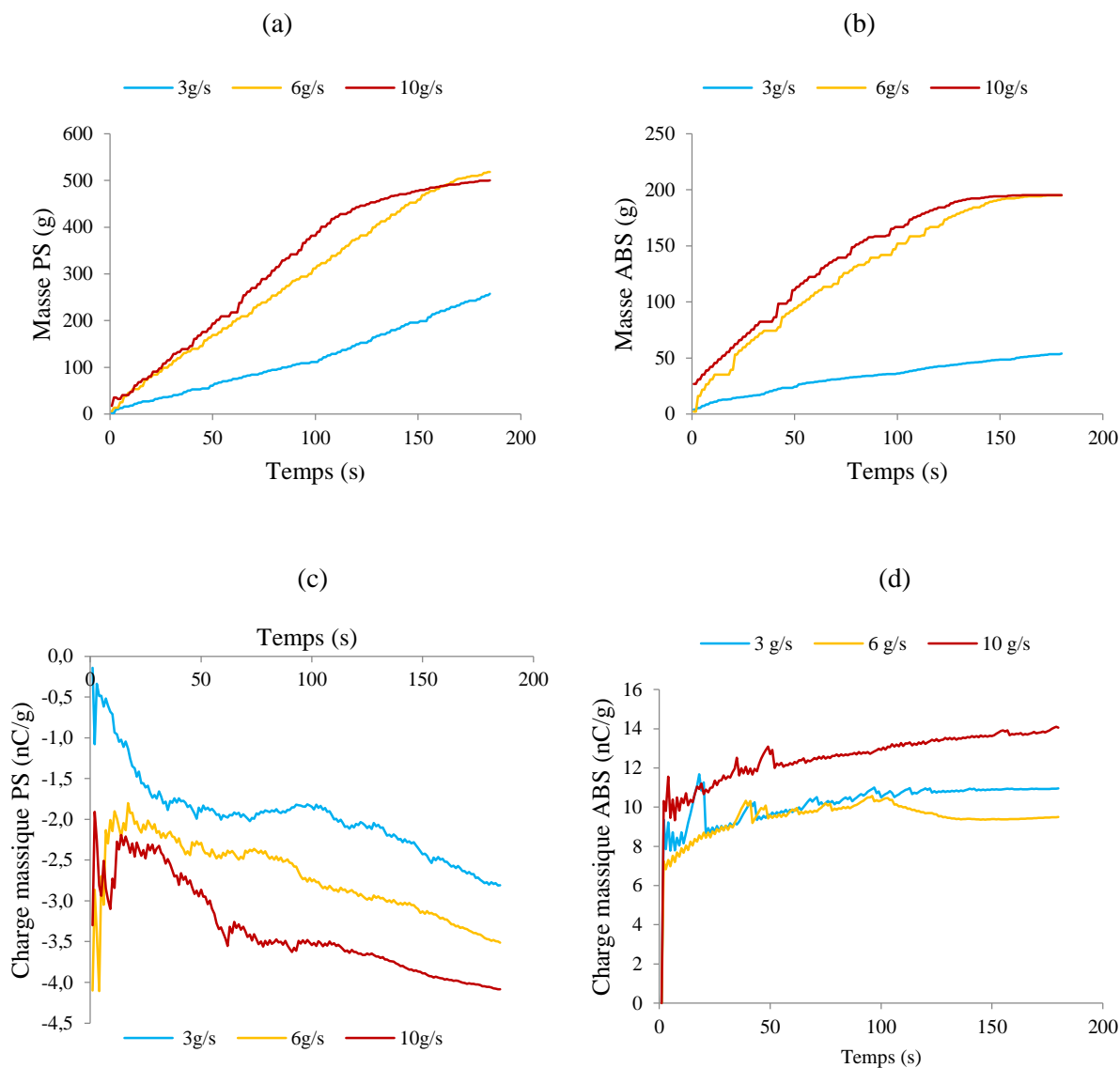


Figure V.8. Influence du débit d'alimentation en produit sur la variation dans le temps des masses collectées de PS (a) et d'ABS (b) ; et des charges massiques du PS (c) et de l'ABS (d).

Expérience effectuée pour la classe granulométrique #1 ($x > 1000 \mu\text{m}$).

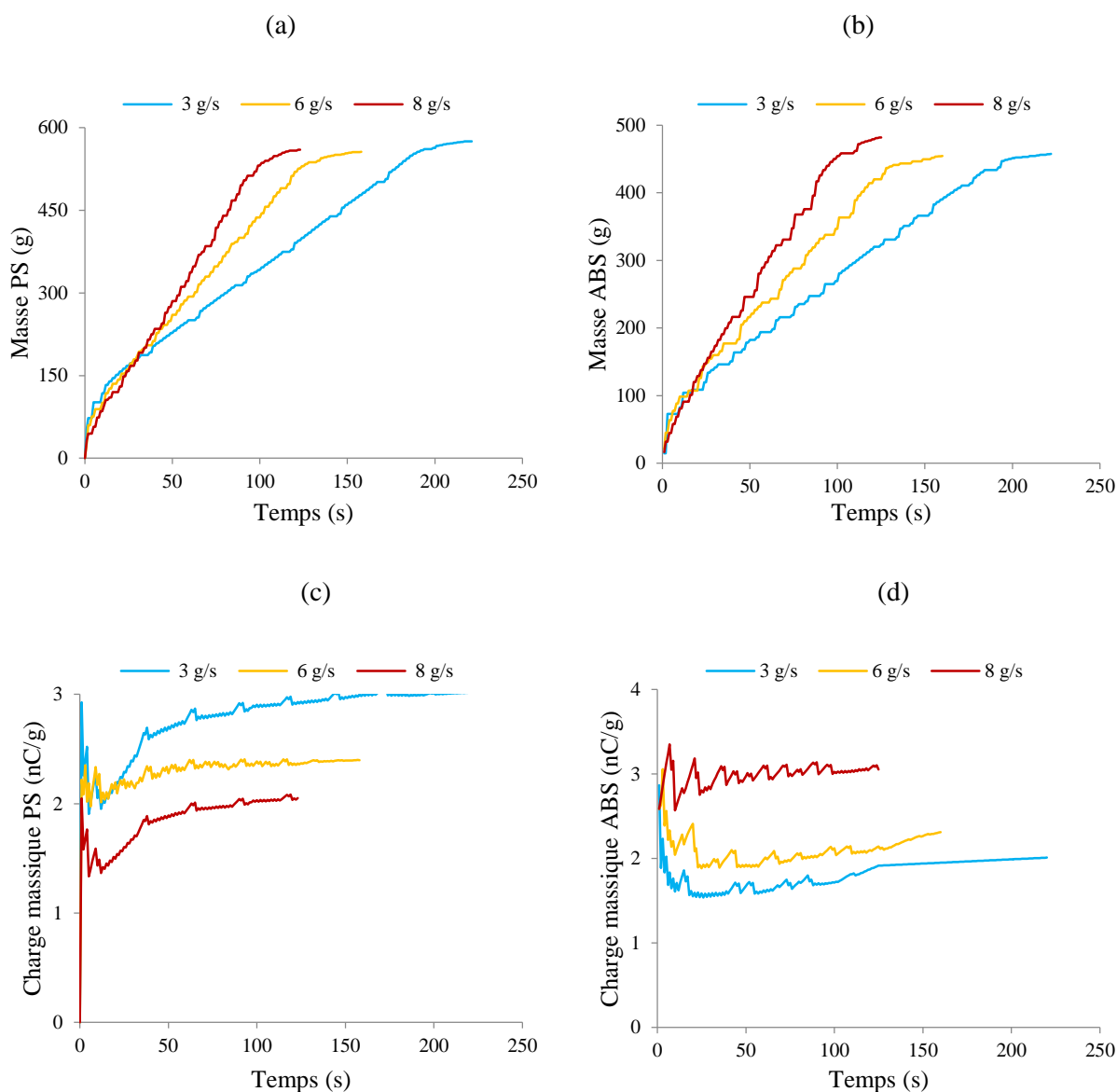


Figure V.9. Influence du débit d'alimentation en produit sur la variation dans le temps des masses collectées de PS (a) et d'ABS (b) ; et des charges massiques du PS (c) et de l'ABS (d).

Expérience effectuée pour la classe granulométrique #2 ($500 \mu\text{m} < x < 1000 \mu\text{m}$).

Les résultats de la première expérience sont représentés sur la Figure V.8. Ils dévoilent une grande différence entre les masses des particules d'ABS et de PS récupérées. Dans le cas des échantillons de la classe de taille #1, les granules de PS de forme plus plate (voir leur aspect sur la figure IV.1) sont plus facilement fixés à la surface des électrodes-disques tournantes et sont plus rapidement retirés du lit fluidisé, tandis que les particules d'ABS qui

ont des formes pointues sont difficilement fixées à la surface des électrodes-disques tournantes. (Figure V.8 a et b).

Les résultats de la figure V.8 montrent que l'augmentation du débit d'alimentation en produit accélère la séparation (figure V.8 a et b). Pour des débits d'alimentation supérieurs, le nombre des particules dans le lit fluidisé devient plus grand, augmentant ainsi le nombre de collisions entre les particules, d'où l'augmentation de la charge massique des particules avec celle du débit d'alimentation en produit (figure V.8 c et d).

Pour les particules de taille #2, l'augmentation du débit d'alimentation en matière accélère la séparation (figure V.9 a et b). Il y a une légère différence entre les masses des particules d'ABS et de de PS car les produits sont de tailles plus fines, ce qui diminue l'effet de la force de pesanteur, et donc les produits sont attachés plus facilement aux électrodes-disques.

Pour la charge massique, on remarque que l'augmentation du débit d'alimentation en produit fait augmenter la charge massique de l'ABS qui se charge plus positivement, et lePS qui se charge plus négativement (figure V.9 c et d). Les particules de PS qui sont chargées négativement, et donc attirées par l'électrode de polarité positive perdent leur charge au contact avec l'électrode et changent leur signe. Les particules d'ABS sont aussi plus influencées par ce phénomène, leurs charges massiques sont diminuées par rapport aux particules de taille #1, mais ne changent pas leur signe.

La figure V.10 affirme que l'augmentation du débit d'alimentation augmente la vitesse de séparation des particules d'ABS et de PS dans le cas des particules de classe de taille #3 (figure V.10 a et b). Les particules sont mieux chargées dans des débits d'alimentation élevés (figure V.10 c et d). Pour des débits d'alimentation élevés, les particules d'ABS chargées positivement ont des valeurs de charge massique plus positives à la fin de séparation ; tandis que les particules de PS chargées négativement ont des valeurs de charge massique plus négatives à la fin de séparation.

Les particules d'ABS et de PS de taille #3 perdent considérablement leurs charges par rapport aux particules de tailles supérieures (#1 et #2). Pour de grandes tailles (rayon plus grand), les nano-décharges provoquées par la pointe des électrodes disques touchent moins de surfaces des particules, situation pour laquelle et le phénomène de changement de signe

n'apparaît pas. Les particules de tailles inférieures (#2 et #3) ont un rayon plus faible, ce qui leur donne la possibilité d'être chargées par les nano-décharges provoquées par les pointes des disques (figure V.11 c et d).

La récupération est plus importante pour des particules plus fines, la force de pesanteur devient moins influente, et les surfaces chargées sont plus nombreuses (figure V.11 a et b).

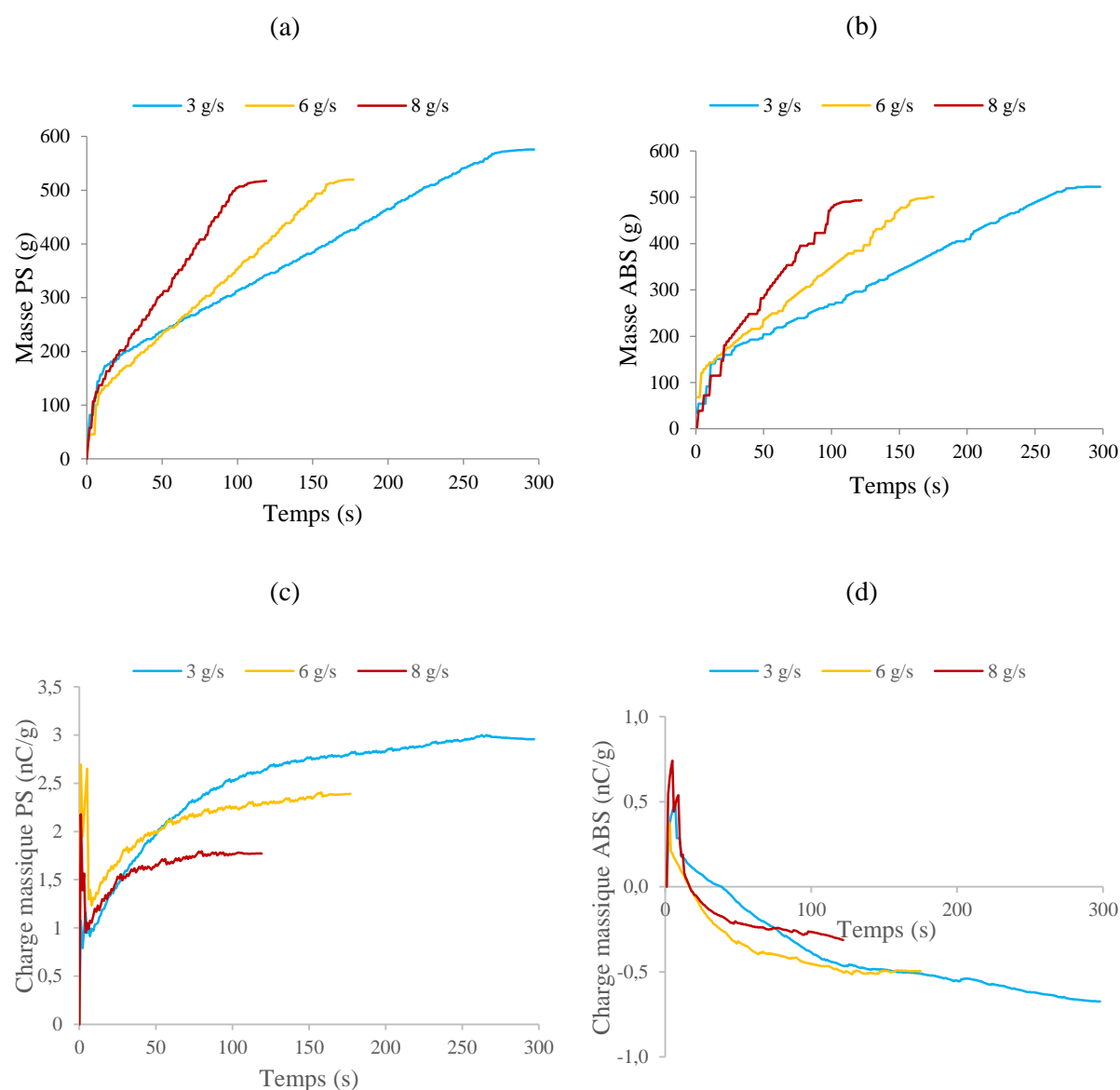


Figure V.10. Influence du débit d'alimentation en produit sur la variation dans le temps des masses collectées de PS (a) et d'ABS (b) ; et des charges massiques du PS (c) et de l'ABS (d).

Expérience effectuée pour la classe granulométrique #3 ($250 \mu\text{m} < x < 500 \mu\text{m}$).

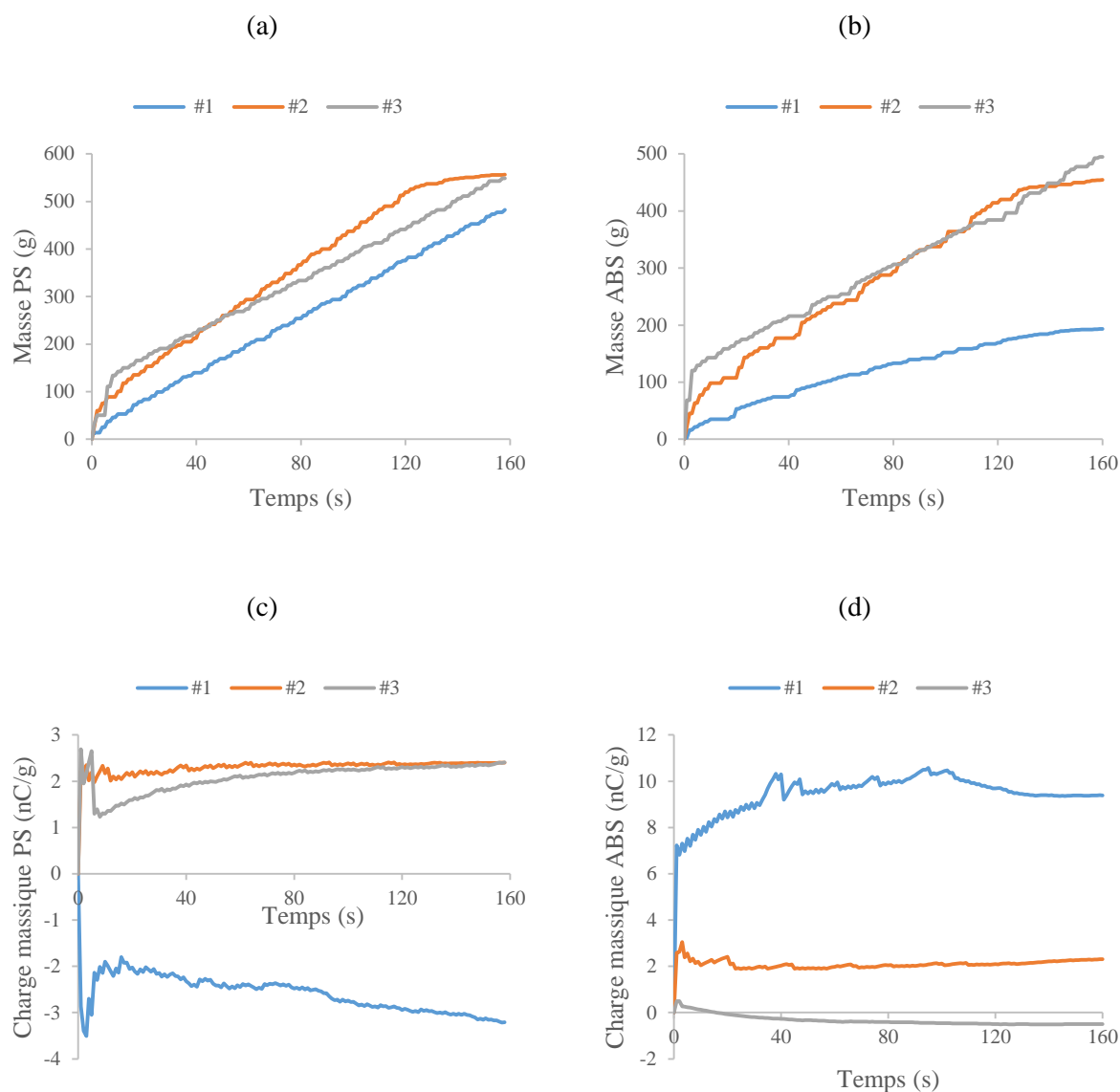


Figure V.11. Influence de la taille des particules sur la variation dans le temps des masses collectées du PS (a) et de l'ABS (b) ; et des charges massiques du PS (c) et de l'ABS (d). Expérience effectuée pour un débit de 6 g/s.

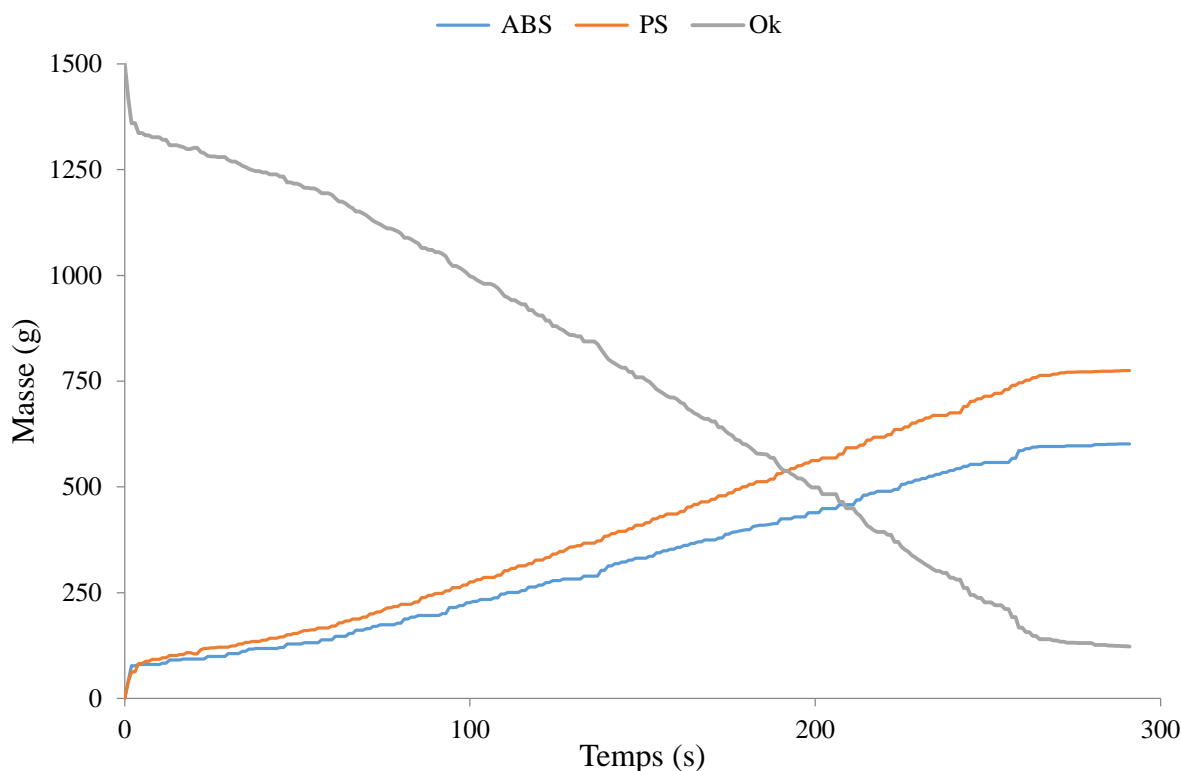


Figure IV.12. Variation des masses de PS et d'ABS collectées par les électrodes-disques, ainsi que celles des granules restés dans la chambre de fluidisation (désignée comme "Ok" dans le graphe), en fonction du temps, pour un mélange de 50% d'ABS et de 50% de PS composé de 33% de chacune des trois classes de tailles, à un débit d'alimentation de 6 g/s.

Les résultats de la dernière expérience, réalisée avec un mélange granulaire de 50% d'ABS et de 50% de PS constitué de 33% de chacune des trois classes de tailles, en régime de fonctionnement continu, sont représentés sur la Figure IV.12. Comparé à la séparation faite en régime offline ou la séparation était médiocre, la séparation en régime continu est bonne, plus de 90% de la masse introduite est récupéré, il ne reste dans le lit fluidisé qu'environ 10% de la masse totale introduite. La grande partie des granules grosses est suffisamment chargée, car le nombre des collisions pour ce type de taille est plus grand par rapport aux résultats de l'expérience en régime offline. L'analyse des granules dans les deux collecteurs (Figure IV.13) a montré que 36,14% de la masse du produit PS était représentée par des granules dans la classe de taille # 3 et 33,9% par la classe de taille # 2, tandis que les particules de la classe de taille #1 représentaient le plus petit pourcentage (29,96%) de la masse totale du PS.

De même, les masses des granules d'ABS des classes de tailles #3 et #2 représentent respectivement 38,55% et 36,98% du produit recueilli à l'électrode négative, tandis que les

particules de la classe granulométrique #1 sont un peu moins représentés dans le collecteur (24.47%). Ces résultats confirment l'observation précédente concernant la difficulté de séparer les granules d'ABS de taille # 1, par rapport aux granules de PS plus lisses.

La majeure partie de la masse restante dans le lit fluidisé (80,4 %) était composée de granules de classe de taille #1 ($x > 1000 \mu\text{m}$). La non-homogénéité granulométrique des granules qui composent le mélange à séparer risque de ne pas donner une bonne séparation tribo-aéro-électrostatique pour un fonctionnement en continu.

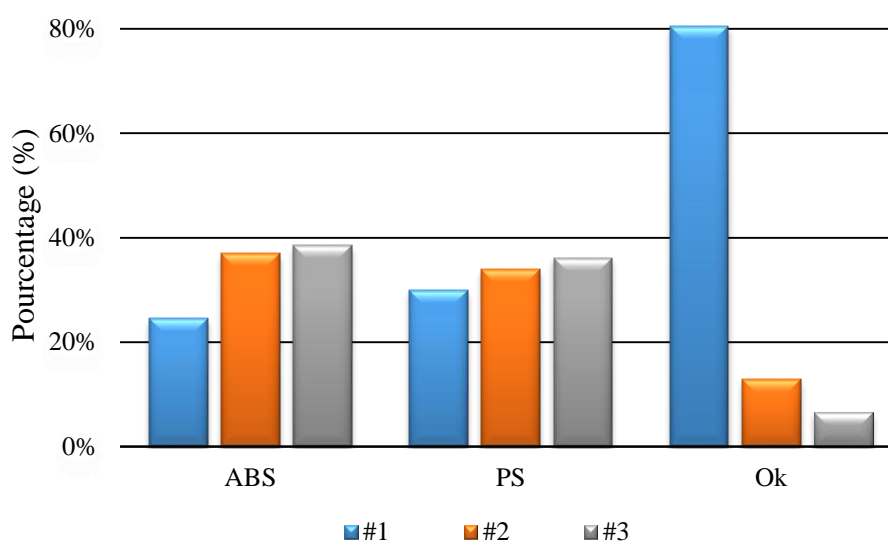


Figure IV.18. Analyse de la granulométrie des produits dans chaque bac collecteur de PS et d'ABS, ainsi que de ceux qui sont restés dans la chambre de fluidisation (désignée comme "Ok" dans le graphe).

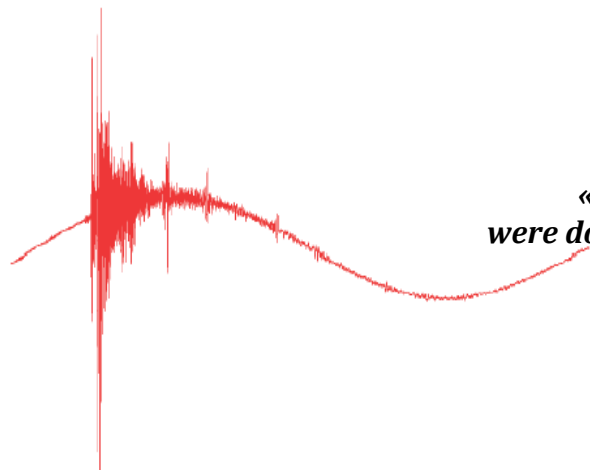
V.3 CONCLUSIONS :

1. Les essais d'un modèle de laboratoire du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disque tournantes ont prouvé l'efficacité de ce dispositif pour le traitement des mélanges des plastiques micronisés, en régime de fonctionnement continu. Ces résultats sont encourageants pour le développement d'un séparateur industriel, avec application au recyclage des DEEE
2. Le débit de matière élevée augmente les conditions de charge des particules, ce qui influence positivement sur la vitesse de séparation des particules et favorise le fonctionnement en

continu par rapport le fonctionnement offline du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques.

3. La non-homogénéité du mélange binaire à séparer diminue la pureté du produit minoritaire, tandis que le produit majoritaire est collecté avec de moindres taux de récupération mais avec des puretés très élevées (< 98%).
4. La séparation est meilleure pour les matériaux plus finement broyés (classes de tailles # 2: $500 \mu\text{m} < x < 1000 \mu\text{m}$, et # 3: $250 \mu\text{m} < x < 500 \mu\text{m}$). Néanmoins, le séparateur tribo-aéro-électrostatique peut également traiter, avec des efficacités inférieures, des mélanges de matières plastiques granulaires de taille millimétrique.
5. Le phénomène de changement de charge en contact avec les électrodes se produit plus facilement pour des mélanges de matériaux finement broyés ou poudreux, à cause de leur rayon plus faible qui peut être soumis facilement à des décharges électriques provoquées par les extrémités des électrodes- disques.
6. Le séparateur tribo-aéro-électrostatique peut également traiter, en régime de fonctionnement continu, des mélanges de matières plastiques caractérisés par une distribution granulométrique non hétérogène avec des efficacités supérieures à celles obtenues en régime offline. Le nombre des collisions élevées assuré dans ce régime de fonctionnement favorise un meilleur chargement des particules de taille plus grosse

CONCLUSION GENERALE



***«If we knew what it was we
were doing, it would not be called
research, would it?»***

Albert Einstein

CONCLUSION GENERALE

La séparation tribo-électrostatique des matériaux granulaires représente une bonne solution innovante pour le recyclage des matériaux plastiques provenant des DEEE. Les procédés de broyage des DEEE plastiques engendrent entre 15% et 25% de matériaux plastiques poudreux, dont le recyclage et la récupération nécessitent la recherche et le développement de nouvelles techniques de séparation physique, basées sur une meilleure compréhension de la triboélectrisation de ce type de particules isolantes. La thèse de doctorat résume l'état de l'art dans le domaine de la séparation tribo-électrostatique. Elle présente les installations de chargement et de séparation construites ou améliorées, ainsi que les résultats obtenus avec ces équipements, les modèles expérimentaux des procédés de séparation obtenus avec la méthode des plans d'expériences et avec les techniques de l'acquisition des données en temps réel.

La conclusion générale de ces travaux peut être formulée ainsi : l'association d'un dispositif de charge triboélectrique à lit fluidisé avec la séparation en champs électrostatique est un procédé efficace de séparation des matériaux isolants poudreux, en assurant un contrôle efficace des forces agissant sur les particules fines et de leurs trajectoires dans le mécanisme de séparation.

a. Les principales contributions originales

1. Identification des problèmes scientifiques et techniques à résoudre dans le domaine de la séparation tribo électrostatique des mélanges de matériaux poudreux isolants provenant des DEEE.
2. Conception, fabrication et mise en œuvre d'un chargeur triboélectrique de type hélice au sein du l'Institut Pprime - IUT d'Angoulême, pour étudier le chargement des particules isolantes provenant des DEEE et caractérisées par différentes tailles.
3. Evaluation des facteurs influent du processus de charge triboélectrique des matériaux granulaires et poudreux dans l'installation de chargement triboélectrique de type hélice.

4. Etude des phénomènes triboélectriques, ainsi que les particularités liées aux mouvements des matériaux poudreux isolants dans le dispositif de chargement triboélectrique.
5. Etude de la séparation tribo-aéro-électrostatique des mélanges de matériaux poudreux isolants sur deux nouvelles installations expérimentales ; la première est le séparateur TAE à deux électrodes cylindriques réalisé au sein du laboratoire IRECOM de l'Université de Sidi Bel-Abbés ; la seconde est le séparateur TAE à deux électrodes disques rotatives réalisée par l'équipe de Electrostatique Appliquée de l'Institut Pprime, à l'IUT d'Angoulême.
6. Modélisation du processus de séparation tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques pour un mélange binaire de matériaux poudreux isolants PVC / uPVC à l'aide de la méthodologie des plans d'expériences ; et puis optimisation du procédé de séparation en utilisant le logiciel MODDE 5.0.
7. Amélioration d'un système d'acquisition des données pour la mesure simultanée de la charge et de la masse des produits récupérés.
8. Etude des facteurs influents sur le chargement triboélectrique et la collecte et des particules isolantes fines dans le séparateur TAE à deux électrodes disques rotatives.
9. Etude de l'influence de la taille des particules isolantes, ainsi que les phénomènes physiques qui se produisent dans la séparation d'un mélange ABS / PS en poudre dans le séparateur TAE à deux électrodes disques rotatives.
10. Etude préliminaire du séparateur TAE à deux électrodes disques rotatives en régime continu, en tenant compte de plusieurs paramètres, afin de développer ce type de séparateur pour l'industrie de recyclage des plastiques.

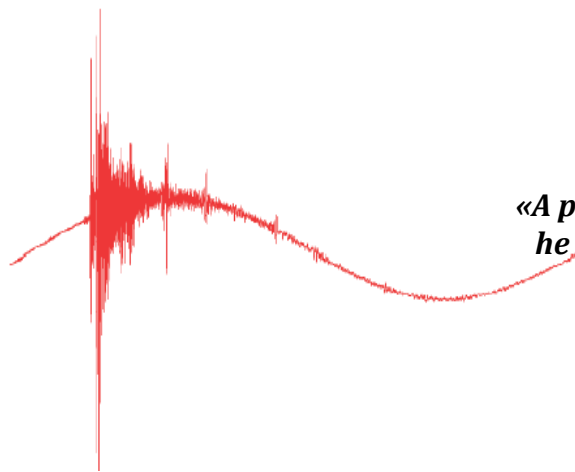
b. Perspectives en recherche

La thèse ouvre des perspectives sur des nouveaux problèmes de recherche dans les domaines de la séparation électrostatique et le chargement triboélectrique des matériaux plastiques poudreux provenant des DEEE

1. Amélioration du chargeur triboélectrique de type hélice, en utilisant plusieurs types de parois, et modélisation numérique du fonctionnement de ce dispositif.

2. Amélioration du séparateur TAE à deux électrodes cylindriques, et étude de la séparation des mélanges diversifiés en vue de son développement pour un contexte industriel.
3. Etude du phénomène de changement de signe lors de l'application des hautes tensions importantes aux électrodes-disques dans le séparateur TAE à deux disques rotatifs, et la possibilité de neutralisation des particules simultanément avec le processus de séparation. Il s'agit d'un sujet scientifique d'intérêt majeur pour comprendre les mécanismes physiques qui gouvernent ce comportement qui se manifeste initialement par un changement de signe.
4. Modélisation numérique des processus de séparation TAE en tenant compte l'ensemble des phénomènes physiques en jeu.
5. Modélisation expérimentale du séparateur TAE à deux électrodes disques rotatives en tenant compte de la charge électrique ainsi que des masses des produits récupérés.

REFERENCES ***BIBLIOGRAPHIQUE***



***«A person starts to live when
he can live outside himself»***

Albert Einstein

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] X.N. Yang, L.S. Sun, J. Xiang, S. Hu, and S. Su, “pyrolysis and dehalogenation of plastics from waste electrical and electronic equipment (weee): A review,” *Waste Management*, vol. 33, pp. 462-473, Feb. 2013.
- [2] R. Taurino, P. Pozzi, and T. Zanasi, “facile characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (weee) for mechanical recycling,” *Waste Management*, vol. 30, pp. 2601-2607, Dec. 2010.
- [3] M. Riess, T. Ernst, R. Popp, B.M Muller, H. Thoma, O. Vierle, M. Wolf, and R. van Eldik, “analysis of flame retarded polymers and recycling materials,” *Chemosphere*, vol. 40, pp. 937-941, May.-Jun. 2000.
- [4] Y. Li, J. Li, and L. Wang “recycling of PBDEs containing plastics from waste electrical and electronic equipment (weee): a review,” IEEE 10th Int. Conf. e-Bus Eng. (ICEBE), 2013 © IEEE. Doi: 10.1109/ICEBE.2013.62
- [5] S. D. Achilias, and E. V. Antonakou, ”chemical and thermochemical recycling of polymers from waste electrical and electronic equipment,” In *Recycling Materials Based on Environmentally Friendly Techniques* , Publisher: InTech, July 15, 2015.
- [6] M. 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.
- [7] M. Miloudi, L. Dascalescu, L. Jia, K. Medles, and 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.
- [8] 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.

- [9] 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. Tech.*, vol. 34, pp. 45-54, 2016.
- [10] J. Li, G. Wu, and Z. Xu, “tribo-charging properties of waste plastic in process of tribo electrostatic separation,” *Waste Manag.*, vol. 35, pp. 36–41, 2015.
- [11] A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S. Bendilerad, M. Miloudi, and K. Medles, “experimental investigation of electrostatic separators of plastic particles using different charging devices,” *Separation Sci. and Tech.*, vol. 49, pp. 464-468, 2014.
- [12] 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.
- [13] J. Sibakov, J. Abecassis, C. Barron, and K. Poutanen, “electrostatic separation combined with ultra-fine grinding to produce B-glucan enriched ingredients from oat bran.” *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 26, pp. 445-455, 2014.
- [14] J. Wang, M. D. Wit, R. M. Boom, and 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.
- [15] F. Cangialosi, M. Notarnicola, L. Liberti, and 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.
- [16] S. Messal, T. Zegloul, **A. Mekhalef Benhafssa**, and L. Dascalescu. “sorting of finely-grinded granular mixtures using a belt-type corona-electrostatic separator,” *Conf. Rec. IEEE/IAS Annual Meeting*, Dallas, October 18-22 2015.
- [17] A. Tilmatine, A. Benabboun, Y. Brahami, 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.

- [18] 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.
- [19] Brown, J.D. “an industrial electrostatic separation process,” *TECH talk*. 2(1), 1998
- [20] *** Association of Plastics Manufactures in Europe. (2000) *Insight into consumption and recovery*. Western Europe 2000”.
- [21] J.E. Lawver, and W.P. Dyrenforth, “electrostatic separation. In: electrostatics and Its applications,” *John Wiley&Sons*, New York, 1973
- [22] L.H. Lee, “dual mechanism for metal polymer contact electrification,” *Journal of Electrostatics*, Vol. 32, n° 1, p. 01-29, 1994.
- [23] 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.
- [24] O.C. Ralston, “electrostatic separation of mixt granular solids,” *Amsterdam, Elsevier*, pp.162-172. 1961
- [25] *** American Plastics Council. (2000). *Plastics from residential electronics recycling*. The report analyzes the types of plastics found in consumer electronics and the current technologies available to recycle these plastics.2000.
- [26] *** HG 448/2005 *Waste Electric and Electronic Equipment*. Romanian Government Decision. 2005.
- [27] I.I. Inculet, G.S.P. Castle, and J.D. Brown, “electrostatic separation of plastics for recycling,” *Particulate Science and Technology*, vol. 16 (1), p. 91-100, 1998.
- [28] K. Medles, L. Dascalescu, A. Tilmatine, A. Bendaoud, and M. Younes, “experimental modeling of the electrostatic separation of granular materials,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 25 (2), p. 163-171, 2007.
- [29] 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 (3), p. 618–626, 2007.

- [30] 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 Manage*, Vol. 9 (29), p. 228–232, 2009.
- [31] Welslau G, Kraus HH (1998) Directorate-general for research division for the environment, energy and research, STOA, DOC_EN\DV\353\353364
- [32] Waste electrical and electronic equipment.
http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_waselee
- [33] E. Dimitrakakis, A. Janz, B. Bilitewski, and E. Gidakos “small weee: determining recyclables and hazardous substances in plastics” *J Hazard Mater*, vol. 161, pp. 913–919, 2009.
- [34] Wager P, Boni H, Buser A, Morf L, Schluep M, and Streicher M (2009) recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment (weee)—tentative results of a Swiss study. http://ewasteguide.info/files/Waeger_2009_R'09.pdf
- [35] A. Buekens, and J. Yang, “recycling of weee plastics: A review”. *The Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 16 (3), pp. 415–434, 2014.
- [36] F. Mark, “the characteristics of plastic-rich waste streams from end-of-life electrical and electronic equipment,” *Plastics Europe*, Brussels, 2006.
- [37] *Plastic waste in the environment, European Commission DG ENV, April 2011*
- [38] J. Cui, and E. Forssberg, “mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review,” *J. Hazard Mater.*, vol. 99(3), pp. 243–263, 2003
- [39] S. Zhang, and E. Forssberg, “intelligent liberation and classification of electronic scrap,” *Powder Technol.*, Vol. 105, pp. 295–301, 1999.
- [40] H. Shent, RJ. Pugh, and E. Forssberg “a review of plastics waste recycling and the flotation of plastics,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 25(2), pp. 85–109, 1999.
- [41] L. Tange, J.A. Houwelingen, W. Hofland, and P. Salémis “recycling of plastics with flame retardants of electronic waste, a technical and environmental challenge for a sustainable solution,” EGG2012 Berlin EFRA REWARD, recycling brominated plastics, 2012.

- [42] A. Buekens, and X.J. Zhou, “recycling plastics from automotive shredder residues: a review,” *Journal of material cycles and waste management*, vol. 16(3), pp. 398–414, July 2014.
- [43] I.C. Nnorom, and O. Osibanjo, “overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 52, pp. 843–858, 2008
- [44] J. Ebert, and M. Bahadir, “formation of PBDD/F from flameretarded plastic materials under thermal stress” *Environ. Int.*, vol. 29(6), pp. 711–716, 2003.
- [45] M. Schlummer, L. Gruber, A. Ma’urer, G. Wolz, and R. Eldik, “characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (weee) and implications for waste management,” *Chemosphere*, vol. 67(9), pp. 1866–1876, 2007
- [46] R. Weber, and B. Kuch, “relevance of BFRs and thermal conditions on the formation pathways of brominated and brominated-chlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans,” *Environ. Int.*, vol. 29(6), pp. 699–710, 2003.
- [47] G.B. Liu, H.Y Zhao, and T. Thiemann, “Zn dust mediated reductive debromination of tetrabromobisphenol A (TBBPA),” *J. Hazard Mater.*, vol. 169, pp. 1150–1153, 2009.
- [48] S. Das, A. Samuila, C. Dragan, and L. Dascalescu, “behaviour of charges insulating particles in contact with a rotating roll electrode,” In: *Journal of Electrostatics*, vol. 69, pp. 189-192, 2009.
- [49] L. Dascalescu, A. Samuila, S. Das, C. Dragan, K. Medles, and M. Gauthier, “étude expérimentale des procédés de séparation électrostatiques en vue de leur utilisation au recyclage des matières plastiques présentes dans les déchets électriques et électroniques”, Contrat WKO 730/2006, Bénéficiaire : APR2
- [50] C. Dragan, “modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéro-électrostatique des matériaux plastiques granulaires,” Thèse Doctorat, Univ. Poitiers, 2010
- [51] G. Touchard, A. Zergouni, S. Watanabe, and J. Borzeix, “evolution de la charge électrique d’une particule heurtant une paroi solide” In: *Journal of Physics III*, France, vol. 1, pp. 1233-1241, 1991.
- [52] C. Liu, and A.J. Bard, “electrons on dielectrics and contact electrification”. In: *Chemical Physics Letter*, vol. 480, issues 4-6, pp. 145-156, 2009.

- [53] L.S. McCarty, and G.M. Whitesides, “electrostatic charge due to separation of ions at interfaces: Contact electrification of ionic electrets”. In: *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47, pp. 2188, 2008.
- [54] L.B. Schein, and G.S.P. Castle, “triboelectricity”. In: *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. John G. Webster (Editor). 22, 574-585
- [55] O. Knoblauch, *Physical Chemistry*, vol. 39, pp. 225, 1902.
- [56] A.F. Diaz, “contact electrification of materials: The chemistry of ions on polymer surfaces,” In: *The Journal of Adhesion*, vol. 67, pp. 111, 1998.
- [57] I. Holme, J.E. McIntyre, and Z.J. Shen “electrostatic charging of textiles” *The Textile Institute*, Vol.1, pp. 28, 1998.
- [58] Sanford. “Phys. Rev”, N° 12, pp. 130, 1918.
- [59] Shaw. “Proc. Roy. Soc”, N° 94, pp. 16, 1917.
- [60] 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, Oct.1, 2010.
- [61] 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.
- [62] A. Benabboun, A. Tilmatine, K. Medles, M. Miloudi, and L. Dascalescu, “étude expérimentale des procédés d’acquisition de charge triboélectrique pour séparateurs électrostatiques de particules de déchets en plastique” *Conférence Francophone sur l’Eco-conception en Génie Electrique (Confrege 2012)*, Montréal Canada, 28-30 Mai 2012.
- [63] Y. Higashiyama and K. Asano, “recent progress in electrostatic separation technology,” *particulate science and technology*, vol. 16(1), pp.77-90, 1998.
- [64] M. Blajan, A. Samuila, V. Neamtu, R. Beleca, L. Caliap, D. Vadan, A. Iuga, and L. Dascalescu, “experimental modeling of particle electrification in vibrated zigzag shaped metallic tubes”. In: *Proceedings of ESA/IEJ/IEEE-IAS/SFE Joint Conference on Electrostatics*, University of California, and Berkeley. California, pp. 538-543, 2006. ISBN-0-7803-9209-4

- [65] L. Dascalescu, A. Urs, S. Bente, M. Huzau, and A. Samuila, “charging of mm-size insulating particles in vibratory devices”. In: *Journal of Electrostatics*, vol. 63, pp. 705-710, 2005.
- [66] Y. Higashiyama, Y. Ujiie, and K. Asano. “triboelectrification of plastic particles on vibrating feeder laminated with a plastic film”. In: *Journal of Electrostatics*, vol. 42, pp. 63-68, 1997.
- [67] G. Buda, M. Bilici, A. Samuila, and L. Dascalescu, “experimental study of the tribocharging proces of plastic garnular materials on a vibratory feeder device,” *IEEE Trans. Diel. Elect. Insul.*, vol. 20, pp. 1489-1496, 2013.
- [68] 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.
- [69] 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 Transactions of Industry Applications*, vol. 49, pp. 1113-1118, 2013.
- [70] H.C. Hamaker, “the London-van der Waals attraction between spherical particles”, *Physica*, vol. 4, pp. 1058, 1937.
- [71] Marc Séguin, Julie Descheneau, and Benjamin Tardif, “ondes et physique moderne,” *Physique XXI*, Tome C, 2010.
- [72] M. Miloudi, K. Medles, W. Aksa, A. Tilmatine, M. Brahami et L. Dascalescu, « association et optimisation de deux nouveaux procédés de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique pour les particules isolantes, » *Ajot Algerian journal of technologie*, 8 éme conférence nationale sur la haute tension CNHT, pp. 276-281, 2011.
- [73] M. Miloudi, «application de la charge par effet triboélectrique des matériaux granulaires à la séparation électrostatique», Thèse Doctorat, Univ. SBA, 2012
- [74] 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,” In: *IEEE Transactions on Industries Aplications*, vol. 44 (4), pp. 1045-1051, 2008.

- [75] L. Calin, A. Mihalcioiu, S. Das, V. Neamtu, C. Dragan, L. Dascalescu, and A. Iuga, "controlling particle trajectories in free-fall separators," In: *IEEE Transactions on Industries Applications*, vol. 44 (4), pp. 1038-1044, 2008.
- [76] L. Calin, C. Dragan, A. Iuga, A. Samuila, and L. Dascalescu, "influence of the air humidity and temperature on fluidised bed triboelectrostatic separation," *MmdE-2008&ROMSC-2008 Conference* at "Politehnica" University of Bucharest, 16-18 June, 2008.
- [77] *** Hamos GmbH, Penzberg, Germany. Bulletin KWS-D-1 10/98, 1998.
- [78] *** HG 448/2005 on waste electric and electronic equipment. Romanian Government Decision.
- [79] R. Köhnelchner, "electrostatic separation of mixed plastics". Hamos GmbH, Penzberg, Germany. www.hamos.com.
- [80] R. Kohnlechner, and L. Dascalescu, "new applications for standard electrostatic separators". In: *IEEE Industry Applications Society 40th Annual Meeting*, 2-6 Oct. 2005, Hong Kong. Conference Record, vol. 4, pp. 2569-2572, 2005.
- [81] ***Carpco Inc., Jacksonville, USA. "carpco application sheet. Rejection of PVC from PET flake using the Carpco V-STAT separator". In: Bulletin No. 97713.
- [82] *** Carpco Inc., Jacksonville, USA. "the solution to separation," Tehnical Information Bulletin, 1997.
- [83] L. Dascalescu, T. Zeghloul, and A. Iuga, In *WEEE Recycling. Reserch, Development, and Policies* (A. Chagnes, G. Cote, E. Ekberg, M. Nilsson, T. Retegan, Eds), Elsevier, Amsterdam, pp. 53-74, 2016.
- [84] L. Calin, and L. Dascalescu, "method for electrostaticly separating a granular mixture made of different materials, and device for implementing same." *Patent* FR2943561/2009, WO2010109096/2010, 2009.
- [85] 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.
- [86] J. Li, and L. Dascalescu, "newly-patented technical solutions for improving the tribo-electrostatic separation of mixed granular solids," *Recent Pat. Eng.*, vol. 6, pp. 104-115, 2012.

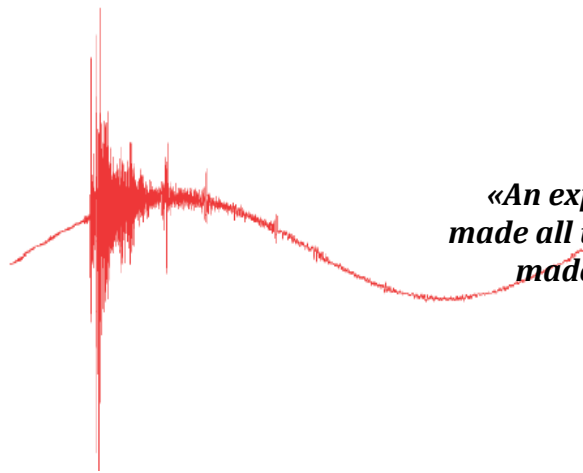
-
- [87] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, and A. Samuila, “tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices,” *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, vol. 18, pp. 1476-1483, 2011.
- [88] M. Bilici, L. Dascalescu, T. György, V. Barna, F. Rahou, and A. Samuila, “experimental modelling of the tribo-aero-electrostatic separation of mixed granular solids,” *Conf. Rec. 2011 IEEE/IAS Ann. Meet*, Orlando, FL. DOI: 10.1109/IAS.2011.6074273.
- [89] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, “experimental study of the optimum operating conditions of a pilote-scale tribo-aero-electrostatic separator of mixed granular solids,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, pp. 699-706, 2013.
- [90] M. Miloudi, L. Dascalescu, L. Jia, S. El-Mossoues, and K. Medles, “Tribo-aero-electrostatic separator for coarse granular insulating materials,” *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, vol. 20, pp. 1510-1515, 2013.
- [91] M. Miloudi, K. Medles, A. Bendaoud, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, “improvement of the industrial pilot of a tribo-aero-electrostatic separator for binary mixtures of granular insulating materials,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, pp. 3479-3484, 2015.
- [92] G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki, and T. Fujita, “triboelectrostatic separation of ABS, PS and PP plastic mixture,” *Mater. Trans.*, vol. 44, pp. 161–166, 2003.
- [93] C.H. Park, H.S. Jeon, H.S. Yu, O.H. Han, and J.K. Park, “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.
- [94] G. Wu, J. Li, and Z. Xu, “triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review,” *Waste Manag.*, vol. 33, pp. 585–597, 2013.
- [95] M. Rezoug, R. Ouiddir, W. Aksa, K. Medles, M. Bilici, and L. Dascalescu, “tribo-aero-electrostatic separator for ternary mixtures of granular plastics,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, pp. 1161-1167, 2015.
- [96] W. Akssa, «Réalisation et étude d’un séparateur aérodynamique semi industriel pour la récupération des particules isolantes», Thèse Doctorat, Univ. SBA, 2014.
- [97] M. Rezoug, «Contribution à l’étude de la neutralisation des charges électrique dans les particules isolantes», Thèse Doctorat, Univ. SBA, 2015

-
- [98] 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.
- [99] 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,” *Electrostatics’2015*, Southampton, UK, 2015.
- [100] S. Messal, T. Zeghloul, **A. Mekhalef Benhafssa**, and L. Dascalescu, « belt-type corona electrostatic separator for the recovery of conductive and non-conductive products from micronized wastes,» *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Early access DOI: 10.1109/TIA.2016.2622684, October 2016.
- [101] S. Messal, **A. Mekhalef Benhafssa**, C. Mayer-Laigle, X. Rouau, and L. Dascalescu, «séparation électrostatique des matières végétales finement divisées» *10^{ème} conférence de la Société française d’électrostatique (SFE)*, Poitiers, France, Aout 29-31, 2016
- [102] C. Barron, J. Abécassis, M. Chaurand, V. Lullien-Pellerin, F. Mabile, X. Rouau, A. Sadouï, et M.F. Samson, « accès à des molécules d’intérêt par fractionnement par voie sèche,» *Innovations Agronomiques*, vol. 19, pp. 51-62, 2012.
- [103] Y. Brahami, A. Tilmatine, S. Bendimerad, M. Miloudi, M. E-M. Zelmat, and L. Dascalescu, “tribo-aero-electrostatic separation of micronized mixtures of insulating materials using “back-and-forth” moving vertical electrodes,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 23, pp. 699–704, 2016.
- [104] A. Benabboun, «contribution à l’étude de la séparation des particules fines pour application dans l’industrie de recyclage», Thèse Doctorat, Univ. SBA, juin 2016.
- [105] **A. Mekhalef Benhafssa**, S. Messal, K. Medles, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, «a propeller-type tribocharger for granular plastics mixtures,» *Electrostatics joint conference*, West Lafayette, Chicago, June 13-16, 2016.
- [106] **A. Mekhalef Benhafssa**, S. Messal, K. Medles, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, «factors that influence the efficiency of a propeller-type tribocharging device for granular plastics» *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Early access DOI:10.1109/TIA.2016.2622684.

- [107] A. Mihalcioiu, L. Dascalescu, S. Das, K. Medles, and R. Munteanu, "virtual instrument for statistic control of powder tribocharging processes", *Journal of Electrostatics*, Vol. 63, Issues 6-10, pp. 565-570, 2015.
- [108] A. Mihalcioiu, "Tehnici de masura și instrumentatie virtuala pentru studiul proceselor electrostatice", Teza de Doctorat, Cluj-Napoca, 2005.
- [109] M. Bilici, " Séparation électrostatique des mélanges de matériaux granulaires dans des dispositifs à lit fluidisé", Thèse de Doctorat, Univ. Poitiers, 2013.
- [110] *** National Instruments, LabVIEW. Measurements Manual, National Instruments, Austin, Tx, 2000.
- [111] L. Eriksson, E. Johansson, N. Kettaneh-Wold, C. Wikström, and S. Wold, "Design of Experiments. Principles and Applications," Stockholm, Sweden: Learnways AB, 2000.
- [112] M. F. Boukhoulda et al., "Experimental modelling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49(6), pp. 2375–2381, Nov./Dec. 2013.
- [113] **A. Mekhalef Benhafssa**, K. Medles, M.F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, and L. Dascalescu, "study of a tribo-aero electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51(5), pp. 4166– 4172, 2015.
- [114] **A. Mekhalef Benhafssa**, K. Medles, M.F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, and L. Dascalescu, "study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials," *IEEE/IAS Annual Meeting (session: Electrostatic Processes)*, Vancouver, BC Canada, October 5-9, 2014.
- [115] **A. Mekhalef Benhafssa**, K. Medles, and M.F. Boukhoulda, « Etude d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges de matériaux pulvérulents isolants issu des deee,» *International Conference in Integrated Management of Environment ICIME 2014*, Hammamet, Tunisia, September 25-28, 2014.
- [116] **A. Mekhalef Benhafssa**, K. Medles, M.F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, and L. Dascalescu, « étude d'un séparateur tribo-aero-électrostatique des mélanges de matériaux poudreux,» *Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Génie Electrique CONFREGÉ 2014*, Albi, France, Mai 25-28, 2014.

- [117] N. L. Frigon and D. Mathews, "Practical Guide to Experimental Design," New York, NY, USA: Wiley, 1996.
- [118] "MODDE 5.0. User Guide and Tutorial," Umetrics AB, Umea, Sweden, 1999.
- [119] S. Messal, "Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie Agro-alimentaire," Thèse Doctorat, Univ. Poitiers, Décembre 2016.
- [120] S. Messal, **A. Mekhalef Benhafssa**, K. Medles, T. Zegloul, and L. Dascalescu, «Factors that influence the efficiency of a tribo-aero electrostatic separator for finely grinded mater,» *Electrostatics joint conference*, West Lafayette, Chicago, June 13-16, 2016.
- [121] **A. Mekhalef Benhafssa**, S. Messal, K. Medles, T. Zegloul, and L. Dascalescu, «Fonctionnement en continu d'un séparateur tribo-électrostatique à lit fluidisé et deux électrodes-disques tournantes,» *10^{ème} conférence de la Société française d'électrostatique (SFE)*, Poitiers, France, Aout 29-31, 20

ANNEXE



***«An expert is a person who has
made all the mistakes that can be
made in a very narrow field»***

Niels Bohr

ANNEXES

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

v	A												
	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,599
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,768
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,855	1,0056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460

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

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

ملخص

فصل المواد الحبيبية يمثل مجالاً هاماً من التطبيقات الصناعية للكهرباء الساكنة. تتنوع تجهيزات وتكنولوجيا الفصل الكهربائي مثير للإعجاب. لدفع هذه التكنولوجيا التي تتطوي على التعامل مع المادة في أشكال منقسمة، عدة أطروحات أعدت في مختبرات جامعة سيدي بلعباس وجامعة بواتييه استهدفت الفهم الجيد لآليات الشحن الكهربائي سواء بالكورونا أو بتأثير الاحتكاك الكهربائي، وتصميم طرق مبتكرة للفصل الكهربائي. هذا العمل هو في نفس الخط من البحوث التي تركز على فئة من خليط من المواد المسحوقة مع تطبيقات في مجال إعادة تدوير نفايات المعدات الكهربائية. ثلاثة منشآت جديدة تم تصميمها ودراستها. لأنها تسهم في فهم الظواهر الفيزيائية الملحوظة خلال عملية فصل الجسيمات العازلة المسحوقة، التي يصعب السيطرة على مساراتها بسبب تأثير هام من القوات الهوائية. نظام القياسات الانني والمستمر للكتلة والشحنة الكهربائية الخاصة بالمنتجات التي تم جمعها يسهل تحليل الظواهر. استخدام منهجية خطة التجارب تساعد على تحديد تأثير كل عامل وإيجاد حالة التشغيل المثلى.

Résumé

La séparation des matériaux granulaires représente un domaine important d'applications industrielles de l'électrostatique. La diversité des installations et des technologies de séparation électrostatique est impressionnante. Pour faire progresser ces technologies qui impliquent la manipulation de la matière sous forme divisée, plusieurs thèses préparées au sein des Laboratoires de l'université de Sidi Belabbés et l'université de Poitiers ont visé la meilleure compréhension des mécanismes de charge par décharge couronne ou par effet tribo-électrique, ainsi que la conception de procédés de séparation électrostatique innovants. Ce travail s'inscrit dans le même axe de recherche, est focalisé sur une catégorie de mélanges de matériaux poudreux avec applications au recyclage des DEEE. Trois nouvelles installations ont été réalisées et étudiées. Elles contribuent à la compréhension des phénomènes physiques rencontrés lors de la séparation des particules isolantes poudreuses, dont les trajectoires sont difficiles à contrôler, en raison de l'influence importante des forces aérodynamiques en jeu. Le système de mesures simultanées et continues de la masse et la charge électrique des produits collectés facilite l'analyse des phénomènes. L'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences permet d'identifier l'influence de chaque facteur et de trouver le régime de fonctionnement optimal.

Abstract

The separation of granular materials is an important area of industrial applications of electrostatics. The diversity of electrostatic separation installations and technologies is impressive. To advance these technologies that involve the manipulation of matter in a divided form, several theses prepared in the laboratories of Sidi Belabbes University and the University of Poitiers aimed at a better understanding of the mechanisms of charge by corona discharge or by Tribo-electric effect, as well as the design of innovative electrostatic separation processes. This work is in line with the same research theme, is focused on a category of mixtures of powdery materials with applications to the recycling of WEEE. Three new installations were designed and studied. They facilitate the understanding of the physical phenomena involved in the separation of powdery insulating particles, whose trajectories are difficult to control, as strongly affected by the aerodynamic forces. The system of simultaneous and continuous measurements of the mass and the electrical charge of the collected products facilitates the analysis of the phenomena. The use of the experimental design methodology to identify the influence of each factor and to find the optimum operating conditions.