THESE

Pour l'obtention du Grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS
(Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées)
(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)
Ecole Doctorale : Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Energétique et Aéronautique

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE SIDI BEL-ABBES
(Faculté de Génie Electrique)
(Diplôme National - Arrêté N°333 du 12/07/2015)
Ecole Doctorale : Haute Tension et Compatibilité Electromagnétique
Secteur de Recherche : Génie électrique

Présentée par :

Ahlem BENABDERRAHMANE

****

CONTRIBUTION A L'ANALYSE DES FACTEURS INFLUENTS DU PROCESSUS DE CHARGE TRIBOELECTRIQUE DES MATERIAUX GRANULAIRES

****

Directeur de thèse : **Lucien DASCALESCU** (U. Poitiers)
Amar TILMATINE (U. Sidi-Bel-Abbes)
Co-directeurs : **Thami ZEGHLOUL** (U. Poitiers)
Noureddine ZOUZOU (U. Poitiers)

****

Soutenue le 17 Juin 2021 devant la Commission d'Examen

****

JURY

Adrian SAMUILA	Professeur, Université de Cluj-Napoca, Roumanie	Rapporteur
Zehira ZIARI	Professeur, Université de Constantine 1, Algérie	Rapporteur
Nacéra HAMMADI	Maître de Conférences – HDR, Université d'Oran, Algérie	Examinateur
Rabah OUIDDIR	Professeur, Université d'Oran, Algérie	Examinateur
Amar TILMATINE	Professeur, Université de Sidi-Bel-Abbès, Algérie	Examinateur
Thami ZEGHLOUL	Maître de Conférences, Université de Poitiers, France	Examinateur
Noureddine ZOUZOU	Maître de Conférences – HDR, Université de Poitiers, France	Examinateur
Lucien DASCALESCU	Professeur, Université de Poitiers, France	Examinateur

- A ma famille



Avant-propos

Je tiens d'abord à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à mes directeurs de thèse :

Je remercie ***M. Amar TILMATINE***, qui, malgré la distance m'a fait bénéficier de sa très grande expérience dans le domaine de l'électrostatique, il a su faire preuve d'une grande disponibilité et d'une grande réactivité lorsque cela était nécessaire. Qu'il trouve ici l'expression de ma plus profonde reconnaissance.

M. Lucien DASCALESCU et ***M. Thami ZEGHLOUL,*** chers encadrants, je vous remercie énormément de m'avoir permis d'intégrer l'équipe, de votre grande sympathie, de votre appui, de l'immense confiance que vous m'avez accordée, et, surtout vos conseils et remarques toujours constructives qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

M. Noureddine ZOUZOU je vous remercie énormément d'avoir apporté à mes travaux, une partie de votre expertise scientifique et technique, et ce, avec autant de bienveillance.

Je remercie très vivement ***Mme. Zehira ZIARI*** et ***M. Adrian SAMUILA***, je suis très sensible à l'honneur que vous m'avez fait en acceptant d'être les rapporteurs de cette thèse.

J'exprimer mes remerciements aux membres du jury : ***Mme. Nacéra HAMMADI*** et ***M. Rabah OUIDDIR,*** je vous suis très reconnaissante d'avoir évalué et examiné mes travaux.

Mes sincères remerciements vont également à ***M. Karim MEDLES***, pour son appui, sa disponibilité, ses conseils, son implication dans mes recherches et son aide précieuse malgré ses multiples occupations.

A mon cher mari ***Omar BENAISSA,*** je te remercie pour ton aide continuelle, et ta présence réconfortant.

Mes parents, je ne vous remercierai jamais assez, c'est aussi grâce à vous que j'en suis arrivée là. Je vous admire autant que je vous aime ! J'adresse mes plus sincères remerciements à mes **frères** et **sœurs**, pour leurs mots d'encouragement et leur amour.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes collègues et mes bons amis, ***Omar TILMATINE***, ***Gontran RICHARD***, ***Bogdan NEAGOE***, ***Yopa PRAWATYA***, ***Sofiane BENDILMI***, ***Imed ACHOURI et Mohamad MAAMMAR,*** avec qui j'ai partagé des bons moments.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE 10

Chapitre I

I.1. Effet triboélectrique 15

I.1.1. Mécanismes physiques 16

I.1.2. Nature du contact 19

I.1.3. Modèle de chargement des particules 20

I.1.4. Conditionnement des surfaces 23

I.2. Dispositifs de charge triboélectrique des matériaux granulaires 26

I.2.1. Dispositifs mécaniques 27

I.2.2. Dispositifs aérodynamiques 28

I.2.3. Dispositifs tribo-aéro-électrostatiques 30

I.3. Modélisation expérimentale et numérique des processus de charge triboélectrique 33

I.3.1. Facteurs influents 33

1.3.2. Séries triboélectriques 35

I.3.3. Modélisation numérique des processus tribo-électrostatiques 36

I.4. Conclusions 37

Chapitre II

II.1 Préparation des échantillons 40

II.1.1. Caractérisation des matériaux 40

II.1.2. Réduction de la taille des polymères 43

II.1.3. Neutralisation de la charge résiduelle 44

II.2. Traitement des matériaux granulaires par plasma non-thermique 44

II.2.1. Dispositifs de décharge à barrière diélectrique 45

II.2.2. Système d'alimentation électrique 47

II.2.3. Caractérisation électrique 47

II.3. Chargement triboélectrique 48

II.3.1. Chargeur à vibrations 48
II.3.2. Chargeur à lit fluidisé 48
II.3.3. Chargeur à cylindre rotatif 49
II.4. Séparation électrostatique 50
II.5. Techniques de mesure de la charge triboélectrique 52
II.6. Méthode des plans d'expériences [137] 53
II.7. Conclusions 56
Chapitre III
III.1. Effet des tailles des granules 59
III.1.1. Optimisation de l'installation de séparation 60
III.1.2. Amélioration du rendement de l'installation de séparation 64
III.1.2.1. Procédure expérimentale 64
III.1.2. Résultats et discussion 66
III.2. Chargement des matériaux polymères dans le broyeur 70
III.2.1. Effet de la charge générée lors du broyage 71
III.2.2. Effet du diamètre de mailles de la grille du broyeur 73
III.3. Conclusions 78
Chapitre IV
IV.1. Décharge à barrière diélectrique statique 82
IV.1.1. Procédure expérimentale 82
IV.1.2. Résultats et discussion 83
IV.2. Décharge à barrière diélectrique dynamique 87
IV.2.1. Procédure expérimentale 88
IV.2.2. Etude paramétrique 88
IV.2.3. Série triboélectrique 95
IV.2.4. Séparation électrostatique 96
IV. 3. Conclusions 99

Chapitre V

V.1. Etude de la faisabilité de la séparation des polymères bromés 103

V.1.1. Influence du choix du dispositif de charge sur la séparation des mélanges HIPS bromé - HIPS non-bromé 104

V.1.2. Séparation électrostatique du mélange PE bromé - PE non-bromé 110

V.1.3. Séparation électrostatique du mélange PP bromé et PP non-bromé 112

V.2. Polarité négative de la haute tension 114

V.3. Amélioration du rendement de la séparation en polarité positive 115

V.4. Conclusion 117

CONCLUSION GENERALE 119

LISTE DES PUBLICATIONS 122

TABLE DES FIGURES 123

BIBLIOGRAPHIE 132

Titre : *Contribution à l'analyse des facteurs influents du processus de charge triboélectrique des matériaux granulaires.*

Résumé : Lorsque deux matériaux sont frottés l'un contre l'autre, ou simplement mis en contact, ils acquièrent chacun une charge électrique de signes opposés. Ce mécanisme d'acquisition de charge, portant le nom de triboélectricité, est à la base du principe de fonctionnement des séparateurs électrostatiques des mélanges granulaires de matériaux isolants. L'objectif de cette thèse de doctorat a été d'évaluer les effets des facteurs géométriques (taille des granules), de l'état de surface (rugosité et mouillabilité) et de la composition chimique (présence des retardateurs de flamme bromés), sur le chargement triboélectrique des particules de polymère issus des déchets des équipements électriques et électroniques. L'étude paramétrique de ces facteurs a servi ensuite de base pour optimiser les conditions de chargement triboélectrique afin d'améliorer le rendement de la séparation électrostatique. La réduction de la taille des granules, ainsi que l'utilisation du broyage en tant qu'opération simultanée de granulation et de chargement triboélectrique a permis l'amélioration de la séparation électrostatique des polymères. Un prétraitement de surface par une décharge à barrière diélectrique (DBD) s'est montré efficace sur le chargement triboélectrique et la séparabilité électrostatique de tels matériaux. Un banc expérimental de traitement de surface des matériaux granulaires par DBD dynamique a été conçu et réalisé afin de pouvoir intégrer ce procédé dans un processus industriel. Les travaux réalisés dans cette thèse ont aussi confirmé la faisabilité de la charge triboélectrique et de la séparation électrostatique des mélanges granulaires des mêmes polymères bromés et non-bromés.

Mots-clés : Charge triboélectrique, séparation électrostatique, broyage, décharge à barrière diélectrique, retardateurs de flamme bromés

---

Title: *Contribution to the analysis of influencing factors on the triboelectric charge process of granular materials.*

Abstract: When two materials are rubbed against each other, or simply brought into contact, they acquire electric charges of opposite signs. This charge acquisition mechanism, called triboelectricity, is the basis of the working principle of the electrostatic separators for granular mixtures of insulating materials. This thesis is aimed at evaluating the effects of geometric factors (size of the granules), surface condition (roughness and wettability) and chemical composition (presence of brominated flame retardants) on the triboelectric charging of plastic particles originated from waste electrical and electronic equipment. The parametric study of these factors was then used as a basis for optimizing the triboelectric charging conditions and improving the efficiency of the electrostatic separation. Particle size reduction, as well as the use of shredding as a simultaneous operation of grinding and triboelectric charging, enhanced the feasibility of the electrostatic separation of granular polymers. A surface pretreatment by dielectric barrier discharge (DBD) proved to be effective on triboelectric charging and electrostatic separation of such materials. An experimental bench for the surface treatment of granular materials by dynamic DBD was designed and built, in order to integrate this technology into an industrial process. The work carried out in this thesis has also confirmed the feasibility of triboelectric charging and electrostatic separation of granular mixtures of brominated and non-brominated polymers.

Keywords: Triboelectric charge, electrostatic separation, grinding, dielectric barrier discharge, brominated flame retardant.



❝Penser est facile. Agir est difficile. Mais agir en accord avec les pensées d'un autre est plus difficile que tout❞.

Johann Wolfgang von Goethe

INTRODUCTION GENERALE

Les équipements électriques et électroniques en fin de vie sont l'un des flux de déchets qui a la croissance la plus rapide au monde [1]. Chaque année, des millions de tonnes de déchets de polymères sont transportés en décharge à cause de la forte consommation de cette matière [2]. En 2018, 939 millions d'équipements électriques et électroniques ont été mis sur le marché en France, soit une augmentation de 8% par rapport à l'année 2017 (Figure 1) [3]. La durée de vie de ces équipements est de plus en plus courte. Ainsi, le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques DEEE est devenu un enjeu primordial pour limiter les risques de pollution de l'air et des sols d'une part, et pour préserver les ressources naturelles d'autre part [4].

Différentes alternatives pour la gestion des déchets polymères ont été développées [5,6] : le tri optique [7,8], la flottaison (séparation par différence de densités des corps à séparer par rapport au liquide où ils sont plongés) [9,10], la flottation (basée sur les différences d'hydrophobicité des surfaces) [11,12] et la séparation triboélectrostatique, sujet de nos travaux de recherche [13,14].

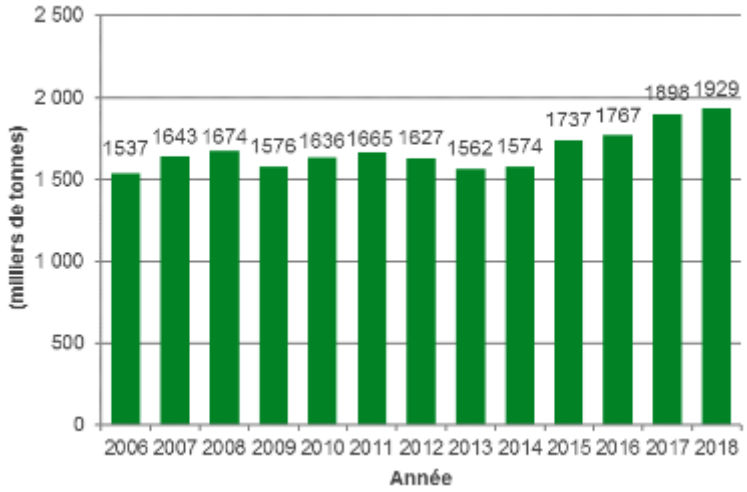


Figure 1. *Évolution de la masse des équipements mis sur le marché entre 2006 et 2018* [3]

Caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que des coûts réduits d'exploitation et d'entretien, cette dernière représente une technologie économiquement viable pour le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques.

La séparation triboélectrostatique permet le tri sélectif des matériaux polymères en fonction de leurs caractéristiques de charge par contact et par frottement. Ce processus se compose donc de deux phases distinctes qui peuvent être consécutives ou simultanées : le chargement des constituants du mélange par effet triboélectrique [15,16] et la séparation électrostatique dans un champ électrique intense.

L'effet triboélectrique est un phénomène de transfert de charges électriques entre deux corps mis en contact ; après leur séparation, un matériau acquiert une charge positive et l'autre une charge négative. Dans les procédés de séparation triboélectrostatique, le chargement triboélectrique des matériaux granulaires ou pulvérulents s'effectue dans des dispositifs de charge dédiés, grâce aux multiples impacts particule - particule et particule – parois. A la sortie du chargeur, les particules chargées sont soumises à un champ intense créé entre deux électrodes. Elles seront séparées selon la polarité de leur charge, sous l'action combinée des forces électriques et mécaniques (Figure 2).

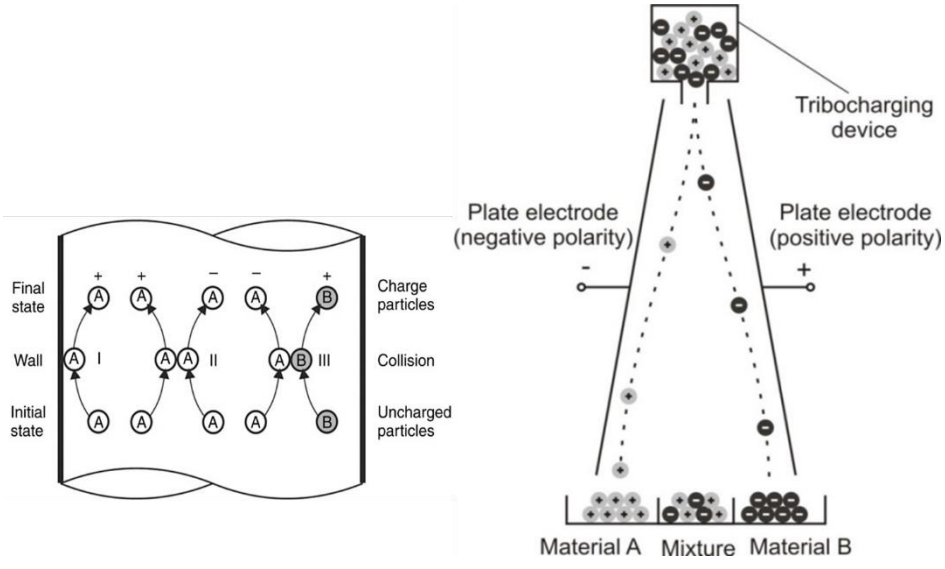


Figure 2. *Représentation schématique de la charge triboélectrique et la séparation électrostatique*

En effet, pour une séparation triboélectrostatique réussie, la charge triboélectrique portée par les granules doit être suffisante, typiquement supérieure à 2 nC/g afin que les forces électrostatiques puissent surmonter les forces mécaniques et gravitationnelles et par conséquent

mieux faire le tri des constituants du mélange. De ce fait, la maîtrise du niveau des charges triboélectriques des particules est l'une des étapes les plus importantes pour améliorer les résultats de cette technique.

Le chargement par effet triboélectrique est un phénomène extrêmement complexe, son efficacité est fortement dépendante de plusieurs paramètres. L'objectif de cette thèse consiste à étudier l'influence des facteurs géométriques telles que la taille et la forme des granules, de l'état de surface (rugosité et mouillabilité) et de la composition chimique (présence des retardateurs de flamme bromés) sur le comportement triboélectrique des matériaux. Cette étude servira ensuite de base pour l'optimisation de la charge triboélectrique et pour l'amélioration de la séparation électrostatique.

Ce mémoire de thèse est organisé en cinq chapitres :

Dans le **chapitre I**, une synthèse bibliographique sera faite sur la triboélectricité. Les mécanismes qui dominent le transfert de charge, les modes de contact ainsi que les modèles de chargement des particules seront passés en revue, avant de présenter les méthodes de traitement de surface utilisés pour améliorer les propriétés triboélectriques des polymères. Nous aborderons ensuite les principes de fonctionnement de certains dispositifs de chargement triboélectrique, ainsi que la modélisation expérimentale et numérique des processus de charge triboélectrique.

Le **chapitre II**, apportera les informations essentielles sur les différents matériaux qui feront l'objet de l'étude, sur les dispositifs mis en œuvre pour étudier le chargement triboélectrique, ainsi que sur les méthodes expérimentales et les techniques de mesures employées.

Le **chapitre III** sera consacré à l'étude de l'influence de la réduction de la taille des granules sur l'efficacité du processus de charge triboélectrique et de séparation électrostatique. Une nouvelle technique de chargement sera présentée. Ainsi, le broyage qui est couramment utilisé en amont d'une unité de recyclage comme une technique de prétraitement des déchets, sera envisagé dans ce travail comme possible opération simultanée de réduction de taille et de chargement triboélectrique.

Le **chapitre IV** sera entièrement dédié à l'étude de l'effet du traitement par décharge à barrière diélectrique sur le comportement triboélectrique des matériaux granulaires. Nous analyserons l'influence de plusieurs facteurs électriques et géométriques de la DBD qui

pourraient impacter l'efficacité du traitement de surface et la charge triboélectrique des matériaux. La possibilité d'associer le traitement par plasma au processus de séparation triboélectrostatique sera évaluée grâce à un système de DBD dynamique.

Les expériences présentées dans le **chapitre V** viseront l'évaluation de la faisabilité de la séparation électrostatique des mélanges de matériaux granulaires contenants des retardateurs de flammes bromés. Trois mélanges du même matériau bromé et non-bromé seront étudiés (HIPS, PP et PE). L'objectif de cette étude étant d'établir les conditions nécessaires pour pouvoir séparer les mêmes polymères bromés des non-bromés. Différents dispositifs de charge seront comparés afin d'aboutir à charger de signes opposés les particules bromés et non-bromés du même matériau. L'efficacité de ce chargement sera testée dans un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante.

La **conclusion générale** du mémoire s'accompagnera d'une synthèse des principales **contributions** que la thèse apporte dans le domaine étudié, ainsi que l'énoncé des **perspectives** prometteuses ouvertes par ce travail.



Machine de Wimshurst

Inventée en 1882 par *James Wimshurst*, historiquement utilisée pour illustrer les nombreux phénomènes et les effets de l'électricité statique.

Source : http://www.lecompendium.com/

Chapitre I

Etat de l'art

L'effet triboélectrique est à la base de plusieurs applications industrielles, notamment dans le domaine du recyclage des déchets des équipements électriques et électroniques. Il a fait l'objet d'un nombre important d'études à caractère fondamental, présentées de façon synthétique dans le sous-chapitre I.1. Les différents dispositifs de chargement triboélectriques développés par les chercheurs seront exposés dans le sous chapitre I.2. Enfin, le sous chapitre I.3 sera focalisé sur les modélisations expérimentales et numérique des processus de charge triboélectrique.

I.1. Effet triboélectrique

Le chargement triboélectrique, également connu sous le nom de charge par contact, est un processus qui se produit lorsque deux surfaces initialement neutres se touchent, se transfèrent des charges et lors de la séparation il en résulte l'obtention de deux matériaux différemment chargés (Figure I.1) [16-18]. La charge triboélectrique se produit au niveau surfacique et elle persiste même après rupture du contact. La polarité et la quantité de charges acquises dépendent des propriétés électriques du matériau, de sa nature chimique, de sa taille, de son état de surface, et aussi du taux d'absorption d'humidité [19-21]. La charge triboélectrique est souvent divisée en deux catégories : l'électrification des conducteurs et l'électrification des isolants. L'électrification par contact des conducteurs implique un transfert d'électrons entre les surfaces et son mécanisme est universellement accepté. En revanche, le mécanisme d'électrification des isolants n'a pas encore été totalement explorée et certains effets restent encore inexpliqués. Dans le paragraphe I.1.1, une synthèse bibliographique a été faite sur les mécanismes qui dominent le transfert de charge. Les paragraphes I.1.2 et I.1.3 introduisent les modes de contact ainsi que les modèles de chargement des particules. Les méthodes de traitement de surface des polymères seront présentées dans le paragraphe I.1.4.

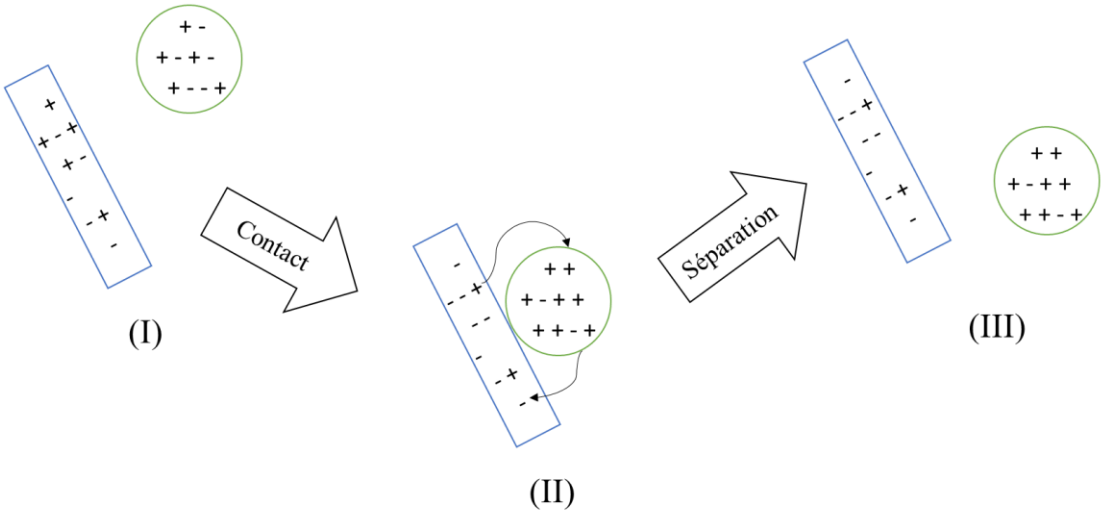


Figure I.1 : *Charge triboélectrique de deux particules en contact. (I) particules électriquement neutres sans contact entre elles ; (II) contact et transfert de charge ; (III) particules chargées après rupture du contact.*

I.1.1. Mécanismes physiques

Les mécanismes dominants du transfert de la charge entre les matériaux isolants ne sont pas bien compris. Au niveau moléculaire, les espèces de charge qui sont transférées d'un matériau à l'autre pourraient être des électrons, des ions ou une petite quantité de matériau chargé (Figure I.2).

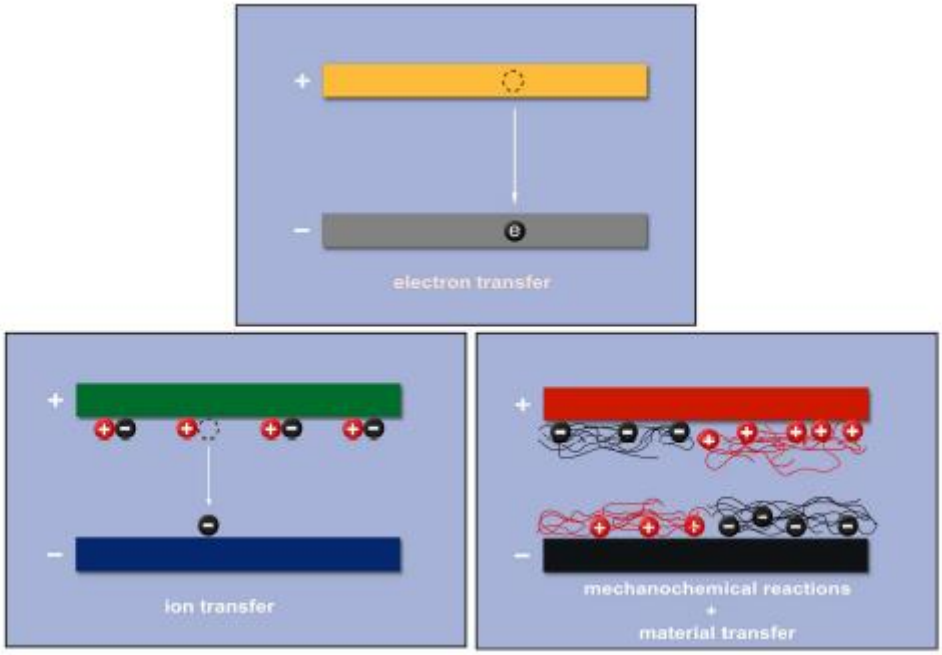


Figure I.2. *Représentation des trois mécanismes de transfert de charge [22].*

Transfert d'électrons

Le transfert d'électron est considéré comme le mécanisme le plus probable pour l'électrification des isolants [23], mais il n'était pas clair comment le transfert d'électrons se produirait dans les isolants car il n'y a pas d'électrons libres. Cependant, les matériaux ne sont pas dans l'état idéal, il a été montré que des électrons piégés peuvent exister dans la bande interdite des isolants. En plus des électrons piégés, des états d'énergie vacants peuvent également exister dans la bande interdite [24-29].

Lowell et ses collègues ont apporté des preuves expérimentales que le transfert d'électrons joue un rôle principal dans la triboélectrification, ils ont montré que le transfert d'électrons se produit dans les isolants de la même manière que les conducteurs [30-32]. Dans la théorie proposée par Lowell, le contact entre deux surfaces fournit un moyen de libérer des électrons de haute énergie piégés dans des isolants, de sorte que les électrons piégés sur une surface peuvent passer à un état d'énergie vide plus faible sur la surface adjacente. Une fois les surfaces séparées l'une de l'autre, les électrons se sont transférés d'une surface à l'autre produisant un déséquilibre de charge sur les deux surfaces [30,31,33-35].

Liu et Bard [36] ont utilisé l'électrochimie pour fournir des preuves d'un mécanisme de transfert d'électrons. Ils ont trouvé que lorsque deux polymères sont frottés ensemble vigoureusement, les charges développées peuvent effectuer différentes réactions d'oxydoréduction chimiques qui peuvent être induites par des électrons mais pas par des ions.

Transfer d'ions

Plusieurs études soutiennent le mécanisme de transfert d'ions [37-45]. Whitesides et McCarthy ont apporté des preuves que le transfert de charge dans les polymères est dû au déplacement d'ions. Ils ont utilisé une série d'électrets ioniques qui contienne des ions mobiles. De cette façon ils ont pu prouver que le transfert d'ions est une explication possible pour la triboélectrification des matériaux isolants [37]. Les ions mobiles ont la capacité facile de se déplacer lors du contact avec un autre matériau tandis que leurs contre-ions sont soit attachés à des polymères et ne sont donc pas capables de se déplacer, soit font partie d'une molécule plus grande qui est considérée comme ayant moins de mobilité pour un tel transfert. Toutefois, il était difficile d'expliquer l'échange de charge à la surface des matériaux non ioniques car ils ne contiennent pas d'ions mobiles. Une hypothèse a été proposée par McCarty et Whitesides dans laquelle ils expliquent que dans le cas de ces matériaux le transfert de charge est possible grâce

aux anions, en particulier l'hydroxyde, qui ont tendance à s'accumuler à l'interface entre l'eau et les polymères organiques.

Transfert de matière

L'impact et le frottement entre deux corps peuvent entraîner un transfert de matière de l'un à l'autre, qui peut être des fragments des deux corps ainsi que des particules de poussière ou des impuretés sur les surfaces. Si le matériau transféré porte une charge, un transfert de charge se produira [46-48]. Il a été démontré par Baytekin et *al*. [49] que la compression et la séparation de deux films de compositions différentes entraînent un transfert de matière et de charge. Cependant, Lowell a attribué un rôle mineur au transfert de masse dans la charge triboélectrique, étant uniquement responsable d'effets « parasites » tels que la dispersion des valeurs expérimentales. Le transfert de matière entre les surfaces des corps en contact explique la double polarité de charge électrostatique qui coexiste sur la même surface.

Rôle de l'humidité

La plupart des surfaces sont recouvertes d'une couche d'eau. L'épaisseur de celle-ci varie d'une monocouche moléculaire à une couche mince microscopique. Lorsqu'un corps est exposé à une certaine quantité d'humidité, celle-ci sera adsorbée à la surface. Quand les deux corps entrent en contact, il peut y avoir une distribution inégale des ions aqueux dans les couches d'eau absorbées sur les surfaces des corps en contact. Une fois les surfaces séparées, la distribution inégale des ions dans la couche d'eau entraîne la génération de charges sur les deux surfaces [37,48]

Il est suggéré que l'eau est nécessaire pour la triboélectrification et pour produire un bon contact entre les surfaces. Les monocouches d'eau peuvent servir de pont entre les surfaces, elles permettent aux ions mobiles de se diffuser sur la surface adjacente. Lorsque les surfaces sont séparées, une partie des ions mobiles est piégée sur la surface non fonctionnalisée, produisant deux surfaces chargées [50-52].

Lungu [53] a expliqué que le processus de tribocharge se déroule en plusieurs étapes. La première étape consiste en l'adsorption d'eau à la surface de l'un ou des deux polymères, selon leur nature hydrophile ou hydrophobe.

Dans la deuxième étape, la collision entre deux particules de polymère aura lieu à travers l'eau adsorbée à la surface du polymère. Le champ électrique *Ec* qui apparaît à cause de la

différence entre les travaux d'extraction des particules, commence à devenir important lorsque la distance entre les particules devient suffisamment petite (Figure I.3).

Dans la troisième étape la polarisation de la couche intermédiaire d'eau se produit à cause du champ *Ec*. A l'interface eau-particule, il apparaît un champ électrique supplémentaire *E*. Ce champ pénètre la particule sur la distance *l* du fait de la polarisation de l'eau :

$$l = \frac{2\varepsilon V_C}{eN_d} \tag{I.1}$$

où *Vc* est le potentiel de contact entre l'eau et la particule, ε la constante diélectrique et N_d la concentration des électrons dans la bande de conduction de la particule.

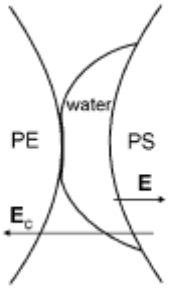


Figure I.3. *Collision entre les particules de PE et PS par l'intermédiaire de la couche d'eau [53].*

I.1.2. Nature du contact

Impact sur un mur

Lorsqu'une particule isolante entre en collision avec une plaque métallique, l'acquisition de charge est due à la différence de potentiel entre les deux objets. Cette différence est due, à son tour, au fait que les travaux d'extraction des matériaux en contact ne sont pas égaux. Le processus de transfert de charge est affecté aussi par toute charge déjà portée par la particule. Pour toute particule initialement non-chargée, la charge acquise dépend des conditions d'impact.

Lorsque des particules impactent à plusieurs reprises une paroi, la charge sur les particules varie en fonction des propriétés électrostatiques et de l'état des collisions. Matsuyama et Yamamoto [54-60] et Matsusaka et *al.* [61,62] ont analysé le chargement par impact, ils ont trouvé que la charge générée par le premier impact affecte la charge d'impact suivante. La charge transférée diminue avec le nombre d'impacts, et donc après chaque impact, une charge plus petite que celle transférée au précédent impact, est additionnée à la charge totale :

$$Q_n = Q_{n-1} + \Delta Q_n \quad \text{(I.2)}$$

avec *Q* représentant la charge totale accumulée par la particule, le nombre entier *n* indiquant le nombre d'impacts, et ΔQn étant la charge transférée lors de l'impact *n*.

Ecoulement des particules sur un plan incliné

Une particule peut glisser, rouler ou rebondir sur un plan. Plusieurs études montrent qu'il existe une différence évidente du transfert de charge si la particule roule ou glisse sur le plan [63,64]. Pendant le glissement le long d'un plan, la même région de la surface d'une particule est en contact continu avec le plan. Dans le cas d'un mouvement de roulement, la surface de contact change à chaque instant, l'accumulation de charge sur un point particulier de la surface des particules sera intermittente. Le mouvement de rebond est très différent des deux précédents car ici la particule n'est pas constamment en contact avec le plan et donc le temps de contact est plus court qu'un contact continu pendant une durée donnée. Il est donc évident que le contact continu génère plus de charges électrostatiques [65].

I.1.3. Modèle de chargement des particules

Modèle du condensateur

C'est un modèle fort répandu, il est inspiré de celui élaboré par Ireland [65]. Des transferts de charge entre les deux objets peuvent avoir lieu s'ils rentrent en contact. Des électrons quittent donc un objet pour rejoindre l'autre par effet triboélectrique. Vu que le plan est un conducteur relié à la terre, nous pouvons représenter schématiquement le circuit du transfert de charge, à l'endroit du contact (Figure I.4) [66-67]. Une charge triboélectrique est accumulée à l'endroit du contact et une charge de signe opposée se situe sur le plan. Ces charges opposées peuvent être représentées comme les armatures d'un condensateur. Par analogie avec un condensateur, l'équation de chargement d'une particule entrant en contact avec le plan métallique s'écrit :

$$\frac{dq}{dt_c} = \frac{1}{R}(V_0 - V_c) \quad \text{(I.3)}$$

où

dq représente la variation de charge transférée ;

t_c représente le temps de contact pendant lequel la particule est en contact avec le plan incliné ;

R est une constante représentant la résistance du circuit de charge ;

V_0 représente une force électromotrice proportionnelle à la différence entre les travaux d'extraction des deux matériaux ;

V_C est la différence de potentiel associée à l'accumulation de charge.

Quand cette tension électrique V_C est égale à celle aux bornes de la pile fictive, V_0, le condensateur est complètement chargé. Le courant ne circule plus dans le circuit, le transfert de charge s'arrête. La particule ne peut donc plus accumuler des charges. Si les particules se chargent uniformément sur leur surface, la charge à l'endroit du contact est donnée par :

$$q_c = \sigma a_c \tag{I.4}$$

où σ représente la densité surfacique de charge et q_c indique la charge sur la surface de contact a_c. Notons que a_c dépend notamment de la géométrie des objets acteurs. Maintenant l'équation I.3 peut être réécrite avec $c = \frac{q}{V} = \frac{\sigma a_c}{V}$:

$$\frac{dq}{dt_c} = \frac{1}{R}\frac{a_c}{C}(\sigma_0 - \sigma) \tag{I.5}$$

σ_0 étant la densité de charge lorsque la charge de la particule arrive à une valeur de saturation. En définissant le temps caractéristique de charge $\tau = RC$, l'équation ci-dessus devient :

$$\frac{dq}{dt_c} = \frac{a_c}{\tau}(\sigma_0 - \sigma) \tag{I.6}$$

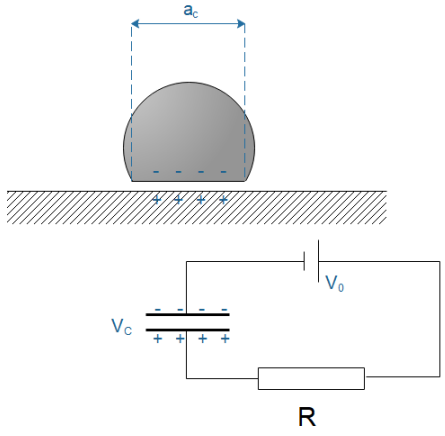


Figure I.4. *Modèle du condensateur [66].*

Charges délocalisées (effet miroir)

Soit une particule initialement neutre, le mouvement et la charge finale de cette particule peuvent être relativement influencés par son environnement électrique. La figure I.5 nous aide à comprendre l'influence de cette charge délocalisée sur le plan. Si une particule chargée se

situe proche du plan (à une distance plus petite que son diamètre), elle n'aura pas d'influence sur le transfert de charge d'une autre particule en contact avec le plan. Tandis que si une particule chargée se trouve à une hauteur plus grande, l'influence électrostatique fait apparaître une charge relativement étalée sur le plan. Ceci conduira à une diminution du transfert de charge si la particule se situe dans une zone chargée par influence. L'équation I.6 peut être modifiée en prenant en compte une charge supplémentaire présente à l'endroit du contact du plan et de la particule [65-67] :

$$\frac{dq_1}{dt_c} = \frac{a_c}{\tau}\left(\sigma_0 - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right) \tag{I.7}$$

où :

q_1 est la charge de la particule ;

σ_1 est la densité de charge de la particule ;

σ_2 est la densité de charge électrique induite à l'endroit du contact.

Si σ_p désigne la densité de charge présente sur le plan due aux autres particules, l'équation I.7 peut être réécrite sous la forme :

$$\frac{dq_1}{dt_c} = \frac{a_c}{\tau}\left(\sigma_0 - \sigma_1 + \frac{\sigma_p}{2}\right) \tag{I.8}$$

Vu que la densité de charge des particules et celle induite sur le plan sont de signes opposés, le transfert de charge sera réduit.

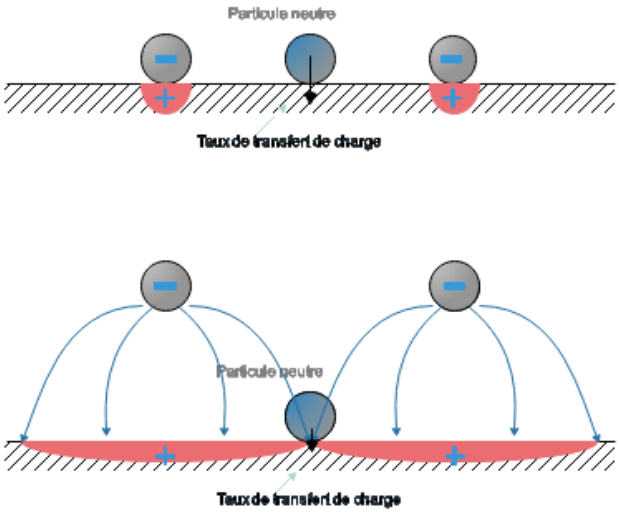


Figure I.5. *Répartition de charge sur le plan [66].*

I.1.4. Conditionnement des surfaces

La triboélectricité est d'une importance considérable dans l'industrie, elle est à la base de nombreuses technologies importantes, telles que : l'électrophotographie [68,69], les précipitateurs électrostatiques [70,71], les nano-générateurs triboélectriques [72,73] et la séparation triboélectrostatique [74,75]. L'amélioration des performances de ces technologies peut être obtenue en augmentant la densité de charge triboélectrique. Dans cette section, sont présentées, trois techniques de traitement de surface des matériaux permettant le contrôle et l'amélioration de la charge triboélectrique.

Traitement par DBD

La décharge à barrière diélectrique est une technologie très prometteuse pour le traitement de surface. Les interactions principales du plasma avec la surface du polymère peuvent être assimilées à l'activation, la réticulation, la gravure ou une combinaison entre ces mécanismes. Nombreuses équipes de recherche ont étudié la modification de la surface des polymères par exposition à une décharge à barrière diélectrique (DBD). Ainsi, certains chercheurs ont constaté que l'adhésion entre la couche mince métallique déposée sur la surface d'un polymère et l'échantillon traité par DBD a augmentée par rapport au cas non traitée [76,77]. D'autres chercheurs ont rapporté une diminution de l'angle de contact avec l'eau et une mouillabilité améliorée des polymères traités par plasma non-thermique [78,79]. La modification de surface des polymères par plasma permet aussi de modifier les propriétés électrostatiques de ces derniers [80-82]. Certains résultats sont relativement contradictoires, Sharma *et al.* [83,84] et Chongqi *et al.* [85] ont montré que le traitement au plasma fait diminuer la charge triboélectrique acquise par les polymères, alors que Murata *et al.* [86] ont observé une amélioration du processus de charge. Dans des recherches plus récentes, il a été rapporté que l'exposition au plasma de type DBD agit de deux façons différentes sur la charge triboélectrique des polymères. Pour un traitement de courte durée, la charge s'améliore alors que pour un traitement de longue durée, la charge triboélectrique diminue (Figure I.6). En effet le traitement par DBD engendre une augmentation de la rugosité surfacique du polymère (Figure. I.7), la mouillabilité augmente également à cause du greffage de groupements chimiques polaire à la surface. L'augmentation de la rugosité entraine une amélioration de la charge triboélectrique tandis que l'augmentation de la mouillabilité rend le matériau hydrophile et agit de façon inverse [87].

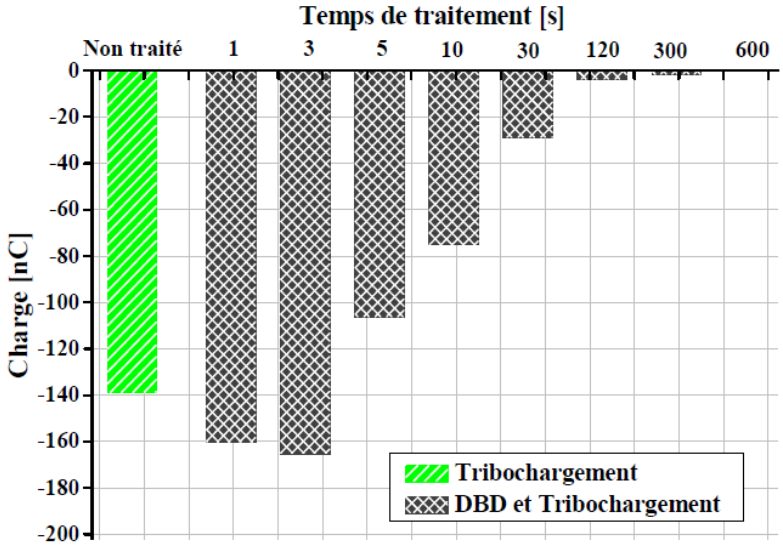


Figure I.6. *Evolution de la charge triboélectrique des particules de PVC en fonction du temps de traitement de la DBD [88].*

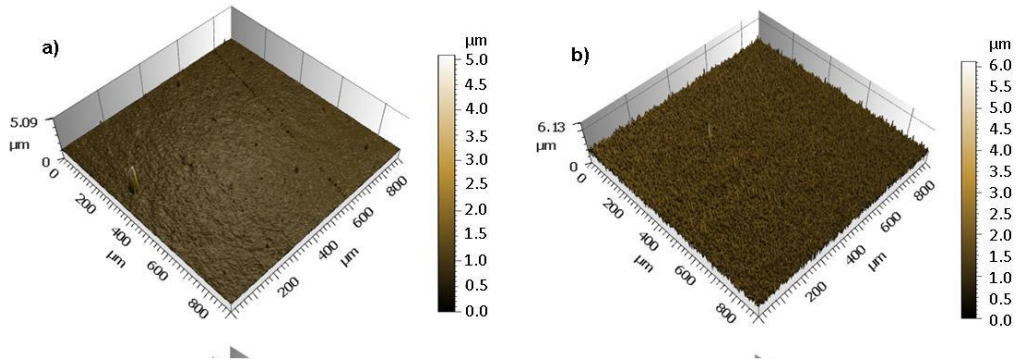


Figure I.7. *Profilométrie 3D des échantillons de : (a) PP non traité et (b) PP traité par DBD [87].*

Injection d'ions

L'injection d'ions est une approche de modification chimique. Cette technique consiste à injecter directement des ions chargés dans les surfaces. Par absorption électrostatique, les ions chargés injectés peuvent rester dans les polymères diélectriques pendant des années [89]. La méthode la plus courante pour effectuer l'injection d'ions est le traitement au plasma en utilisant l'argon et l'oxygène. Au cours de ce processus, les ions sont spontanément injectés dans le polymère, ce qui entraîne un changement de son état de surface et une modification chimique par injection d'ions [90].

En plus du traitement par plasma, Wang et *al.* [91] ont utilisé un pistolet à air ionisé pour implanter de manière contrôlable des charges supplémentaires sur la surface de l'éthylène propylène fluoré (FEP) et ont étudié le chargement triboélectrique du polymère (Figure I.8). Ce pistolet à air ionisé de la taille d'une main est simple et pratique, il peut produire des ions avec

les deux polarités. La polarité de l'ion peut être manipulée en pressant ou en relâchant la gâchette. Des charges négatives ($CO_3^-, NO_3^-, NO_2^-, O_3^-, O_2^-$) ont été sélectionnées dans ce travail, car le FEP a une forte tendance à gagner des électrons. L'injection d'ions pourrait permettre une densité de charge 5 fois plus grande sur la surface FEP (Figure I.9).



Figure I.8. *Illustration de l'injection des ions négatifs à la surface du FEP avec un pistolet à air ionisé [90].*

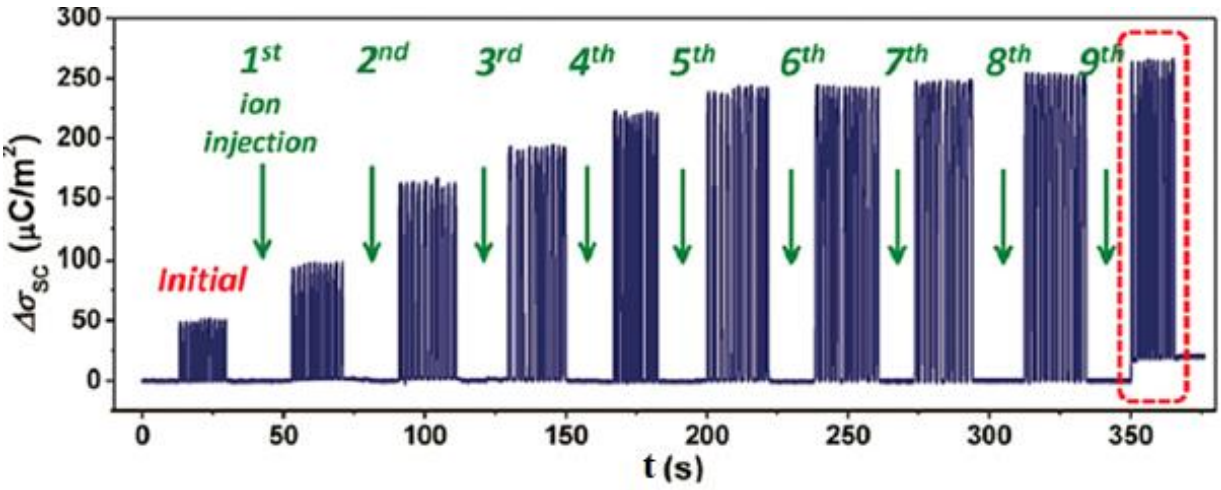


Figure I.9. *Variation de la densité de charge en fonction du temps de traitement [90].*

La fluoration de surface

La fluoration directe est une méthode reconnue pour la modification des propriétés de surface des matériaux, et en particulier les polymères ; elle consiste à introduire des atomes de fluor (F) supplémentaires sur la surface du polymère par des modifications chimiques. Cette méthode met à profit le fait que la tendance à gagner ou à perdre des électrons est liée à la nature des atomes de surface, et le fluor est un des éléments à forte affinité électronique. Ce procédé permet de modifier seulement la surface tout en conservant les propriétés du matériau. Dans le cas des polymères organiques par exemple, la couche de polymère modifiée est généralement comprise entre 0,01 µm et 10 µm [90].

Shin et *al.* [92] ont étudié la fonctionnalisation de surface d'un film de polyéthylène téréphtalate (PET) avec un groupe amino chargé positivement (NH_3) et un groupe CF_3 chargé négativement. Les substrats de PET ont été traités dans un plasma d'oxygène pendant 100 s. Après les modifications chimiques, le P-PET et le F-PET ont montré une tendance plus élevée à perdre et à gagner des électrons.

Li et *al*. ont également étudié la modification chimique de la surface du PET par plasma fluorocarbone [93]. Dans ce cas, un mélange de gaz tétrafluorure de carbone (CF_4) et oxygène (O_2) a été utilisé comme source de plasma. Le potentiel de surface a été augmenté de 41 mV à 105 mV après le traitement plasma (Figure I.10). Selon les caractérisations topographiques de la microscopie à force atomique (AFM), la surface PEF non modifiée était très lisse avec une rugosité moyenne de 2,2 nm. Après le traitement au plasma, la rugosité moyenne a été augmentée à 34,4 nm (Figure I.11).

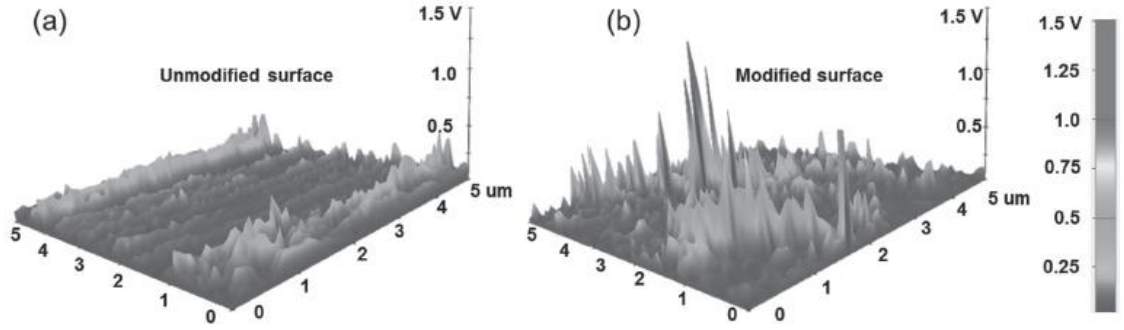


Figure I.10. *Potentiel de surface de : (a) échantillon de PET non traité ; (b) échantillon de PET traité [93].*

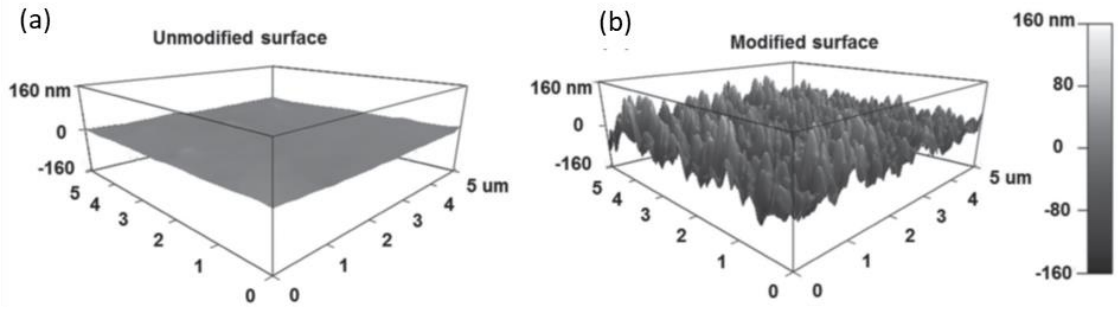


Figure I.11. *Morphologie de surface de : (a) échantillon de PET non traité ; (b) échantillon de PET traité [93].*

I.2. Dispositifs de charge triboélectrique des matériaux granulaires

L'effet triboélectrique permet le chargement électrique des matériaux isolants granulaires à l'aide de dispositifs de charge triboélectrique en vue de leur séparation électrostatique. Il

existe une grande variété de dispositifs mécaniques ou aérodynamiques ayant déjà des applications industrielles.

I.2.1. Dispositifs mécaniques

Dispositifs de chargement à vibrations

Ils se composent généralement de tuyaux en forme de zigzag assemblés sur une plaque métallique. Un mécanisme à bielle manivelle entraîné par un moteur à courant continu met en mouvement la plaque et les tubes (Figure I.12). Le matériau granulaire se charge par glissement dans les canaux en zigzag, mis en mouvements vibratoires. Cette configuration favorise à la fois les contacts particule-paroi et particule-particule. La fréquence et l'amplitude des vibrations imposées aux tubes en forme de zigzag sont réglables. Le dispositif a été conçu pour pouvoir fonctionner seul pour l'étude expérimentale du processus de tribochargement ; il peut également être intégré à un séparateur électrostatique [94].

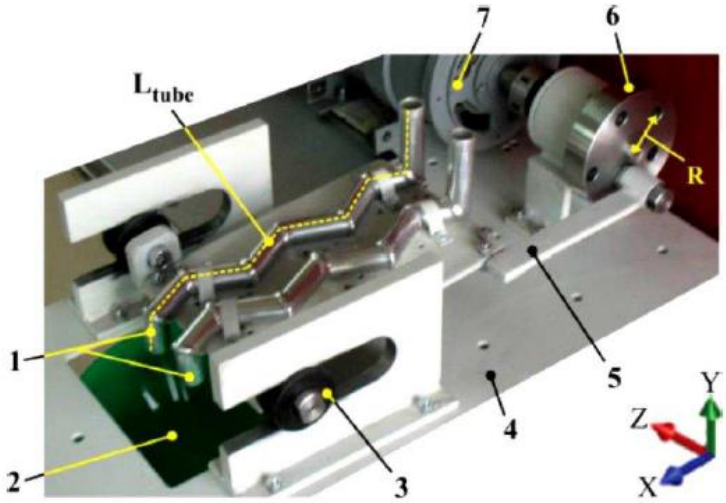


Figure I.12. *Dispositif à vibration ; (1) tubes de charge ; (2) sortie des particules chargées ; (3) glissière ; (4) support ; (5) bielle ; (6) manivelle ; (7) moteur électrique ; (R) rayon ; (L_{tube}) longueur du tube [95].*

Dispositif de charge à cylindre rotatif

Le dispositif de chargement à cylindre rotatif est utilisé pour le chargement des déchets polymères depuis les années 1990. Le dispositif consiste en un cylindre creux qui tourne autour d'un axe légèrement incliné par rapport à l'horizontale. Les particules neutres sont alimentées d'un côté du cylindre, en passant à travers le tube, elles se frottent les unes contre les autres et avec la paroi interne du cylindre et sortent de l'autre côté fortement chargées (Figure I.13). La simplicité mécanique et les faibles besoins en énergie sont les principaux avantages de ce dispositif. Afin d'améliorer la charge triboélectrique, la surface intérieure du cylindre peut être

équipée d'ailettes, la présence des ailettes augmente la probabilité de collisions particule-particule et particule-paroi par rapport au modèle à surface interne lisse [96-98].

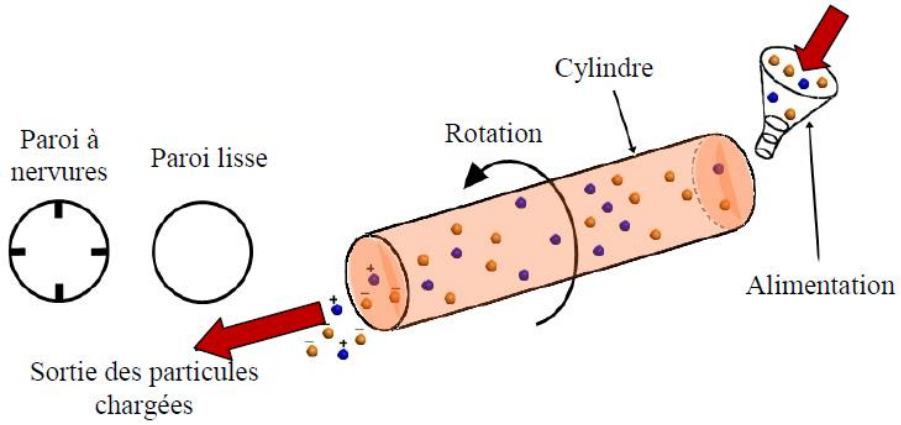


Figure I.13. *Dispositif de chargement à cylindre rotatif [88].*

I.2.2. Dispositifs aérodynamiques

Dispositif de chargement à cyclone

Le dispositif de chargement à cyclone est présenté dans la figure I.14, il consiste en une chambre cylindrique avec une section conique à son extrémité inférieure. Dans les tribochargeurs cyclones, un flux d'air est nécessaire pour transporter les particules dans le chargeur et créer un mouvement turbulent. Alors que les particules sont soufflées par le ventilateur, elles subissent un frottement continu contre les parois internes du dispositif et acquièrent des charges de signes opposés [99,100].

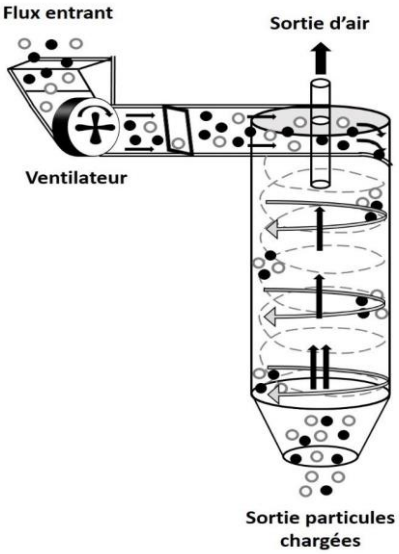


Figure I.14. *Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [101].*

Dispositif de chargement à lit fluidisé

C'est le dispositif le plus utilisé pour le chargement triboélectrique des matériaux granulaires ou pulvérulents (Figure I.15). Dans de tels dispositifs, les matériaux granulaires à charger sont déposés sur une plaque poreuse placée au fond d'une chambre rectangulaire. Le lit fluidisé est généré par une soufflante d'air à vitesse variable. L'air ascendant assure la triboélectrification des granules. Durant le processus de fluidisation, les particules sont transportées vers le haut et dispersées dans le volume de la chambre de fluidisation, les particules acquièrent des charges électriques de signes opposés grâce aux multiples collisions entre les particules et entre les particules et les parois internes du chargeur [102,103].

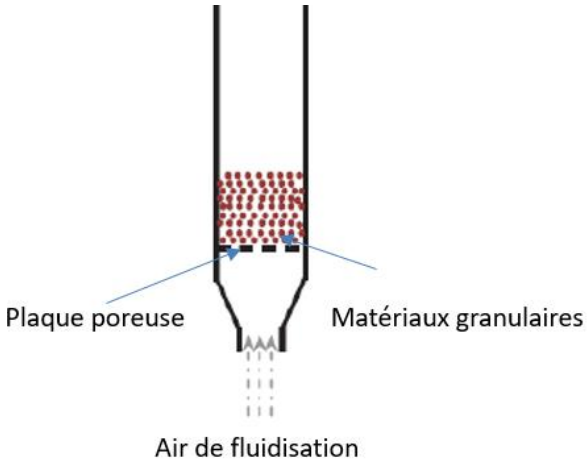
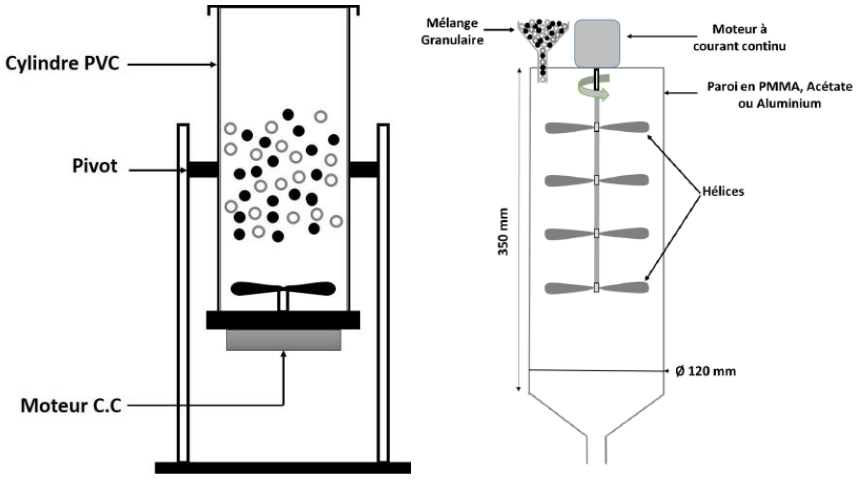


Figure I.15. *Représentation schématique d'un dispositif de chargement à lit fluidisé [95].*

Dispositif de chargement à ventilateur

Le dispositif consiste en une chambre cylindrique pourvue d'hélices coaxiales entraînées par un moteur électrique à courant continu à vitesse variable (Figure I.16). Les hélices créent des turbulences aérodynamiques hélicoïdales ce qui multiplient les collisions et favorisent la charge triboélectrique des granules. Le matériau granulaire introduit dans le chargeur a un premier impact avec les pales des hélices, ensuite, les forces aérodynamiques projettent les particules. Les multiples impacts particule-hélices, particule-cylindre et particule- particule, chargent les particules par effet triboélectrique. Le signe et l'amplitude de la charge de chaque granule sont déterminés par l'action combinée de ces trois mécanismes physiques. Lorsque le processus de tribocharge est considéré comme terminé, les matériaux granulaires peuvent être évacués alors que les hélices sont encore en mouvement, pour faciliter la récupération des granulés chargés qui pourraient rester collés aux parois du cylindre [104,105].



(a) (b)

Figure I.16. *Représentation schématique d'un dispositif de chargement à ventilateur ; (a) flux ascendant ; (b) flux descendant [101].*

I.2.3. Dispositifs tribo-aéro-électrostatiques

Le principe de fonctionnement de ces procédés est basé sur l'effet triboélectrique, la force de Coulomb et la force d'image électrique. La particularité de ces dispositifs est que les particules simultanément : se chargent triboélectriquement et se séparent dans un champ électrique intense sous l'action des forces d'attraction électriques. Un des avantages de ce procédé réside dans le fait que les particules moins chargées ne quittent pas la zone active du séparateur jusqu'à ce qu'elles acquièrent une charge suffisante pour permettre aux forces électriques de les conduire à l'électrode de polarité opposée.

Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses

Dans ce dispositif (Figure I.17), les mélanges granulaires de matériaux isolants chargés dans le lit fluidisé sont soumis à un champ électrique perpendiculaire à la direction de l'air de fluidisation. Les électrodes qui vont attirer les particules chargées sont deux bandes transporteuses entrainées par des moteurs triphasés alternatifs, commandés par des variateurs de fréquence et connectées à des sources haute tension de polarités opposées. Les granules ayant des charges électriques de polarités opposées se déplacent sous l'action de la force de Coulomb dans le champ électrique horizontal créé entre les deux électrodes. Soumis à l'action de la force d'image électrique, les granules chargés adhèrent à la surface des bandes de polarités opposées, qui assurent l'évacuation des granules de la zone de charge et de séparation, vers les collecteurs de récupération des produits. Les granules non-chargés ne peuvent pas quitter la zone de charge, ce qui garantit une excellente pureté des produits collectés [106].

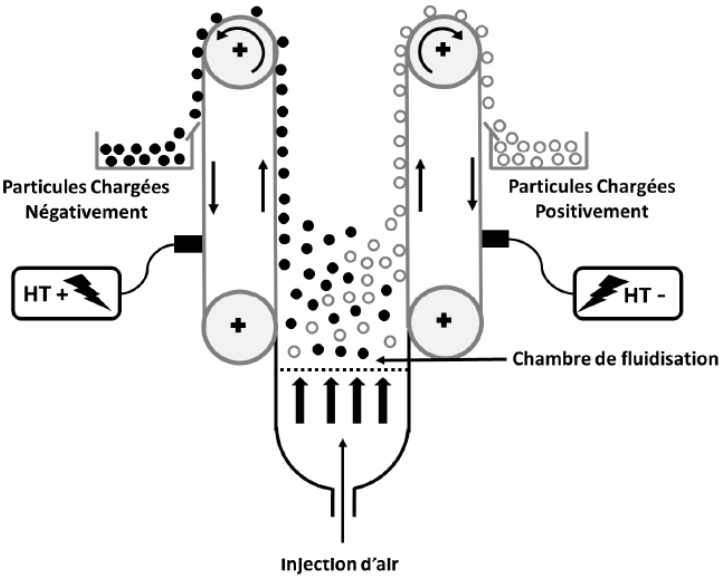


Figure I.17. *Représentation schématique du dispositif tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses [101].*

Séparateur tribo-aéro-électrostatique à cylindres tournants

Le mélange est introduit dans la chambre de fluidisation qui sert aussi de chambre de séparation. L'injection de l'air est faite à vitesse variable par une soufflante d'air. Le champ électrique est généré entre deux électrodes cylindriques tournantes situées dans la chambre de séparation ; elles sont alimentées par deux alimentations de haute tension de polarités opposées et leur entrainement à vitesse variable est réalisé par des moteurs à courant continu. Les produits séparés sont récupérés dans les deux bacs collecteurs placés de part et d'autre de la chambre de séparation (Figure I.18) [107].

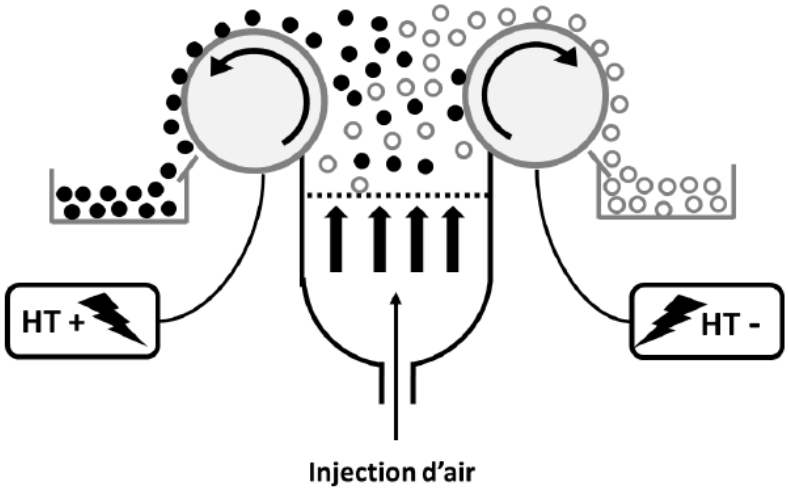


Figure I.18. *Représentation schématique du dispositif tribo-aéro-électrostatique à cylindres tournants [101].*

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

Cette installation est particulièrement adaptée à la séparation des particules de polymères fines, elle se compose d'une chambre de séparation où à l'intérieur le matériau granulaire est introduit dans le lit fluidisé généré par l'injection de l'air à une vitesse variable. Le champ électrique est généré entre deux électrodes en disque rotatif distancées à un intervalle variable et immergées dans le lit fluidisé. Les disques sont alimentés par deux alimentations haute tension de polarités opposées et entraînés à vitesse variable par deux moteurs à courant continu. Les particules chargées sont attirées par les électrodes de polarités opposées. La récupération des particules collées sur la surface des électrodes est assurée par des racleurs. Les produits séparés sont récupérés dans deux boites collectrices placées à l'extérieur de la chambre de séparation (Figure I.19) [95].



Figure I.19. *Photographie du dispositif tribo-aéro-électrostatique à disques tournants.*

Dispositif de triboélectricité à électrodes verticales

La chambre de fluidisation de section rectangulaire est prévue avec deux parois transparentes pour permettre l'observation du mouvement des granules. Les deux autres parois ont à l'intérieur des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces. Les électrodes sont alimentées par deux sources haute tension continue de polarités opposées, afin de créer un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules et assurer la séparation entre les composants du mélange (Figure I.20) [108].

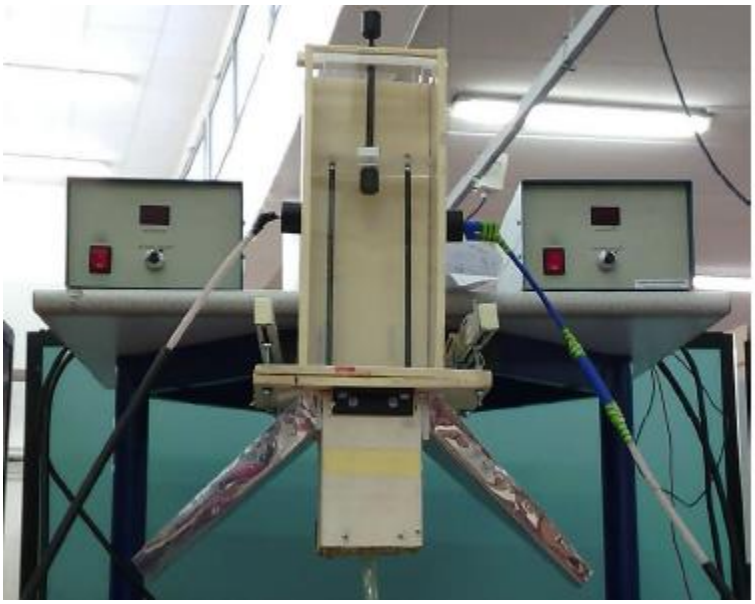


Figure I.20. *Photographie du dispositif de triboélectricité à électrodes verticales.*

I.3. Modélisations expérimentale et numérique des processus de charge triboélectrique

I.3.1. Facteurs influents

La triboélectrification est un phénomène complexe, pour lequel un grand nombre de facteurs peuvent affecter la charge générée sur les surfaces en contact : la nature du contact (par exemple, frottement ou glissement), la température et l'humidité, la taille des matériaux, la rugosité de surface, l'hydrophilie / hydrophobie. Certains de ces facteurs seront abordés dans les sections suivantes.

Propriétés de surface

La rugosité de surface permet d'améliorer le comportement triboélectrique, les études de triboélectrification ont révélé que les particules rugueuses ont tendance à accumuler plus de charges que les particules lisses. Cette différence de charge entre les particules rugueuses et lisses est attribuée à un potentiel de surface significativement plus élevé des particules rugueuses par rapport aux particules lisses. De plus, la rugosité de surface influence également la zone de contact et peut donc affecter le transfert de charge, le chargement devient plus local [109-111].

Les changements dans la microstructure du matériau pourraient également affecter le mécanisme de transfert de charge. Wang et *al.* [112] ont prouvé que les différences de microstructure de matériaux chimiquement identiques déclenchent un comportement de tribochargement distinct. Lorsque deux matériaux chimiquement identiques sont mis en

contact, une charge triboélectrique se produira de telle sorte qu'une surface se charge positivement et l'autres se charge négativement, la direction du transfert de charge est aléatoire. En revanche, lorsqu'un des échantillons est déformé, il y a un transfert de charge systématique tel que l'échantillon déformé se charge presque toujours positivement et se comporte triboélectriquement comme un matériau distinct [113].

Taille des particules

La quantité de charge transférée dépend de la taille des particules. Plus la taille des particules est petite, plus la surface exposée est élevée, ce qui génèrent une charge plus élevée. Des études sur l'effet de la taille des particules sur le chargement triboélectrique ont suggéré que l'amplitude de la charge acquise augmente avec une diminution de la taille des particules [114,115]. En outre, un transfert de charge entre particules de nature identique, avec une large distribution de taille, des charges de polarités opposées se formeront, les grosses particules ont tendance à se charger positivement, tandis que les petites particules ont tendance à se charger négativement [116,117].

Forme des particules

La forme des granules s'est avérée être un facteur important dans la charge électrostatique. Elle a un impact direct sur la force de contact et le mouvement de la particule, vu l'importance supposée de la surface de contact dans le transfert de charge. En effet, une particule cubique aura tendance à avoir une plus grande surface de contact avec le plan et elle glissera plutôt que de rouler, pour une particule sphérique ce sera le contraire [63,65].

Yao et *al*. [118] ont effectué des expériences de chargement par glissement sur la surface d'une plaque en acier inoxydable inclinée de 54° en utilisant des granules de PVC avec des formes typiques formées pendant l'attrition des granules : cône, cube, demi-cylindre, colonne triangulaire et colonne trapézoïdale. Ils ont découvert que les granules longs et pointus avaient tendance à acquérir plus de charge et que les particules ayant une forme angulaire permettaient un transfert de charge plus élevé. Dans une autre étude [119] sur des granules de PVC triangulaires et trapézoïdaux, ils ont rapporté que les granules triangulaires généraient plus de charge électrostatique par glissement. Dans une comparaison entre les granules rectangulaires et semi-cylindriques, il a été constaté qu'un granule semi-cylindrique produit plus de charge qu'un granule rectangulaire [120].

Humidité relative

L'humidité relative a une importance capitale dans le transfert de charge par effet triboélectrique. L'humidité a un fort effet sur la conductivité électrique des matériaux. Naik et *al.* [121] ont constaté que la charge des particules diminue avec l'augmentation de l'humidité relative ambiante, les chercheurs ont observé une baisse significative de la charge spécifique nette avec l'augmentation de l'humidité relative. Il a été suggéré que l'humidité peut modifier la conductivité des particules, et donc faciliter la neutralisation des charges [122,123].

L'humidité relative influe sur la polarité ainsi que sur l'amplitude des charges générées entre différentes fractions de taille de matériaux identiques [124]. La différence de la teneur en humidité entre les particules du même matériau mais de tailles différentes peut entraîner des différences dans les travaux d'extraction, et donner naissance à un chargement bipolaire [115].

1.3.2. Séries triboélectriques

Lorsque deux objets sont mis en contact, les ressources théoriques pour prédire lequel des deux aura une charge positive ou négative sont encore trop vagues. La polarité des charges dépend de nombreux facteurs et il est donc difficile de prédire théoriquement des résultats précis. Une question récurrente est de savoir quels éléments deviennent chargés positivement et lesquels deviennent chargés négativement ? La meilleure approche pour répondre à cette question est la série triboélectrique ; un classement des matériaux en fonction de leur tendance à acquérir une charge positive ou négative (Figure I.21). Les éléments supérieurs perdront plus facilement des électrons et les éléments inférieurs en gagneront. Plus les deux éléments en contact sont éloignés dans la série, plus le transfert de charge sera grand entre les deux objets. Les séries triboélectriques ne sont pas toujours exactement reproductibles puisqu'elles sont établies expérimentalement à partir des résultats de chargement triboélectrique. Ceci est dû au fait que les conditions expérimentales varient d'une expérience à l'autre. D'autre part, dans certaines expériences les matériaux étudiés sont mis en contact avec un seul type de matériau de référence. De plus, certains chercheurs ont utilisé des matériaux de référence qui sont conducteurs alors que la série triboélectrique est principalement constituée de matériaux isolants. En conséquence, plusieurs séries triboélectriques ont été établies à travers les années, chaque groupe de recherche rapporte généralement un ordre différent des matériaux, il n'y a donc pas de série triboélectrique universelle. Ces séries triboélectriques ont peu de valeur d'un point de vue théorique, le principe fondamental qui est à la base du classement des matériaux reste encore inconnu. La compréhension de ce principe permettra aux chercheurs de prédire la

polarité de la charge générée, il ne sera alors plus nécessaire d'effectuer les expériences de chargement triboélectrique [125-127].

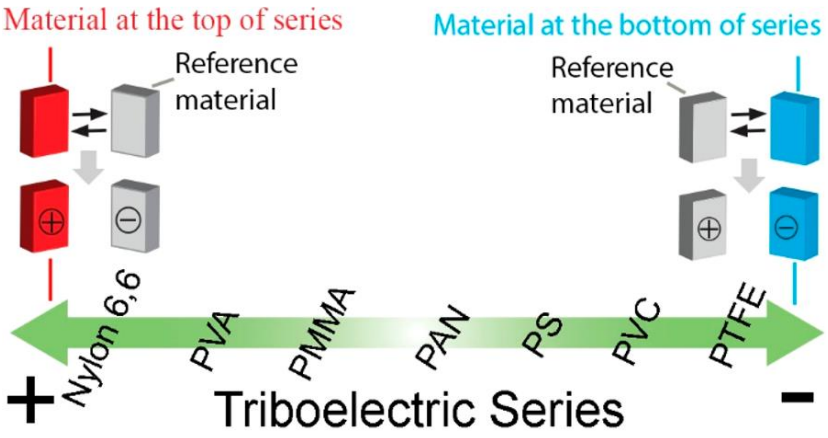


Figure I.21. *Illustration de série triboélectrique [125]*

I.3.3. Modélisation numérique des processus tribo-électrostatiques

La méthode de simulation « DEM » (*discrete element method*) est utilisée pour simuler l'effet triboélectrique. La base de cette méthode de mécanique granulaire consiste à calculer les forces générées par tous les chocs, c'est-à-dire les chocs entre particules et avec les parois. Une fois les forces calculées, on en déduit les accélérations et les vitesses et donc les positions des particules au pas de temps suivant [128].

Les modèles de contacts entre particules peuvent prendre en compte la déformation des corps en contact, ainsi que la forme des particules, et la cohésion entre elles. L'interaction entre deux particules est la résultante d'une force normale et d'une force tangentielle, décrite par le modèle *Kelvin-Voigt*. Ce modèle peut être complété par la prise en compte de l'effet triboélectrique [129].

Plusieurs modèles ont déjà été proposés pour calculer localement des échanges de charge par effet triboélectrique [130,131], tous expriment la charge échangée par unité de surface, c'est-à-dire, la densité surfacique de charge (σ) lors de la collision de deux particules isolantes (i et j) en fonction des propriétés des deux matériaux :

$$\sigma = K(\varphi_i - \varphi_j) \tag{I.9}$$

La constante K regroupe des paramètres liés à la géométrie des corps en contact et au milieu ambiant, tandis que φ_i et φ_j sont les travaux d'extraction exprimant l'énergie nécessaire pour extraire ou placer un électron à la surface de chaque particule.

En s'appuyant sur ce modèle, Laurentie a réalisé des simulations numériques basées sur l'hypothèse que l'échange de charge q par unité de surface lors d'une collision entre deux particules sphériques isolantes dépend des propriétés physiques des matériaux en contact. Le modèle de charge par effet triboélectrique a été élaboré dans l'objectif de simuler le comportement des lits vibrés comportant un grand nombre de particules. L'échange de charge entre particules est calculé localement en fonction des propriétés physiques de celles-ci et de l'environnement. En utilisant cette approche, il est possible de représenter à tout instant et en tout point les phénomènes électrostatiques liés à des variations spatiales et temporelles des charges générées par effet triboélectrique. Le modèle peut être exprimée comme suit [128,132,133] :

$$q = \frac{\varepsilon_0}{\delta_e}(\varphi_i - \varphi_j - E\delta_e) \tag{I.9}$$

où : ε_0 la permittivité de l'espace libre, δ la distance de coupure du transfert de charge, e la charge de l'électron, φ le travail d'extraction, représentant de l'énergie nécessaire pour extraire un électron de la surface d'une particule et E le champ électrique au point d'impact des deux particules.

I.4. Conclusions

(1) Le chargement triboélectrique est un phénomène extrêmement complexe. Malgré le nombre de travaux de recherche qui ont été publiés, la compréhension des transferts de charges par contact reste incomplète et vague. Il est difficile de prévoir le chargement triboélectrique en raison de la complexité des facteurs qui le contrôlent.

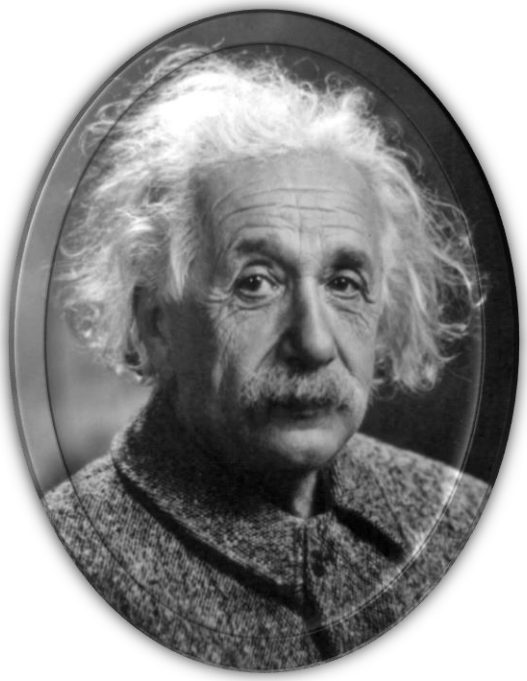
(2) Plusieurs types de dispositifs de chargement triboélectrique ont été développés ces dernières années, chacun a prouvé son efficacité pour des applications bien spécifiques.

(3) Des études réalisées sur le traitement de surface des polymères montrent que cette technique pourrait modifier le comportement du chargement triboélectrique des matériaux polymères granulaires.

(4) L'approche expérimentale avec des analyses phénoménologiques s'impose comme incontournable dans l'étude du chargement triboélectrique.

(5) La modélisation numérique s'est avérée nécessaire pour pouvoir comprendre et étudier le comportement des matériaux granulaires.

Le chapitre suivant est consacré à la mise en œuvre expérimentale avec une description détaillée des dispositifs expérimentaux conçus et réalisés, de l'instrumentation utilisée et des matériaux à séparer.



“Un problème sans solution est un problème mal posé.”

Albert Einstein

Chapitre II

Mise en œuvre expérimentale de la charge triboélectrique et séparation électrostatique des matériaux granulaires

La triboélectrification des polymères est un phénomène de surface complexe, elle dépend essentiellement de la nature chimique des matériaux, de la taille des granules, de leur état de surfaces, du taux d'absorption de l'humidité et des conditions climatiques. Les différentes techniques et installations qui ont été mises en œuvre pour caractériser l'influence de ces paramètres seront présentées dans ce chapitre.

Les caractéristiques des matériaux ayant fait l'objet de l'étude sont présentées dans le paragraphe II.1.1. Le granulateur utilisé pour réduire la taille des polymères, dans le but d'étudier l'influence de la taille des particules isolantes sur la charge triboélectrique ainsi que l'effet de la charge générée lors de l'opération du broyage sur l'efficacité de la séparation électrostatique, est présenté dans le paragraphe II.1.3.

Dans le but d'améliorer l'efficacité du processus de charge triboélectrique, un prétraitement de surface des matériaux granulaires par une décharge à barrière diélectrique (DBD) a été effectué. Les deux bancs d'essais de DBD sont décrits dans le sous chapitre II.2.

Le chargement triboélectrique a été effectué sur trois dispositifs de charge, un chargeur à vibrations, un chargeur à lit fluidisé et un chargeur à cylindres tournants présentés dans le sous chapitre II.3. Le tri des matériaux granulaires chargés par effet triboélectrique a été réalisé en utilisant un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante dont la constitution et le mode de fonctionnement sont explicités dans le sous chapitre II.4.

Le sous chapitre II.5 est consacré à la description de la technique de mesure de la charge triboélectrique pour caractériser l'efficacité de chargement. La méthode des plans d'expériences utilisée pour la modélisation et l'optimisation du processus de séparation électrostatique est présentée dans le sous chapitre II.6.

II.1 Préparation des échantillons

L'efficacité de la charge triboélectrique est fortement dépendante de plusieurs facteurs, comme la taille des granules, la température et l'humidité relative ainsi que la quantité d'eau absorbée par les particules, d'où l'intérêt du strict respect des procédures de préparation des échantillons.

II.1.1. Caractérisation des matériaux

Les différentes gammes des matériaux polymère étudiés sont présentées dans cette section.

II.1.1.1. Echantillons granulaires utilisés

En raison de la diversité des DEEE, nous avons étudié le chargement triboélectrique et la séparation électrostatique de plusieurs types de polymères couramment rencontrés dans le domaine du recyclage des DEEE. La taille et l'aspect des particules faisant l'objet de l'étude peuvent être examinés sur la figure II.1.

- *Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)*

L'ABS offre la résistance au choc la plus élevée de tous les polymères. Il est solide, résilient et facile à mouler, il est composé de 15 % à 35 % de Terpolymère d'acrylonitrile, de 5 % à 30 % de butadiène et de 40 % à 60 % de styrène, il est utilisé pour la fabrication de casques de sécurité, raccords de tuyau, systèmes de sécurité pour la maison, équipement de communication, machines de bureau, éléments de plomberie, habillage interne des réfrigérateurs, coques de valise, etc.

- *Polypropylène (PP)*

Le polypropylène est un thermopolymère bon marché, léger et ductile, il offre de bonnes qualités de résistance chimique, thermique et électrique et une rigidité diélectrique élevée mais il a une faible tenue mécanique. Le PP est produit en très grandes quantités, il est utilisé dans de nombreux secteurs en particulier dans l'emballage, les articles ménagers, l'électroménager et le sanitaire.

- *Polychlorure de vinyle (PVC)*

Le polychlorure de vinyle est un des polymères le moins cher et le plus polyvalent, il est robuste, très résistant aux produits chimiques et aux conditions climatiques. Il a de bonnes propriétés barrières aux gaz atmosphériques, il est composé de 57 % de sel et 43 % de pétrole.

Le PVC est disponible sous forme de films, feuilles et tubes, il est facile à mettre en forme et à colorer. Le PVC est utilisé dans divers secteurs industriels, tels que, la fabrication des tuyaux de canalisation, emballages de cosmétiques, les carcasses de produits électriques, électroniques et informatiques, l'industrie de l'ameublement et dans le bâtiment.

- *Polystyrène (PS)*

Le polystyrène est un polymère bon marché et facilement moulable, il est caractérisé par une excellente résistance électrique. Les plus grandes applications du PS sont : la mousse d'emballage, les boîtiers de cassettes audio/vidéo, les gobelets et couverts jetables, les capots d'appareils électroniques.

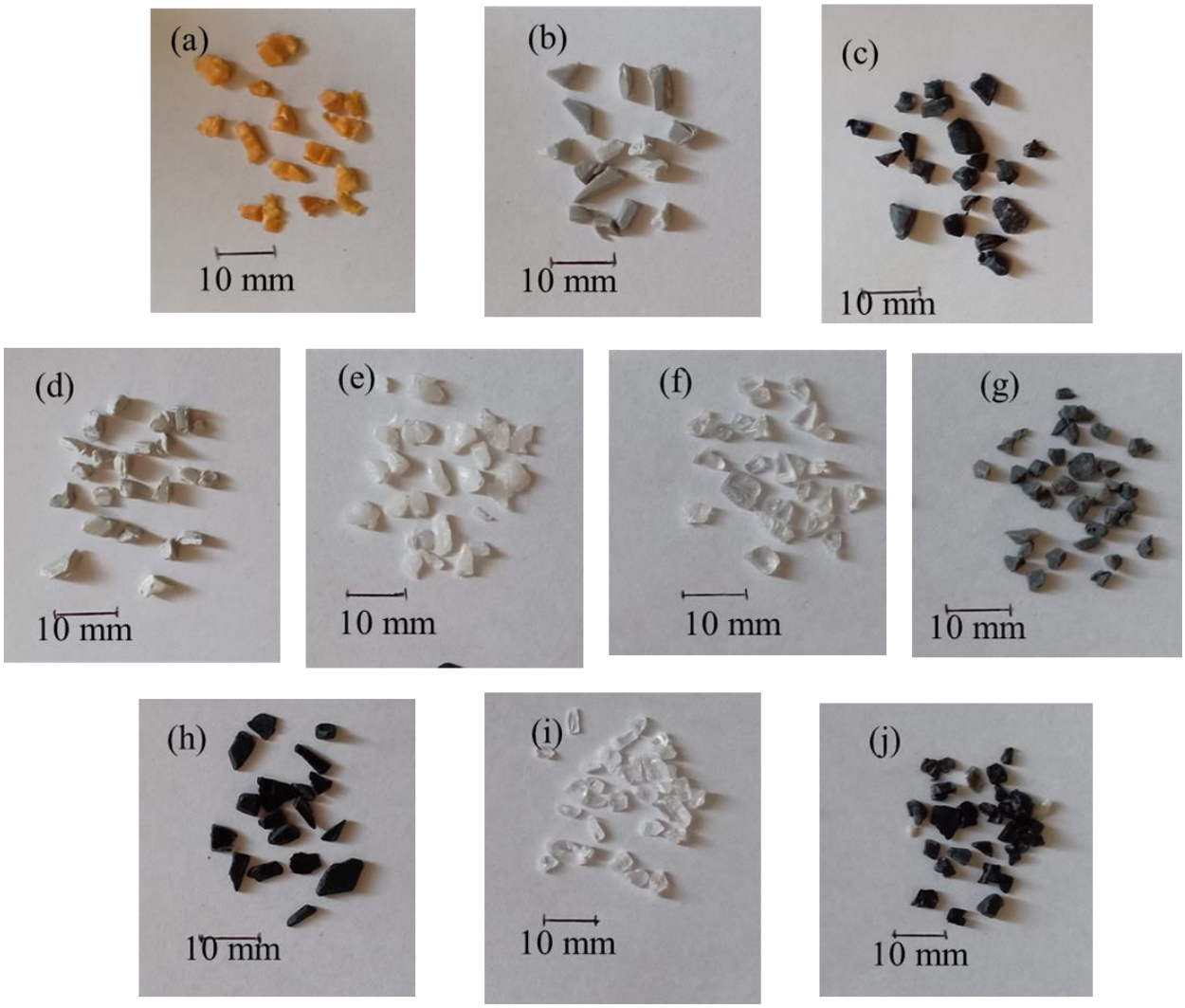


Figure II.1. *Taille et forme des matériaux granulaires étudiées : (a) PP orange ;(b) PP gris ; (c) HIPS noir ; (d) HIPS gris ; (e) PE ; (f) PS cristallin ; (g) PVC ; (h) PS noir ; (i) PC cristallin ; (j) ABS.*

- *Polycarbonate (PC)*

Le PC est un des thermopolymères techniques, c'est un matériau qui a de meilleures propriétés mécaniques que les polymères bon marché de base. La combinaison des structures de l'anneau benzénique et du carbonate dans la structure moléculaire du PC lui donne des caractéristiques uniques de rigidité et de haute résistance à l'impact même à des températures relativement élevées, ainsi que d'excellentes propriétés diélectriques. Le PC est utilisé pour la fabrication des disques compacts, casques de sécurité, capots des appareils électriques, articles médicaux etc.

- *Polyéthylène (PE)*

Le polyéthylène est un matériau bon marché et particulièrement facile à mouler et à mettre en forme, il est extrêmement résistant à l'eau et aux solutions basées sur l'eau. Il est commercialement produit sous la forme de films, feuilles, barreaux, mousses et fibres. C'est un bon isolant électrique avec un facteur de pertes diélectriques faible. Le PE est très largement utilisé pour la fabrication des articles ménagers, jouets, emballage alimentaire, récipients pour aliments, vêtements de protection jetables, sacs en polymère etc.

- *Polystyrène à haute tenue à l'impact (HIPS)*

Le PS à haute résistance à l'impact est un matériau polymère bon marché, facile à produire et à mettre en forme, c'est un mélange de polybutadiène et de polystyrène. Il est beaucoup plus solide, et résiste mieux aux basses températures (jusqu'à - 12 °C) que la plupart des polymères. Il se trouve à l'intérieur des réfrigérateurs et des congélateurs, dans les emballages pour aliments et les jouets.

II.1.1.2. Plaques de polymère issues des DEEE

Afin d'étudier l'influence de la taille des particules obtenues après broyage sur la charge et la séparation triboélectrostatique, trois types de polymère ont été récupérés des DEEE (Figure II.2) : le PC-ABS (un matériau à base de Polycarbonate et d'ABS), le HIPS et le PVC. Les plaques de polymère ont été découpées en morceaux à l'aide d'une scie à ruban (Metabo BAS 261 Precision) pour pouvoir ensuite les broyer.

II.1.1.3. Polymères bromés

Une étude du chargement triboélectrique a été réalisée sur des polymères contenants des retardateurs de flamme bromés (RFB) en vue de démontrer la possibilité de séparer les

polymères contenant les RFB des polymères du même matériau sans RFB. L'étude a été menée sur trois mélanges granulaires (Figure.II.3) : HIPS non-bromé et HIPS contenant 40000 ppm de brome (4,7 %), PP non-bromé et PP bromé, PE non-bromé et PE bromé. Ces polymères ont été produits et fournies par le Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie (CRITT) Polymères, à Verneuil-en-Halate, France.

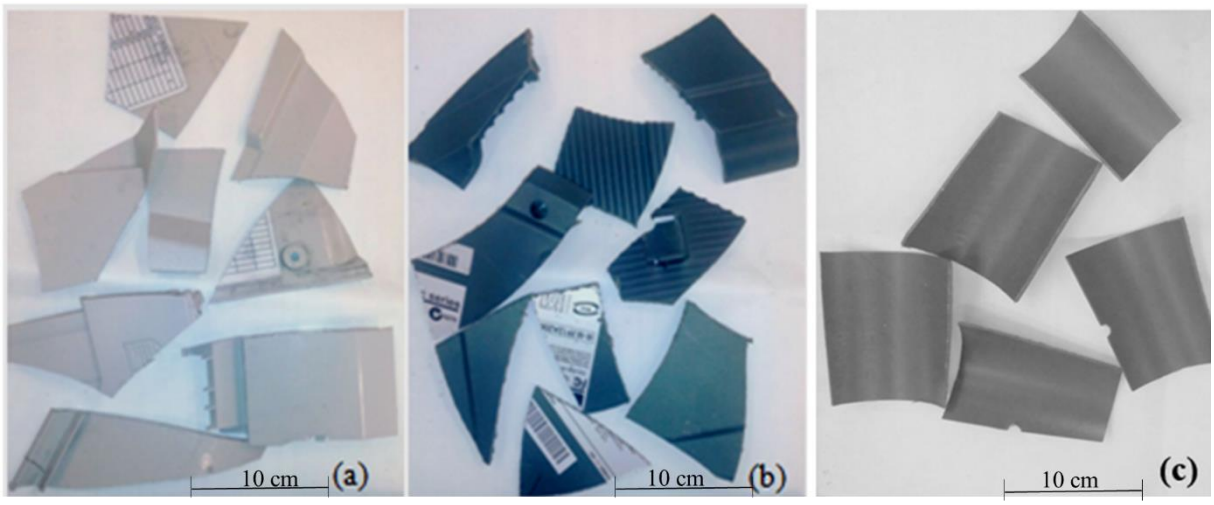


Figure II.2. *Photographies des morceaux de polymère issus des DEEE : (a) PC-ABS ; (b) HIPS ; (c) PVC.*

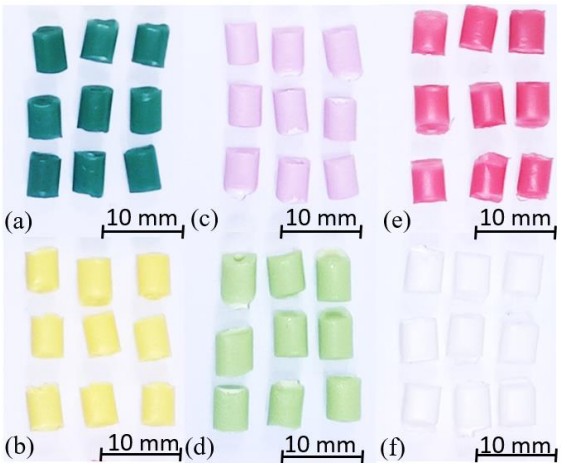


Figure II.3. *Taille et forme des particules de : (a) HIPS bromé ; (b) HIPS non-bromé ; (c) PE bromé ; (d) PE non-bromé ; (e) PP bromé ; (f) PP non-bromé.*

II.1.2. Réduction de la taille des polymères

Afin d'étudier l'influence de la taille des particules sur la charge et la séparation triboélectrostatique, un granulateur fabriqué par l'entreprise CITF (Dorgeville, Saint Cybardeaux, France) a été utilisé soit pour broyer les plaques de polymère, soit pour réduire la taille des granules. Le broyeur présenté dans la figure II.4 est constitué d'une goulotte pour introduire les polymères, d'une chambre de coupe composée de deux lames fixes, de trois lames

rotatives et d'une grille placée sous le système de lames. Quatre grilles de différents diamètres de mailles : 2 mm, 3 mm, 5 mm ou 7 mm sont disponibles. Le choix de la grille dépend de la taille de granulat souhaitée. Les polymères broyés sont ensuite collectés dans le bac de récupération qui se trouve en dessous de la grille.

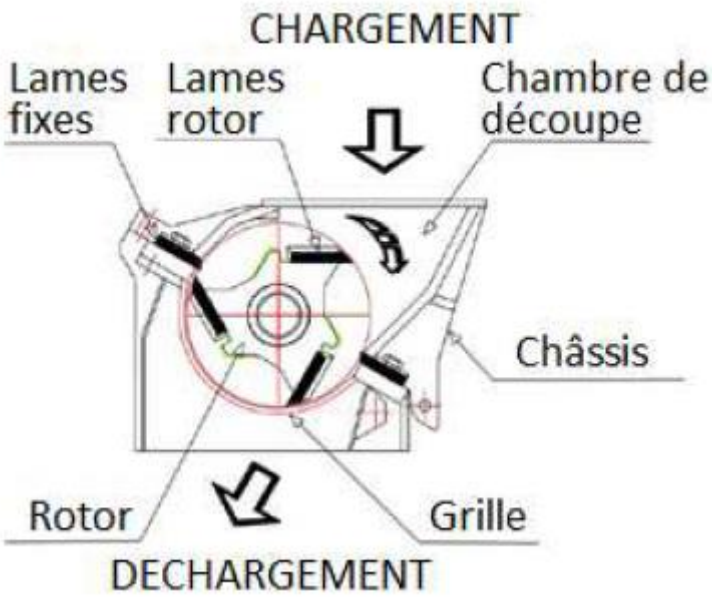


Figure II.4. *Représentation schématique du granulateur [134].*

II.1.3. Neutralisation de la charge résiduelle

Les matériaux isolants conservent les charges électrostatiques générées durant les phases de traitement et de préparation des granules. Ces charges résiduelles non désirées doivent être éliminées ou réduites avant chaque expérimentation car elles peuvent affecter la quantité de charge acquise après le processus de tribochargement ; afin de les éliminer, un neutralisateur de charge a été utilisé (ELCOWA, modèle ECA88-BS). Le neutralisateur est composé d'une source de tension alternative de 5 kV et des électrodes, qui permettent de générer des charges positives et négatives.

II.2. Traitement des matériaux granulaires par plasma non-thermique

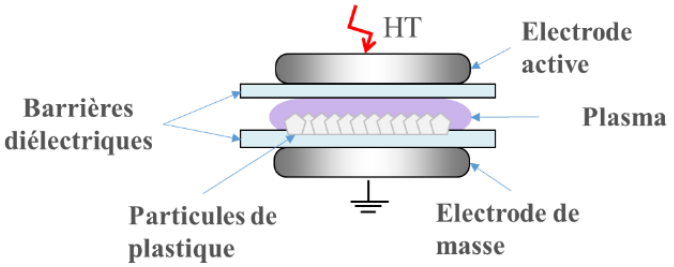
Dans le but d'améliorer la charge triboélectrique de certains polymères, un prétraitement de surface des particules de taille millimétrique par le plasma d'une décharge à barrière diélectrique a été effectué.

II.2.1. Dispositifs de décharge à barrière diélectrique

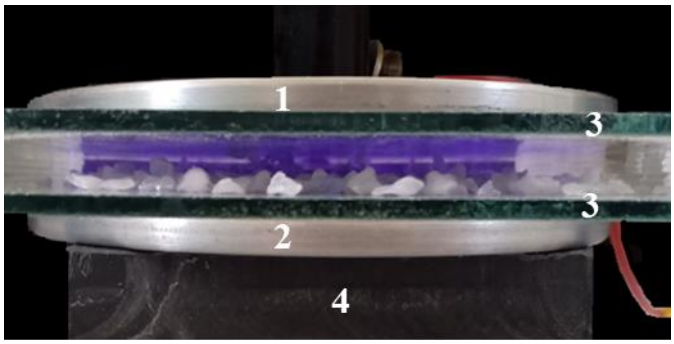
Dans la pratique, il existe de nombreuses variantes de réacteurs de décharge à barrière diélectrique : décharge cylindrique, décharge pointe-plan, décharge plan-plan. Dans notre étude, nous avons testé deux systèmes de DBD plan-plan, un système statique et un système dynamique.

II.2.1.1. Réacteur DBD statique

La cellule de la DBD est constituée de deux électrodes disques en aluminium d'un diamètre de 117 mm et d'une épaisseur de 7 mm, l'électrode supérieure est connectée à la haute tension alors que l'électrode inférieure est reliée à la masse par l'intermédiaire d'une résistance shunt de 100 Ω. Les particules à traiter sont placées entre deux barrières diélectriques en verre interposées entre les deux électrodes (Figure II.5). La distance inter-diélectriques est fixée à l'aide de cales en polymère et la décharge est créée entre les deux barrières diélectriques dans le volume contenant les particules. L'ensemble est fixé sur un support en PVC qui permet de maintenir la cellule de décharge horizontalement.



(a)

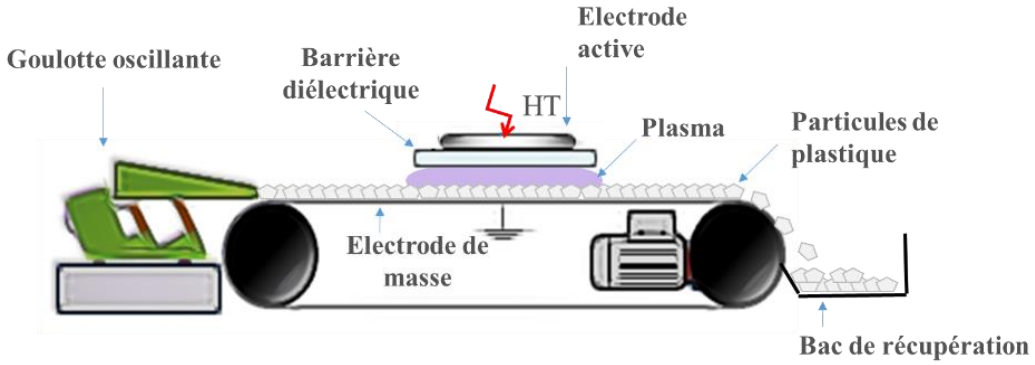


(b)

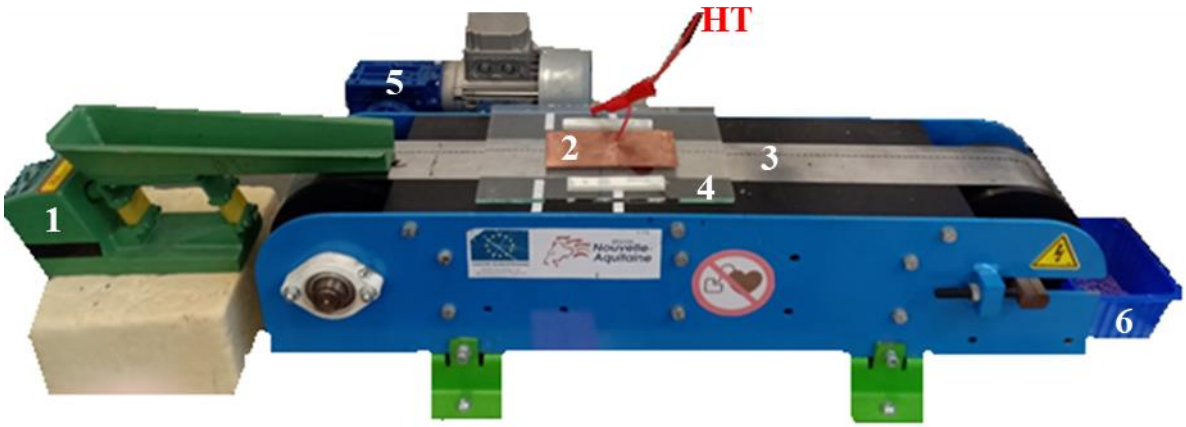
Figure II.5. *Cellule de DBD statique : (a) représentation schématique ;(b) photographie de la cellule : (1) électrode active ; (2) électrode de masse ; (3) barrières diélectriques ; (4) support en PVC.*

II.2.1.2. Réacteur DBD dynamique

Dans ce système de DBD, un convoyeur à bande métallique (fabriqué par la société CITF) entraîné par un moteur électrique triphasé de 120 W, joue le rôle de l'électrode liée à la terre. La DBD est créée entre la bande métallique de 700 mm de longueur et 70 mm de largeur reliée à la masse via une résistance de 100 Ω, et une électrode rectangulaire de 170 mm de longueur et 70 mm de largeur recouverte d'une barrière diélectrique en verre et alimentée par une source de haute tension alternative. Une goulotte oscillante assure le dépôt en monocouche du matériau granulaire à traiter sur la surface de la bande métallique du convoyeur qui les fait traverser la zone de la DBD (Figure II.6).



(a)



(b)

Figure II.6. *Cellule de DBD dynamique : (a) représentation schématique ; (b) photographie de la cellule : (1) goulotte oscillante ; (2) électrode active ; (3) électrode de masse ; (4) barrière diélectrique ; (5) moteur d'entrainement de l'électrode de masse ; (6) bac de récupération.*

II.2.2. Système d'alimentation électrique

Comme le montre la figure II.7, La cellule de DBD est alimentée par un signal de haute tension alternative délivré par un amplificateur (marque TREK, modèle 30/20A), sa tension maximale en AC est de ± 30 kV avec un courant de ± 20 mA et la vitesse de montée du signal de sortie est de 550 V/µs. L'amplificateur est piloté par un générateur de fonction (marque YOKOGAWA, modèle FG300), avec une gamme de fréquences de 1 µHz à 15 MHz. Le générateur de fonction permet de fournir le signal de référence avec lequel on peut effectuer plusieurs réglages sur la haute tension de sortie, tels que le niveau de la tension appliquée, le type de signal (carré, sinusoïdal, triangle, entre autres), la fréquence du signal, ainsi que le réglage du rapport cyclique et de l'offset. Le signal délivré par le générateur de fonction est envoyé directement à l'entrée de l'amplificateur, qui sera ensuite amplifié avec un rapport de 3000 V/ 1V.



Figure II.7. *Système d'alimentation électrique de la cellule de DBD : (1) générateur de fonction ;(2) amplificateur haute tension (3) cellule de DBD.*

II.2.3. Caractérisation électrique

Les principales grandeurs électriques à mesurer pour surveiller le fonctionnement d'une décharge à barrière diélectrique sont la tension appliquée aux électrodes et le courant de décharge. Un oscilloscope numérique à deux chaines (marque LECROY, modèle Waveace 1001), avec une bande passante de 40 MHz, un taux d'échantillonnage de 2 GHz, un temps de

montée de 8,8 ns, une sensibilité verticale de 2 mV/div et une base de temps minimum de 2,5 ns/div, a été utilisé pour visualiser et relever les formes d'onde de la tension et du courant.

Le courant est déduit de la mesure de la tension aux bornes de la résistance de 100 Ω placée en série avec la cellule, tandis que la tension appliquée sur les électrodes est directement mesurée à l'aide de la sonde intégrée de l'amplificateur haute tension (3000/1). Ces deux signaux sont ensuite transmis à l'oscilloscope numérique par l'intermédiaire des câbles coaxiaux.

II.3. Chargement triboélectrique

Trois dispositifs de charge ont été utilisés pour les études de chargement triboélectrique des matériaux granulaires : chargeur à vibration, chargeur à lit fluidisé et chargeur à cylindres tournants. Chaque dispositif a son propre principe de chargement.

II.3.1. Chargeur à vibrations

Ce dispositif de charge (marque Retsch, modèle AS200 basic) est composé d'une boîte en acier inoxydable d'un diamètre de 160 mm reliée à la masse, elle-même fixée sur une plaque vibrante avec une amplitude de vibration pouvant atteindre 3 mm pendant une durée maximale de 60 min (Figure II.8). Les granules placés dans le récipient métallique sont mis en mouvements vibratoires et acquièrent alors une charge électrostatique par impacts avec les parois du récipient et avec les autres granules. Dans ce dispositif, la charge triboélectrique acquise par les matériaux granulaires dépend essentiellement de l'amplitude des vibrations du dispositif et du temps de chargement.

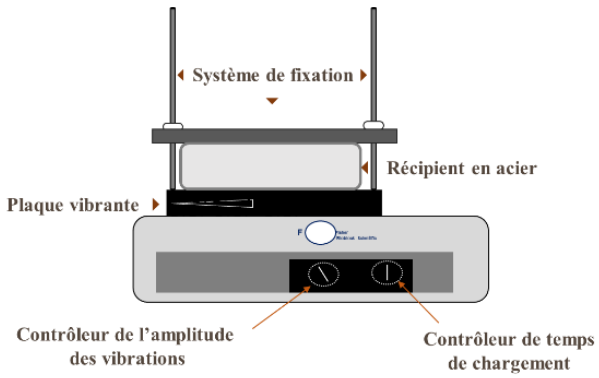


Figure II.8. *Dispositif de charge par vibrations.*

II.3.2. Chargeur à lit fluidisé

Le tribochargeur à lit fluidisé utilisé est de construction originale ; la particularité de ce dernier est sa chambre de fluidisation facilement remplaçable. L'injection de l'air de fluidisation est assurée par une soufflante d'air d'une vitesse pouvant atteindre 419 m/min. Une grille placée au fond de la chambre, au-dessus d'une structure en nid d'abeilles, permet une distribution uniforme de l'air, alors que l'extrémité supérieure de la chambre est équipée d'un filtre pour empêcher les granules de s'échapper. A l'intérieur de la chambre de fluidisation et sous l'effet de l'air ascendant, les particules acquièrent une charge électrique qui résulte des collisions entre les particules elles-mêmes et entre les particules et les parois de la chambre de fluidisation. Les dimensions de la chambre de fluidisation, indiquées sur la figure II.9, permettent la prédominance des impacts granules-granules. Afin d'étudier l'influence de la nature des parois sur la charge triboélectrique, quatre parois de matériaux différents ont été confectionnées : PMMA (polyméthacrylate de méthyle), PS, PP et PE. Les facteurs qui peuvent influer sur l'efficacité du processus de charge à lit fluidisé sont : la vitesse de l'air, le temps de séjour des granules dans la chambre de fluidisation et la nature des parois de la chambre de fluidisation.

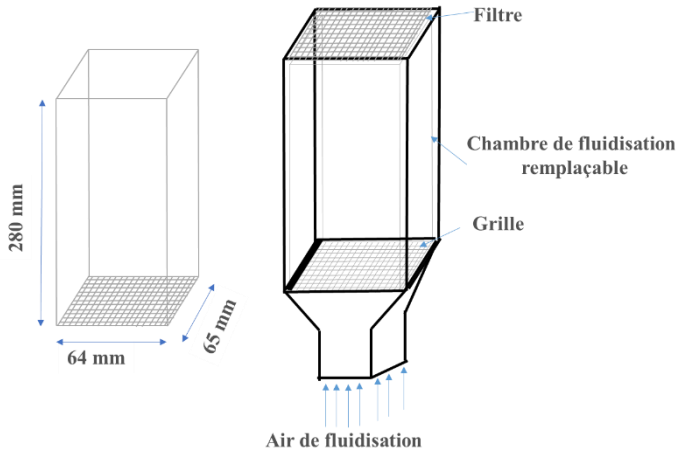


Figure II.9. *Description schématique du chargeur à lit fluidisé.*

II.3.3. Chargeur à cylindre rotatif

Le dispositif de charge présenté à la figure II.10, conçu par l'Institut PPRIME et réalisé par la société CITF, est composé d'un cylindre extérieur creux (diamètre intérieur 120 mm) lié à un moteur dont la vitesse de rotation est variable jusqu'à 120 tr/min. Le cylindre est d'une longueur modulable : 200 mm, 400 mm ou 600 mm. Sa surface intérieure peut être équipée d'un jeu de 3 ou de 6 ailettes de 10 mm ou 15 mm de hauteur destinées à augmenter les impacts

particules-particules et particules-parois. Un deuxième cylindre plein composé de la même matière que le cylindre creux, peut être inséré à l'intérieur de celui-ci et lié à un second moteur permettant sa rotation en sens inverse par rapport à celui du cylindre extérieur jusqu'à 40 tr/min, augmentant également les impacts entre les particules et le chargeur. Les cylindres et les accessoires sont disponibles en deux matériaux : PEHD et PVC. Dans ce dispositif de charge, nombreux facteurs sont capables d'influencer la charge acquise par les particules de polymère : la longueur des cylindres, leurs vitesses de rotations, leur inclinaison, la présence du cylindre intérieur, le nombre et la hauteur des ailettes, la durée de séjour ainsi que le matériau des parois du chargeur [135,136].



Figure II.10. *Dispositif de charge à cylindre tournant : (1) entonnoir pour alimenter le produit ; (2) cylindre extérieur ; (3) système de réglage de l'inclinaison du cylindre ; (4) moteur d'entrainement du cylindre extérieur ; (5) trémie de récupération du produit chargé ; (6) moteur d'entrainement du cylindre intérieur ; (7) armoire électrique.*

II.4. Séparation électrostatique

L'installation de séparation triboélectrostatique fournie par l'entreprise prodecologia (Rivne, Ukraine), illustrée sur les figures II.11 et II.12, est composée d'un dispositif de charge à pales tournantes (Figure II.11 (a)) et d'un séparateur triboélectrostatique à électrode cylindrique tournante (Figure II.11 (b)). Le processus de séparation se compose de deux phases distinctes : chargement triboélectrique et séparation électrostatique. Les particules sont introduites à l'intérieur du dispositif de charge, le cylindre creux métallique, légèrement incliné par rapport à l'horizontal, est muni d'un arbre tournant sur lequel sont fixés deux pales en polyuréthane (PU). Le mouvement de rotation des pales brasse les particules et provoque de multiples contacts entre elles, avec les pales et avec la paroi du cylindre. Une fois les particules chargées, une trappe placée dans la partie basse du cylindre est ouverte, les particules tombent

dans la trémie d'alimentation d'une table vibrante. Celle-ci est aussi munie d'une trappe qui assure la disposition en monocouche du produit à séparer. La table transporte ensuite le produit jusqu'à l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre et les particules sont alors soumises à un champ électrique créé entre cette électrode et une seconde électrode de profil NACA reliée à une source de haute tension qui peut être de polarité positive ou négative avec une valeur maximum de tension de ± 38 kV. Dans ce champ électrique, les particules ayant une charge de polarité opposée à la source de haute tension sont attirées par l'électrode et finissent leurs trajectoires dans le bac B1. Les particules de même polarité que cette électrode sont repoussées et se retrouvent dans le bac B2 du collecteur. Les particules qui restent collées à la surface de l'électrode cylindrique sont détachées par la brosse et collectées dans le bac B3.

Le dispositif de charge et le séparateur peuvent être utilisés simultanément, ou indépendamment.

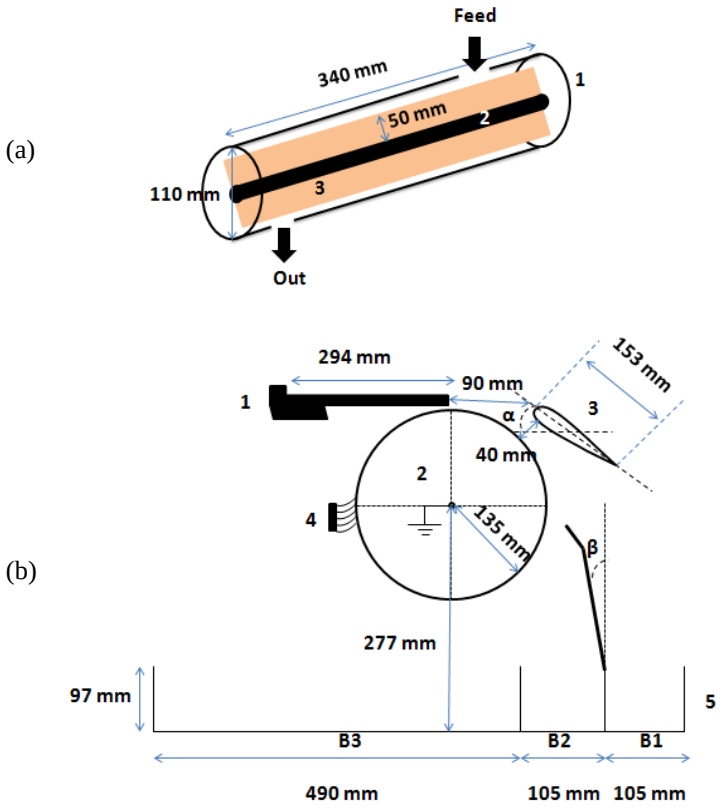


Figure II.11 *Représentation schématique de l'installation de séparation triboélectrostatique : (a) dispositif de chargement : 1. cylindre creux métallique ; 2. arbre tournant ; 3. pales en PU ; (b) séparateur triboélectrostatique à électrode cylindrique tournante : 1. goulotte oscillante ; 2. électrode cylindrique tournante reliée à la terre ; 3. électrode statique reliée à une source de haute tension ; 4. balai ; 5. collecteurs à trois compartiments.*



Figure II.12. *Photographie de l'installation de séparation : (1) trémie d'alimentation du chargeur ; (2) système d'ouverture/fermeture de la trappe du chargeur ; (3) goulotte oscillante ; (4) électrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (5) électrode statique reliée à une source de haute tension ; (6) système de réglage de l'inclinaison du volet déflecteur ; (7) collecteurs à trois compartiments.*

II.5. Techniques de mesure de la charge triboélectrique

La mesure de la charge triboélectrique est réalisée à l'aide d'une cage de Faraday constituée de deux enceintes métalliques concentriques isolées l'une de l'autre (Figure II.13). Le récipient extérieur est relié à la terre et fait office de blindage contre les perturbations électriques extérieures alors que le récipient intérieur est relié à un électromètre (marque Keitheley Instruments, modèle 6514) qui permet la mesure de la charge des particules accumulées dans la cage de Faraday.

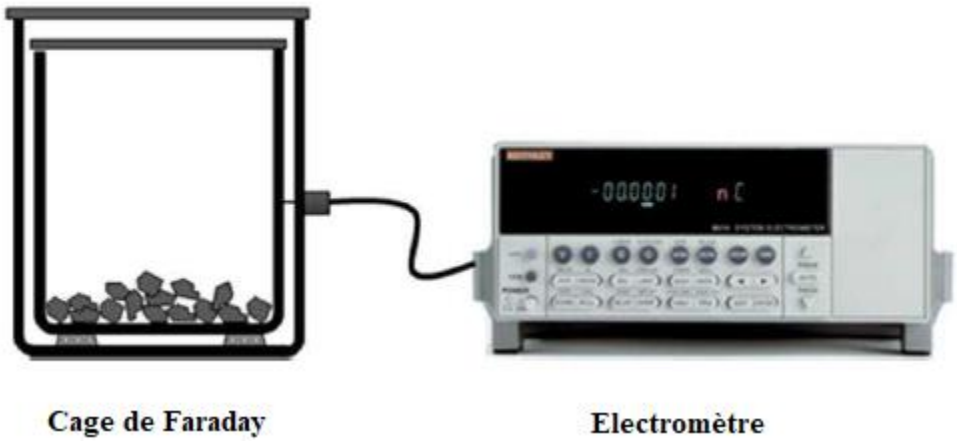


Figure II.13. Système de mesure de charge.

La charge peut également être mesurée simultanément avec la masse des particules en utilisant l'instrumentation virtuelle. Les particules chargées sont récupérées dans une cage de Faraday connectée à l'électromètre et placée sur une balance électronique (marque KERN, résolution 0,01 g). Les deux instruments de mesure sont connectés à un PC équipé d'une carte d'acquisition de données, ce dernier permettra l'acquisition continue et simultanée des mesures de la masse et de la charge des particules en fonction du temps *via* une instrumentation virtuelle, créée avec le logiciel LABVIEW.

II.6. Méthode des plans d'expériences [137]

La méthode des plans d'expériences est utilisée pour la modélisation et l'optimisation d'un processus. Cette méthode fournit autant d'informations que possible sur le fonctionnement du processus avec un minimum d'essais, pour cela, il suffit de suivre des règles mathématiques et d'adopter une démarche rigoureuse. La méthode des plans d'expériences détermine le nombre d'expériences à réaliser et prédit le comportement du processus dans un domaine d'utilisation dépendant de plusieurs facteurs pouvant varier simultanément. De plus, elle permet une interprétation rapide en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié.

Lors de la conception d'un plan d'expériences, il est important de sélectionner des variables d'entrée (facteurs) potentiellement influents sur le processus.

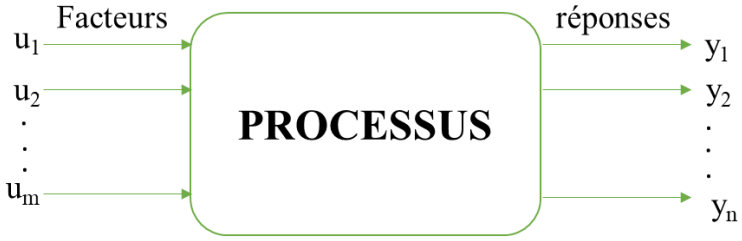


Figure II.14. *Représentation schématique d'un processus.*

L'étude du processus peut généralement être résumée comme suit : le processus fournit des réponses y_i en fonction des facteurs u_i (Figure II.14). Le comportement d'un système peut être défini en exprimant les n variables de sortie y_i (avec $i = 1, \ldots, n$), comme fonctions des variables d'entrée u_i ($i = 1, \ldots, m$), qui peuvent être contrôlées.

Chaque réponse y_i peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$y_i = c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ij} u_i^2 \qquad \text{(II.1)}$$

Une variable centrée réduite x_i est définie pour chaque facteur u_i, avec la relation :

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

Où

$$u_{i0} = \frac{(u_{imax} + u_{imin})}{2} \; ; \; \Delta u_i = \frac{(u_{imax} - u_{imin})}{2} \qquad \text{(II.3)}$$

La fonction de réponse devient :

$$y_i = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ij} x_i^2 \qquad \text{(II.4)}$$

où x_i a la valeur -1 pour le niveau inférieur u_{imin} du facteur et la valeur +1 pour le niveau supérieur du même facteur u_{imax}.

Dans la méthode des plans d'expériences, les plans factoriels complets sont les plus simples et les plus couramment utilisés. La figure II.15 montre la représentation graphique des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences complet pour un domaine défini par 3 facteurs. Un plan factoriel complet permet d'exprimer la réponse par un polynôme de premier degré.

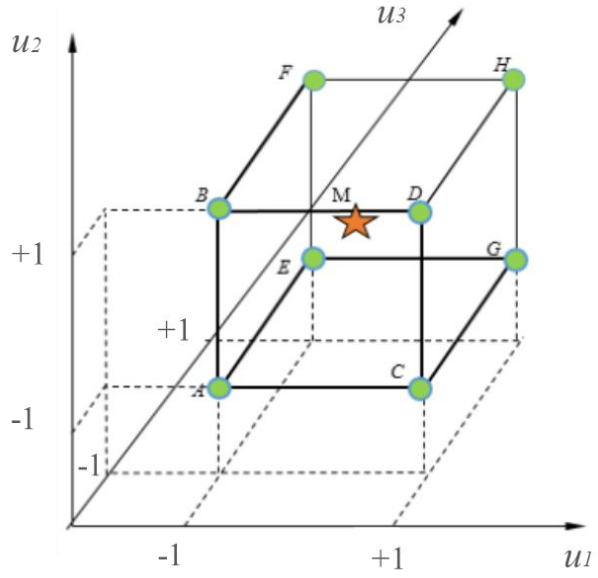


Figure II.15. *Représentation des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences complet.*

Lorsque le domaine expérimental est défini à partir des variations de *k* facteurs, le nombre total des essais *n* est déterminé par la relation :

$$n = 2^k + 2k + 3 \qquad \text{(II.5)}$$

La réponse y_i peut alors s'exprimer en fonction des *k* facteurs comme suit :

$$y_i = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{i,j,l} x_i x_j x_l + \cdots + a_{i,j\ldots k} x_i x_j \ldots x_k \qquad \text{(II.6)}$$

Les plan factoriels composites conduisent à un modèle polynôme de second degré. La construction de ces plans consiste à rajouter des points en étoile à partir d'un plan factoriel complet. Ces points sont positionnés à une distance ± *a* du centre du domaine suivant les axes des facteurs. L'ensemble de ces points constitue un dispositif au sein duquel on ne fait varier qu'un seul facteur à la fois. Il y a donc 2*k* points en étoile, *k* étant le nombre des variables du plan d'expériences (Figure II.16). Le domaine de variation d'un facteur est représenté par un segment, et le point de mesure est marqué par un point. L'étoile marque le centre du domaine total de la variation, correspondant du centre de chaque facteur.

$$y_i = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{i,j,l} x_i x_j x_l + \cdots + a_{i,j\ldots k} x_i x_j \ldots x_k + \sum a_{i,j} x_i^2 \quad \text{(II.7)}$$

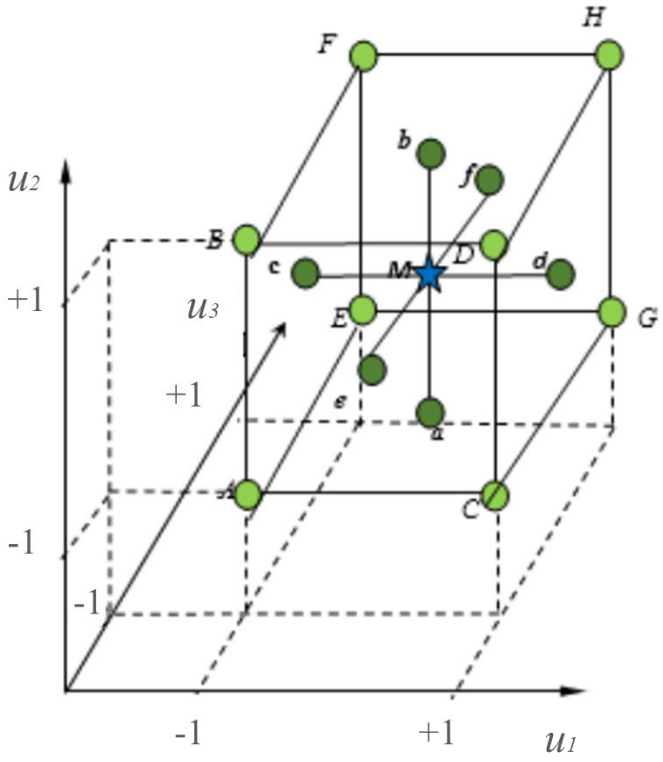


Figure II.16. *Représentation graphique des points expérimentaux du plan composite.*

La Qualité descriptive du modèle, appelé la qualité de l'ajustement, traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, le coefficient de détermination appartient à l'intervalle suivant :

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

Où 1 indique un modèle parfait et 0 indique aucun modèle.

Le modèle obtenu peut servir à prédire la valeur de la réponse non encore réalisés. Il est possible de définir la qualité prédictive du modèle Q^2. Par définition, le coefficient Q^2 appartient à l'intervalle suivant :

$$-\infty \leq Q^2 \leq 1$$

Plus la valeur du coefficient Q^2 est proche de 1, plus la qualité prédictive du modèle est importante.

Les deux paramètres doivent être élevés, et de préférence non séparés par plus de 0,2 à 0,3.

Parmi les logiciels utilisés pour optimiser des processus on cite le logiciel MODDE de la société *Umetrics*, qui est spécialisé dans la construction et l'analyse de plans d'expériences. Pour cela, il suffit d'y indiquer les différents facteurs et réponses ainsi que le type de plan d'expériences. Le logiciel fournit alors les informations sur les expériences devant être effectuées. Lorsque les résultats de ces expériences sont intégrés au logiciel, celui-ci calcule les modèles mathématiques représentant chaque réponse en fonction de tous les facteurs. Ainsi, il peut définir, dans les plages de variation des facteurs, le point de fonctionnement optimal répondant aux objectifs de l'utilisateur, c'est-à-dire les valeurs des facteurs pour lesquelles les réponses du processus sont les plus proches des objectifs.

II.7. Conclusions

Ce chapitre a été consacré à la présentation et la description des installations de chargement triboélectrique et de séparation triboélectrostatique. Plusieurs points importants y ont été abordés.

(1) Tenant en compte de la diversité des matériaux qui composent les DEEE, des études seront menées sur plusieurs types de polymères.

(2) Plusieurs installations seront utilisées pour étudier l'influence de plusieurs facteurs sur le comportement triboélectrique des matériaux : facteurs géométriques (taille des granules), facteurs climatiques (humidité relative, humidité absorbée et température), état de surface (rugosité et mouillabilité) et composition chimique (présence des retardateurs de flamme bromés).

(3) Les dispositifs de charge triboélectrique et le séparateur triboélectrostatique serviront à mettre en évidence la capacité des polymères à acquérir et à conserver des charges électrostatiques en vue de leurs séparations électrostatiques.

(4) Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries.



“Lorsque deux forces sont jointes, leur efficacité est double.”

Isaac Newton

Chapitre III

Influence de la réduction des tailles des matériaux granulaires sur leur séparabilité triboélectrostatique

La séparation triboélectrostatique utilise l'effet triboélectrique en conjonction avec les forces du champ électrique. Ce processus se compose donc de deux phases consécutives : la charge électrique des matériaux granulaires diélectrique par effet triboélectrique suivie de leur séparation sous l'action d'un champ électrique intense, selon leur polarité grâce à la force électrique appliquée aux particules.

L'efficacité de la séparation triboélectrostatique dépend essentiellement des niveaux de la charge triboélectrique acquise par les polymères à trier. Un grand nombre de facteurs contrôlables et incontrôlables peuvent influencer de façon significative la charge triboélectrique ainsi que le résultat de la séparation électrostatique [138,139]. Les tailles et les formes des particules ont un grand impact sur le processus d'acquisition de la charge triboélectrique. Compte tenu de la diversité dimensionnelle des déchets polymères collectés, il est nécessaire de contrôler leurs tailles par une opération de broyage. Celle-ci réduit les matériaux à trier à des tailles appropriées (généralement inférieures à 5 mm) avant de les soumettre à une séparation électrostatique.

Etant donné que le broyage est utilisé en amont d'une unité de recyclage comme une phase de prétraitement, le but du travail qui sera présenté dans ce chapitre est de :

(1) Etudier l'influence de la réduction des tailles des granules sur l'efficacité du processus de charge triboélectrique et de la séparation électrostatique ;

(2) Évaluer la possibilité d'utiliser le broyage en tant qu'opération simultanée de réduction de tailles et de chargement triboélectrique ;

(3) Quantifier l'effet de la distribution granulométrique des mélanges sur la charge triboélectrique générée durant le broyage et sur l'efficacité de la séparation électrostatique.

III.1. Effet des tailles des granules

Afin d'étudier l'influence des tailles des granules isolants ainsi que la composition du mélange sur la charge triboélectrique et sur la séparation électrostatique, il est indispensable

d'utiliser un dispositif avec les meilleurs régalages en termes de récupération et de pureté. Les résultats de l'optimisation d'une installation de séparation par la méthode des plans d'expériences seront présentés dans cette section.

III.1.1. Optimisation de l'installation de séparation

Dans le cadre d'un partenariat international, l'entreprise Prodecologia a mis à la disposition de l'Institut PPRIME un séparateur électrostatique à cylindre tournant doté d'un dispositif de charge à pales tournantes. La méthode des plans d'expériences a été utilisée pour modéliser et optimiser le processus afin de déterminer le point de fonctionnement optimal de l'installation. Pour cette étude, deux types de particules ont été utilisé : le PP et le HIPS.

III.1.1.1. Procédure expérimentale

Dans l'installation de séparation triboélectrostatique de la société Prodecologia (paragraphe II.4 ; Figure II.11 et Figure II.12), les particules acquièrent une charge dont la valeur et la polarité dépendent des collisions entre les particules, ainsi que des impacts des particules avec les pales en PU et les parois du chargeur. Après une durée de charge qui peut varier selon la composition du mélange, la trappe placée dans la partie basse du cylindre est ouverte pour conduire les particules chargées dans la zone de champ électrique intense et les séparer selon la polarité de leur charge.

La méthode des plans d'expériences a été mise œuvre afin d'évaluer les effets des trois facteurs considérés parmi ceux pouvant affecter les résultats de la charge triboélectrique et la séparation électrostatique : la durée de chargement *t*, l'angle d'inclination de l'électrode statique reliée à la haute tension α, et la tension appliquée à cette électrode *U*. Pour chaque expérience, un mélange de 100 g composé de parts égales de PP (Figure II.1 (a)) et de HIPS (Figure II.1 (c)) a été chargé et ensuite séparé. Quatre réponses ont été considérées dans cette étude : les taux de récupération et de pureté des deux produits.

Sur la base des résultats des tests préliminaires, l'inclinaison du volet déflecteur $\beta = -10^{\circ}$, la vitesse de l'électrode cylindrique $n = 40$ tr/min et le débit de matière à la sortie de la goulotte oscillante $Q = 2{,}5$ g/s ont été maintenus constants, tandis que le domaine de variation de chaque facteur étudié a été établi comme indiqué dans le tableau III.1.

Toutes les expériences ont été effectuées dans des conditions climatiques stables, à des températures comprises entre 17 °C et 17,8 °C et des humidités relatives ambiantes variant entre 36,9 % et 37,4 %.

Tableau III.1. *Domaines de variation des trois variables de contrôle.*

Niveau	*t* (min)	*α* (°)	*U* (kV)
-1	2	15	15
0	4	25	20
1	6	35	25

III.1.1.2. Résultats et discussion

Les valeurs des quatre réponses pour les 17 essais de modélisation expérimentale par la méthode des plans d'expérience sont indiquées dans le tableau III. 2. La pureté et la récupération ont été calculées à l'aide des équations (III.1) et (III.2) :

$$Pur\ x(\%) = \frac{m_{xBx}}{m_{TBx}} \times 100 \quad \text{(III.1)}$$

$$Rec\ x\ (\%) = \frac{m_{xBx}}{m_{xB1}+m_{xB2}+m_{xB3}} \times 100 \quad \text{(III.2)}$$

avec m_{xBx} la masse du produit *x* collectée dans le collecteur qui lui est réservé ; m_{TBx} est la masse totale récupérée en *Bx* (compartiment réservé au produit *x*) et m_{xBi} est la masse du produit *x* collectée dans les différents collecteurs B1, B2, B3.

Les coefficients statistiques R^2 et Q^2 qui expriment respectivement, la qualité descriptive et prédictive des quatre réponses, sont donnés dans le tableau III.3. Nous avons ainsi établi les modèles mathématiques suivants exprimant le rendement du processus en termes de pureté et de récupération des produits séparés :

$$RecPP = 89{,}01 + 14{,}79\,U + 6{,}39\,t - 11{,}79\,\alpha - 5{,}70\,t^2 + 7{,}85\,U \times \alpha + 4{,}35\,t \times \alpha \quad \text{(III.3)}$$

$$PurPP = 87{,}64 - 2{,}27\,U + 3{,}03\,t + 2{,}87\,\alpha + 1{,}28\,U^2 - 3{,}26\,t^2 + 1{,}39\,\alpha^2 - 0{,}30\,U \times t + 1{,}61\,t \times \alpha \quad \text{(III.4)}$$

$$RecHIPS = 87{,}20 - 4{,}75\,U + 1{,}2\,t + 3{,}93\,\alpha + 1{,}30\,U^2 - 2{,}53\,t^2 - 0{,}71\,U \times \alpha \quad \text{(III.5)}$$

$$PurHIPS = 89{,}34 + 10{,}78\,U + 5{,}01\,t - 8{,}22\,\alpha - 2{,}99\,U^2 - 3{,}86\,t^2 + 3{,}98\,U \times \alpha + 3{,}52\,t \times \alpha \quad \text{(III.6)}$$

Tableau III.2. *Résultats du plan factoriel composite.*

			Compartiment B1 (PP)		**Compartiment B2 (HIPS)**	
Temps	**Angle**	**Tension**	**Rec PP**	**Pur PP**	**Rec HIPS**	**Pur HIPS**
***t* (min)**	***α* (°)**	***U* (kV)**	**(%)**	**(%)**	**(%)**	**(%)**
2	15	15	81,0	85,3	85,5	82,3
2	15	25	99,4	81,2	78,0	99,8
6	15	15	88,3	89,0	88,0	88,8
6	15	25	98,17	83,5	79,5	98,5
2	35	15	32,2	87,8	94,5	52,7
2	35	25	81,7	84,0	83,6	82,6
6	35	15	56,7	97,6	97,4	69,8
6	35	25	98,2	92,9	86,6	98,9
4	25	15	67,6	91,5	93,1	74,7
4	25	25	96,3	87,0	83,3	96,4
2	25	20	72,9	81,3	83,3	79,0
6	25	20	89,9	87,0	85,4	90,3
4	15	20	97,8	86,0	83,3	98,4
4	35	20	78,0	91,6	91,6	81,6
4	25	20	93,2	88,0	87,6	91,8
4	25	20	87,4	87,8	87,0	87,9
4	25	20	94,1	88,0	88,3	91,6

Tableau III.3. *Valeurs des coefficients Q^2 et R^2 pour chaque réponse.*

Coefficients	Rec PP (%)	Pur PP (%)	Rec HIPS (%)	Pur HIPS (%)
Q^2	92,7	98,7	97,1	92
R^2	98,2	99,7	99,4	99

Les courbes de prédiction de la figure III.1 données par le logiciel MODDE, montrent que la haute tension appliquée influe fortement sur la récupération de PP et la pureté de HIPS ; quand la haute tension augmente, la récupération du PP et la pureté du HIPS atteignent des valeurs élevées. Cependant, à des niveaux de tension plus élevés, la pureté du HIPS ne dépassant pas 83 %, ce qui signifie que le champ électrique généré devient suffisamment puissant pour conduire au collecteur B1 non seulement des particules de PP, mais aussi certaines particules de HIPS.

Des courbes assez similaires sont obtenues pour l'effet de la durée de chargement sur les quatre réponses. La pureté et la récupération des deux produits augmentent avec l'augmentation du temps de séjour des particules dans le chargeur et restent constantes après $t = 4$ min (Figure III.2).

L'angle d'inclinaison de l'électrode haute tension a un effet positif sur la pureté du PP et la récupération du HIPS. Ce facteur modifie l'intensité et la distribution du champ électrique dans l'espace inter-électrodes, ce qui affecte les résultats de la séparation.

Selon le logiciel MODDE, les conditions de fonctionnement optimales du procédé sont les suivantes : $t = 5$ min 20 sec, $\alpha = 35°$ et $U = 25$ kV et pour lesquelles les valeurs prédites de la pureté et de la récupération des produits séparés sont [140] :

RecPP = 98,72 %, *PurPP* = 93,04 %, *RecHIPS* = 87,42 %, *PurHIPS* = 97,51 %.

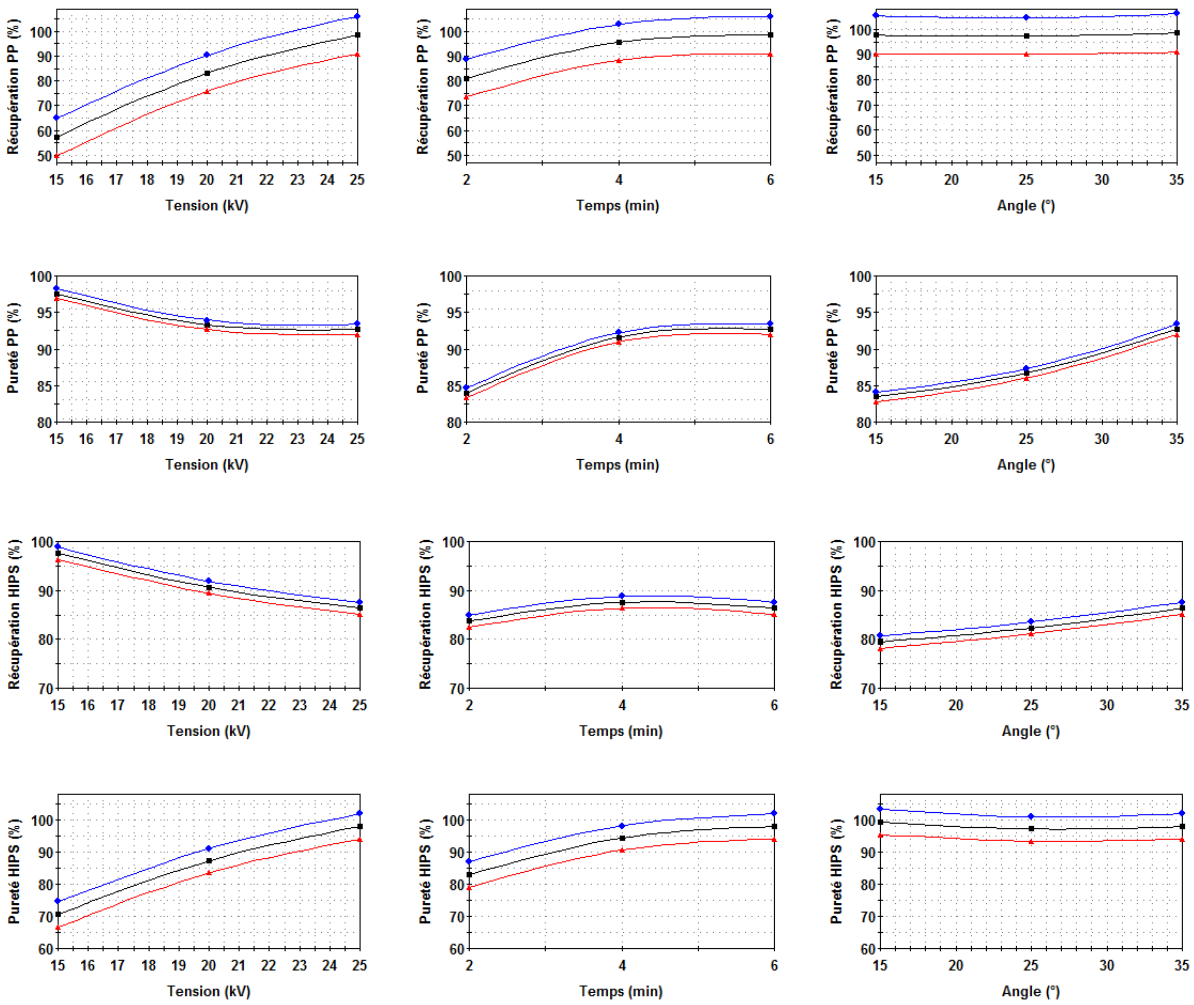
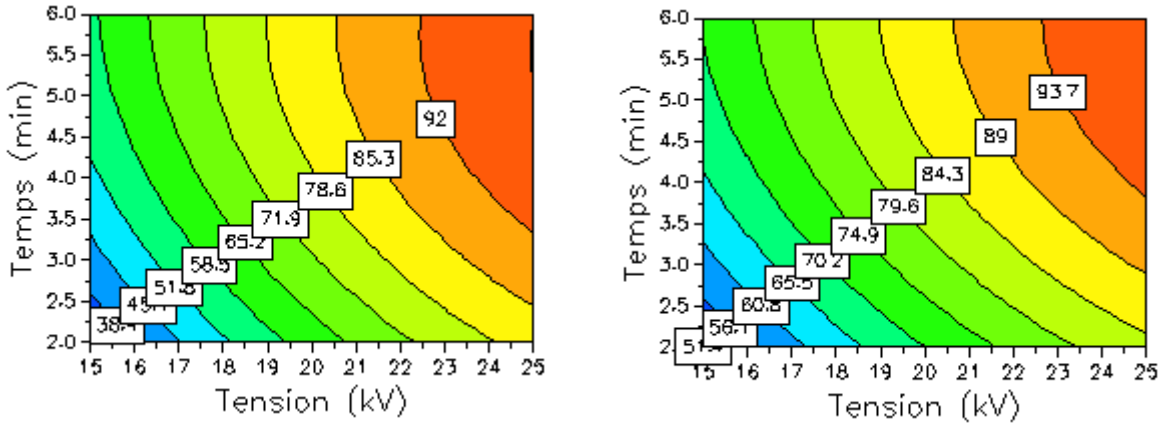


Figure III.1. *Courbes de prédiction pour les trois variables, avec β = - 10°, n = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s. (Les courbes rouge et bleu correspondent à l'intervalle de niveau de confiance de 95 %).*



(a) *(b)*

Figure III.2. *Iso-contours de : (a) récupération du PP et (b) pureté du HIPS, en fonction du temps de chargement et la tension et appliquée à l'électrode (β = - 10°, n = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s).*

III.1.2. Amélioration du rendement de l'installation de séparation

Ce travail avait pour but d'étudier plusieurs possibilités de pré-conditionnement d'un mélange granulaire de particules polymères provenant des déchets d'équipements électriques et électroniques, et de démontrer qu'une opération supplémentaire de broyage peut améliorer les performances de l'installation de séparation.

III.1.2.1. Procédure expérimentale

Les expériences décrites dans ce paragraphe ont été menées sur des échantillons de 200 g composés de parts égales de PP (Figure II.1 (a)) et de HIPS (Figure II.1 (c)). La charge triboélectrique et la séparation électrostatique des mélanges granulaires ont été réalisées avec l'installation fournie par la société Prodecologia (paragraphe II.4 ; Figure II.12). Toutes les expériences ont été réalisées au point de fonctionnement optimal de l'installation, à savoir avec la vitesse fixe de l'arbre tournant du chargeur n_1 = 55 tr/min, le temps de chargement t = 5 min, l'angle d'inclinaison de l'électrode haute tension α = 35°, la haute tension appliquée à l'électrode U = 25 kV de polarité positive, l'inclinaison du volet déflecteur β = - 10°, la vitesse de l'électrode cylindrique n_2 = 40 tr/min et le débit de la matière traitée Q = 2,5 g/s.

Dans la première partie, 4 procédures de traitement des échantillons contenant 50 % de PP et 50 % de HIPS ont été étudiées [141] :

- La procédure #1 consistait à séparer un mélange de 200 g de granules de tailles moyennes comprises entre 2 mm et 6 mm (Figure III.3 (a)) au point de fonctionnement optimal de l'installation de séparation triboélectrostatique.

- Dans la série d'expériences #2, un mélange granulaire de tailles moyennes également comprises entre 2 mm et 6 mm a été soumis à un broyage, en utilisant un dispositif composé de deux lames fixes, trois lames rotatives et une grille placée en dessous du système à lames (paragraphe II.1.2 ; Figure II.4). Le mélange obtenu a été neutralisé pour éliminer les charges triboélectriques acquises dans la phase de broyage à l'aide du dispositif décrit au paragraphe II.1.3, et ensuite stocké pendant 24 h dans les conditions climatiques ambiantes, puis chargé et séparé comme dans la première série. La figure III.3 (b) montre les formes et les tailles des particules PP et HIPS après broyage en utilisant une grille ayant des mailles de 2 mm de diamètre. Après le broyage, une séparation granulométrique a été réalisée, 42 % des granules dans le mélange avaient des tailles entre 0,5 mm et 1 mm, et 58 % entre 1 mm et 2 mm.

- Dans la série #3, le mélange à séparer a été broyé, neutralisé puis alimenté en continu dans l'installation de séparation triboélectrostatique de la société Prodecologia. Toutes les variables de contrôle de l'installation de séparation ont été définies comme dans les expériences précédentes, à l'exception du temps de chargement. Dans ce cas, la trappe de sortie du dispositif de charge était ouverte dès l'introduction des particules, la durée de chargement était alors limitée au temps de passage des particules à travers le dispositif de charge.

- L'ensemble des expériences #4 a consisté à broyer des mélanges de PP et de HIPS, suivis immédiatement d'une séparation triboélectrostatique. Avec la trappe de sortie ouverte, le dispositif de charge de l'installation Prodecologia a été utilisé uniquement pour transférer le mélange vers l'unité de séparation à un débit de 2,5 g/s.

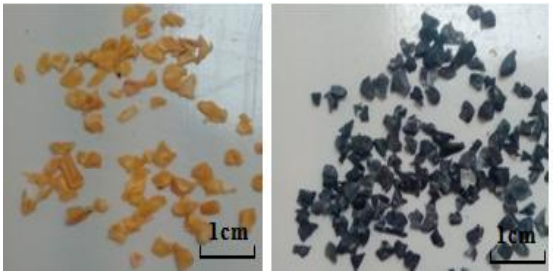
Dans la deuxième partie de l'étude expérimentale, des échantillons de 200 g de mélanges de PP et de HIPS ont été préparés sous forme de mélanges binaires de compositions différentes : 20 % PP - 80 % HIPS, 80 % PP - 20 % HIPS, 40 % PP - 60 % HIPS, 60 % PP - 40 % HIPS et 50 % PP - 50 % HIPS. Les granules tribochargés dans le broyeur ont été traités en utilisant la même procédure que dans l'ensemble des expériences #4 [141].

Après chaque expérience, les produits collectés ont été transférés dans une cage de Faraday connectée à un électromètre (marque Keithley Instruments, modèle 6514), afin de mesurer la charge des produits récupérés dans chaque compartiment. Après la mesure de la charge, les particules collectées dans chaque boîte ont été séparées manuellement en fonction de la différence de couleurs de chaque type de polymère, puis la masse des deux types de particules présentes dans chaque compartiment a été mesurée à l'aide d'une balance électronique (marque KERN PCB, résolution 0,001 g). La pureté et la récupération ont été calculés à l'aide des équations (III.1) et (III.2).

Toutes les expériences ont été réalisées dans des conditions climatiques stables, à des températures comprises entre 23,4 °C et 25,1 °C et une humidité relative ambiante variant entre 54,6 % et 57,3 %.



(a)



(b)

Figure III.3. *Tailles et formes des particules de PP et de HIPS : (a) avant et (b) après réduction de tailles (Diamètre des mailles de la grille = 2 mm).*

III.1.2. Résultats et discussion

Dans tous les cas étudiés, la plupart des particules de PP se sont chargées négativement et ont été récupérées dans le compartiment B1, tandis que la plupart des particules de HIPS se sont chargées positivement et ont été collectées dans le compartiment B2. Le produit collecté dans le compartiment B3 a été regroupé avec le compartiment B2, car il contient principalement des particules de HIPS.

Dans l'ensemble des expériences #1, la récupération du PP n'a pas dépassé 78 % avec une pureté de 91 % (Figure III.4 (a)). En fait, les granules de PP qui ont une charge négative élevée sont facilement déviés vers l'électrode positive, tandis que les particules mal chargées tombent librement dans le compartiment B2, ce qui détériore l'efficacité de la séparation. D'autre part, la pureté du HIPS n'a pas excédé 80 % avec une récupération qui dépasse 90 %. La charge massique enregistrée pour les produits récupérés dans les deux collecteurs B1 et B2 était égale à - 6,05 nC/g pour le PP et + 4,5 nC/g pour le HIPS.

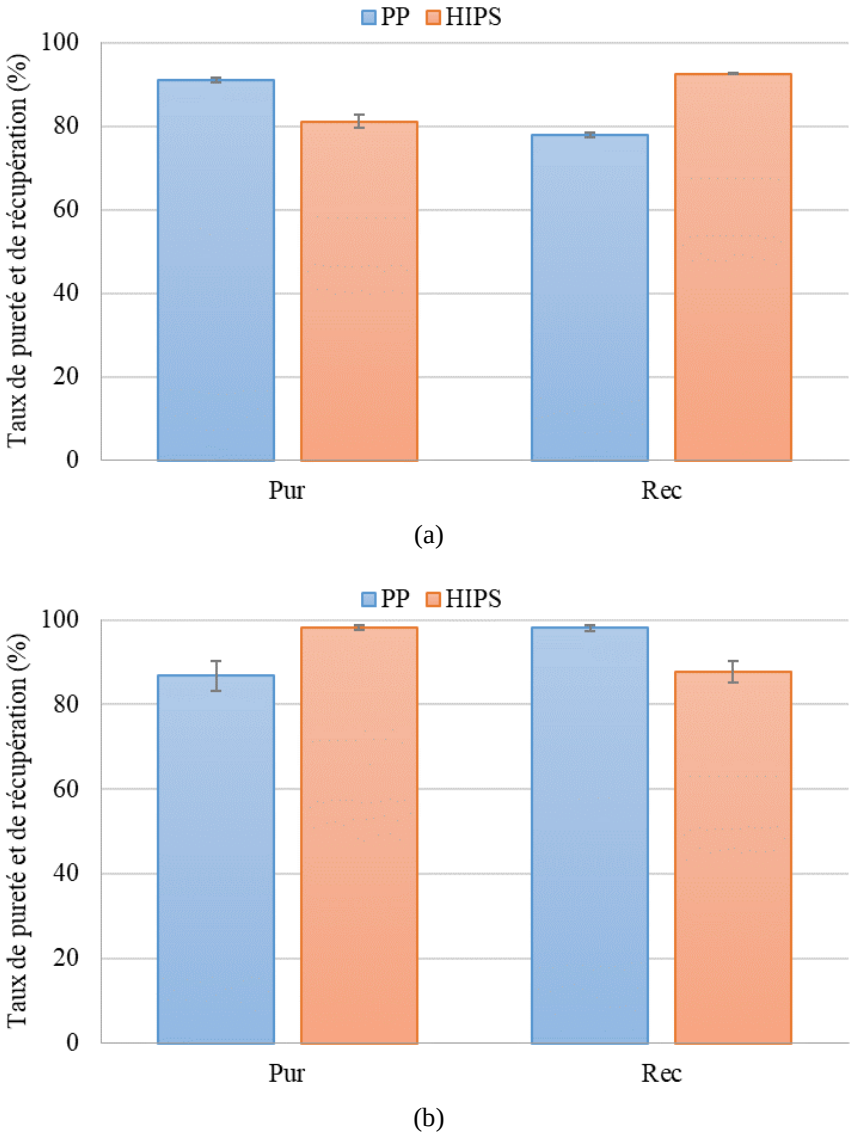


Figure III. 4. *Taux de pureté et de récupération du PP et du HIPS au point de fonctionnement optimal de l'installation de séparation triboélectrostatique : (a) avant et (b) après réduction de tailles. (Diamètre des mailles de la grille = 2 mm, n_1 = 55 tr/min, t = 5 min, α = 35°, U = 25 kV, β = - 10°, n_2 = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s).*

Dans le cas de granules de tailles réduites (expérience #2), le PP et le HIPS ont été caractérisés par des charges triboélectriques de - 12,3 nC/g et + 5,4 nC/g, respectivement. Comme le montre la figure III.4 (b), la réduction des tailles des particules conduit à de meilleurs résultats de séparation : 98 % des granules de PP ont été récupérés avec une pureté de 87 %, tandis que la récupération et la pureté du HIPS étaient respectivement de 88 % et de 98 %.

Les particules de PP acquièrent une charge très élevée au sein du dispositif de charge, ce qui améliore l'action des forces du champ électrique qui les conduisent vers l'électrode haute tension, afin de les collecter dans le bac B1. Toutefois, il n'était pas possible d'atteindre des

valeurs de pureté du PP et récupération du HIPS supérieures à 88 %. En effet, les particules de HIPS et de PP de petites tailles ont tendance à former des agglomérats, qui sont déviées par la suite vers l'électrode haute tension car leur charge totale est de polarité négative.

Selon les résultats présentés sur la figure III.5, 77 % des granules de PP ont été récupérés dans le compartiment B1 avec une pureté de 92 %, et 93 % des granules de HIPS ont été collectés dans le compartiment B2 avec une pureté de 79 %. Les résultats de l'ensemble des expériences #3 montrent la faisabilité d'un fonctionnement continu du tribochargeur pour le traitement de granules broyés et neutralisés de PP et de HIPS. En passant à travers le cylindre creux métallique, les granules de tailles réduites atteignent des charges triboélectriques similaires à celles acquises par les granules après les avoir maintenus pendant 5 min dans le dispositif de charge, soit environ – 6 nC/g pour le PP et + 4 nC/g pour HIPS. De cette façon, l'efficacité du processus de la séparation triboélectrostatique en continu avec des granules de tailles réduites est presque identique à celle obtenue avec des granules sans réduction de tailles (expérience #1).

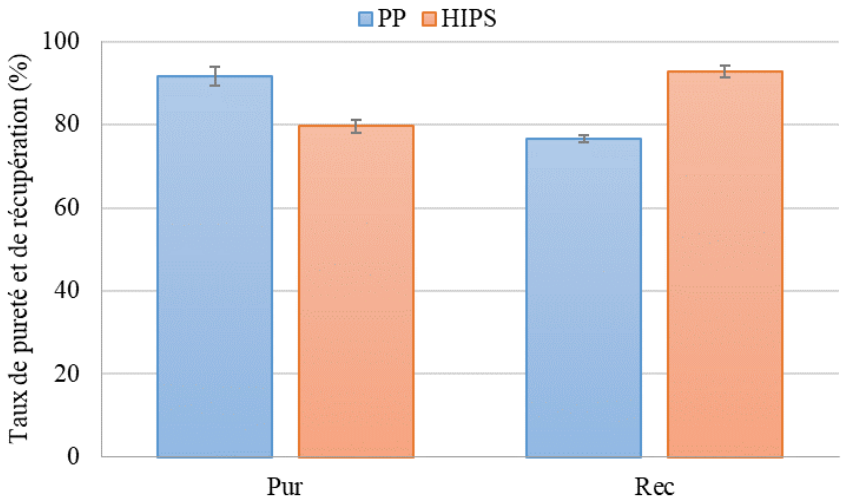


Figure III.5. *Taux de pureté et de récupération des particules de tailles réduites alimentées en continu (Diamètre des mailles de la grille = 2 mm, n_1 = 55 tr/min, α = 35°, U = 25 kV, β = - 10°, n_2 = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s).*

Les résultats présentés dans la figure III.6 (expérience #4), montrent que l'alimentation du mélange juste après le broyage semble améliorer le résultat de la séparation. La charge accumulée lors du broyage et du passage des particules à travers le dispositif de charge était suffisante pour extraire 98 % de PP avec une pureté supérieure à 94 %, et 95 % de HIPS avec une pureté supérieure à 98 %. Les rapports charge/masse des deux produits étaient de - 6,62 nC/g et + 6,51 nC/g, pour le PP et le HIPS respectivement.

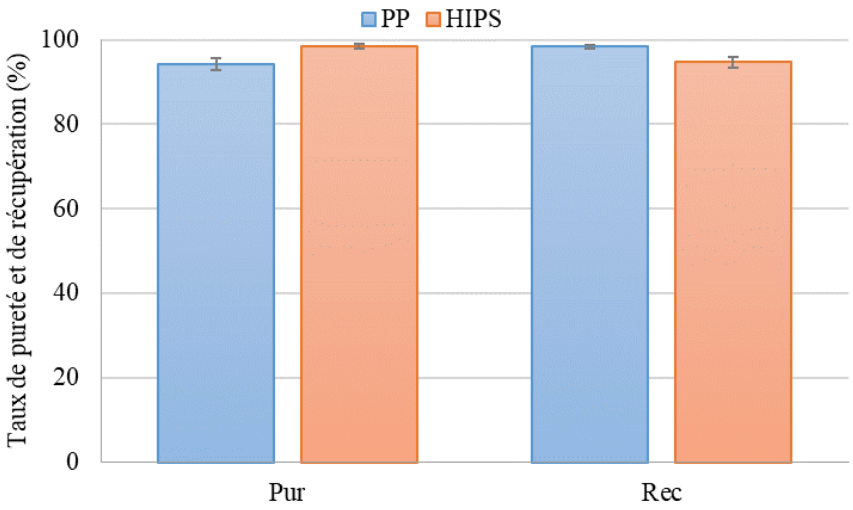
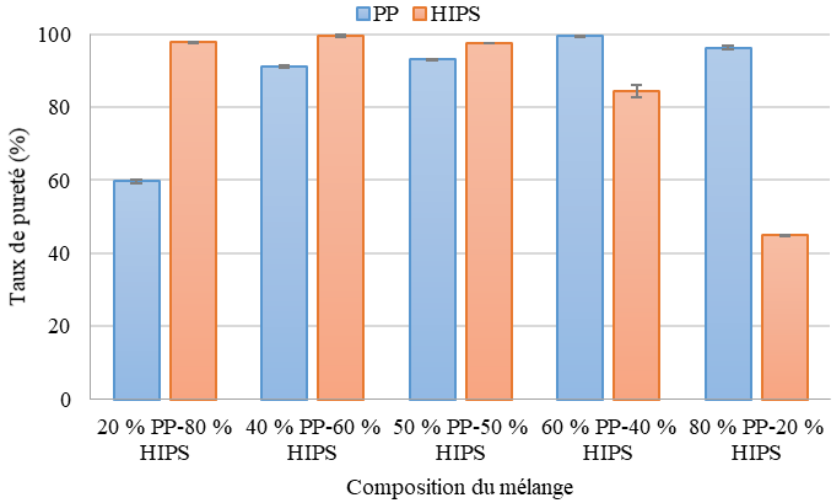


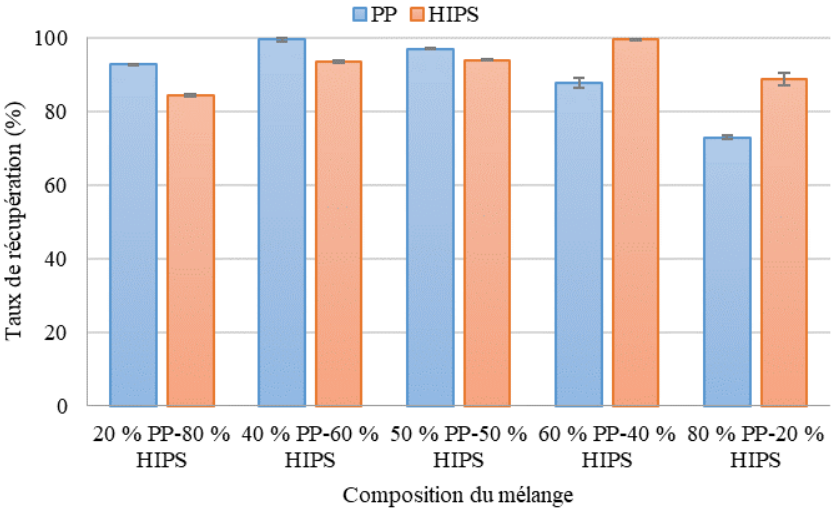
Figure III.6. *Taux de pureté et de récupération des particules de tailles réduites chargées dans le broyeur (Diamètre des mailles de la grille = 2 mm, α = 35°, U = 25 kV, β = - 10°, n_2 = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s).*

La figure III.7 présente le taux de récupération et de pureté de chaque produit suivant la composition du mélange. Les résultats montrent que la composition du mélange initialement introduit dans le broyeur a une influence certaine sur la charge et la séparation électrostatique. Les meilleurs résultats ont été obtenus dans le cas où le mélange est équilibré avec des puretés obtenues supérieures à 96 %. Une bonne séparation est également obtenue pour un mélange composé de 40 % de PP et 60 % de HIPS ; dans ce cas 99 % des granules de PP ont été récupérés avec une pureté supérieure à 91 % tandis que le HIPS était caractérisé par une pureté de 99 % pour un taux de récupération de 93 %.

Dans le cas où un type de polymère est majoritaire (les cas 20 % PP – 80 % HIPS et 80 % PP – 20 % HIPS), les conditions de chargement sont mauvaises et les résultats de la séparation seront modifiés. Pendant le broyage, il y a beaucoup plus d'impacts entre particules de même nature, car les mélanges ne contiennent que 20 % de la seconde matière. La probabilité d'impacts entre particules de natures différentes est très faible. Dans ce cas, une fraction des particules se charge négativement et les autres positivement, donc certaines seront collectées dans la boîte B1 et d'autres dans les boîtes B2, B3 dégradant le rendement de la séparation.



(a)



(b)

Figure III.7 *Evolution des taux de (a) pureté et (b) récupération des particules de PP et HIPS en fonction de la composition du mélange (Diamètre des mailles de la grille = 2 mm, α = 35°, U = 25 kV, β = - 10°, n_2 = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s).*

III.2. Chargement des matériaux polymères dans le broyeur

Ce travail est divisé en deux parties. La première vise à évaluer la possibilité d'utiliser le broyage en tant qu'opération simultanée de réduction de tailles et de chargement triboélectrique. La seconde partie a pour but d'évaluer l'effet de la taille des particules obtenues en fonction du diamètre des mailles des grilles utilisées ; sur l'efficacité du processus de charge et de séparation électrostatique.

III.2.1. Effet de la charge générée lors du broyage

Deux processus de séparation triboélectrostatique ont été comparés. L'objectif spécifique des expériences était de mettre en évidence l'effet de la charge générée lors du broyage sur l'efficacité de la séparation électrostatique [142,143].

III.2.1.1. Procédure expérimentale

L'étude a été réalisée sur deux types de polymères, le PC-ABS et le PVC provenant de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Les expériences commencent par un découpage des polymères en morceaux à l'aide d'une scie à ruban (Metabo, BAS 261 Precision). Ensuite, une masse initiale de 500 g de morceaux de polymère contenant des quantités égales de PC-ABS (Figure II.2 (a)) et de PVC (Figure II.2 (c)) a été introduite dans la trémie d'alimentation du broyeur. Afin d'obtenir un mélange de tailles moyennes comprise entre 3 mm et 5 mm, une grille de 5 mm de diamètre de mailles a été utilisée. Pendant l'opération de broyage, les lames rotatives du broyeur cisaillent et brassent les morceaux de polymère, par conséquent, un transfert de charge se produit grâce à des collisions répétées et des frottements entre les particules de polymère. Après un temps de séjour de 40 s dans la chambre de coupe, une masse de 300 g a été collectée dans le bac de récupération du broyeur.

Deux séries d'expériences distinctes ont été conduites. Dans la première série, le mélange granulaire récupéré dans le broyeur (Figure III.8) a d'abord été soumis à une opération de neutralisation de charge, pour éliminer les charges accumulées durant le broyage, à l'aide d'un neutralisateur de charge (paragraphe II.1.3 ; Figure II.5). Les particules neutralisées ont ensuite été tribochargées pendant 5 minutes puis séparées dans l'installation de séparation triboélectrostatique de la société Prodecologia.

Dans une autre série d'expériences, le mélange granulaire récupéré dans le broyeur a été immédiatement transféré vers le séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante, sans passer par son dispositif de charge. Ainsi, le mélange à séparer a été déposé directement sur la goulotte oscillante du séparateur.

A la fin de chaque expérience, la charge et la masse des produits séparés ont été mesurées à l'aide d'une cage de Faraday connectée à un électromètre et d'une balance électronique. Les taux de pureté et de récupération des matériaux granulaires présents dans chaque bac de récupération ont été calculés afin de déterminer l'efficacité de la séparation triboélectrostatique.

Toutes les expériences ont été réalisées à des températures comprises entre 15 °C et 19 °C et une humidité relative ambiante variant entre 38 % et 55 %. Les résultats sont rapportés comme une valeur moyenne de trois essais et les barres d'erreur indiquées représentent l'erreur expérimentale.



Figure III.8. *Tailles et formes du mélange PC-ABS / PVC obtenu après broyage (Diamètre des mailles de la grille = 5 mm).*

III.2.1.2. Résultats et discussion

En bon accord avec leur position dans la série triboélectrique, les particules de PVC se sont chargées négativement et ont été récupérées dans le compartiment B1, tandis que les particules de PC-ABS se sont chargées positivement et ont été collectées dans le compartiment B2. Le produit collecté dans le compartiment B3 a été regroupé avec les granules récupérés en B2 car il contient principalement des particules de PC-ABS.

Les résultats de la comparaison expérimentale entre les échantillons neutres tribochargés pendant 5 minutes dans le chargeur à pales tournantes et les échantillons tribochargés dans le broyeur et immédiatement transférés vers le séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante sont présentés sur la figure III.9.

Le mélange chargé dans le chargeur à pales tournantes était caractérisé par des puretés de 95 % pour les particules de PVC et de 90 % pour le PC-ABS, et des récupérations de 89 % et 94 % pour le PVC et le PC-ABS respectivement. Il a été constaté que la séparation du mélange juste après le broyage améliore le résultat de la séparation. La charge accumulée par impact entre les particules lors du broyage était suffisante pour extraire 96 % de PVC avec une pureté de 99 % et extraire 98,5 % de PC-ABS avec une pureté dépassant 97 %. L'utilisation du broyeur en tant qu'installation de réduction de tailles et de tribochargement présente un triple avantage : réduction du temps de traitements des déchets, amélioration de la qualité de séparation électrostatique, et enfin la diminution du cout du procédé en se passant du tribochargeur.

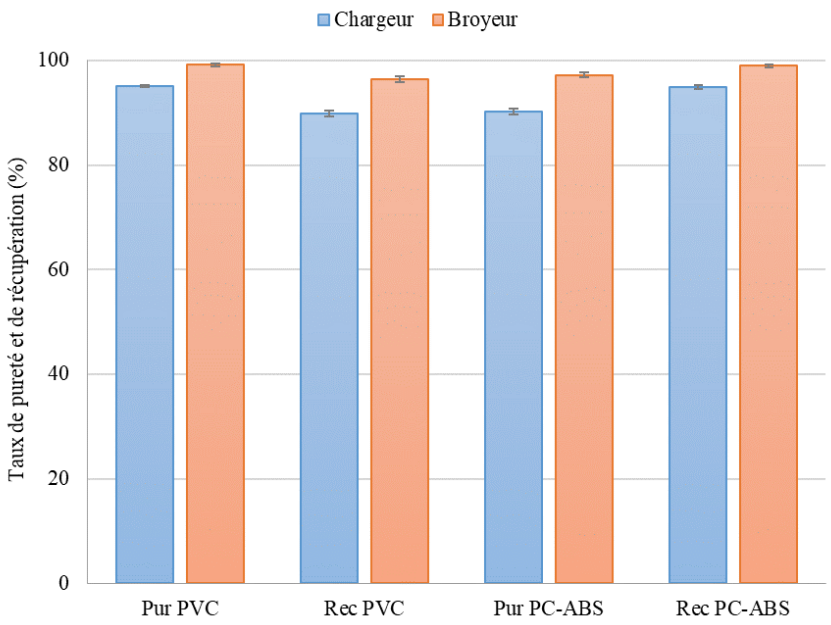


Figure III.9. *Comparaison des taux de pureté et de récupération des particules de PVC et de PC-ABS tribochargées dans le broyeur ou dans le chargeur à pales tournantes (Diamètre des mailles de la grille = 5 mm, α = 35°, U = 25 kV, β = - 10°, n_2 = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s).*

III.2.2. Effet du diamètre de mailles de la grille du broyeur

Quatre séries d'expériences ont été menées pour étudier l'effet du diamètre de mailles de la grille du broyeur et la distribution granulométrique des mélanges obtenus, sur la charge triboélectrique générée durant le broyage et sur l'efficacité de la séparation électrostatique [142,143].

III.2.2.1. Procédure expérimentale

Quatre grilles de broyeur de différents diamètres de mailles 2 mm, 3 mm, 5 mm et 7 mm ont été comparées. L'étude a été réalisée sur des morceaux de polymère de PC-ABS (Figure II.2 (a)) et de HIPS (Figure II.2 (b)), récupérés des déchets d'équipements électriques et électroniques et découpés à l'aide d'une scie à ruban. Les morceaux de polymère ont été préparés sous forme de mélanges binaires de 300 g et introduits dans le broyeur, la durée de séjour des particules dans la chambre de coupe dépend du diamètre des mailles de la grille sélectionnée. Après un certain temps de séjour, une masse de 200 g a été récupérée du broyeur et immédiatement transférée vers le séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante comme illustré dans le schéma de la figure III.10.

Dans les quatre séries d'expériences, les mélanges granulaires obtenus après broyage (Figure III.11) n'ont pas été soumis à une neutralisation de charge ou à un chargement

supplémentaire par effet triboélectrique. La charge acquise lors du broyage était suffisante pour leur séparation.

Une analyse granulométrique a été effectuée après chaque expérience à l'aide d'un tamis vibrant (marque Retsch, modèle AS200 basic) pour déterminer la distribution granulométrique dans chaque boîte de collecte. La charge, la masse et les taux de pureté et de récupération des matériaux granulaires séparés ont été mesurés afin de déterminer l'efficacité de la séparation triboélectrostatique pour chaque classe de tailles.

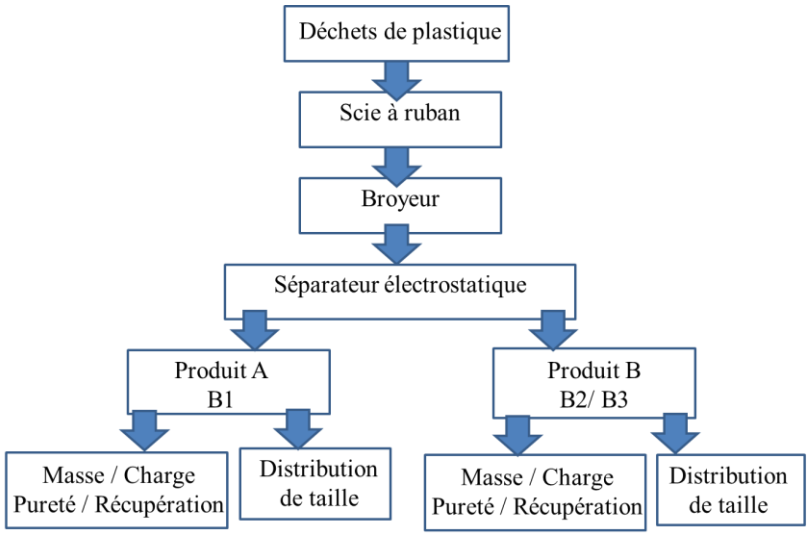


Figure III.10. *Flux de traitement des déchets de polymère.*

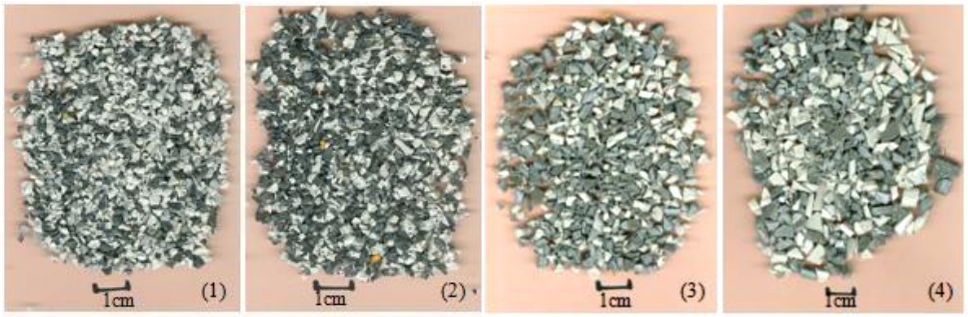


Figure III.11. *Photographies des mélanges PC-ABS / HIPS obtenus après broyage avec une grille de : (1) 2 mm de diamètre de maille ; (2) 3 mm de diamètre de maille ; (3) 5 mm de diamètre de maille ; (4) 7 mm de diamètre de maille.*

III.2.2.2. Résultats et discussion

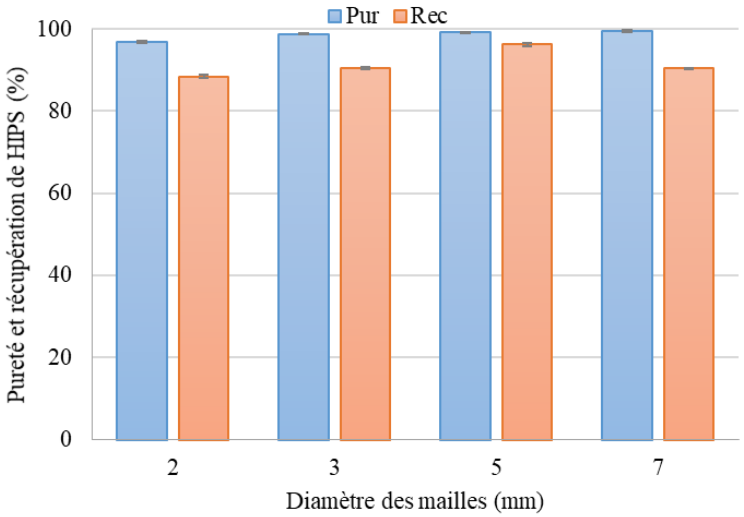
Dans toutes les expériences, les particules de HIPS ont acquis une charge négative lors du broyage et ont été attirées par l'électrode haute tension de polarité positive et collectées dans le compartiment B1, tandis que les particules PC-ABS se sont chargées positivement et ont été collectées dans les compartiments B2, B3.

La figure III.12 compare la pureté et la récupération des produits PC-ABS et HIPS obtenus dans les quatre séries d'expériences. Dans le cas d'un broyage fin en utilisant une grille de 2 mm de diamètre, la récupération de HIPS et la pureté de PC-ABS ne dépassent pas 88 %. En fait, des particules de tailles comprises entre 0,25 mm et 1 mm sont générées lors du broyage, les particules fines de charges opposées se combinent et forment des agglomérats dégradant ainsi la pureté du PC-ABS. Les charges massiques des produits étaient de - 2,69 nC/g et de 4,18 nC/g pour le HIPS et le PC-ABS respectivement.

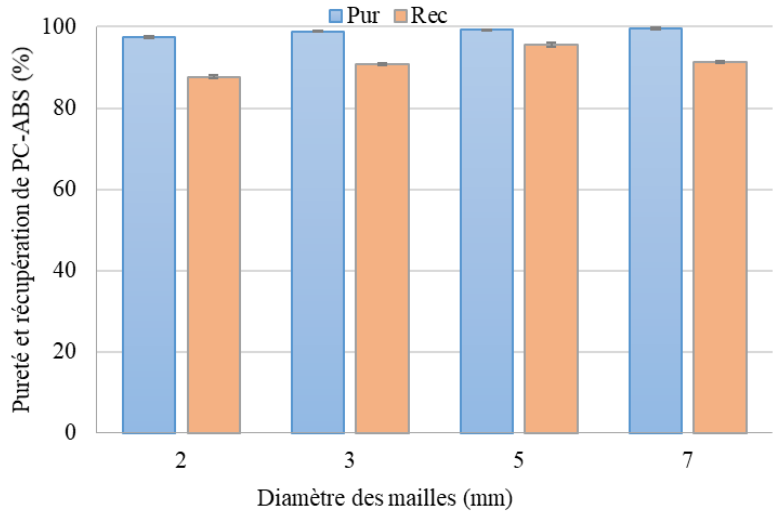
Pour la deuxième série d'expériences, l'augmentation du diamètre des mailles à 3 mm entraîne une diminution de la présence des particules sous millimétriques dans le mélange. En conséquence, moins d'agglomérats de particules ont été générés et la pureté des produits a augmenté à 90 % pour le PC-ABS et à 98 % pour le HIPS avec des taux de récupération de 98 % et 90 % respectivement. Les charges massiques des produits collectés étaient de - 2,52 nC/g pour le HIPS et de 3,87 nC/g pour le PC-ABS.

Le broyage avec une grille de 5 mm de diamètre a donné des résultats encore meilleurs. 96 % des particules de HIPS étaient récupérées avec une pureté de 99 %. Pour les particules de PC-ABS, les taux de récupération et de pureté étaient d'environ 99 % et 95 % respectivement. Les particules ont été caractérisées par des charges de - 2,37 nC/g pour le HIPS et de 3,23 nC/g pour le PC-ABS.

Avec une grille de 7 mm de diamètre, les particules de HIPS et de PC-ABS ont acquis des charges de - 1,97 nC/g et de 2,76 nC/g respectivement. Par conséquent, le champ électrique généré entre l'électrode haute tension et l'électrode mise à la terre n'était pas suffisant pour attirer les grosses particules de HIPS (tailles > 7 mm), elles tombent donc dans le collecteur réservé au PC-ABS, réduisant la récupération de HIPS et la pureté de PC-ABS à environ 90 %.



(a)



(b)

Figure III.12. *Taux de pureté et de récupération des particules de : (a) HIPS et (b) PC-ABS en fonction du diamètre des mailles de la grille du broyeur (α = 35°, U = 25 kV, β = - 10°, n_2 = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s).*

Le temps de séjour du mélange dans la chambre de broyage diminue avec l'augmentation du diamètre de la grille, donc la charge acquise par les particules diminue également progressivement. Pour une grille de 7 mm de diamètre, 30 s suffisent pour récupérer 200 g de mélange granulaire broyé, 60 s est le temps nécessaire pour obtenir la même masse pour un diamètre de 5 mm, tandis que pour les petites tailles 3 mm et 2 mm, il faut environ 100 s et 130 s respectivement.

Il a été observé pendant les expériences que l'électrode haute tension se couvre d'une couche de particules fines de HIPS. Dans le cas d'un broyage à 7 mm ou 5 mm de diamètre de maille, environ 5 % à 6 % de la masse de HIPS collent à la surface de l'électrode ; la charge de ces particules est d'environ - 5,92 nC/g et - 6,56 nC/g respectivement. Par ailleurs, pour des

grilles de 3 mm ou 2 mm de diamètre, 14% à 16% de la masse totale de HIPS adhèrent à la surface de l'électrode avec une charge d'environ - 12 nC/g. Par ailleurs, ces résultats montrent que la charge accumulée par les particules est très probablement surfacique, puisque la charge par unité de masse augmente avec l'accroissement de la surface totale des particules lorsque la taille des particules diminue.

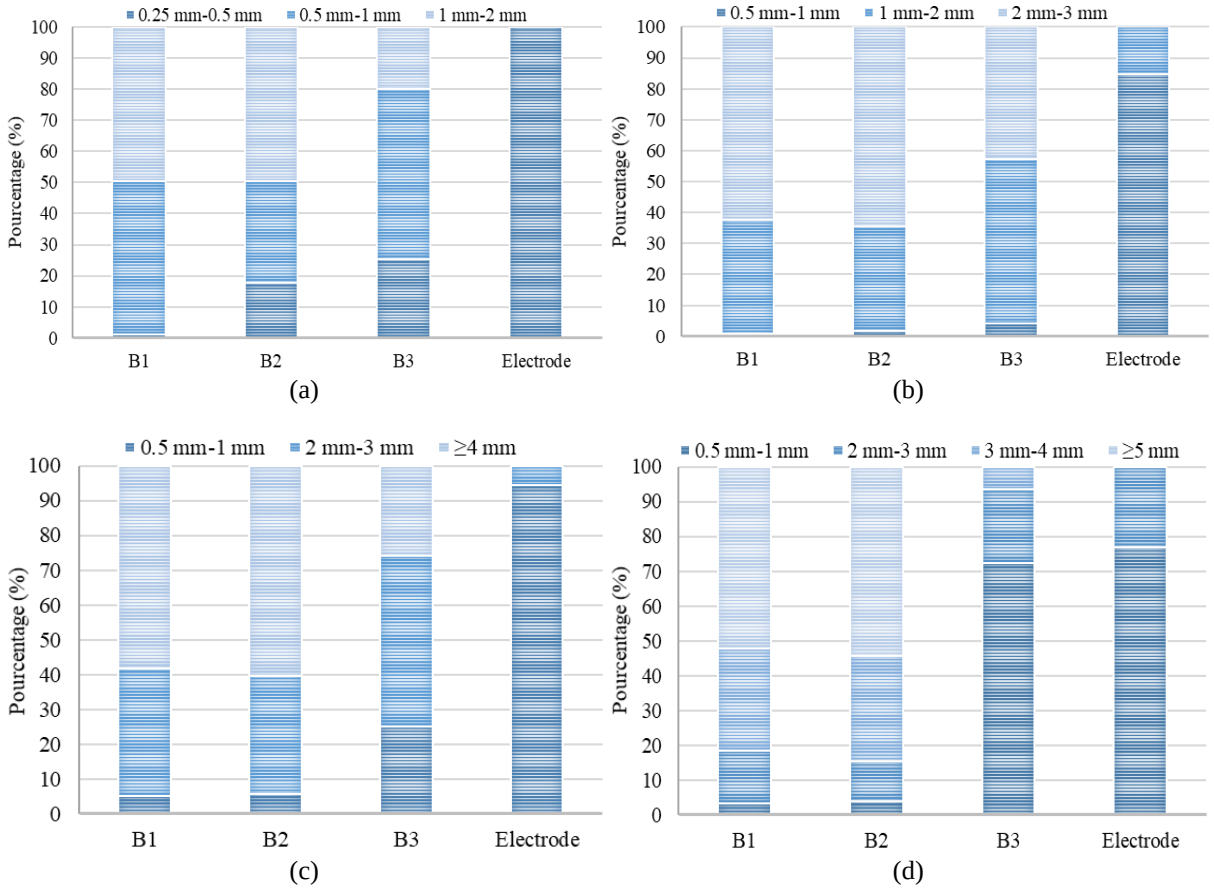


Figure III.13. *Distribution des tailles des particules collectées dans les bacs B1, B2, B3 et sur la surface de l'électrode HT pour une grille de : (a) 2 mm de diamètre de maille ; (b) 3 mm de diamètre de maille ; (c) 5 mm de diamètre de maille ; (d) 7 mm de diamètre de maille.*

Les résultats de l'analyse granulométrique (Figure III.13) montrent que le broyage génère des mélanges avec une large distribution de tailles. Dans les quatre cas étudiés, les boîtes de collecteur B1 et B2 ont la même distribution de tailles. En règle générale, les grosses particules ont été récupérées dans B1 ou B2 selon la polarité de leur charge. Les petites particules, caractérisées par une charge triboélectrique très élevée, ont été collées à la surface de l'électrode cylindrique tournante puis éliminées par la brosse et collectées dans B3, ou alors sur l'électrode haute tension. Dans ce dernier cas, la formation d'une couche compacte de particules isolantes peut perturber le processus de séparation électrostatique en raison de la déformation des lignes de champ électrique.

Notons enfin que ces essais ont été conduits au point optimal de fonctionnement du séparateur qui a été déterminé pour des mélanges granulaires obtenus avec une grille du broyeur de diamètre de mailles de 5 mm. En effet, dans un fonctionnement en un milieu industriel, le broyage est plus grossier pour réduire la consommation énergétique et la durée de cette phase.

III.3. Conclusions

(1) Le chargeur présenté dans ce chapitre se caractérise par sa simplicité mécanique et ses faibles besoins en énergie par rapport à d'autres dispositifs de charge triboélectrique. Cependant, lors du traitement des granules de tailles moyennes entre 3 mm et 6 mm, une charge triboélectrique optimale nécessite une durée de chargement relativement longue.

(2) La classe granulométrique des particules est un facteur important influençant le résultat de la charge et la séparation triboélectrostatique. La réduction des tailles des particules améliore l'efficacité du chargement triboélectrique, les résultats expérimentaux confirment que des particules de tailles réduites peuvent obtenir suffisamment de charge pendant leur transfert en continu à travers le dispositif de charge pour être séparées par le séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante.

(3) La composition du mélange a une grande influence sur la charge et la séparation électrostatique. Les puretés et les récupérations des produits varient avec la composition des mélanges granulaires à séparer.

(4) L'alimentation du mélange granulaire juste après le broyage améliore le résultat de la séparation électrostatique. Pendant le broyage, les granules acquièrent des niveaux de charge élevés ce qui facilite leur séparation électrostatique, le principal mécanisme de charge étant les impacts particule-particule, ni la nature des parois du broyeur, ni celle des couteaux du broyeur n'influe sur le résultat du processus.

(5) Le choix de la grille du broyeur peut jouer un rôle important sur la distribution granulométrique des granules, sur le temps de traitement ainsi que sur la charge générée pendant le broyage.

(6) Le séparateur électrostatique à cylindre tournant a prouvé son efficacité dans le traitement des mélanges avec une large distribution de tailles, mais la présence de particules sous millimétriques, de tailles typiques entre 0,25 mm et 1 mm a un effet négatif sur le processus de séparation électrostatique. En effet, ces particules s’agglomèrent avant de former une couche sur la surface des électrodes, ce qui dégrade la qualité de la séparation.



Le plasma, quatrième état de la matière, un plasma atteint généralement plusieurs millions de degrés. Mais il existe aussi des plasmas froids, qu'on utilise de plus en plus pour l’éclairage, la médecine et la propulsion spatiale.

Sources : https://plasmachemistry.wordpress.com/

https://lejournal.cnrs.fr/articles/les-plasmas-froids-rechauffent-linnovation

Chapitre IV

Modification des propriétés triboélectriques des polymères par une décharge à barrière diélectrique

Une décharge à barrière diélectrique (DBD) s'établit entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz et par au moins une couche d'un matériau à propriétés diélectriques. Cette dernière joue le rôle d'un condensateur en série avec le plasma. Ainsi, l'accumulation de charges à la surface de la barrière diélectrique entraîne une chute de la différence de potentiel entre les deux électrodes et évite le passage à l'arc [144].

Les décharges à barrière diélectrique sont connues pour être une excellente source de plasma pour le traitement de surface [144,145]. Par exemple, il est rapporté dans la littérature que le traitement par DBD change à la fois la morphologie de surface et la composition chimique de surface des polymères traités [146].

Au cours d'un traitement DBD, des radicaux, des ions et des photons se produisent. Ces espèces réagissent avec la surface du polymère en modifiant ses propriétés mécaniques, électriques et optiques. Un polymère exposé à un plasma subit des réactions qui engendrent un changement de la composition et la structure de quelques couches moléculaires de la surface, une augmentation de la rugosité du polymère et de son énergie de surface. La DBD influe aussi sur la mouillabilité des polymères permettant de les rendre hydrophobes ou hydrophiles [147-149].

Les chercheurs ont démontré que cette combinaison de changements influence les propriétés triboélectriques des matériaux isolants [150-154]. La rugosité de surface, par exemple, augmente le nombre de points de contact à la surface des polymères, et comme rapporté par Neagoe et *al.* [155], la charge électrique acquise par frottement augmente également. La mouillabilité se manifeste par la présence d'une fine couche d'eau superficielle qui facilite le transfert de charge entre les deux corps, augmentant ainsi la capacité de tribocharge

Ce chapitre décrit en premier lieu les paramètres de la DBD qui influencent l'efficacité du traitement de surface et la charge triboélectrique des matériaux granulaires. Un système de DBD dynamique est ensuite présenté. Il est dédié au fonctionnement continu, en vue d'évaluer le potentiel d'application de cette technologie dans l'industrie du recyclage pour améliorer la

séparation triboélectrostatique des polymères mixtes des déchets d'équipements électriques et électroniques.

IV.1. Décharge à barrière diélectrique statique

La première partie de l'étude a comme objectif la mise en évidence de l'effet des principaux paramètres de fonctionnement du réacteur DBD sur la charge triboélectrique des matériaux granulaires exposés au plasma [156].

IV.1.1. Procédure expérimentale

Les expériences ont été menées sur des échantillons de 20 g de PE de tailles comprises entre 2 mm et 5 mm, issues de déchets d'équipements électriques et électroniques (Figure II.1 (e)). Pour chaque expérience, l'échantillon a tout d'abord été traité par une DBD atmosphérique créée à l'aide du banc d'essais précédemment présenté dans le paragraphe II.2.1.1 (Figure II.5). Après 3 secondes d'exposition à la DBD (durée fixée à partir des résultats des essais préliminaires), les particules ont été chargées par effet triboélectrique en étant placées dans un dispositif de charge vibrant composé d'un récipient en acier inoxydable fixé sur un système vibrant (paragraphe II.3.1 ; Figure II.8). La durée du tribochargement était égale à 1 min et l'amplitude des vibrations fixée à 3 mm. La charge triboélectrique acquise par chaque échantillon a ensuite été mesurée à l'aide d'une cage de Faraday connectée à un électromètre (paragraphe II.5, Figure II.13).

Un signal de forme carrée a été utilisé dans les expériences présentées dans ce chapitre. Ce type de signal provoque l'effet le plus significatif sur la charge triboélectrique des particules, car l'énergie transférée par la décharge avec un signal carré est la plus élevée par rapport aux autres signaux [152].

L'influence des paramètres gouvernant la DBD sur la charge triboélectrique des particules de PE a été étudiée. Les facteurs examinés sont : la tension appliquée U, la fréquence du signal appliqué aux électrodes f, la distance entre les électrodes d, l'épaisseur de la barrière diélectrique e et l'arrangement de la barrière diélectrique dans l'espace inter-électrodes. L'étude a été menée en variant un facteur à la fois, et en fixant tous les autres paramètres aux valeurs de références.

IV.1.2. Résultats et discussion

Toutes les expériences ont été effectuées à une humidité ambiante relative de 53,2 % à 60 % et une température de 17 °C à 18,7 °C. Pour chaque expérience, trois essais ont été effectués dont la valeur moyenne a été utilisée pour tracer les courbes.

IV.1.2.1. Influence de la tension appliquée

L'effet de la tension appliquée sur le comportement triboélectrique des particules de PE a été étudié. La tension appliquée aux électrodes de la cellule DBD a été variée de 15 kV jusqu'à 30 kV par pas de 3 kV, les autres paramètres de la DBD ont été maintenus constants (f = 800 Hz, d = 11 mm, e = 4 mm, t = 3 s).

Les résultats montrent que la charge triboélectrique des particules s'est nettement améliorée après traitement par DBD (Figure IV.1). Plus la tension appliquée est élevée, plus la charge acquise par les particules est grande. Un maximum est atteint pour une tension de 24 kV, à partir de cette valeur, la charge reste quasiment constante. L'effet de la DBD est plus efficace pour de hautes valeurs de tensions. En effet, lorsque la tension augmente, la décharge devient plus énergétique avec une zone d'activité plus importante. Ce caractère énergétique élevé génère des changements accrus des propriétés de surface des granules et par conséquent sur leurs propriétés triboélectriques. Par ailleurs, l'augmentation de la tension intensifie le régime filamentaire de la DBD, ce qui a pour conséquence d'accroître le nombre de micro-décharges en contact avec la surface des particules et de modifier les caractéristiques de surface.

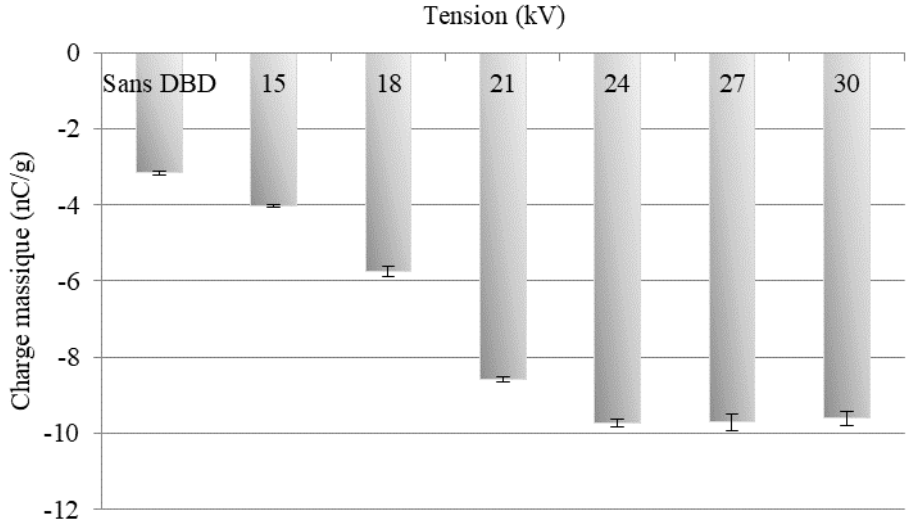


Figure IV.1. *Variation de la charge des particules de PE en fonction de la tension pour f = 800 Hz, d = 11 mm, e = 4 mm, t = 3 s.*

IV.1.2.2. Influence de la fréquence du signal

La figure IV.2 présente l'évolution de la charge massique en fonction de la fréquence de la tension appliquée. La fréquence du signal a été variée de 200 Hz à 1000 Hz par pas de 200 Hz et de 1000 Hz à 2000 Hz par pas de 500 Hz. Les autres paramètres de réglage sont maintenus constants (U = 24 kV, d = 11 mm, e = 4 mm, t = 3 s).

Les résultats montrent que le traitement par DBD conduit à une augmentation importante de la charge triboélectrique générée par rapport aux échantillons non-traités. Toutefois, il semble que la fréquence n'a pas une grande influence sur l'efficacité du traitement DBD. La charge triboélectrique reste quasiment constante quelle que soit la valeur de la fréquence du signal dans la gamme 200 Hz - 2000 Hz.

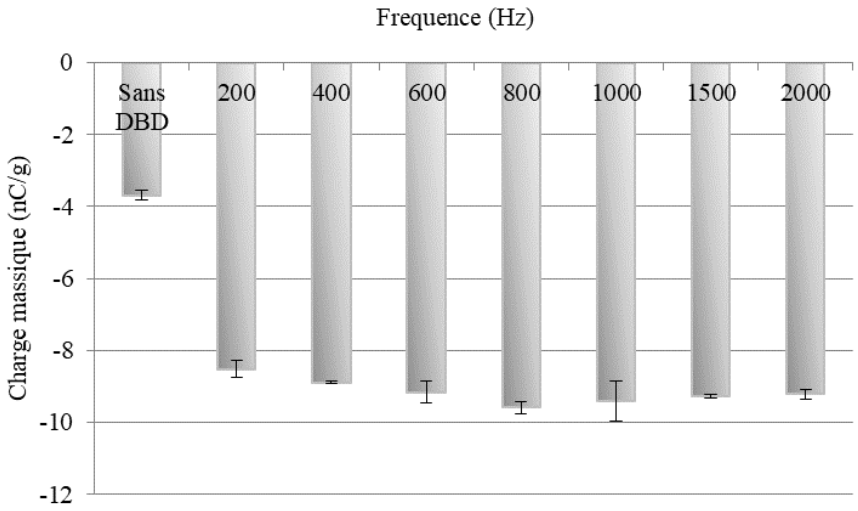


Figure IV.2. *Influence de la fréquence du signal sur la charge des particules de PE pour U = 24 kV, d = 11 mm, e = 4 mm et t = 3 s.*

IV.1.2.3. Influence de la distance inter-électrodes

Afin de mettre en exergue l'effet de la zone d'air entre les barrières diélectriques sur l'efficacité du traitement DBD, la distance entre les deux électrodes (Figure IV.3) a été variée de 10 mm à 17 mm. Des plaques de verre de 4 mm d'épaisseur ont été utilisées comme barrières diélectriques, la tension appliquée aux électrodes et la fréquence ont été gardées constantes, respectivement égales à 24 kV et 800 Hz.

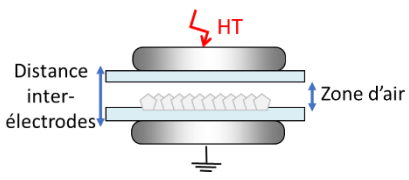


Figure IV.3. *Schéma de la cellule DBD.*

La figure IV.4 montre la charge massique des particules de PE pour les cinq distances étudiées. La charge triboélectrique augmente avec la distance, elle atteint un maximum pour une distance de 13 mm. Pour cette distance inter-électrodes, la zone d'air est de 5 mm ; elle est suffisante pour initier une décharge consistante (niveau de ramification élevé) avec une tension de 24 kV. Au-delà de cette valeur, la charge a tendance à diminuer. Ainsi, l'augmentation de la distance inter-électrodes modifie la distribution du champ électrique qui devient insuffisant pour ioniser la zone d'air entre les barrières diélectriques. De ce fait, les distances plus grandes nécessitent l'utilisation d'amplitudes de tension plus élevées pour renforcer le champ électrique.

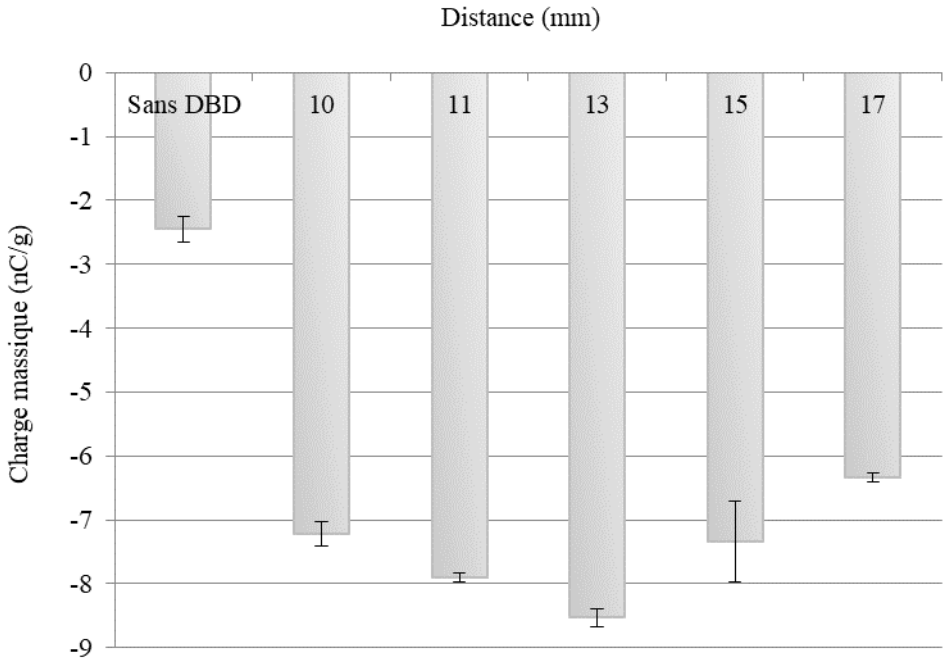


Figure IV.4. *Variation de la charge des particules de PE en fonction de la distance inter-électrodes (U = 24 kV, f = 800 Hz, e = 4 mm, t = 3 s).*

IV.1.2.4. Influence de l'épaisseur de la barrière diélectrique

Pour étudier l'effet de l'épaisseur de la barrière sur le comportement triboélectrique des particules de PE après le traitement DBD, des plaques de verre de trois épaisseurs différentes, 3 mm, 4 mm et 5 mm, ont été utilisées. La zone d'air est restée inchangée 5 mm ainsi que les autres paramètres de la DBD (U = 27 kV, f = 800 Hz, d = 13 mm, t = 3 s).

Les résultats de la figure IV.5 montrent que la charge triboélectrique la plus élevée est obtenue avec la barrière la plus mince (3 mm). Cette baisse de la charge triboélectrique des particules traitées par DBD est due au fait que l'impédance du diélectrique augmente avec l'épaisseur de la barrière. Cette augmentation de l'impédance conduit à une diminution du

courant de décharge. L'énergie de la décharge étant liée à l'intensité du courant de décharge, une diminution de ce dernier affaiblit la puissance transmise dans le plasma, il en résulte alors une réduction de l'efficacité du traitement par DBD.

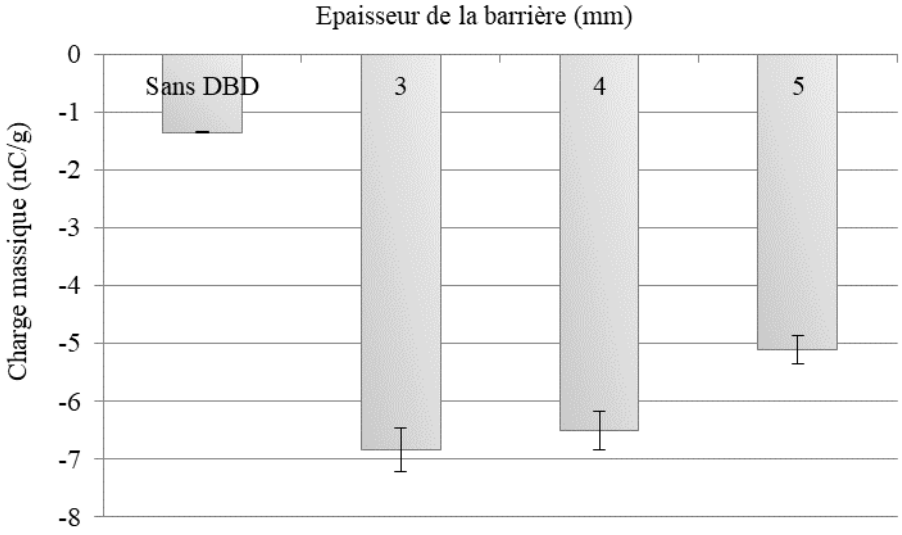


Figure IV.5. *Variation de la charge des particules de PE en fonction de l'épaisseur de la barrière diélectrique (U = 27 kV, f = 800 Hz, d = 13 mm, t = 3 s).*

IV.1.2.5. Influence de la configuration de la barrière diélectrique

La figure IV.6 présente la charge massique des particules de PE traitées dans un gap d'air de 5 mm avec différentes configurations de barrières de 3 mm d'épaisseur. La première configuration correspond à l'utilisation de deux barrières diélectriques recouvrant les deux électrodes à la fois, tandis que les deux autres configurations correspondent à l'utilisation d'une seule barrière couvrant soit l'électrode active (connectée à la haute tension) soit l'électrode reliée à la terre.

Les résultats montrent que le réacteur a presque la même efficacité dans les deux premiers cas. La charge massique est légèrement plus faible (en valeurs absolues) pour la configuration avec une seule barrière diélectrique mise en contact avec l'électrode mise à la terre (troisième cas). La morphologie de la décharge change dans le cas où seule l'électrode reliée à la terre est couverte par le diélectrique (Figure IV.7), pour lequel une forte localisation des filaments a été observée. Ce phénomène ne s'est pas produit dans le cas où le diélectrique est positionné du côté de l'électrode active, cela est peut-être dû au fait que les particules de PE dispersées sur toute la surface de l'électrode mise à la terre forment une couche diélectrique qui empêche le passage de toutes les charges électriques de la décharge vers la terre. Cependant, la position de

la barrière diélectrique dans l'espace inter-électrodes a une faible influence sur le processus de traitement des particules.

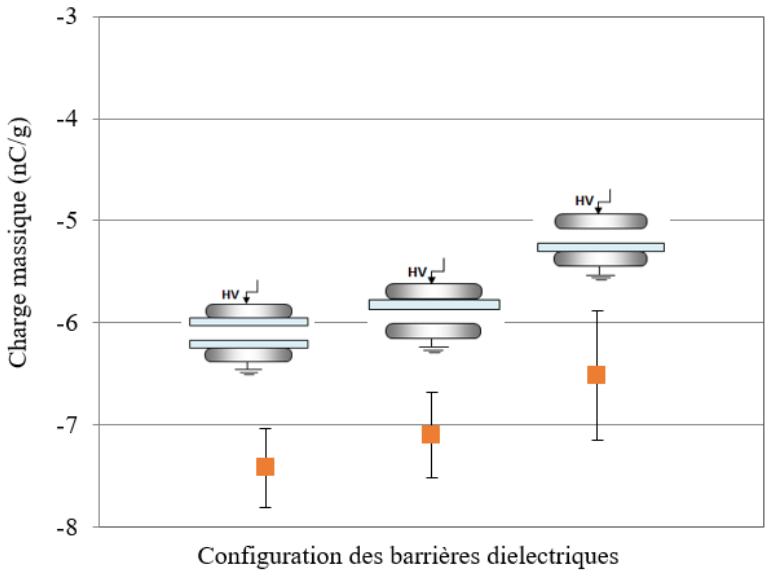


Figure IV.6. *Variation de la charge des particules de PE pour différentes configurations de la barrière diélectrique (U = 27 kV, f = 800 Hz, d = 13 mm, e = 3 mm, t = 3 s).*

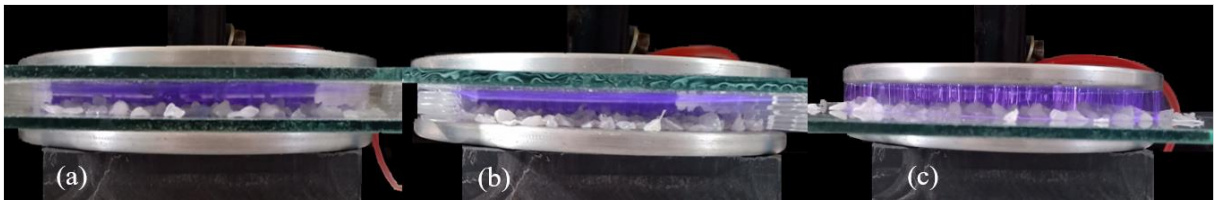


Figure IV.7. *Photographies de la DBD pour les trois arrangements de barrières : (a) Les deux électrodes couvertes par un diélectrique ; (b) L'électrode supérieure est couverte par le diélectrique et (c) L'électrode inférieure est couverte par le diélectrique.*

IV.2. Décharge à barrière diélectrique dynamique

L'idée de ce travail découle des conclusions rapportées dans le paragraphe IV.1.2.5. Il a été prouvé que le réacteur DBD a quasiment la même efficacité, que les deux électrodes soient couvertes d'un diélectrique ou seule l'électrode supérieure. Ces considérations nous ont incités à réaliser un banc expérimental de traitement de surface des matériaux granulaires par DBD adapté au fonctionnement continu, facilitant ainsi, l'association du traitement par plasma au processus de séparation triboélectrostatique, et l'intégration de cette opération dans un processus industriel continu.

IV.2.1. Procédure expérimentale

Le prétraitement de surface des particules de PE a été réalisé en continu dans le réacteur de DBD dynamique décrit dans le paragraphe II.2.1.2. Le matériau granulaire à traiter a été dispersé sous forme de monocouche sur la surface du convoyeur à bande métallique mise à la terre au moyen d'une goulotte oscillante (Figure II.6). Le convoyeur entraîne les particules de PE à travers l'espace DBD. Les particules sont ensuite collectées dans un bac et introduites dans le chargeur à vibrations où l'amplitude des vibrations est réglée à 3 mm et la durée de charge à 1 min. La charge des particules a été mesurée à l'aide d'une cage de Faraday connectée à un électromètre (Keithley Instruments, modèle 6514).

Toutes les expériences ont été effectuées à une humidité ambiante relative de 31 % à 58 % et une température de 18 °C à 21 °C.

IV.2.2. Etude paramétrique

Dans un premier temps, l'étude s'est portée sur l'influence de chaque variable de contrôle du banc expérimental sur l'efficacité du traitement par DBD des particules de PE. Le but a été de déterminer la valeur optimale de chaque variable, et définir ensuite la configuration du banc d'essais pour laquelle la charge acquise par les particules serait la plus élevée. Les facteurs considérés dans cette étude sont : la tension appliquée *U*, la fréquence de la haute tension appliquée *f*, la distance entre les électrodes *d*, l'épaisseur de la barrière diélectrique *e*, ainsi que la vitesse du convoyeur *v* qui conditionnera le temps d'exposition à la DBD. Le domaine de variation des variables de contrôle a été fixé soit par les limites physiques des dispositifs soit par des essais préliminaires comme indiqué dans le tableau IV.1. L'effet de l'humidité relative sur l'efficacité du traitement DBD a également été étudié [157].

Tableau IV.1. *Domaine de variation des paramètres de la DBD.*

Variable	Minimum	Maximum
U (kV)	15	30
f (Hz)	50	2000
d (mm)	11	14
e (mm)	3	5
v (cm/s)	3	12,2

IV.2.2.1. Effet de la haute tension appliquée

La figure IV.8 représente l'influence de la haute tension appliquée aux électrodes sur la charge des particules de PE traitées dans un gap d'air de 7 mm en utilisant une barrière diélectrique de 4 mm d'épaisseur et une fréquence de 800 Hz. La vitesse linéaire du convoyeur qui transporte les particules à travers la zone de DBD a été fixée à 4,7 cm/s soit un temps d'exposition de 3,4 s.

Les résultats montrent que la charge triboélectrique augmente progressivement avec la tension appliquée. A partir de 18 kV, le champ appliqué devient suffisamment élevé pour initier une décharge suffisamment énergétique pour que le traitement de surface devient efficace. Ainsi, la charge massique des particules de PE non traitées était d'environ – 4 nC/g, et atteignait - 12 nC/g après traitement DBD à 30 kV.

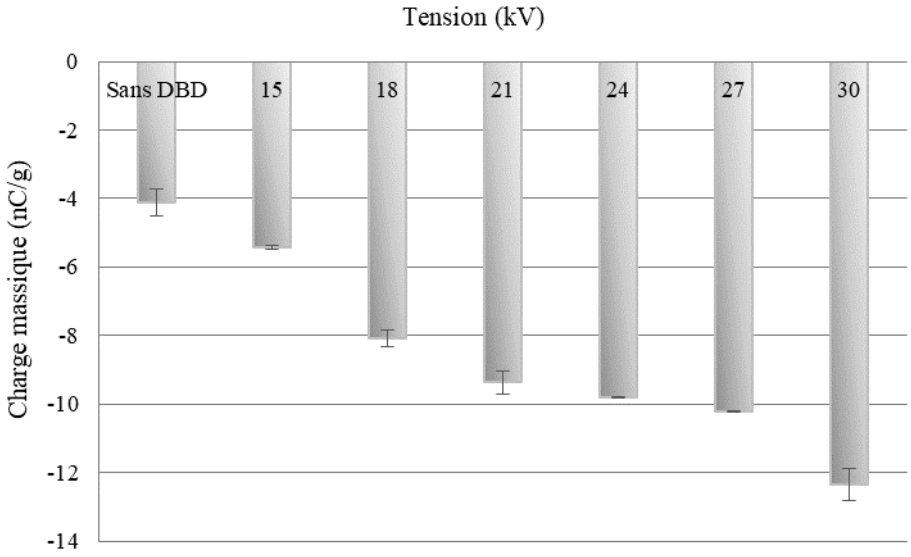


Figure IV.8. *Evolution de la charge massique des particules de PE avec la tension appliquée pour f = 800 Hz, d = 11 mm, e = 4 mm, v = 4,7 cm/s, t = 3,4 s.*

IV.2.2.2. Effet de la fréquence

L'effet de la fréquence sur la charge acquise par les particules de PE après le traitement au plasma peut être examiné sur la figure IV.9. Les expériences ont été réalisées dans un gap d'air de 7 mm (*d* = 11 mm) avec une barrière diélectrique de 4 mm d'épaisseur, la haute tension a été réglée à 21 kV et la vitesse du convoyeur à 4,7 cm/s.

Les résultats semblent difficiles à interpréter. La charge triboélectrique acquise par les particules de PE soumises à une décharge à barrière diélectrique a été significativement

modifiée, cependant, l'effet de la fréquence reste très réduit dans le domaine de variation considéré dans cette étude.

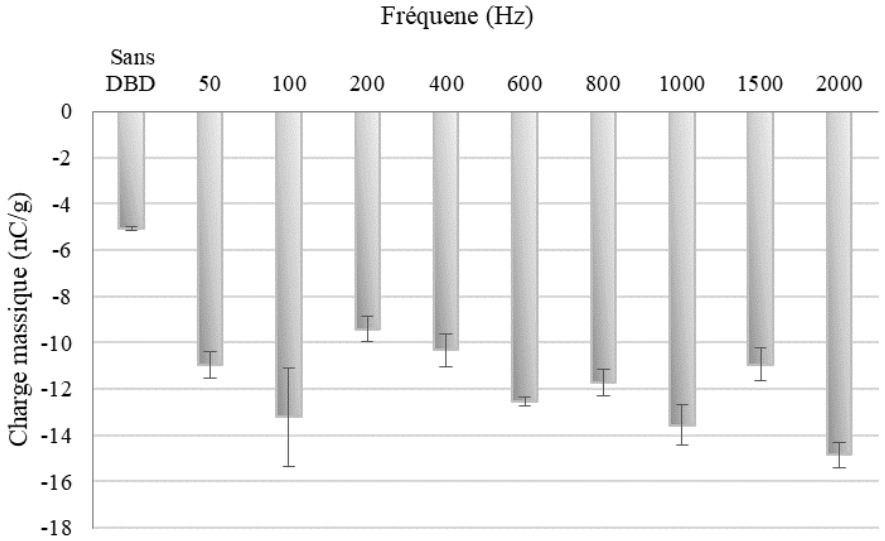


Figure IV.9. *Charge massique pour différentes valeurs de fréquence (U = 21 kV, d = 11 mm, e = 4 mm, v = 4,7 cm/s, t = 3,4 s).*

IV.2.2.3. Effet de la distance inter-électrodes

L'effet de la distance entre l'électrode active et le convoyeur mis à la terre sur l'efficacité du traitement DBD continu, est analysé dans cette section. La tension appliquée, la fréquence du signal, la vitesse du convoyeur ainsi que l'épaisseur de la barrière diélectrique utilisée ont été maintenues constants à 21 kV, 400 Hz, 4,7 cm/s (t = 3,4 s) et 4 mm respectivement.

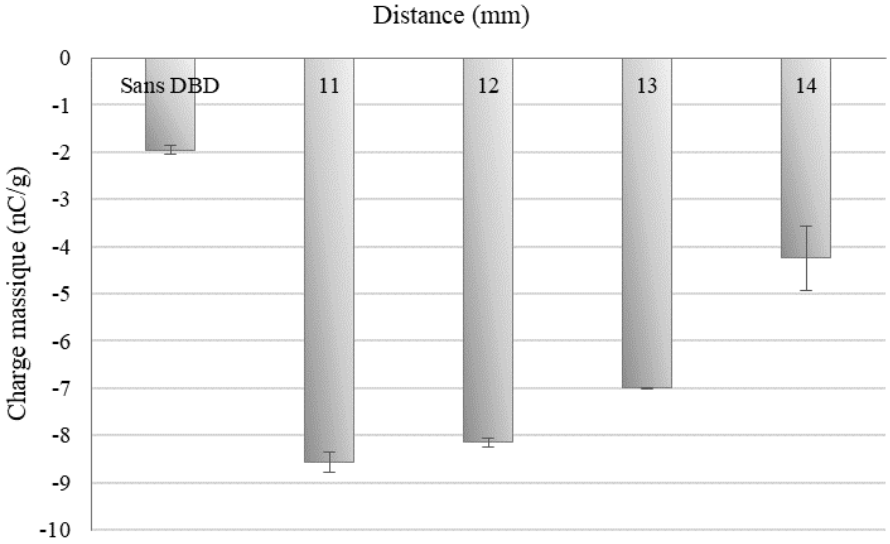


Figure IV.10. *Variation de la charge massique en fonction de la distance inter-électrodes (U = 21 kV, f = 400 Hz, e = 4 mm, v = 4,7 cm/s, t = 3,4 s).*

Les résultats de la figure IV.10 montrent que la charge triboélectrique acquise après traitement par DBD a tendance à diminuer avec l'augmentation du volume de la décharge. Cela est dû, comme évoqué précédemment, au fait que la décharge devient moins énergétique avec l'augmentation de la zone d'air entre les électrodes. Le champ appliqué est faible pour que les électrons libres acquièrent assez d'énergie pour ioniser les molécules du gaz dans l'espace inter-électrodes. Les distances inter-électrodes plus importantes nécessitent des amplitudes de tension plus élevées pour injecter la même énergie dans la décharge. Sur la base de ces résultats, la distance entre les électrodes a été maintenue à 11 mm pour le reste des expériences.

IV.2.2.4. Effet de l'épaisseur de la barrière diélectrique

Trois plaques en verre de différentes épaisseurs (3 mm, 4 mm, 5 mm) ont été comparées en vue d'étudier l'influence de ce facteur sur la charge triboélectrique des particules de PE. Les résultats présentés sur la figure IV.11 ont été obtenus pour un signal carré de 21 kV, 400 Hz, la vitesse du convoyeur et le gap d'air sont restés inchangés et maintenus égaux à 4,7 cm/s (t = 3,4 s) et 7 mm respectivement.

L'efficacité du traitement par DBD augmente avec l'épaisseur de la barrière utilisée, la charge des particules non-traitées étant de l'ordre de - 2 nC/g, elle augmente de plus de 275 % lorsqu'une barrière de verre de 5 mm d'épaisseur est utilisée. Les résultats montrent que la charge la plus élevée est obtenue pour la barrière la plus épaisse ; une augmentation de la valeur de la charge triboélectrique des particules traitées de - 5,37 nC/g à - 7,76 nC/g est obtenue en passant d'une barrière de 3 mm à une barrière de 5 mm, ce qui contredit les conclusions présentées dans le paragraphe IV.1.2.4.

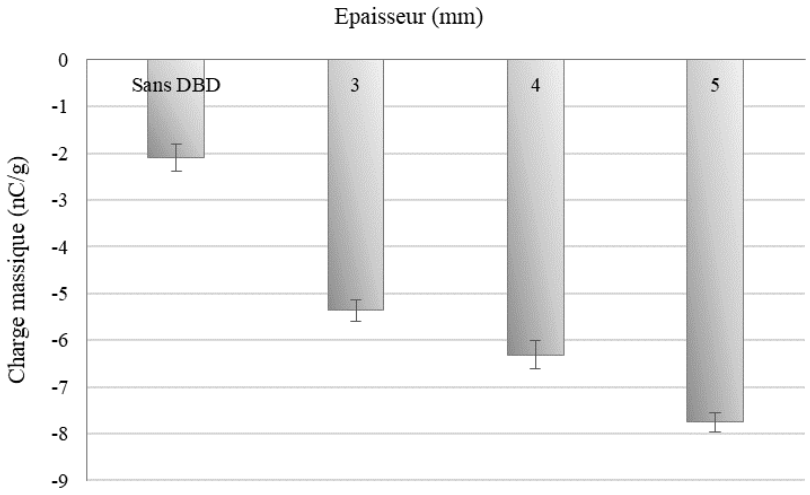


Figure IV. 11. *Variation de la charge massique en fonction de l'épaisseur de la barrière diélectrique (U = 21 kV, f = 400 Hz, gap d'air = 7 mm, v = 4,7 cm/s, t = 3,4 s).*

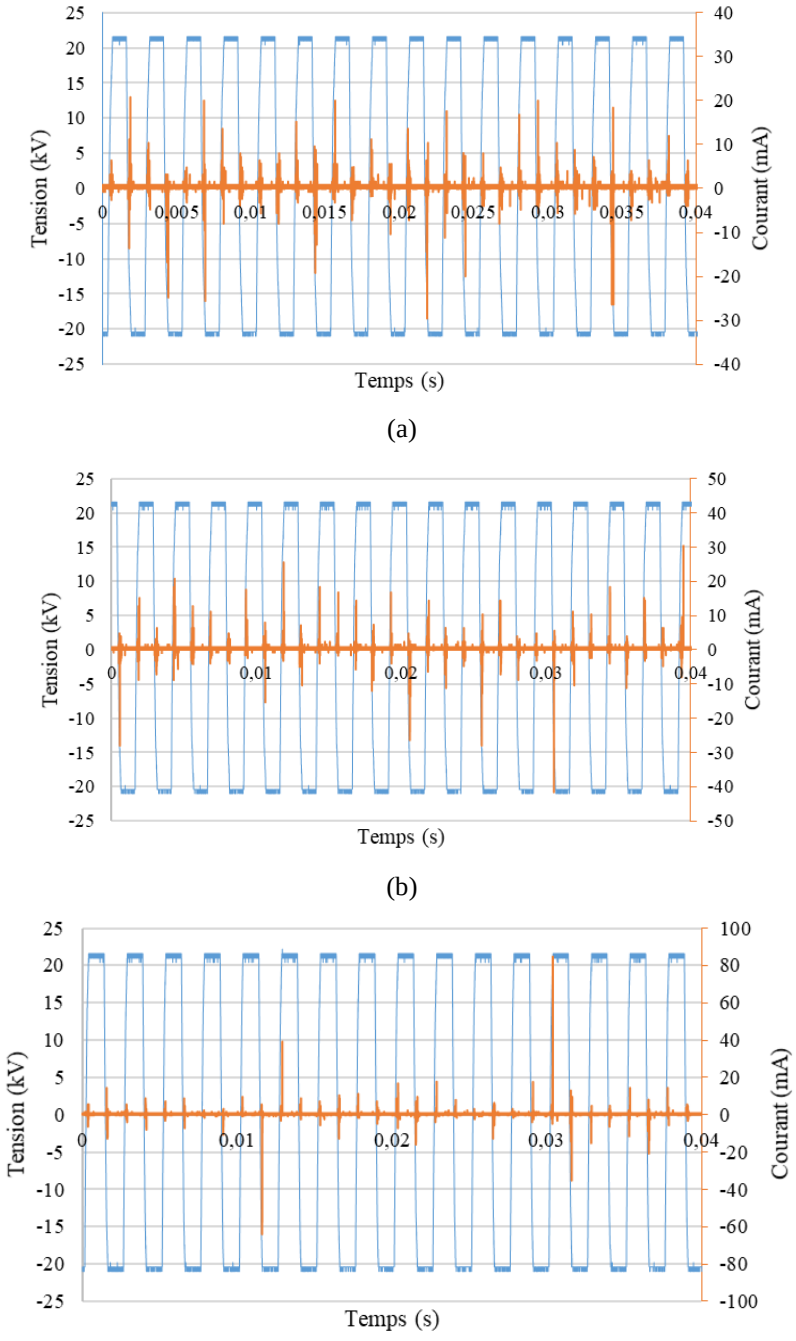


Figure IV.12. *Oscillogramme tension-courant pour : (a) Une barrière diélectrique de 3 mm ; (b) Une barrière diélectrique de 4 mm ; (c) Une barrière diélectrique de 5 mm.*

Dans le cas du réacteur de DBD statique où les deux électrodes sont couvertes d'une barrière diélectrique en verre, la charge des particules de PE tend à diminuer avec l'augmentation de l'épaisseur de la barrière. Car, la puissance consommée diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du diélectrique pour les mêmes conditions. Cependant, sur la

figure IV.12 on voit que l'amplitude des pics de courant de décharge est plus conséquente lorsque la DBD est mise en œuvre avec une barrière épaisse. En revanche, le nombre de pics de courant diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du diélectrique, les impulsions de courant sont plus nombreuses lorsque la DBD est générée avec la barrière la plus fine.

IV.2.2.5. Effet de la vitesse linéaire du convoyeur

La figure IV.13 illustre l'effet de la vitesse du convoyeur sur la charge triboélectrique des particules de PE exposées au plasma d'une DBD. Les paramètres électriques et géométriques de la DBD ont été fixés aux valeurs de références (U = 21 kV, f = 400 Hz, d = 11 mm, e = 4 mm).

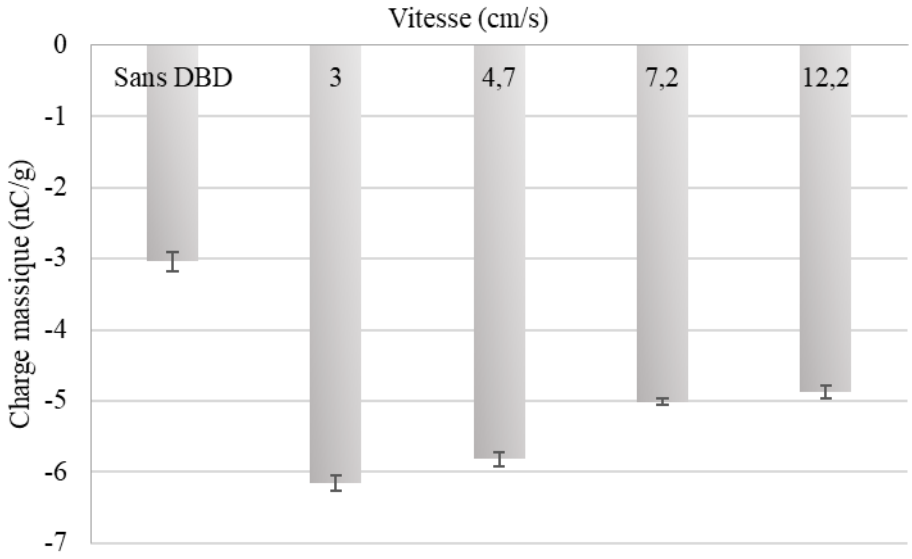


Figure IV.13. *Evolution de la charge massique des particules de PE avec la vitesse du convoyeur (U = 21 kV, f = 400 Hz, e = 5 mm, d = 11 mm).*

La charge massique des particules traitées par DBD diminue avec l'augmentation de la vitesse linéaire du convoyeur. La charge la plus élevée - 6,15 nC/g est obtenue lorsque la vitesse du convoyeur est réglée à son minimum et à mesure que la vitesse augmente, la charge triboélectrique diminue. En faisant varier la vitesse du convoyeur, la durée de traitement varie également. Quand la vitesse du convoyeur a été réglée à son maximum v = 12,2 cm/s, une particule traverse la zone de décharge en moins de 1,4 s, pour ce temps d'exposition à la DBD, la charge triboélectrique augmente de 60 % par rapport au cas où les particules ne sont pas traitées par DBD ; c'est le taux d'augmentation le plus faible qui a été enregistré pour les 4 vitesses étudiées. Une vitesse plus élevée ne permettrait pas une durée de traitement suffisante pour générer une charge triboélectrique efficace. Le temps nécessaire au convoyeur pour entraîner une particule à travers l'espace DBD était 5,7 s lorsque la vitesse était fixée à 3 cm/s,

cette durée de traitement permet une amélioration de charge de plus de 100 % par rapport au cas non-traité.

IV.2.2.6. Effet de l'humidité relative

En plus des facteurs contrôlables de la DBD, nous avons étudié l'influence de l'humidité relative sur l'efficacité du traitement par DBD, les paramètres de la DBD ont été fixés aux valeurs optimales (U = 21 kV, f = 400 Hz, e = 5 mm, d = 11 mm, v = 3 cm/s, t = 5,7 s).

Comme le montre la figure IV.14, la charge triboélectrique des échantillons non-traités et traités par DBD diminue avec l'augmentation de l'humidité atmosphérique. Cette tendance revient au fait qu'une augmentation de l'humidité diminue la résistivité de surface des particules [159] et augmente la conductivité de l'air ambiant [160]. Etonnamment, le taux d'augmentation de charge avait tendance à augmenter avec l'humidité relative, ce qui signifie que le traitement DBD était plus efficace à une humidité relative élevée, probablement dû à l'intensification de la décharge. Ces résultats sont en accord avec les conclusions de Anderson et Roy [161] et Benard et *al.* [162], qui ont rapporté une augmentation des performances d'un réacteur DBD à des valeurs plus élevées d'humidité relative. Leurs résultats ont montré que les réacteurs DBD peuvent fonctionner à une humidité relative élevée [163].

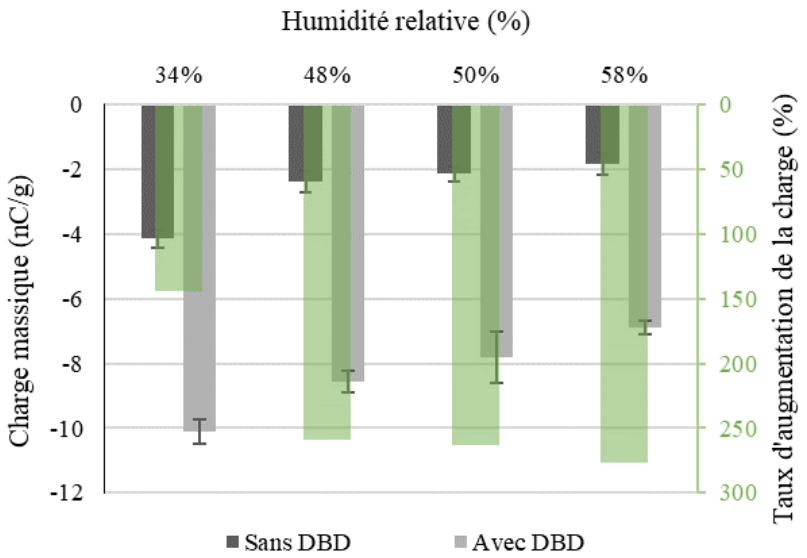


Figure IV.14 *Charge massique et taux d'amélioration de la charge en fonction de l'humidité relative (U = 21 kV, f = 400 Hz, e = 5 mm, d = 11 mm, v = 3 cm/s, t = 5,7 s).*

IV.2.3. Série triboélectrique

L'objectif de cette série d'expériences est d'établir deux séries triboélectriques distinctes, une pour les particules traitées par DBD et l'autre pour les particules non traitées. Huit types de polymères ont fait l'objet de cette étude (Figure II.1) : PP (b), HIPS (d), PE (e), PS cristallin (f), PVC (g), PS (h), PC cristallin (i) et ABS (j).

Les paramètres électriques et géométriques de la DBD ont été fixés aux valeurs optimales (U = 21 kV, f = 400 Hz, e = 5 mm, d = 11 mm, v = 3 cm/s, t = 5,7 s).

La figure IV.15 montre les séries triboélectriques et les niveaux de charge obtenus pour les huit types de polymère. Lorsque les particules non traitées ont été tribochargées pendant 1 min dans le dispositif de charge vibrant avec des parois en acier, six types de polymère ont été chargés négativement et seuls l'ABS et le PC cristallin ont été chargés positivement. Notons que le PVC a acquis la charge négative la plus élevée et le PC cristallin a acquis la charge positive la plus élevée [158].

Lorsque les particules ont été exposées à la DBD (Figure.IV.15 (b)), non seulement leur charge a augmenté, mais étonnamment tous les types de granules polymères étudiés ont été chargés négativement et leur ordre dans les séries triboélectriques a changé. Ce résultat est très intéressant car la qualité d'une séparation électrostatique dépend du positionnement relatif des matériaux à traiter dans les séries triboélectriques. L'inversion de polarité peut être liée aux modifications ayant été subies par les granules après traitement DBD, ces modifications sont produites à la fois au niveau atomique et moléculaire. Selon Nastuta et *al.* [164], pendant le traitement par plasma, des réactions radicalaires se produisent, entraînant la formation de nouveaux groupes chimiques fonctionnels et de divers produits d'oxydation qui interagiront avec la surface du polymère, et la modifient. Liu et *al.* [165] ont également constaté que le traitement par plasma modifie à la fois la chimie de surface et sa microstructure. Pendant le traitement DBD, les surfaces des polymères sont exposées à un régime hautement réactif, l'énergie des espèces chargées créées pendant le traitement au plasma peut être suffisante pour briser les liaisons covalentes des chaînes polymères.

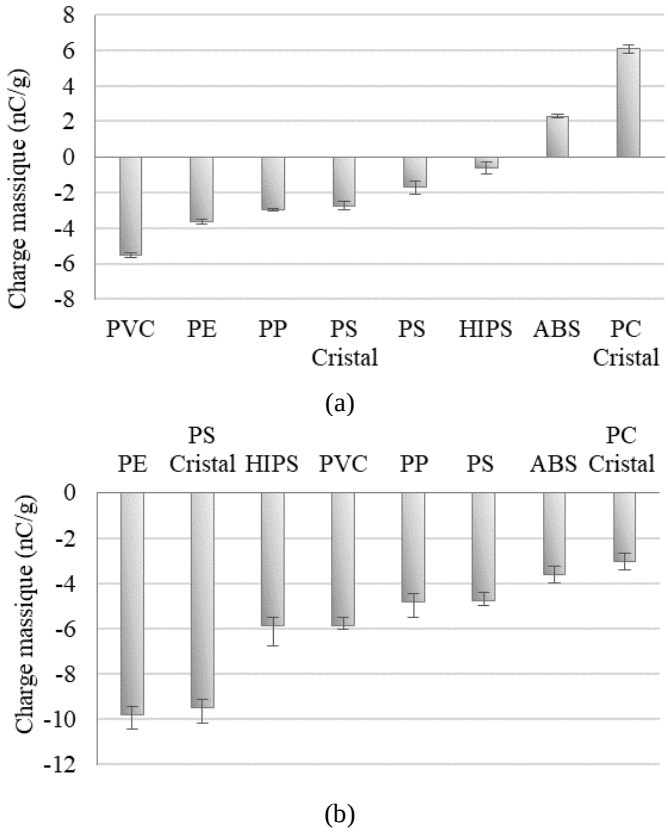


Figure IV.15. *Charge massique acquise par les différents types de particules : (a) Avant traitement par DBD ; (b) Après traitement par DBD (U = 21 kV, f = 400 Hz, e = 5 mm, d = 11 mm, v = 3 cm/s, t = 5,7 s).*

IV.2.4. Séparation électrostatique

Il est évident que l'efficacité de la séparation électrostatique dépend du niveau de la charge des particules isolantes. Le but de cette troisième série d'expériences est d'analyser l'influence que peut avoir une exposition des particules à une DBD sur les performances de la séparation électrostatique.

Les expériences ont été réalisées avec un mélange PE-PS traité par DBD. Ce mélange a été choisi car le PE et le PS font partie des polymères les plus utilisées dans le domaine industriel. Les résultats ont ensuite été comparés à ceux obtenus pour un même mélange non-traité par DBD.

Pour la séparation électrostatique des mélanges PE-PS, le séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante de la société Prodecologia a été utilisé (Figure.IV.16). Lors de ces essais, le séparateur a été utilisé seul sans son dispositif de charge. Les particules chargées 1 min dans le dispositif vibrant sont transportées par la goulotte oscillante (1) et déposées en couche uniforme sur la surface de l'électrode tournante reliée à la terre (2). Elles traversent la zone du champ électrique créé entre l'électrode tournante mise à la terre et l'électrode reliée à

la haute tension (3). Les particules sont ensuite triées selon la polarité de leur charge, celles ayant une charge opposée à la tension appliquée sont attirées par l'électrode haute tension et celles chargées de la même polarité sont repoussées. Les particules ainsi séparées sont récupérées dans les compartiments du collecteur (4).

Dans toutes les expériences, l'électrode haute tension était connectée à une alimentation haute tension à courant continu de polarité positive. D'un autre côté, les autres facteurs ont été maintenus à des valeurs constantes : l'angle d'inclinaison de l'électrode haute tension α = 35°, la haute tension appliquée à l'électrode U = 36 kV, l'inclinaison du volet déflecteur (5) β = - 12°, la vitesse du tambour n = 40 tr/min et le débit de la matière Q = 2,5 g/s.

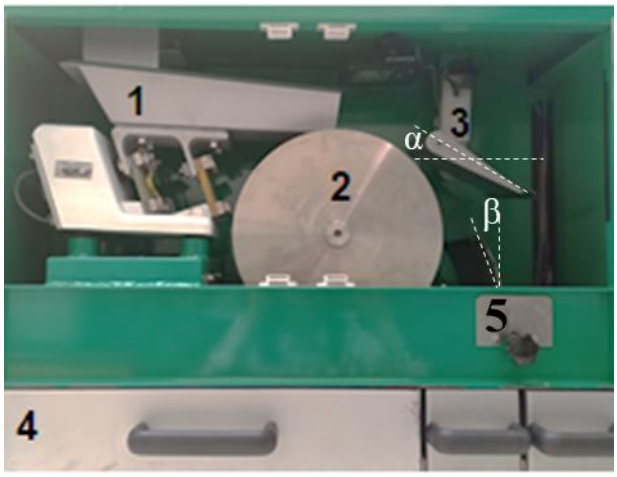


Figure IV.16. *Séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante de la société Prodecologia : (1)* goulotte oscillante *; (2) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (3) Electrode reliée à une source de haute tension ; (4) Collecteur a 3 compartiments ; (5) Système de réglage de l'inclinaison du volet déflecteur.*

La figure IV.17 montre une comparaison des taux de récupération et de pureté des particules de PE et de PS, avant et après traitement par DBD. Les résultats de l'étude suggèrent que la séparation électrostatique est influencée par le traitement DBD. En effet, dans le cas d'un mélange PE-PS non-traité par DBD, la pureté et la récupération des particules de PE n'étaient que de 70 % et 57 % respectivement. Les résultats de la séparation sont fortement améliorés après le traitement DBD, la pureté de PE et la récupération de PS dépassent 97 %.

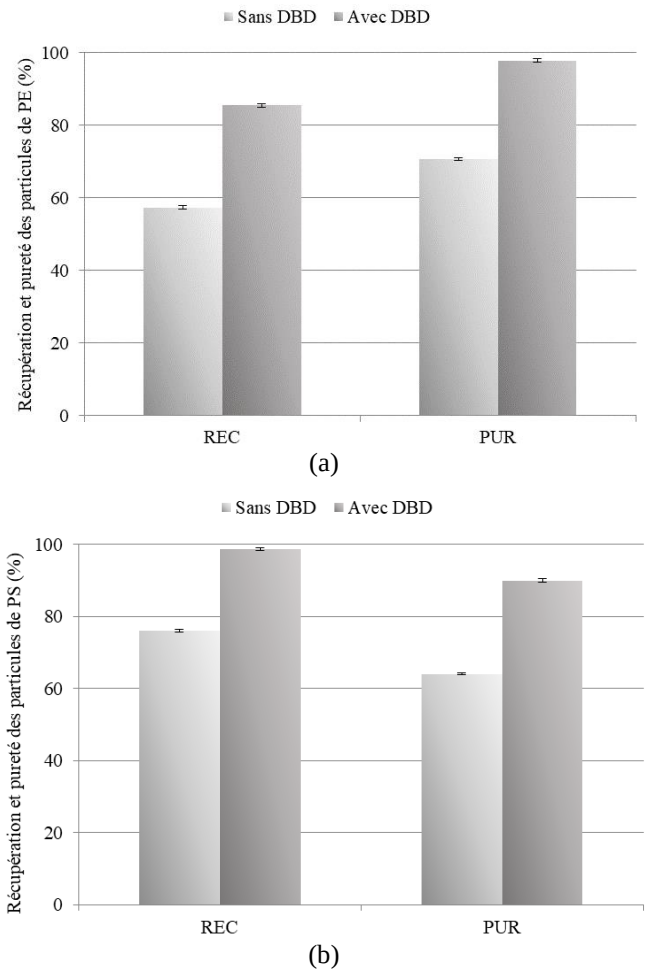


Figure IV.17. *Comparaison des taux de récupération et de pureté des particules de : (a) PE et (b) PS, avant et après traitement par DBD.*

Cette amélioration peut être expliquée par la position des deux matériaux dans la série triboélectrique. Sur la figure IV.15 (a), nous pouvons voir que sans traitement par DBD, PE et PS étaient plus proches l'un de l'autre dans la série triboélectrique, mais lorsque les particules sont exposées au plasma (Figure IV.15 (b)), les positions des deux polymères changent et deviennent ainsi plus éloignés les uns des autres et leur amplitude de charge augmente également.

Le succès de la séparation électrostatique d'un mélange granulaire dépend des charges triboélectriques acquises par chaque type de matériau après le processus de triboélectrification, l'efficacité de l'échange de charges étant déterminée par la position des matériaux dans la série triboélectrique ; plus les deux matériaux sont loin les uns des autres, plus le transfert de charge est important [158].

IV. 3. Conclusions

La charge triboélectrique des particules de polymère issues des déchets d'équipements électriques et électroniques est fortement impactée par leur exposition préalable à l'action d'une décharge à barrière diélectrique.

Dans ce chapitre nous avons, dans un premier temps, étudié l'effet des paramètres gouvernant la DBD sur la charge triboélectrique des particules de PE traitées dans un réacteur DBD statique. Les résultats mènent aux conclusions suivantes :

(1) La charge triboélectrique augmente avec la tension appliquée au système d'électrodes.

(2) La fréquence du signal n'a qu'une faible influence sur la charge triboélectrique acquise par les particules de PE dans la gamme de fréquences 200 Hz – 2000 Hz.

(3) En augmentant la distance inter-électrodes, la charge triboélectrique semble atteindre un maximum pour une valeur optimale. Au-delà de ce point, la charge devient plus faible car le champ électrique diminue avec l'accroissement de la distance.

(4) L'épaisseur du diélectrique est également un facteur qui peut fortement affecter la charge triboélectrique, cependant la position de ce dernier dans l'espace inter-électrodes n'a montré que peu d'influence sur l'efficacité de traitement par DBD.

(5) Pour le système de DBD statique, dans les meilleures conditions, la charge des particules de PE peut être multipliée par 5 en comparaison avec des granules non-traités par DBD.

A partir de ces conclusions, nous avons réalisé un banc expérimental de traitement de surface des matériaux granulaires par DBD adapté au fonctionnement continu, dans l'optique d'intégrer cette technologie dans un processus industriel où les polymères pourraient être exposés à une DBD lors de leur acheminement vers les installations de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique.

En cherchant à définir une configuration optimum du banc d'essais, permettant d'avoir la charge triboélectrique la plus élevée, il s'est avéré que :

(1) La tension de décharge, l'épaisseur de la barrière diélectrique et la distance inter-électrodes ont un effet significatif sur la charge triboélectrique des particules de PE, alors que la fréquence est peu influente.

(2) La vitesse du convoyeur influe sur la durée d'exposition à la DBD, cette dernière affecte l’efficacité du traitement au plasma.

(3) Dans des conditions de fonctionnement optimales, la charge massique des particules de PE traitées est 4 fois supérieure à celle des particules non traitées.

(4) L'amplitude de charge et la position de plusieurs types de particules dans la série triboélectrique ont changé après le traitement par DBD. Par conséquent, la séparation électrostatique des mélanges polymères peut être contrôlée par ces changements.



“L'intelligence sans ambition, c'est comme un oiseau sans ailes.”

Salvador Dali

Chapitre V

Chargement triboélectrique et séparation électrostatique des polymères bromés

Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) sont l'un des flux de déchets à la croissance la plus rapide au monde et sont considérés comme un problème planétaire [4]. Les DEEE peuvent contenir des matériaux précieux [166,167], ainsi que des constituants toxiques tels que les retardateurs de flamme bromés (RFB) [168,169].

Les retardateurs de flamme bromés (RFB) sont des substances chimiques utilisées depuis les années 1970 dans des matériaux inflammables afin d'accroître la résistance au feu et ralentir sa propagation [170-172]. Bien que ces retardateurs de flamme aient des avantages en termes de sécurité et d'efficacité, ils représentent tout de même un danger pour l'environnement et la santé des êtres humains. Environ 75 RFB différents ont été produits à l'échelle commerciale. Les RFB ont eu cette part importante du marché en raison du faible coût et des performances élevées du brome.

Les RFB peuvent être incorporés de différentes manières dans les polymères, en tant que constituants réactifs ou additifs. Les RFB réactifs sont mélangés chimiquement avec les polymères par la formation de liaisons covalentes. Cependant, les RFB additifs ne se lient pas chimiquement à la matrice polymère. Par conséquent, lorsqu'ils sont utilisés comme additifs, les RFB comme plusieurs autres substances de cette catégorie peuvent se dégager des produits et se libérer dans l'environnement pendant l'utilisation, après la mise en décharge ou pendant le recyclage [173-178].

Les retardateurs de flamme bromés ne sont pas biodégradables et s'accumulent donc dans l'environnement. En raison de leur nature persistante, les RFB ont tendance à s'accumuler et se retrouvent dans l'air, la poussière, les sols aquatiques et les sédiments. De plus, les retardateurs de flamme bromés peuvent libérer des gaz toxiques lors de l'incinération [179-181].

Pour toutes ces raisons, de nombreux RFB sont désormais répertoriés dans plusieurs réglementations, notamment la convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP), la directive REACH ou la réglementation RoHS [178,182,183]. Ainsi, les produits en fin de vie contenant ces substances dangereuses doivent être soigneusement gérés [184,185]. Les polymères sont particulièrement concernés par ce problème, diverses options de

traitement sont envisagées pour gérer les matériaux contenant ces substances dangereuses. Les principales alternatives sont l'enfouissement, l'incinération, le recyclage mécanique et le recyclage chimique [186].

Pour limiter les risques, l'identification des polymères contenant les RFB est essentielle. Actuellement, l'identification des RFB est réalisée avec succès à l'aide de nombreuses méthodes telles que la chromatographie en phase gazeuse avec détection par capture d'électrons (ECD) [187], la chromatographie en phase liquide [188], la spectroscopie Raman [189], la spectrométrie de dégradation induite par laser (LIBS) [190], la fluorescence X (XRF) [191] la spectroscopie proche infrarouge (NIR) [192] et l'imagerie hyper-spectrale [193]. Toutefois, beaucoup de ces méthodes sont plutôt longues, coûteuses et nécessitent des équipements sophistiqués ainsi que des procédures complexes de préparation des échantillons, et sont difficiles à mettre en œuvre dans un processus de tri automatisé [191,193].

Le développement de procédés de recyclage industriels efficaces est nécessaire pour répondre aux exigences légales et réduire les risques environnementaux [194-196]. La séparation triboélectrostatique [197,198] est une technique prometteuse qui peut être utilisée dans le recyclage des déchets des polymères, il s'agit d'un procédé non polluant, peu coûteux et très efficace pour trier les différents constituants des déchets de polymères.

Le travail qui sera présenté dans ce chapitre vise à démontrer la faisabilité de trier les polymères bromés des mêmes polymères non-bromés qui peuvent être présents dans les déchets d'équipements électriques et électroniques en utilisant la technique de séparation triboélectrostatique.

V.1. Etude de la faisabilité de la séparation des polymères bromés

L'objectif de cette étude est de pouvoir séparer les polymères bromés des non-bromés. Dans un premier temps, une comparaison entre trois dispositifs a été effectuée, le but est de déterminer le dispositif permettant de charger les matériaux avec des signes opposés. L'étude s'est portée uniquement sur un mélange de particules de HIPS non-bromé et HIPS bromé. Une fois le dispositif de charge adéquat défini, des essais de séparation électrostatique ont été réalisés sur deux autres mélanges (no-bromé/bromé en PE puis en PP) [199].

V.1.1. Influence du choix du dispositif de charge sur la séparation des mélanges HIPS bromé - HIPS non-bromé

Avant de séparer des mélanges de polymères, il est essentiel de déterminer le mode de chargement triboélectrique approprié afin de charger les particules de manière optimale. C'est cette charge qui permettra ensuite de faire le tri des particules dans le séparateur électrostatique. Pour cela, des tests sur plusieurs dispositifs de charge ont été réalisés.

V.1.1.1. Procédure expérimentale

L'étude a été réalisée sur des échantillons de 100 g constitués de quantités égales de particules de HIPS non-bromé et de HIPS contenant 40000 ppm de brome (4,7 %), présentés dans le paragraphe II.1.1.3 (Figure II.3 (a) et (b)).

Dans la première série d'expériences, le mélange granulaire a été tribochargé dans un dispositif à vibrations (paragraphe II.3.1, Figure II.8). Trois récipients de natures différentes ont été comparés : acier, PS et PP. Dans toutes les expériences, l'amplitude des vibrations de fréquence 50 Hz de la plaque support du récipient de charge a été fixée à 3 mm et la durée de chargement à 3 minutes. Rappelons ici que des essais préliminaires avaient montré que ces réglages conduisaient à un chargement optimal.

Dans la deuxième série d'expériences, les échantillons de 100 g de HIPS bromé et non-bromé, ont été tribochargés dans le dispositif à cylindre rotatif décrit dans le paragraphe II.3.3 (Figure II.10). Dans cette étude, nous avons utilisé un cylindre en PVC de 600 mm de longueur muni de six ailettes d'une hauteur de 15 mm fixées sur ses parois internes. La vitesse de rotation du cylindre a été réglée à 80 tr/min et son inclinaison fixée à 5°. Ces réglages ont également été déterminés par des essais préliminaires.

Le dispositif expérimental utilisé dans la troisième série d'expériences est un tribochargeur à lit fluidisé présenté dans le paragraphe II.3.2 (Figure II.9). La chambre de fluidisation de ce dernier étant facilement remplaçable, quatre matières de parois ont été utilisées : PMMA, PS, PP et PE. La durée de séjour des granules dans la chambre de fluidisation a également été analysée. Ainsi, les granules ont été maintenus dans la chambre de fluidisation pendant 3 min ou 5 min. La vitesse de l'air était fixée à 241 m/min.

Le tri des mélanges granulaires a été effectué à l'aide du séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante de l'entreprise prodecologia illustré sur la figure IV.16. Dans toutes les expériences, l'électrode haute tension était connectée à une source de tension de

polarité positive, l'angle d'inclinaison de l'électrode haute tension α = 30°, la haute tension appliquée à l'électrode U = 36 kV, l'inclinaison du volet déflecteur β = - 11°, la vitesse du tambour n = 35 tr/min et le débit de la matière Q = 2,5 g/s. Des plans d'expériences menés dans des études de notre équipe [140] avaient déterminé ces réglages comme étant le point de fonctionnement optimal de ce dispositif.

L'efficacité de l'effet triboélectrique a été analysée en mesurant la charge des particules collectées dans les deux compartiments B1 et B2, à l'aide d'une cage de Faraday connectée à un électromètre.

V.1.1.2. Résultats et discussion

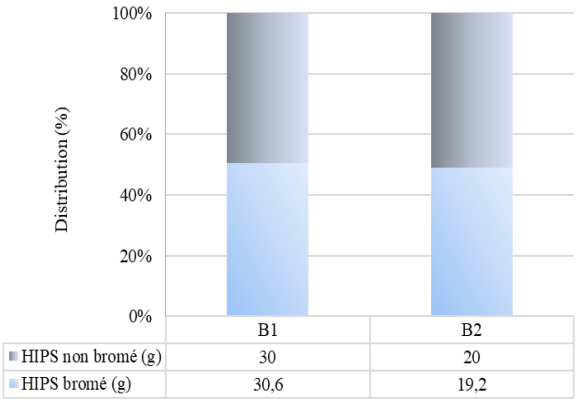
Toutes les expériences ont été effectuées à une humidité relative ambiante qui variait entre 43 % et 50,6 % et à une température comprise entre 18 °C et 19 °C. Pour chaque expérience, trois essais ont été effectués dont la valeur moyenne a été utilisée pour tracer les courbes.

- ***Chargeur à vibrations***

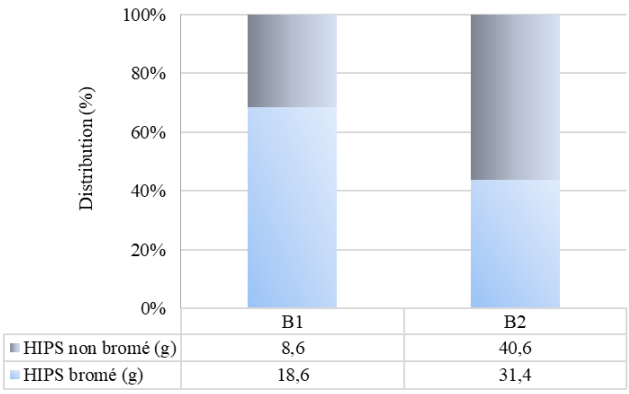
La figure V.1 présente la répartition des particules de HIPS bromé et non-bromé tribochargées dans le dispositif vibrant. Le mélange tribochargé dans le récipient en acier est difficile à séparer, les particules sont réparties quasiment uniformément dans les deux bacs collecteurs du séparateur (Figure V.1 (a)), les charges des produits collectés dans les collecteurs B1 et B2 étant de - 2,3 nC/g et - 1,4 nC/g, respectivement.

Les essais réalisés avec des particules tribochargées dans le récipient en PS n'ont pas montré de séparation efficace. Sur la figure V.1 (b), nous pouvons voir que la pureté des particules de HIPS bromés collectées dans B1 était d'environ 68 %, en revanche, la masse récupérée est très faible : elle représentait seulement 37 % (18,6 g) de la masse initiale.

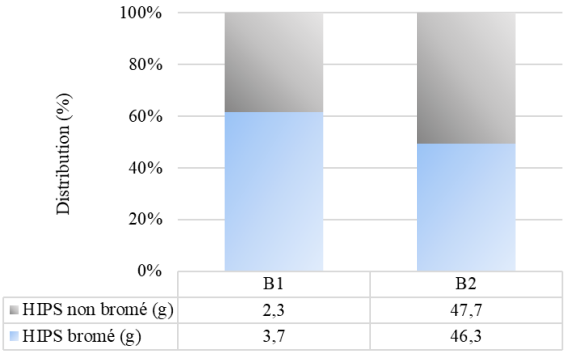
La séparation des particules de HIPS bromés et non-bromés était médiocre lorsque les particules étaient chargées dans le récipient en PP (Figure V.1 (c)) ; seuls 6 g ont été collectés dans le compartiment B1 avec une charge de - 5,14 nC/g, tandis que le reste du mélange a été récupéré dans le compartiment B2 avec une charge totale de - 1,21 nC/g.



(a)



(b)



(c)

Figure V.1. *Distribution des particules dans les deux compartiments du collecteur pour les mélanges tribochargés dans : (a) boîte en acier ; (b) boîte en PS ; (c) boîte en PP. (U = 36 kV, α = 30°, n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s).*

- ***Chargeur à cylindre rotatif***

Après avoir montré que le chargement avec le dispositif vibrant n'est pas efficace, une deuxième méthode de chargement est explorée en utilisant le dispositif à cylindre rotatif. Les résultats, illustrés sur la figure V. 2, montrent encore une fois que la séparation électrostatique du mélange tribochargé n'est pas satisfaisante. En effet, le mélange a été principalement collecté dans le collecteur B2, cela peut être dû au fait que les particules n'étaient pas suffisamment chargées pour être attirées par l'électrode haute tension. Une charge de 3,68 nC/g a été enregistrée pour les 18 g récupérés dans B1, le reste du mélange était caractérisé par une charge triboélectrique de - 1,81 nC/g.

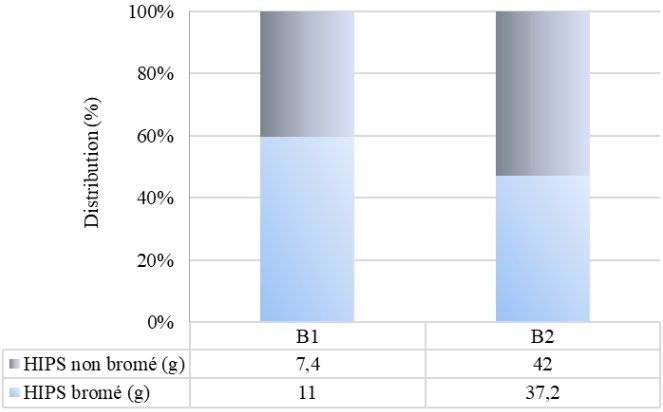


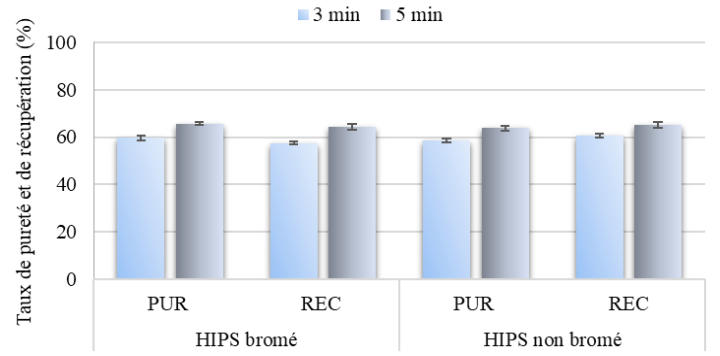
Figure V.2. *Répartition des particules dans les deux compartiments du collecteur pour le mélange HIPS bromé et non-bromé tribochargés dans le dispositif de charge à cylindre rotatif. (U = 36 kV, α = 30°, n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s).*

- ***Chargeur à lit fluidisé***

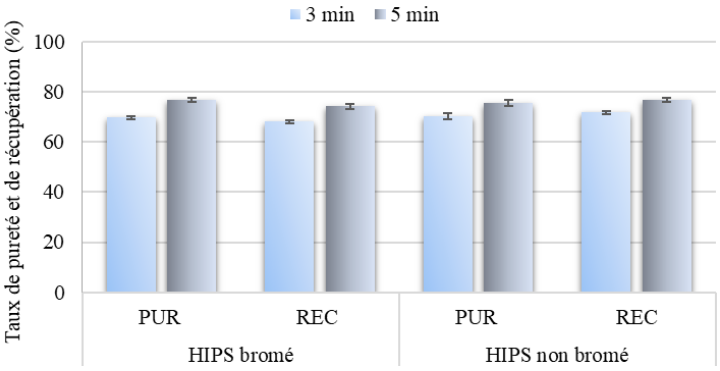
Pour les quatre matières de parois étudiées, les particules de HIPS bromé ont été majoritairement collectées dans le compartiment B1 alors que le compartiment B2 reçoit la majorité des granules du HIPS non-bromé.

Des résultats de séparation satisfaisants ont été obtenus avec le tribochargeur à lit fluidisé. La figure V.3 montre que la qualité de la séparation s'améliore en fonction de la durée de séjour des granules dans le chargeur. Lorsque les particules sont maintenues pendant 5 minutes dans la chambre de fluidisation les résultats de séparation sont meilleurs.

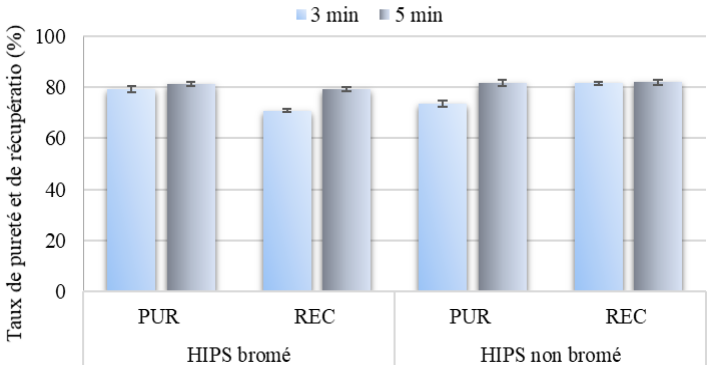
Une récupération et une pureté d'environ 65 % ont été obtenues pour les deux produits lorsque les particules ont été tribochargées dans la chambre en PMMA (Figure V.3 (a)). Une charge totale négative a été enregistrée dans les deux compartiments du collecteur avec - 3,42 nC/g dans B1 pour le HIPS bromé et - 0,18 nC/g dans B2 (HIPS non-bromé). La valeur de la charge indiquée par l'électromètre pour B2, est en effet, la somme de la charge des deux constituants du mélange. Les particules de HIPS non-bromé se chargent positivement mais le niveau de leur charge est très faible, la présence des particules de HIPS bromé donne alors une charge totale de polarité négative.



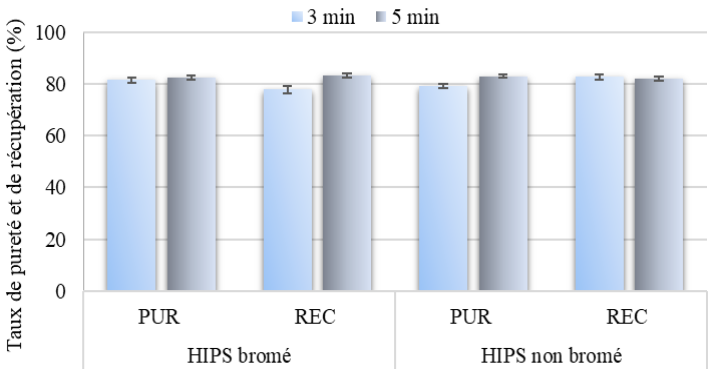
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure V.3. *Comparaison des taux de pureté et de récupération des particules de HIPS bromé et non-bromé tribochargées pendant 3 minutes et 5 minutes dans le dispositif à lit fluidisé pour : (a) Parois en PMMA ; (b) Parois en PS ; (c) Parois en PE et (d) Parois en PP. (U = 36 kV, α = 30°, n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s).*

De bons résultats de séparation ont été obtenus avec les parois en PS (Figure V.3 (b)). En effet, 74 % des HIPS bromé ont été récupérés dans le compartiment B1 avec une pureté de 76 % et une charge de - 3,04 nC/g, la pureté des particules de HIPS non-bromé était d'environ 75 %, le taux de récupération de 77 % et la charge totale du compartiment B2 était de 0,46 nC/g.

Les parois en PP ou en PE donnent les meilleurs résultats de séparation (Figure V.3 (c), (d) ; Figure V.4). Les résultats sont presque identiques pour le PP et le PE, ces deux polymères étant proches l'un de l'autre dans les séries triboélectriques. Des taux de pureté supérieurs à 80 % ont été obtenus pour les deux produits. Une charge de - 4,06 nC/g était enregistrée pour les particules de HIPS bromé tribochargées dans la chambre en PP et de - 3,97 nC/g avec des parois en PE. La charge des particules collectées dans B2 était de 2,35 nC/g et 2,37 nC/g pour le PP et PE respectivement.

Les mécanismes de tribochargement peuvent expliquer les différents résultats obtenus avec chaque dispositif. Dans le dispositif à lit fluidisé, l'air ascendant assure le chargement des granules par de multiples collisions particules/particules et particules/parois. Dans le cas de la table vibrante, le transfert de charge est principalement dû à des impacts particules/parois, les granules acquièrent des charges en se frottant avec les parois des récipients. Le même mécanisme est prédominant dans le tribochargeur à cylindre rotatif, la rotation du cylindre met les particules en mouvement et elles entrent en contact avec les parois internes du cylindre.



Figure V.4. *Résultats de séparation du mélange HIPS bromé et HIPS non-bromé. (Parois en PP, t = 5 min, U = 36 kV, α = 30°, n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s).*

V.1.2. Séparation électrostatique du mélange PE bromé - PE non-bromé

Les expériences ont été menées sur des échantillons de 100 g composés de quantités égales de particules de PE contenant 4,7 % de brome (Figure II.3 (c)) et de PE non-bromé (Figure II.3 (d)).

Sur la base des résultats présentés dans la section V.1.1, le chargeur à lit fluidisé a été utilisé pour charger les mélanges à séparer. Les granules ont été maintenus dans la chambre de fluidisation pendant 5 minutes. Des expériences ont été réalisées avec les quatre matières de parois : PMMA, PS, PP et PE. Le but était de déterminer l'influence de la nature des parois de la chambre de fluidisation sur la charge triboélectrique et la séparation triboélectrostatique des produits bromés et non-bromés.

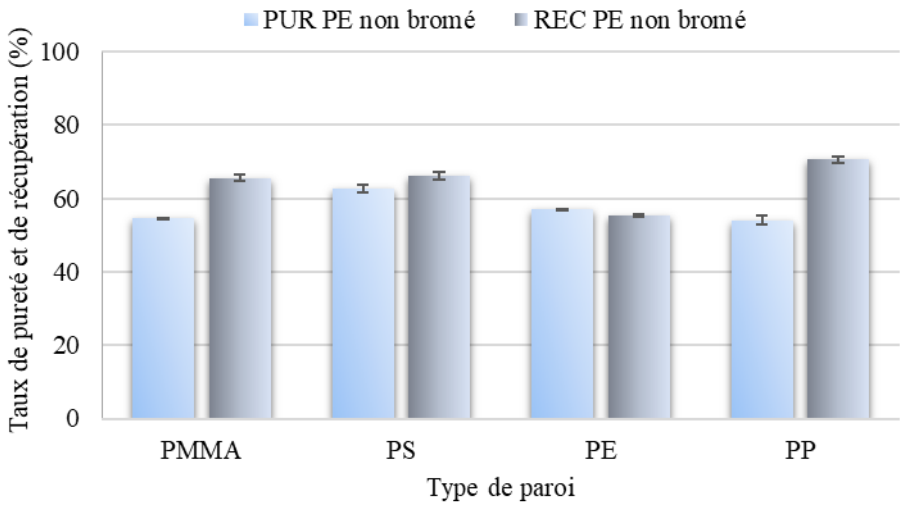
Pour chaque expérience, trois essais ont été effectués. Lors de ces essais, le séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante a été utilisé pour séparer les mélanges tribochargés. Les paramètres de réglage ont été gardés constants : la haute tension appliquée à l'électrode U = 36 kV de polarité positive, l'angle d'inclinaison de l'électrode haute tension α = 30°, la vitesse de l'électrode cylindrique n = 35 tr/min, l'inclinaison du volet déflecteur β = - 11° et le débit de la matière Q = 2,5 g/s.

A la fin de chaque expérience, la charge, la masse, ainsi que les taux de pureté et de récupération des matériaux collectés dans chaque compartiment ont été mesurés afin de déterminer l'efficacité de la séparation triboélectrostatique.

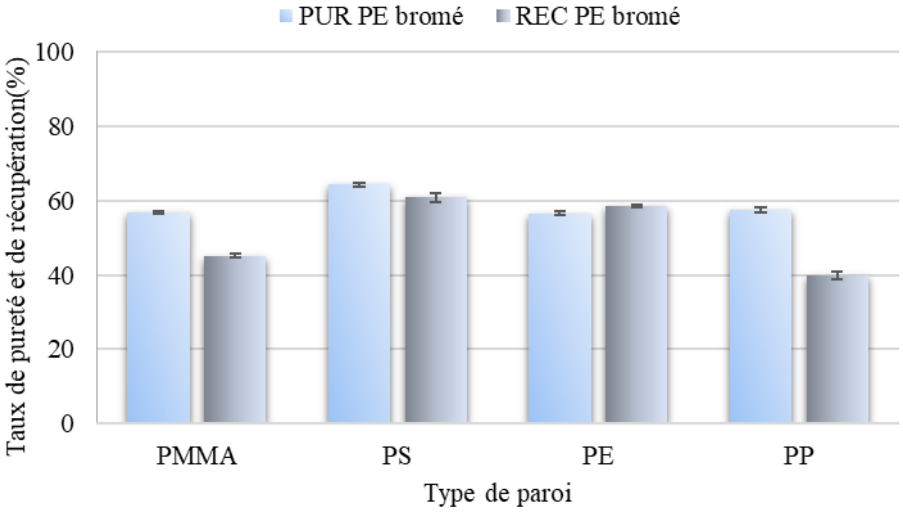
Lors des essais, l'humidité relative était comprise entre 54,8 % et 56,3 % et la température entre 19 °C et 19,6 °C.

Les particules de PE bromé ont été chargées négativement et collectées dans le compartiment B1 situé du côté de l'électrode haute tension, et les particules de PE non-bromé ont été chargées positivement est récupérées dans le compartiment B2.

Les graphes sur la figure V.5 représentent la pureté et la récupération des deux produits en fonction de la nature des parois de la chambre de fluidisation. Les résultats montrent que la séparation du mélange PE bromé et non-bromé était difficile, la pureté des deux produits n'atteignait pas 60 % avec des parois en PMMA, PP ou PE. Une charge totale négative a été enregistrée dans les deux compartiments du collecteur.



(a)



(b)

Figure V.5. *Pureté et récupération de : (a) PE non-bromé et (b) PE bromé. (t = 5 min, U = 36 kV, α = 30°, n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)*

Les parois en PS semblent donner les meilleurs résultats de séparation avec une pureté d'environ 64 % pour les deux produits (Figure V.6), cette valeur reste relativement basse car les forces électriques agissant sur les particules sont faibles. Le produit du collecteur B1 était caractérisé par une charge négative de - 2,44 nC/g et celui du collecteur B2 par une charge totale positive de 0,86 nC/g [200].



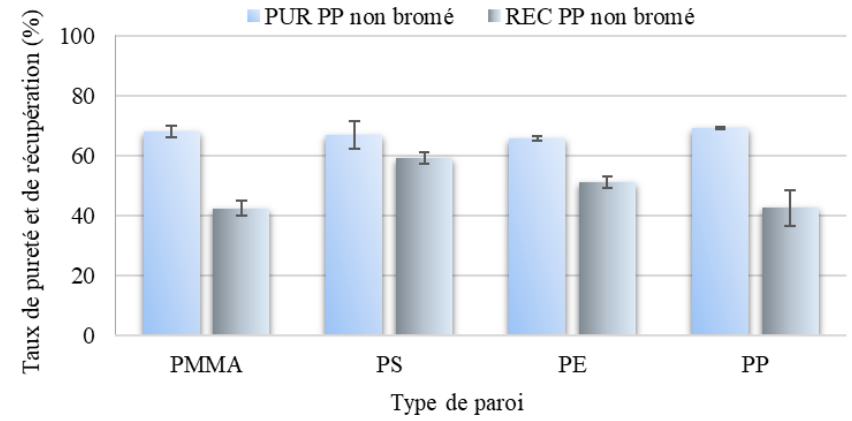
Figure V.6. *Résultats de séparation du mélange PE bromé et PE non-bromé. (Parois en PS, t = 5 min, U = 36 kV, α = 30°, n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s).*

V.1.3. Séparation électrostatique du mélange PP bromé et PP non-bromé

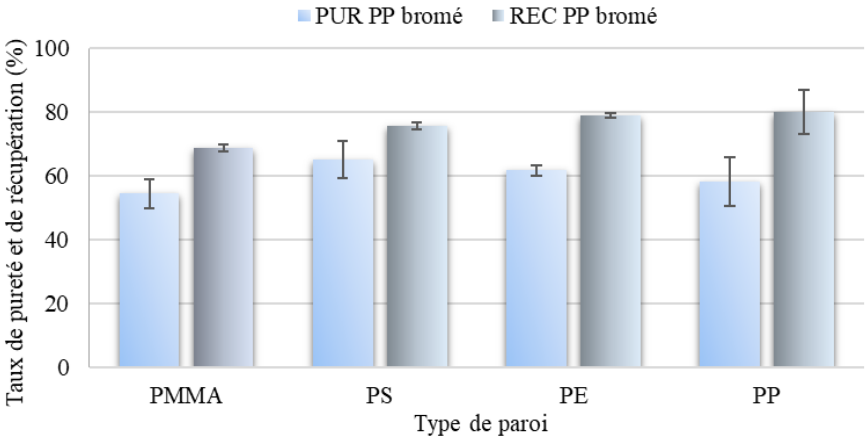
La procédure expérimentale est la même que celle présentée dans le paragraphe V.1.2. Les quatre matières de parois de la chambre de fluidisation du chargeur ont été comparées. Le but était au final de pouvoir déterminer la paroi permettant la meilleure séparation des produits bromés et non-bromés.

Chaque expérience a été effectuée sur un mélange de 100 g de PP bromé et non-bromé tribochargé pendant 5 minutes dans le chargeur à lit fluidisé puis introduit dans un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante.

Comme pour le mélange PE**,** le tri des particules de PP bromé et non-bromé est difficile. Les particules de PP bromé entrent en collision avec le volet déflecteur et sont ainsi déviées vers le compartiment B2 ; elles ne sont pas suffisamment chargées pour être attirées par l'électrode HT. La pureté du PP bromé et non-bromé atteint une valeur de 66 % avec les parois en PS [200]. La séparation est moins bonne avec les trois autres types de parois, comme le montre les résultats représentés sur la figure V.7 et figure V.8.



(a)



(b)

Figure V.7. *Pureté et récupération de : (a) PP non-bromé et (b) PP bromé. (t = 5 min, U = 36 kV, α = 30° n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)*

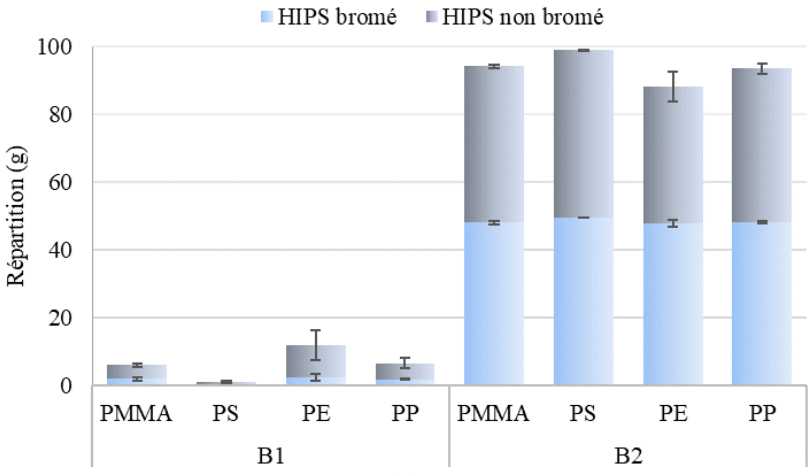


Figure V.8. *Résultats de séparation du mélange PP bromé et PP non-bromé. (Parois en PS, t = 5 min, U = 36 kV, α = 30 n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s).*

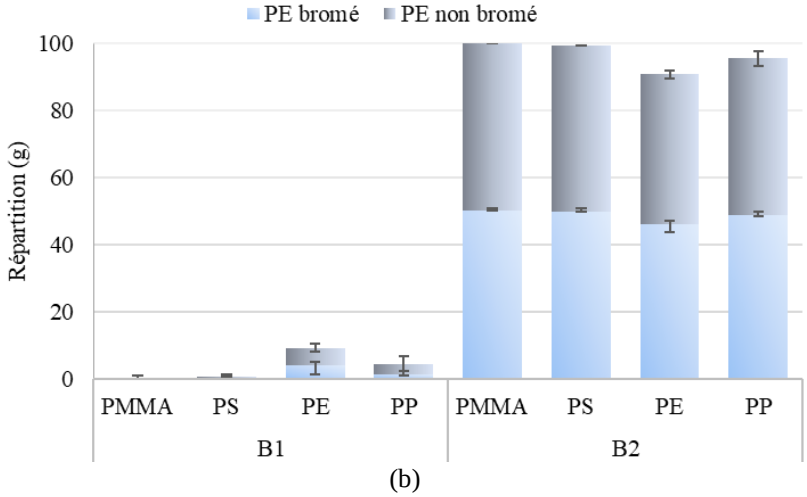
V.2. Polarité négative de la haute tension

Des essais sur les mêmes mélanges ont été réalisés mais cette fois avec une tension de polarité négative. Le but était de voir l'influence de la polarité de la tension sur les résultats de séparation. Ce travail découle de l'idée suivante : les particules de polymère contenant du brome étant plus denses que les non-bromées, cette différence entre les deux composants du mélange devrait permettre à l'électrode haute tension d'attirer plus facilement les particules non- bromées, plus légères.

Les expériences effectuées pour une tension de polarité négative ont donné les résultats présentés en figure V.9. La séparation s'est avérée plus difficile, pour chaque mélange étudié la quantité de produit récupérée dans le compartiment B1 est très faible, les particules de polymère non-bromé sont insuffisamment chargées pour être attirées par l'électrode haute tension. Ces mauvais résultats pourraient s'expliquer par le fait que la charge acquise par les particules n'est pas aussi importante car le taux d'humidité était très élevé lors des essais, elle était comprise entre 62,1 % et 68 % et la température entre 19 °C et 21 °C.



(a)



(b)

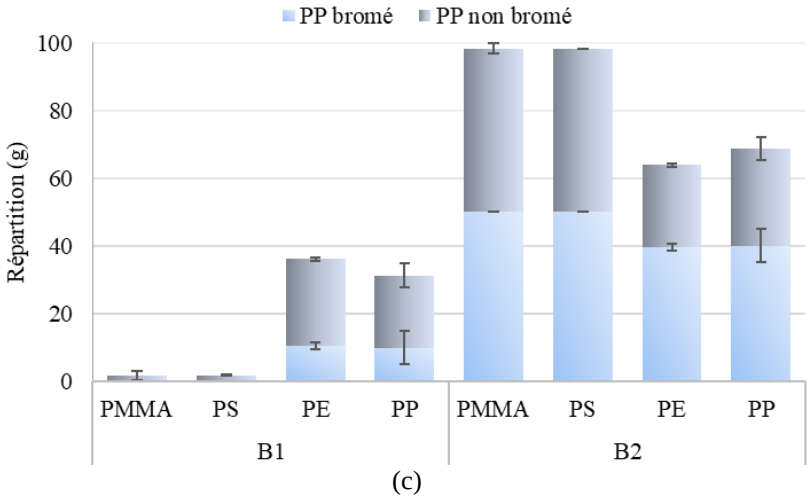


Figure V.9. *Distribution des particules dans les deux compartiments du collecteur pour les mélanges : (a) HIPS bromé et non-bromé ; (b) PE bromé et non-bromé ; (c) PP bromé et non-bromé. (t = 5 min, U = - 36 kV, α = 30° n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s).*

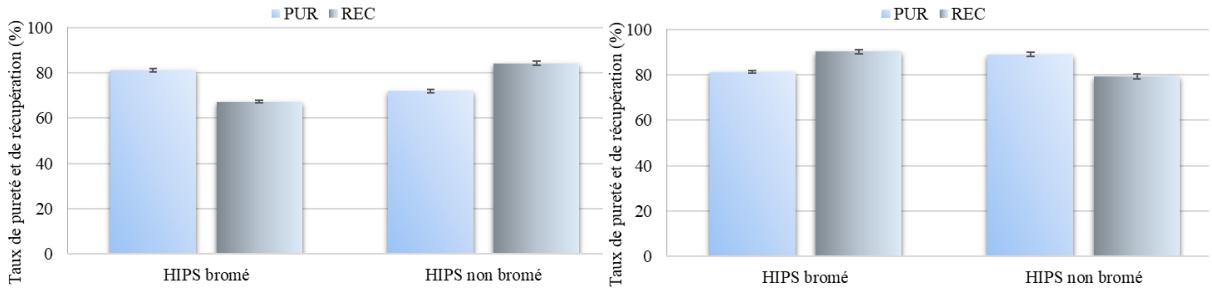
V.3. Amélioration du rendement de la séparation en polarité positive

Une polarité positive de la haute tension appliquée donne de meilleurs résultats de séparation, mais la pureté des polymères non-bromés récupérés dans le compartiment B2 reste tout de même relativement faible, ce qui montre la nécessité de traiter à nouveau les produits collectés dans ce compartiment.

Chaque mélange a été chargé 5 minutes dans le dispositif à lit fluidisé avec la matière de parois permettant les meilleures conditions de charge : le mélange HIPS bromé et non-bromé avec les parois en PP et les mélanges PP bromé et non-bromé, PE bromé et non-bromé avec les parois en PS. Les mélanges tribochargés ont ensuite été traités dans le séparateur à cylindre tournant avec une polarité positive de 36 kV. Le produit récupéré dans B2 a été collecté puis déposé dans la trémie de la table vibrante du séparateur déjà en fonctionnement pour effectuer une deuxième séparation afin d'améliorer les résultats. Là encore, les essais ont été réalisés à des taux d'humidité élevés qui variaient entre 58 % et 60 %.

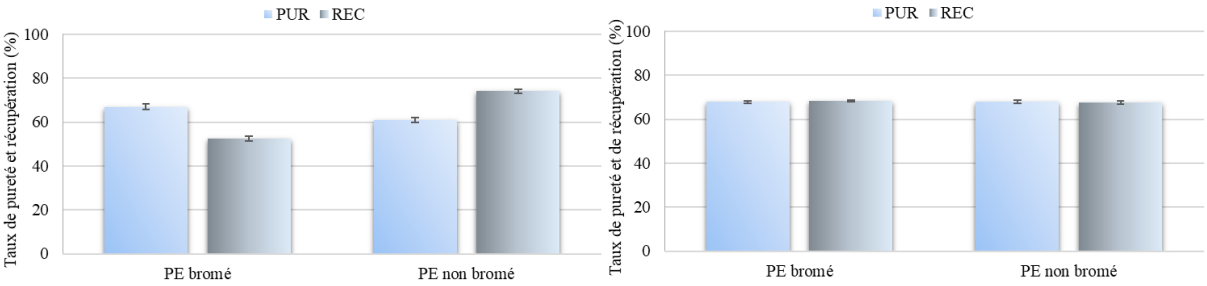
Les figures V.10, V.11 et V.12, montrent les résultats expérimentaux de cette séparation. La pureté des trois polymères non-bromés peut être améliorée par une séparation en deux temps. Ainsi, on obtient un HIPS non-bromé pur à 89 % soit une amélioration de 24 %. La pureté du PE non-bromé augmente de 12 %, et une légère amélioration de 7 % a été enregistrée pour le PP non-bromé. La récupération des polymères non-bromés diminue légèrement après une deuxième séparation, cela signifie qu'une fraction du produit non-bromé se charge

négativement et est attirée par l'électrode haute tension, ce qui dégrade en conséquence la pureté du produit bromé.



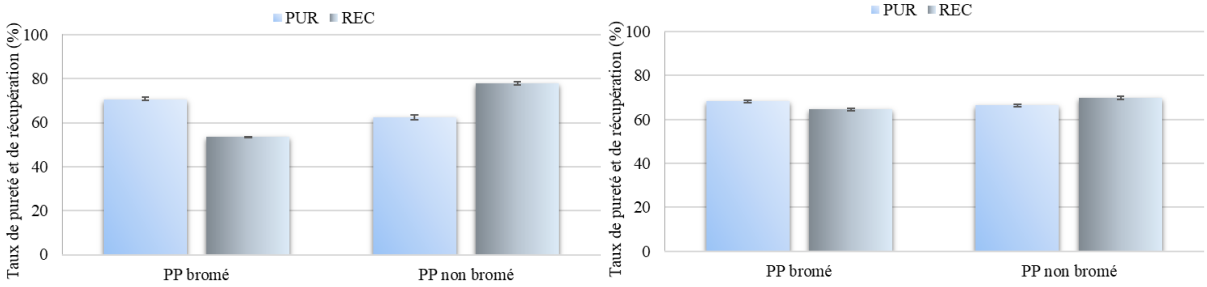
(a) (b)

Figure V.10. *Résultats de séparation du mélange HIPS bromé et non-bromé : (a) Après une première séparation ; (b) Après traitement du compartiments B2. (t = 5 min, U = 36 kV, α = 30° n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)*



(a) (b)

Figure V.11. *Résultats de séparation du mélange PE bromé et non-bromé : (a) Après une première séparation ; (b) Après traitement du produit récupéré dans le compartiment B2. (t = 5 min, U = 36 kV, α = 30° n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)*



(a) (b)

Figure V.12. *Résultats de séparation du mélange PP bromé et non-bromé : (a) Après une première séparation ; (b) Après traitement du produit récupéré dans le compartiment B2. (t = 5 min, U = 36 kV, α = 30° n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)*

V.4. Conclusion

(1) Les travaux présentés dans ce chapitre visaient à étudier la faisabilité de séparer des polymères contenant des retardateurs de flamme bromés des mêmes polymères sans de tels additifs. Le chargement triboélectrique et la séparation électrostatique des deux constituants des trois mélanges considérés dans cette étude a été un défi car les particules ont les mêmes taille, forme et monomère.

(2) Les résultats expérimentaux montrent qu'il est possible de séparer les polymères contenant les RFB des polymères sans RFB. L'efficacité du chargement triboélectrique est le facteur clé pour une séparation électrostatique réussie.

(3) Le choix du mode de chargement triboélectrique peut jouer un rôle important dans les résultats de la séparation électrostatique. Le dispositif de charge à lit fluidisé s'est avéré plus efficace que la table vibrante et le cylindre rotatif, car il permet de charger les composants de chaque mélange de signes opposés.

(4) Pour les trois mélanges étudiés, les particules de polymère bromé ont tendance à se charger négativement alors que les particules de polymère non-bromé se chargent positivement et leur charge n'est pas aussi importante que celle des particules contenant du brome.

(5) Les meilleurs résultats de séparation ont été obtenus pour le mélange HIPS bromé et non-bromé avec des taux de pureté et récupération supérieurs à 80%, les deux autres mélanges se séparent beaucoup plus difficilement.

(6) Une deuxième séparation du produit collecté dans le compartiment B2 semble être nécessaire afin d'améliorer le rendement du tri des polymères bromés et non-bromés.

(7) Enfin, les meilleurs résultats sont obtenus lorsque la phase amont de tribochargement aboutit à des charges opposées des polymères bromés et non-bromés.



“Se donner du mal pour les petites choses, c’est parvenir aux grandes avec le temps.”

Samuel Beckett

CONCLUSION GENERALE

Le développement de nouvelles technologies de séparation électrostatique est stimulé par la grande diversité des matériaux à traiter dans les usines de recyclage des déchets, mais aussi dans l'industrie minière ou agro-alimentaire. La maîtrise du processus de charge électrique des matériaux à trier est la condition essentielle de la faisabilité de la séparation.

Après une présentation de l'état de l'art dans ces domaines, la thèse a décrit les installations expérimentales conçues et mises en œuvre à l'Institut PPRIME de l'Université de Poitiers et au Laboratoire APELEC de l'Université de Sidi Bel-Abbès, afin de répondre aux besoins de l'étude des différents facteurs influents du processus de charge des matériaux granulaire. Les recherches ont essentiellement porté sur des polymères provenant des déchets d'équipement électriques et électroniques.

La **conclusion générale** de ces travaux peut être formulée ainsi : l'efficacité du processus de charge triboélectrique des matériaux granulaires peut être augmentée en maîtrisant, d'une part, la taille et l'état de surface des particules et, d'autre part, en optimisant les conditions de fonctionnement des dispositifs de chargement utilisés.

a. Les principales contributions originales

L'étude de l'état de l'art (chapitre I) nous a permis d'identifier plusieurs problèmes scientifiques et techniques à résoudre dans le domaine de la charge triboélectrique des polymères granulaires : (1) évaluer les effets et les interactions de la multitude des facteurs influents de ce processus ; (2) approfondir la compréhension des mécanismes physiques en jeu ; (3) mettre au point des techniques de traitement de surface des polymères, afin de modifier leur comportement triboélectrique.

Afin d'atteindre les objectifs fixés à notre travail, nous avons réalisé plusieurs bancs d'essais instrumentalisés (chapitre II) permettant l'étude de l'influence de plusieurs facteurs sur le comportement triboélectrique des matériaux : facteurs géométriques (taille des granules), état de surface (rugosité et mouillabilité) et la composition chimique (présence des retardateurs de flamme bromés).

Le premier banc expérimental associe un broyeur, un séparateur électrostatique à tambour et des appareils pour la mesure simultanée de la masse et de la charge électrique des produits triés. Dans le deuxième banc, la place du broyeur a été prise par des dispositifs permettant d'exposer les granules à l'action d'une décharge à barrière diélectrique, en régime statique ou dynamique, avant de les transférer dans un dispositif de charge triboélectrique à vibrations et les soumettre par la suite à la séparation électrostatique.

En utilisant un broyeur à couteaux, nous avons pu réduire la taille des granules et démontrer que cette opération augmente l'efficacité du processus de charge triboélectrique et de la séparation électrostatique (chapitre III). Les essais nous ont permis de valider la possibilité d'utiliser le broyage en tant qu'opération simultanée de réduction de tailles et de chargement triboélectrique.

Le traitement de surface par la Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) est une technique efficace pour la modification de l'état de surface des matériaux granulaires. L'application d'une DBD a permis l'amélioration de leurs caractéristiques de charge triboélectrique, ainsi que les résultats de séparation.

La conception et réalisation d'un banc expérimental de traitement de surface des matériaux granulaires par DBD dynamique est l'une des contributions originales majeures de cette thèse (chapitre IV). Le dispositif est adapté au fonctionnement continu, il permet aux polymères d'être exposés à une DBD lors de leur acheminement vers les installations de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique.

Les travaux présentés dans cette thèse ont confirmé la faisabilité de la charge triboélectrique et de la séparation électrostatique des mélanges granulaires des mêmes polymères bromés et non-bromés (chapitre V). Un dispositif de charge de conception originale a été utilisé, ce dernier a permis la charge triboélectrique différentiée des particules ayant les mêmes taille, forme et monomère. Grace à ses parois interchangeables, les trois mélanges étudiés ont pu être séparés par un procédé électrostatique lorsqu'ils sont préalablement chargés en utilisant le type des parois qui transmet la charge la plus élevée.

b. Perspectives

(1) Validation sur une installation industrielle de la possibilité d'utiliser le broyage en tant qu'opération simultanée de réduction de tailles et de chargement triboélectrique des polymères provenant des déchets d'équipements électriques et électroniques.

(2) Extension de l'étude des effets de la décharge à barrière diélectriques sur d'autres classes de polymères.

(3) Réalisation de réacteurs plasma avec des géométries différentes et en utilisant d'autres matériaux pour la construction des barrières diélectriques.

(4) Etude de la charge triboélectrique et la séparation de mélanges comportant plus de deux isolants, bromés et non-bromés, une situation fréquemment rencontrée dans l'industrie du recyclage.

(5) Approfondissement des études réaliser sur les particules traitées par DBD, en regardant notamment les aspects chimiques et surfaciques, afin de comprendre et quantifier les mécanismes physiques jouant sur leur charge (changement de polarité, variation du niveau de charge en fonction de la durée d'exposition, de la forme et de la fréquence du signal ou de la tension…).

(6) Evaluation des effets de l'humidité et de la température sur la charge triboélectrique des polymères granulaires.

(7) Modélisation numérique des divers processus de charge triboélectrique et séparation électrostatique, prenant en compte l'ensemble des phénomènes physiques en jeu.

LISTE DES PUBLICATIONS

A. Benabderrahmane, K. Medles, T. Zeghloul, P. Renoux, L. Dascalescu and A. Parenty, "Triboelectric charging and electrostatic separation of granular polymers containing brominated flame retardants," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no 1, p. 915-922, 2020.

A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, K. Medles, A. Tilmatine, et L. Dascalescu, "Triboelectric Charging of Granular Polymers Previously Exposed to Dielectric Barrier Discharges in Atmospheric Air," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no 3, p. 3061-3067, 2020.

A. Benabderrahmane, G. Richard, K. Medles, T. Zeghloul, A. Tilmatine, L. Dascalescu, "Dielectric barrier discharge treatment of granular plastic mixtures in view of their triboelectrostatic separation," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no 1, p. 693–703, 2019.

A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, K. Medles, A. Tilmatine, et L. Dascalescu, "Surface treatment of granular materials by dielectric barrier discharge in view of triboelectric charging improvement," Journal of Physics: Conference Series, 2019, vol. 1322, no 1, p. 012005.

A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, W. Aksa, A. Tilmatine, K. Medles, L. Dascalescu, "Shredding as simultaneous size-reduction and tribo-charging operation for improved performances of an electrostatic separation process for granular plastic wastes," Particulate Science and Technology, pp. 1-8, 2019.

G. Richard, A. Tilmatine, **A. Benabderrahmane**, T. Zeghloul, K. Medles, et L. Dascalescu, "Factors that affect tribocharging of Polyethylene (PE) granules after exposure to a dielectric barrier discharge (DBD)," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no 1, p. 812 816, 2018.

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Évolution de la masse des équipements mis sur le marché entre 2006 et 2018 [3]. 10

Figure 2. Représentation schématique de la charge triboélectrique et la séparation électrostatique..... 11

Figure I.1 : Charge triboélectrique de deux particules en contact. (I) particules électriquement neutres sans contact entre elles ; (II) contact et transfert de charge ; (III) particules chargées après rupture du contact. 16

Figure I.2. Représentation des trois mécanismes de transfert de charge [22]. 16

Figure I.3. Collision entre les particules de PE et PS par l'intermédiaire de la couche d'eau [53]. 19

Figure I.4. Modèle du condensateur [66]. 21

Figure I.5. Répartition de charge sur le plan [66]. 22

Figure I.6. Evolution de la charge triboélectrique des particules de PVC en fonction du temps de traitement de la DBD [88]. 24

Figure I.7. Profilométrie 3D des échantillons de : (a) PP non traité et (b) PP traité par DBD [87]. 24

Figure I.8. Illustration de l'injection des ions négatif à la surface du FEP avec un pistolet à air ionisé [90]..... 25

Figure I.9. Variation de la densité de charge en fonction du temps de traitement [90]. 25

Figure I.10. Potentiel de surface de : (a) échantillon de PET non traité ; (b) échantillon de PET traité [93]. 26

Figure I.11. Morphologie de surface de : (a) échantillon de PET non traité ; (b) échantillon de PET traité [93]. 26

Figure I.12. Dispositif à vibration ; (1) tubes de charge ; (2) sortie des particules chargées ; (3) glissière ; (4) support ; (5) bielle ; (6) manivelle ; (7) moteur électrique ; (R) rayon ; (L_{tube}) longueur du tube [95]. 27

Figure I.13. Dispositif de chargement a cylindre rotatif [88]. 28

Figure I.14. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [101]. . 28

Figure I.15. Représentation schématique d'un dispositif de chargement à lit fluidisé[95]..... 29

Figure I.16. Représentation schématique d'un dispositif de chargement à ventilateur ; (a) flux ascendant ; (b) flux descendant [101]. 30

Figure I.17. Représentation schématique du dispositif tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses [101]. 31

Figure I.18. Représentation schématique du dispositif tribo-aéro-électrostatique à cylindres tournants [101]. 31

Figure I.19. Photographie du dispositif tribo-aéro-électrostatique à disques tournants [88]. . 32

Figure I.20. Photographie du dispositif de triboélectricité à électrodes verticales [88]..... 33

Figure I.21. Illustration de série triboélectrique [125] 36

Figure II.1. Taille et forme des matériaux granulaire étudiées : (a) PP orange ;(b) PP gris ; (c) HIPS noir ; (d) HIPS gris ; (e) PE ; (f) PS cristallin ; (g) PVC ; (h) PS noir ; (i) PC cristallin ; (j) ABS. 41

Figure II.2. Photographies des morceaux de polymère issus des DEEE : (a) PC-ABS ; (b) HIPS ; (c) PVC. 43

Figure II.3. Taille et forme des particules de : (a) HIPS bromé ; (b) HIPS non-bromé ; (c) PE bromé ; (d) PE non-bromé ; (e) PP bromé ; (f) PP non-bromé. 43

Figure II.4. Représentation schématique du granulateur [134]..... 44

Figure II.5. Cellule de DBD statique : (a) représentation schématique ;(b) photographie de la cellule : (1) électrode active ; (2) électrode de masse ; (3) barrières diélectriques ; (4) support en PVC. 45

Figure II.6. Cellule de DBD dynamique : (a) représentation schématique ; (b) photographie de la cellule : (1) goulotte oscillante ; (2) électrode active ; (3) électrode de masse ; (4) barrière diélectrique ; (5) moteur d'entrainement de l'électrode de masse ; (6) bac de récupération. .. 46

Figure II.7. Système d'alimentation électrique de la cellule de DBD : (1) générateur de fonction ;(2) amplificateur haute tension (3) cellule de DBD. 47

Figure II.8. Dispositif de charge par vibrations. 48

Figure II.9. Description schématique du chargeur à lit fluidisé. 49

Figure II.10. Dispositif de charge à cylindre tournant : (1) entonnoir pour alimenter le produit ; (2) cylindre extérieur ; (3) système de réglage de l'inclinaison du cylindre ; (4) moteur

d'entrainement du cylindre extérieur ; (5) trémie de récupération du produit chargé ; (6) moteur d'entrainement du cylindre intérieur ; (7) armoire électrique. 50

Figure II.11 Représentation schématique de l'installation de séparation triboélectrostatique : (a) dispositif de chargement : 1. cylindre creux métallique ; 2. arbre tournant ; 3. pales en PU ; (b) séparateur triboélectrostatique à électrode cylindrique tournante : 1. goulotte oscillante ; 2. électrode cylindrique tournante reliée à la terre ; 3. électrode statique reliée à une source de haute tension ; 4. balai ; 5. collecteurs à trois compartiments. 52

Figure II.12. Photographie de l'installation de séparation : (1) trémie d'alimentation du chargeur ; (2) système d'ouverture/fermeture de la trappe du chargeur ; (3) goulotte oscillante ; (4) électrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (5) électrode statique reliée à une source de haute tension ; (6) système de réglage de l'inclinaison du volet déflecteur ; (7) collecteurs à trois compartiments. 52

Figure II.13. Système de mesure de charge. 53

Figure II.14. Représentation schématique d'un processus. 53

Figure II.15. Représentation des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences complet. 54

Figure II.16. Représentation graphique des points expérimentaux du plan composite. 55

Figure III.1. Courbes de prédiction pour les trois variables, avec $\beta = -10^{\circ}$, n = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s. (Les courbes rouge et bleu correspondent à l'intervalle de niveau de confiance de 95 %). 64

Figure III.2. Iso-contours de : (a) récupération du PP et (b) pureté du HIPS, en fonction du temps de chargement et la tension et appliquée à l'électrode ($\beta = -10^{\circ}$, n = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s). 64

Figure III.3. Tailles et formes des particules de PP et de HIPS : (a) avant et (b) après réduction de tailles (Diamètre des mailles de la grille = 2 mm). 67

Figure III. 4. Taux de pureté et de récupération du PP et du HIPS au point de fonctionnement optimal de l'installation de séparation triboélectrostatique : (a) avant et (b) après réduction de tailles. (Diamètre des mailles de la grille = 2 mm, n_1 = 55 tr/min, t = 5 min, $\alpha = 35°$, U = 25 kV, $\beta = -10°$, n_2 = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s). 68

Figure III.5. Taux de pureté et de récupération des particules de tailles réduites alimentées en continu (Diamètre des mailles de la grille = 2 mm, n_1 = 55 tr/min, α = 35°, U = 25 kV, β = - 10°, n_2 = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s). 69

Figure III.6. Taux de pureté et de récupération des particules de tailles réduites chargées dans le broyeur (Diamètre des mailles de la grille = 2 mm, α = 35°, U = 25 kV, β = - 10°, n_2 = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s,). 70

Figure III.7 Evolution des taux de (a) pureté et (b) récupération des particules de PP et HIPS en fonction de la composition du mélange (Diamètre des mailles de la grille = 2 mm, α = 35°, U = 25 kV, β = - 10°, n_2 = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s,). 71

Figure III.8. Tailles et formes du mélange PC-ABS / PVC obtenu après broyage (Diamètre des mailles de la grille = 5 mm). 73

Figure III.9. Comparaison des taux de pureté et de récupération des particules de PVC et de PC-ABS tribochargées dans le broyeur ou dans le chargeur à pales tournantes (Diamètre des mailles de la grille = 5 mm, α = 35°, U = 25 kV, β = - 10°, n_2 = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s). 74

Figure III.10. Flux de traitement des déchets de polymère. 75

Figure III.11. Photographies des mélanges PC-ABS / HIPS obtenus après broyage avec une grille de : (1) 2 mm de diamètre de maille ; (2) 3 mm de diamètre de maille ; (3) 5 mm de diamètre de maille ; (4) 7 mm de diamètre de maille. 75

Figure III.12. Taux de pureté et de récupération des particules de : (a) HIPS et (b) PC-ABS en fonction du diamètre des mailles de la grille du broyeur (α = 35°, U = 25 kV, β = - 10°, n_2 = 40 tr/min, Q = 2,5 g/s,). 77

Figure III.13. Distribution des tailles des particules collectées dans les bacs B1, B2, B3 et sur la surface de l'électrode HT pour une grille de : (a) 2 mm de diamètre de maille ; (b) 3 mm de diamètre de maille ; (c) 5 mm de diamètre de maille ; (d) 7 mm de diamètre de maille. 78

Figure IV.1. Variation de la charge des particules de PE en fonction de la tension pour f = 800 Hz, d = 11 mm, e = 4 mm, t = 3 s. 83

Figure IV.2. Influence de la fréquence du signal sur la charge des particules de PE pour U = 24 kV, d = 11 mm, e = 4 mm et t = 3 s. 84

Figure IV.3. Schéma de la cellule DBD. 84

Figure IV.4. Variation de la charge des particules de PE en fonction de la distance inter-électrodes (U = 24 kV, f = 800 Hz, e = 4 mm, t = 3 s). 85

Figure IV.5. Variation de la charge des particules de PE en fonction de l'épaisseur de la barrière diélectrique (U = 27 kV, f = 800 Hz, d = 13 mm, t = 3 s). 86

Figure IV.6. Variation de la charge des particules de PE pour différentes configurations de la barrière diélectrique (U = 27 kV, f = 800 Hz, d = 13 mm, e = 3 mm, t = 3 s). 87

Figure IV.7. Photographies de la DBD pour les trois arrangements de barrières : (a) Les deux électrodes couvertes par un diélectrique ; (b) L'électrode supérieure est couverte par le diélectrique et (c) L'électrode inférieure est couverte par le diélectrique. 87

Figure IV.8. Evolution de la charge massique des particules de PE avec la tension appliquée pour f = 800 Hz, d = 11 mm, e = 4 mm, v = 4,7 cm/s, t = 3,4 s. 89

Figure IV.9. Charge massique pour différentes valeurs de fréquence (U = 21 kV, d = 11 mm, e = 4 mm, v = 4,7 cm/s, t = 3,4 s)..... 90

Figure IV.10. Variation de la charge massique en fonction de la distance inter-électrodes (U = 21 kV, f = 400 Hz, e = 4 mm, v = 4,7 cm/s, t = 3,4 s). 91

Figure IV. 11. Variation de la charge massique en fonction de l'épaisseur de la barrière diélectrique (U = 21 kV, f = 400 Hz, gap d'air = 7 mm, v = 4,7 cm/s, t = 3,4 s)..... 92

Figure IV.12. Oscillogramme tension-courant pour : (a) Une barrière diélectrique de 3 mm ; (b) Une barrière diélectrique de 4 mm ; (c) Une barrière diélectrique de 5 mm..... 93

Figure IV.13. Evolution de la charge massique des particules de PE avec la vitesse du convoyeur (U = 21 kV, f = 400 Hz, e = 5 mm, d = 11 mm). 94

Figure IV.14 Charge massique et taux d'amélioration de la charge en fonction de l'humidité relative (U = 21 kV, f = 400 Hz, e = 5 mm, d = 11 mm, v = 3 cm/s, t = 5,7 s)..... 95

Figure IV.15. Charge massique acquise par les différents types de particules : (a) Avant traitement par DBD ; (b) Après traitement par DBD (U = 21 kV, f = 400 Hz, e = 5 mm, d = 11 mm, v = 3 cm/s, t = 5,7 s)..... 96

Figure IV.16. Séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante de la société Prodecologia : (1) goulotte oscillante ; (2) Electrode cylindrique tournante reliée à la terre ; (3) Electrode reliée à une source de haute tension ; (4) Collecteur a 3 compartiments ; (5) Système de réglage de l'inclinaison du volet déflecteur..... 97

Figure IV.17. Comparaison des taux de récupération et de pureté des particules de : (a) PE et (b) PS, avant et après traitement par DBD. 98

Figure V.1. Distribution des particules dans les deux compartiments du collecteur pour les mélanges tribochargés dans : (a) boîte en acier ; (b) boîte en PS ; (c) boîte en PP. (U = 36 kV, α = 30°, n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)..... 106

Figure V.2. Répartition des particules dans les deux compartiments du collecteur pour le mélange HIPS bromé et non-bromé tribochargés dans le dispositif de charge à cylindre rotatif. (U = 36 kV, α = 30°, n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s). 107

Figure V.3. Comparaison des taux de pureté et de récupération des particules de HIPS bromé et non-bromé tribochargées pendant 3 minutes et 5 minutes dans le dispositif à lit fluidisé pour : (a) Parois en PMMA ; (b) Parois en PS ; (c) Parois en PE et (d) Parois en PP. (U = 36 kV, α = 30°, n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)..... 109

Figure V.4. Résultats de séparation du mélange HIPS bromé et HIPS non-bromé. (Parois en PP, t = 5 min, U = 36 kV, α = 30°, n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s). 110

Figure V.5. Pureté et récupération de : (a) PE non-bromé et (b) PE bromé. (t = 5 min, U = 36 kV, α = 30°, n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)..... 112

Figure V.6. Résultats de séparation du mélange PE bromé et PE non-bromé. (Parois en PS, t = 5 min, U = 36 kV, α = 30°, n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s). 112

Figure V.7. Pureté et récupération de : (a) PP non-bromé et (b) PP bromé. (t = 5 min, U = 36 kV, α = 30° n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)..... 114

Figure V.8. Résultats de séparation du mélange PP bromé et PP non-bromé. (Parois en PS, t = 5 min, U = 36 kV, α = 30 n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)..... 114

Figure V.9. Distribution des particules dans les deux compartiments du collecteur pour les mélanges : (a) HIPS bromé et non-bromé ; (b) PE bromé et non-bromé ; (c) PP bromé et non-bromé. (t = 5 min, U = - 36 kV, α = 30° n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s). 115

Figure V.10. Résultats de séparation du mélange HIPS bromé et non-bromé : (a) Après une première séparation ; (b) Après traitement du compartiments B2. (t = 5 min, U = 36 kV, α = 30° n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)..... 117

Figure V.11. Résultats de séparation du mélange PE bromé et non-bromé : (a) Après une première séparation ; (b) Après traitement du produit récupéré dans le compartiment B2. (t = 5 min, U = 36 kV, α = 30° n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)..... 117

Figure V.12. Résultats de séparation du mélange PP bromé et non-bromé : (a) Après une première séparation ; (b) Après traitement du produit récupéré dans le compartiment B2. (t = 5 min, U = 36 kV, α = 30° n = 35 tr/min, β = - 11°, Q = 2,5 g/s)..... 117

BIBLIOGRAPHIE

[1] A. Deprouw, M. Jover, S. Chouvenc, E. Fangeat. « Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques. Données 2016 », Deloitte développement durable, 2017. Disponible sur www.ademe.fr/mediatheque.

[2] *** « The new plastics economy-rethinking the future of plastics », World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation and McKinsey Company, January 2016. http://www.ellenmacarthurfoundation.org/ publications.

[3] A. Deprouw, M. Jover, S. Chouvenc, E. Fangeat, M. Borie. « Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques. Données 2018 », Deloitte Développement Durable, 2019. Disponible sur www.ademe.fr/mediatheque.

[4] E. Williams, R. Kahhat, B. Allenby, E. Kavazanjian, J. Kim, M. Xu, « Environmental, social, and economic implications of global reuse and recycling of personal computers », *Environmental Science & Technology*, vol. 42, n° 17, p. 6446-6454, 2008.

[5] *** « Enquête sur l'état de l'art et les perspectives des techniques de tri automatique des déchets », ERDYN, ADEME,2003. Disponible sur www.ademe.fr/mediatheque

[6] D. Lazarevic, E. Aoustin, N. Buclet,, N. Brandt, « Plastic waste management in the context of a European recycling society: comparing results and uncertainties in a life cycle perspective », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, n° 2, p. 246-259, 2010.

[7] T. Huth-Fehre *et al.*, « NIR-Remote sensing and artificial neural networks for rapid identification of post-consumer plastics », *Journal of Molecular Structure*, vol. 348, p. 143-146, 1995.

[8] D. M. Scott, « A two-colour near-infrared sensor for sorting recycled plastic waste », *Measurement Science and Technology*, vol. 6, n° 2, p. 156, 1995.

[9] M. R. Gent, M. Menendez, J. Toraño, D. Isidro, S. Torno, « Cylinder cyclone (LARCODEMS) density media separation of plastic wastes », *Waste Management*, vol. 29, n° 6, p. 1819-1827, 2009.

[10] G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki, T. Fujita, « Separation performance of PVC and PP plastic mixture using air table », *Physical Separation in Science and Engineering*, vol. 12, n° 2, p. 71-86, 2003.

[11] F. Burat, A. Güney, M. O. Kangal, « Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method », *Waste Management*, vol. 29, n° 6, p. 1807-1813, 2009.

[12] H. Shent, R. J. Pugh, E. Forssberg, « A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 25, n° 2, p. 85-109, 1999.

[13] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, A. Bendaoud, L. Dascalescu, "Optimization of belt-type electrostatic separation of triboaerodynamically charged granular plastic mixtures," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 1781-1786, 2013

[14] C. H. Park, H. S. Jeon, H. S. Yu, O. H. Han, J. K. Park, « Application of electrostatic separation to the recycling of plastic wastes: separation of PVC, PET, and ABS », *Environmental Science & Technology*, vol. 42, n° 1, p. 249-255, 2008.

[15] S. Nicoara, L. Calin, A. Iuga, N. Serban, « Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose », *Environment and Progress*, vol. 6, p. 341-346, 2006.

[16] G. S. P. Castle, « Contact charging between insulators », *Journal of Electrostatics*, vol. 40/41, p. 13-20, 1997.

[17] W. R. Harper, Contact and frictional electrification, Oxford University Press, London, 1967.

[18] S. Matsusaka, H. Masuda, « Electrostatics of particles », *Advanced Powder Technology*, vol. 14, n° 2, p. 143-166, 2003.

[19] W. D. Greason, « Investigation of a test methodology for triboelectrification », *Journal of Electrostatics*, vol. 49, n° 3-4, p. 245-256, 2000.

[20] D. K. Davies, « Charge generation on dielectric surfaces », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 2, n° 11, p. 1533, 1969.

[21] W. D. Greason, I. I. Inculet, « Insulator work function determination from contact charging with metals », *Conference Record 1975 IEEE-IAS Annual Meeting*, p. 428-435, 1975.

[22] F. Galembeck, T. A. Burgo, L. B. Balestrin, R. F. Gouveia, C. A. Silva, A. Galembeck, « Friction, tribochemistry and triboelectricity: recent progress and perspectives », *Rsc Advances*, vol. 4, n° 109, p. 64280-64298, 2014.

[23] J. Lowell, A. C. Rose-Innes, « Contact electrification », *Advances in Physics*, vol. 29, n° 6, p. 947-1023, 1980.

[24] J. C. L. Hageman, G. A. De Wijs, R. A. De Groot, R. J. Meier, « Bond scission in a perfect polyethylene chain and the consequences for the ultimate strength », *Macromolecules*, vol. 33, n° 24, p. 9098-9108, 2000.

[25] D. Wang, A. A. Klaassen, G. E. Janssen, E. de Boer, R. J. Meier, « The detection of radicals in strained, high-modulus polyethylene fibers », *Polymer*, vol. 36, n° 22, p. 4193-4196, 1995.

[26] A. M. Saitta, P. D. Soper, E. Wasserman,t M. L. Klein, « Influence of a knot on the strength of a polymer strand », *Nature*, vol. 399, n° 6731, p. 46-48, 1999.

[27] A. M. Saitta, M. L. Klein, « First-principles study of bond rupture of entangled polymer chains », *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 104, n° 10, p. 2197-2200, 2000.

[28] A. Kron, T. Reitberger, B. Stenberg, « Luminescence from γ-and β-irradiated HDPE and LLDPE », *Polymer International*, vol. 42, n° 2, p. 131-137, 1997.

[29] A. Markiewicz, R. J. Fleming, « Simultaneous thermally stimulated luminescence and conductivity in low-density polyethylene », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 21, n° 2, p. 349, 1988.

[30] J. Lowell, « Surface states and the contact electrification of polymers », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 10, n° 1, p. 65, 1977.

[31] J. Lowell, « The electrification of polymers by metals », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 9, n° 11, p. 1571, 1976.

[32] A. R. Akande,t J. Lowell, « Charge transfer in metal/polymer contacts », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 20, n° 5, p. 565, 1987.

[33] M. J. Aitken, Chrometric dating in archaeology, Taylor and Aitken, Eds., Plenum Press, New York (1997)

[34] J. Lowell, « Constraints on contact charging of insulators. I. Spatial localisation of insulator states », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 19, n° 1, p. 95, 1986.

[35] J. A. Wiles, M. Fialkowski, M. R. Radowski, G. M. Whitesides, B. A. Grzybowski, « Effects of surface modification and moisture on the rates of charge transfer between metals and organic materials », *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 108, n° 52, p. 20296-20302, 2004.

[36] C. Liu, A. J. Bard, « Electrostatic electrochemistry at insulators », *Nature materials*, vol. 7, n° 6, p. 505-509, 2008.

[37] L. S. McCarty, G. M. Whitesides, « Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: contact electrification of ionic electrets », *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47, n° 12, p. 2188-2207, 2008.

[38] A. F. Diaz, « Contact electrification of materials: the chemistry of ions on polymer surfaces », *The Journal of Adhesion*, vol. 67, n° 1-4, p. 111-122, 1998.

[39] A. F. Diaz, J. Guay, « Contact charging of organic materials: Ion vs. electron transfer », *IBM Journal of Research and Development*, vol. 37, n° 2, p. 249-260, 1993.

[40] A. F. Diaz, D. Wollmann,, D. Dreblow, « Contact electrification: ion transfer to metals and polymers », *Chemistry of Materials*, vol. 3, n° 6, p. 997-999, 1991.

[41] A. Diaz, D. Fenzel-Alexander, D. Wollmann, J. A. Barker, « Importance of dissociated ions in contact charging », *Langmuir*, vol. 8, n° 11, p. 2698-2706, 1992.

[42] J. A. Wiles, B. A. Grzybowski, A. Winkleman, G. M. Whitesides, « A tool for studying contact electrification in systems comprising metals and insulating polymers », *Analytical Chemistry*, vol. 75, n° 18, p. 4859-4867, 2003.

[43] L. S. McCarty, A. Winkleman, G. M. Whitesides, « Ionic electrets: electrostatic charging of surfaces by transferring mobile ions upon contact », *Journal of the American Chemical Society*, vol. 129, n° 13, p. 4075-4088, 2007.

[44] B. A. Grzybowski, A. Winkleman, J. A. Wiles, Y. Brumer, G. M. Whitesides, « Electrostatic self-assembly of macroscopic crystals using contact electrification », *Nature Materials*, vol. 2, n° 4, p. 241-245, 2003.

[45] B. A. Grzybowski, J. A. Wiles, et G. M. Whitesides, « Dynamic self-assembly of rings of charged metallic spheres », *Physical Review Letters*, vol. 90, n° 8, p. 083903, 2003.

[46] J. Lowell, A. C. Rose-Innes, « Contact electrification », *Advances in Physics*, vol. 29, n° 6, p. 947-1023, 1980.

[47] K. Tanoue, A. Ema, H. Masuda. « Effect of material transfer and work hardening of metal surface on the current generated by impact of particles », *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. p. 32, 544-548, 1999.

[48] R. K. Pandey, H. Kakehashi, H. Nakanishi, S. Soh, « Correlating material transfer and charge transfer in contact electrification », *J. Phys. Chem. C*, vol. 122, n° 28, p. 16154-16160, 2018, DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b04357.

[49] H. T. Baytekin, A. Z. Patashinski, M. Branicki, B. Baytekin, S. Soh, B. A. Grzybowski, « The mosaic of surface charge in contact electrification », *Science*, vol. 333, n° 6040, p. 308-312, 2011.

[50] Y. Awakuni, J. H. Calderwood, « Water vapour adsorption and surface conductivity in solids », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 5, n° 5, p. 1038, 1972.

[51] S. Pence, V. J. Novotny, A. F. Diaz, « Effect of surface moisture on contact charge of polymers containing ions », *Langmuir*, vol. 10, n° 2, p. 592-596, 1994.

[52] L. Xie, N. Bao, Y. Jiang, J. Zhou, « Effect of humidity on contact electrification due to collision between spherical particles », *AIP Advances*, vol. 6, n° 3, p. 035117, 2016.

[53] M. Lungu, « Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect », *Minerals Engineering*, vol. 17, n° 1, p. 69-75, 2004.

[54] T. Matsuyama, H. Yamamoto, « Charge Transfer between a Single Polymer Particle and Metal Plate by Impact [Translated] », *KONA Powder and Particle Journal*, vol. 7, p. 15-21, 1989.

[55] T. Matsuyama, H. Yamamoto, « Charge transfer between a polymer particle and a metal plate due to impact », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, n° 3, p. 602-607, 1994.

[56] T. Matsuyama, H. Yamamoto, « Charge relaxation process dominates contact charging of a particle in atmospheric conditions », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 28, n° 12, p. 2418, 1995.

[57] T. Matsuyama, H. Yamamoto, « Characterizing the electrostatic charging of polymer particles by impact charging experiments », *Advanced Powder Technology*, vol. 6, n° 3, p. 211-220, 1995.

[58] T. Matsuyama, M. Ogu, H. Yamamoto, J. C. Marijnissen, B. Scarlett, « Impact charging experiments with single particles of hundred micrometre size », *Powder Technology*, vol. 135, p. 14-22, 2003.

[59] T. Matsusyama, H. Yamamoto, « Impact charging of particulate materials », *Chemical Engineering Science*, vol. 61, n° 7, p. 2230-2238, 2006.

[60] T. Matsuyama, H. Yamamoto, « Electrification of single polymer particles by successive impacts with metal targets », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, n° 6, p. 1441-1445, 1995.

[61] S. Matsusaka, M. Ghadiri, H. Masuda, « Electrification of an elastic sphere by repeated impacts on a metal plate », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 33, n° 18, p. 2311, 2000.

[62] S. Matsusaka, M. Oki, H. Masuda, « Control of electrostatic charge on particles by impact charging », *Advanced Powder Technology*, vol. 18, n° 2, p. 229-244, 2007.

[63] P. M. Ireland, « Dynamic particle-surface tribocharging: The role of shape and contact mode », *Journal of Electrostatics*, vol. 70, n° 6, p. 524-531, 2012.

[64] P. M. Ireland, « Triboelectrification of particulate flows on surfaces: Part I—Experiments », *Powder Technology*, vol. 198, n° 2, p. 189-198, 2010.

[65] P. M. Ireland, « Triboelectrification of particulate flows on surfaces: Part II—Mechanisms and models », *Powder Technology*, vol. 198, n° 2, p. 199-210, 2010.

[66] G. Vermeulen, « Étude numérique et expérimentale des transferts de charges dans des flux granulaires », mémoire de Master Université de Liège, 2020.

[67] S. Matsusaka, H. Maruyama, T. Matsuyama, M. Ghadiri, « Triboelectric charging of powders: A review », *Chemical Engineering Science*, vol. 65, n° 22, p. 5781-5807, 2010.

[68] L. B. Schein, Electrophotography and Development Physics, vol. 14. Springer Science & Business Media, 2013.

[69] L. B. Schein, « Recent advances in our understanding of toner charging », in *NIP & Digital Fabrication Conference*, 1998, vol. 1998, n° 2, p. 328-331.

[70] N. Noda, H. Makino, « Influence of operating temperature on performance of electrostatic precipitator for pulverized coal combustion boiler », *Advanced Powder Technology*, vol. 21, n° 4, p. 495-499, 2010.

[71] H. J. Kim, B. Han, Y. J. Kim, T. Oda,, H. Won, « Submicrometer particle removal indoors by a novel electrostatic precipitator with high clean air delivery rate, low ozone emissions, and carbon fiber ionizer », *Indoor Air*, vol. 23, n° 5, p. 369-378, 2013.

[72] G. Zhu *et al.*, « Toward large-scale energy harvesting by a nanoparticle-enhanced triboelectric nanogenerator », *Nano Letters*, vol. 13, n° 2, p. 847-853, 2013.

[73] S. Wang *et al.*, « Maximum surface charge density for triboelectric nanogenerators achieved by ionized-air injection: methodology and theoretical understanding », *Advanced Materials*, vol. 26, n° 39, p. 6720-6728, 2014.

[74] Y. Matsushita, N. Mori, T. Sometani, « Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades », *Electrical Engineering in Japan*, vol. 127, n° 3, p. 33-40, 1999.

[75] C. H. Park, H. S. Jeon, H. S. Yu, O. H. Han, J. K. Park, « Application of electrostatic separation to the recycling of plastic wastes: separation of PVC, PET, and ABS », *Environmental Sscience & Technology*, vol. 42, n° 1, p. 249-255, 2008.

[76] C. S. Ren, K. Wang, Q. Y. Nie, D. Z. Wang,, S. H. Guo, « Surface modification of PE film by DBD plasma in air », *Applied Surface Science*, vol. 255, n° 5, p. 3421-3425, 2008.

[77] H. Zhang *et al.*, « Roll-to-roll DBD plasma pretreated polyethylene web for enhancement of Al coating adhesion and barrier property », *Applied Surface Science*, vol. 388, p. 539-545, 2016.

[78] K. d Kostov *et al.*, « Treatment of PET and PU polymers by atmospheric pressure plasma generated in dielectric barrier discharge in air », *Surface and Coatings Technology*, vol. 204, n° 18-19, p. 3064-3068, 2010.

[79] Z. Niu, C. Zhang, T. Shao, Z. Fang, Y. Yu, P. Yan, « Repetitive nanosecond-pulse dielectric barrier discharge and its application on surface modification of polymers », *Surface and Coatings Technology*, vol. 228, p. S578-S582, 2013.

[80] K. Takashima, T. Oda, « Antistatic process of dielectric thin films using low pressure discharge plasma », *Journal of Electrostatics*, vol. 46, n° 2-3, p. 193-206, 1999.

[81] H. Takeda, Y. Murata, « Change in charging characteristics of high polymers due to plasma treatment », *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 35, n° 9R, p. 4791, 1996.

[82] J. Kodama, R. Foerch, N. S. McIntyre, G. S. P. Castle, « Effect of plasma treatment on the triboelectric properties of polymer powders », *Journal of Applied Physics*, vol. 74, n° 6, p. 4026-4033, 1993.

[83] R. Sharma. S. Trigwell, M. Mazumder, R. Sims, « Modification of electrostatic properties of polymer powders by atmospheric pressure plasma treatment », *Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion*, vol. 3, p. 25, 2004.

[84] R. Sharma, S. Trigwell, M. K. Mazumder, R. A. Sims, « Modification of electrostatic properties of polymer powders by atmospheric pressure plasma treatment », in *Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion*, vol. 3, VSP Utrecht, The Netherlands, p. 25-37, 2001.

[85] M. Chongqi, Z. Shulin, H. Gu, « Anti-static charge character of the plasma treated polyester filter fabric », *Journal of Electrostatics*, vol. 68, n° 2, p. 111-115, 2010.

[86] Y. Murata, Y. Hara, « Enhancement of frictional charging characteristics of polymer powder by plasma treatment », *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No. 00CH37129)*, 2000, vol. 2, p. 847-850.

[87] M. F. Bekkara, L. Dascalescu, Y. Benmimoun, T. Zeghloul, A. Tilmatine, N. Zouzou, « Modification of surface characteristic and tribo-electric properties of polymers by DBD plasma in atmospheric air », *The European Physical Journal Applied Physics*, vol. 81, n° 1, p. 10801, 2018.

[88] A. Nadjem, « Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques », Thèse de Doctorat, Université de Guelma 2018.

[89] H. Fang, W. Wu, J. Song, Z. L. Wang, « Controlled growth of aligned polymer nanowires », *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 113, n° 38, p. 16571-16574, 2009.

[90] Y. Yu, X. Wang, « Chemical modification of polymer surfaces for advanced triboelectric nanogenerator development », *Extreme Mechanics Letters*, vol. 9, p. 514-530, 2016.

[91] S. Wang *et al.*, « Maximum surface charge density for triboelectric nanogenerators achieved by ionized-air injection: methodology and theoretical understanding », *Advanced Materials*, vol. 26, n° 39, p. 6720-6728, 2014.

[92] S. H. Shin, Y. H. Kwon, Y.-H. Kim, J.-Y. Jung, M. H. Lee, J. Nah, « Triboelectric charging sequence induced by surface functionalization as a method to fabricate high performance triboelectric generators », *ACS Nano*, vol. 9, n° 4, p. 4621-4627, 2015.

[93] H. Y. Li, L. Su, S. Y. Kuang, C. F. Pan, G. Zhu, Z. L. Wang, « Significant enhancement of triboelectric charge density by fluorinated surface modification in nanoscale for converting mechanical energy », *Advanced Functional Materials*, vol. 25, n° 35, p. 5691-5697, 2015.

[94] M. Blajan, R. Beleca, A. Iuga, L. Dascalescu, « Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, n° 4, p. 1558-1563, 2010.

[95] S. Messal, « Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire », Thèse de Doctorat, Université Poitiers, 2016.

[96] J. D. Brown, P. F. Wynen, T. E. Doyle, *Tribocharging and electrostatic separation of mixed electrically insulating particles*. US20060081507A1 Google Patents, 2005.

[97] I. I. Inculet, G. S. P. Castle, J. D. Brown, « Tribo-electrification system for electrostatic separation of plastics », in *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1994, vol. 2, p. 1397-1399.

[98] G. Wu, J. Li, Z. Xu, « Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review », *Waste Management*, vol. 33, n° 3, p. 585-597, 2013.

[99] M. E. M. Zelmat, A. Tilmatine, M. Rizouga, R. Gouri, K. Medles, L. Dascalescu, « Experimental analysis of a cyclone tribocharging device for free-fall triboelectric separation of plastic particles », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, n° 5, p. 1584-1589, 2013.

[100] G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki, T. Fujita, « Electrostatic separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone », *Physical Separation in Science and Engineering*, vol. 11, n° 1-2, p. 63-92, 2002.

[101] D. E. Fekir, « Chargement triboélectrique et séparation électrostatique pour deux types de mélange granulaire binaire isolants de taille fine et ceux de grosse taille. », Thèse de Doctorat, Université de Sidi-Bel-Abbes 2017.

[102] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, L. Dascalescu, « Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device », *Journal of Electrostatics*, vol. 63, n° 6-10, p. 937-942, 2005.

[103] L. Calin, A. Mihalcioiu, A. Iuga, L. Dascalescu, « Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification », *Particulate Science and Technology*, vol. 25, n° 2, p. 205-211, 2007.

[104] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, L. Dascalescu, « Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials », *Journal of Electrostatics*, vol. 69, n° 6, p. 631-637, 2011.

[105] D. E. Fekir, M. Miloudi, F. Miloua, K. Medles, L. Dascalescu, « New propeller-type tribocharging device with application to the electrostatic separation of granular insulating materials », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, n° 3, p. 2416-2422, 2017.

[106] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu, « Experimental study of the optimum operating conditions of a pilot-scale tribo-aero-electrostatic separator for mixed granular solids », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, n° 2, p. 699-706, 2013.

[107] A. M. Benhafssa, K. Medles, M. F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, L. Dascalescu, « Study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, n° 5, p. 4166-4172, 2015.

[108] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, A. Samuila, « Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, n° 5, p. 1476-1483, 2011.

[109] J. W. Kwek *et al.*, « High speed imaging with electrostatic charge monitoring to track powder deagglomeration upon impact », *Journal of Aerosol Science*, vol. 65, p. 77-87, 2013.

[110] S. Karner, E. M. Littringer, N. A. Urbanetz, « Triboelectrics: The influence of particle surface roughness and shape on charge acquisition during aerosolization and the DPI performance », *Powder Technology*, vol. 262, p. 22-29, 2014.

[111] S. Naik, R. Mukherjee, B. Chaudhuri, « Triboelectrification: A review of experimental and mechanistic modeling approaches with a special focus on pharmaceutical powders », *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 510, n° 1, p. 375-385, 2016.

[112] A. E. Wang *et al.*, « Dependence of triboelectric charging behavior on material microstructure », *Physical Review Materials*, vol. 1, n° 3, p. 035605, 2017.

[113] Y. G. Chung, D. J. Lacks, « Atomic mobility in strained glassy polymers: The role of fold catastrophes on the potential energy surface », *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. 50, n° 24, p. 1733-1739, 2012.

[114] S. Sarkar, J. Cho, B. Chaudhuri, « Mechanisms of electrostatic charge reduction of granular media with additives on different surfaces », *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 62, p. 168-175, 2012.

[115] R. Mukherjee *et al.*, « Effects of particle size on the triboelectrification phenomenon in pharmaceutical excipients: Experiments and multi-scale modeling », A*sian Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 11, n° 5, p. 603-617, 2016.

[116] D. J. Lacks, N. Duff, S. K. Kumar, « Nonequilibrium accumulation of surface species and triboelectric charging in single component particulate systems », *Physical Review Letters*, vol. 100, n° 18, p. 188305, 2008.

[117] K. M. Forward, D. J. Lacks, R. M. Sankaran, « Particle-size dependent bipolar charging of Martian regolith simulant », *Geophysical Research Letters*, vol. 36, n° 13, 2009.

[118] J. Yao, C. H. Wang, E. Wee Chuan Lim, J. Bridgwater, « Granular attrition in a rotary valve: Attrition product size and shape », *Chemical Engineering Science*, vol. 61, n° 11, p. 3435-3451, 2006, DOI: 10.1016/j.ces.2005.12.013.

[119] J. Yao *et al.*, « Experimental investigations of granular shape effects on the generation of electrostatic charge », *Particuology*, vol. 15, p. 82-89, 2014, DOI: 10.1016/j.partic.2013.01.010.

[120] J. Yao, F. Zhou, H. Yin, Y. Zhao, Q. Guo, N. Li, « Experimental investigation of electrostatic charge generation for granules », *Procedia Engineering*, vol. 102, p. 287-294, 2015, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.145.

[121] S. Naik *et al.*, « A combined experimental and numerical approach to explore tribocharging of pharmaceutical excipients in a hopper chute assembly », *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 491, n° 1-2, p. 58-68, 2015.

[122] G. Rowley, L. A. Mackin, « The effect of moisture sorption on electrostatic charging of selected pharmaceutical excipient powders », *Powder Technology*, vol. 135, p. 50-58, 2003.

[123] M. P. Grosvenor, J. N. Staniforth, « The influence of water on electrostatic charge retention and dissipation in pharmaceutical compacts for powder coating », *Pharmaceutical Research*, vol. 13, n° 11, p. 1725-1729, 1996.

[124] P. Cartwright, S. Singh, A. G. Bailey, L. J. Rose, « Electrostatic charging characteristics of polyethylene powder during pneumatic conveying », *IEEE Transactions on Industry Applications*, n° 2, p. 541-546, 1985.

[125] X. Zhang, L. Chen, Y. Jiang, W. Lim, S. Soh, « Rationalizing the Triboelectric Series of Polymers », *Chem. Mater.*, vol. 31, n° 5, p. 1473-1478, 2019, DOI: 10.1021/acs.chemmater.8b04526.

[126] S. Pan, Z. Zhang, « Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review », *Friction*, vol. 7, n° 1, p. 2-17, 2019, DOI: 10.1007/s40544-018-0217-7.

[127] H. Zou *et al.*, « Quantifying the triboelectric series », *Nature communications*, vol. 10, n° 1, p. 1-9, 2019.

[128] J.C. Laurentie, « Contribution à la modélisation numérique d'écoulements électro-fluido-dynamiques diphasiques tridimensionnels », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2011.

[129] F. Z. Rahou, « Modélisation du fonctionnement d'un séparateur tribo-aero-électrostatique pour matériaux plastiques granulaires », Thèse de Doctorat, Université de Sidi-Bel-Abbes2015.

[130] E. S. Oran, C. K. Oh, B. Z. Cybyk, « Direct simulation Monte Carlo: recent advances and applications », *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 30, n° 1, p. 403-441, 1998.

[131] S. McNamara, W. R. Young, « Inelastic collapse and clumping in a one-dimensional granular medium », *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, vol. 4, n° 3, p. 496-504, 1992.

[132] J.C. Laurentie, P. Traoré, C. Dragan, L. Dascalescu,. « Elaboration d'un modèle de charge électrostatique de matériaux granulaires dans des lits vibrants ». *In: Proceedings of the 7th Conference of French Society of Electrostatics*. Montpellier, France, August 30-31, September 1, 2010.

[133] J. C. Laurentie, P. Traoré, L. Dascalescu, « Discrete element modeling of triboelectric charging of insulating materials in vibrated granular beds », *Journal of Electrostatics*, vol. 71, n° 6, p. 951-957, 2013, DOI: 10.1016/j.elstat.2013.08.001.

[134] G. Richard, « Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2018.

[135] I. E. Achouri, T. Zeghloul, G. Richard, K. Medles, K. Senouci, L. Dascalescu, « Endurance test of a rotating-cylinder-type tribocharger », *Conf. Rec. IEEE/IAS Ann. Meet.*, Baltimore, MD, Sept. 29 – Oct. 3, 2019, DOI: 10.1109/IAS.2019.8912352.

[136] **A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, G. Richard, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu, « Factors influencing triboelectrification of granular polymers in a coaxial coun-ter-rotating cylinders tribocharger », *2018 Electrostatics Joint Conference*, June 18-20, 2018, Boston, Massachusetts, USA p. 7, 2018.**

[137] L. Eriksson, Design of experiments: principles and applications. MKS Umetrics AB, 2008.

[138] T. Zeghloul, A. M. Benhafssa, G. Richard, K. Medles, L. Dascalescu, « Effect of particle size on the tribo-aero-electrostatic separation of plastics », *Journal of Electrostatics*, vol. 88, p. 24-28, 2017.

[139] J. Kolehmainen *et al.*, « Effect of humidity on triboelectric charging in a vertically vibrated granular bed: experiments and modeling », *Chemical Engineering Science*, vol. 173, p. 363-373, 2017.

[140] **A. Benabderrahmane, G. Richard, A. Tilmatine, A. M. Delisor, T. Zeghloul, L. Dascalescu, « Modeling and Optimization of a Roll-type Tribo-electrostatic Separator for Granular Plastic Mixtures », *2017 Annual Meeting of the Electrostatics Society of America*, p. 9, June 13-15, 2017, Ottawa, Ontario, Canada.**

[141] **A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu, « Experimental investigation of a roll-type tribo-electrostatic separator for granular waste plastics », *Conf. Rec. IEEE/IAS Ann. Meet., Cincinnati, OH, Oct. 1-5, 2017, DOI: 10.1109/IAS.2017.8101696.***

[142] **A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, W. Aksa, A. Tilmatine, K. Medles, L. Dascalescu, « Shredding as simultaneous size-reduction and tribo-charging operation for improved performances of an electrostatic separation process for granular plastic wastes », *Particulate Science and Technology*, p. 1-8, 2019.**

[143] **A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu, "Effect of grinding and particle size on charge generation and electrostatic separation efficiency of granular plastic mixtures," *11th conference of French Society of Electrostatics*, August 29-31, 2018, Grenoble, France.**

[144] U. Kogelschatz, « Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications », *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 23, n° 1, p. 1-46, 2003.

[145] K. G. Kostov, T. M. C. Nishime, L. R. O. Hein, A. Toth, « Study of polypropylene surface modification by air dielectric barrier discharge operated at two different frequencies », *Surface and Coatings Technology*, vol. 234, p. 60-66, 2013

[146] B. Held, Physique des plasmas froids, physique fondamentale et appliquée, Edition Masson, 1994

[147] H. Li, H. Liang, F. He, Y. Huang, Y. Wan, « Air dielectric barrier discharges plasma surface treatment of three-dimensional braided carbon fiber reinforced epoxy composites », *Surface and Coatings Technology*, vol. 203, n° 10-11, p. 1317-1321, 2009.

[148] C. S. Ren, K. Wang, Q. Y. Nie, D. Z. Wang, S. H. Guo, « Surface modification of PE film by DBD plasma in air », *Applied surface science*, vol. 255, n° 5, p. 3421-3425, 2008.

[149] S. Yoo, D. C. Seok, K. Lee, Y. H. Jung, « Enhancement of polymer powder wettability by using surface dielectric barrier discharge », *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, n° 2, p. 1302-1308, 2019.

[150] A. Nadjem, M. Kachi, F. Bekkara, K. Medles, T. Zeghloul, L. Dascalescu, « Triboelectrification of granular insulating materials as affected by dielectric barrier discharge (DBD) treatment », *Journal of Electrostatics*, vol. 86, p. 18-23, 2017.

[151] A. Nadjem, M. Kachi, L. Dascalescu, K. Medles, T. Zeghloul, « Influence of the geometrical parameters of a dielectric barrier discharge reactor on the subsequent tribocharging of granular polymers », *Journal of Electrostatics*, vol. 95, p. 24-31, 2018.

[152] **G. Richard, A. Tilmatine, A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, K. Medles, L. Dascalescu, « Factors that affect tribocharging of Polyethylene (PE) granules after exposure to a dielectric barrier discharge (DBD) », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, n° 1, p. 812-816, 2018.**

[153] G. Richard, A. Nadjem, K. Medles, M. Kachi, T. Zeghloul, L. Dascalescu, « Tribocharging of PP granules after exposure to a dielectric barrier discharge (DBD). Effect of exposure duration voltage amplitude and frequency », in *Proc. Electrost. Soc. Am. Annu. Meet. ESA*, p. 8-11, 2017.

[154] **G. Richard, A. Benabderrahmane, K. Medles, A. Tilmatine, T. Zeghloul, L. Dascalescu, « Factors that affect tribocharging of PE granules after exposure to a dielectric barrier discharge (DBD) », *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting,* , October 1-5, 2017, *Cincinnati,* OH (U.S.A.).**

[155] M. B. Neagoe, Y. E. Prawatya, T. Zeghloul, L. Dascalescu, « Influence of surface roughness on the tribo-electric process for a sliding contact between polymeric plate materials », *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 174, n° 1, p. 012003.

[156] **A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu, « Surface treatment of granular materials by dielectric barrier discharge in view of triboelectric charging improvement », *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1322, n° 1, p. 012005.**

[157] **A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu, « Effect of dielectric barrier discharge exposure on the triboelectric charging of granular plastics », *Conf. Rec. IEEE/IAS Ann. Meet.*, Baltimore, MD, Sept. 29 – Oct. 3, 2019, DOI: 10.1109/IAS.2019.8912375.**

[158] **A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu, « Triboelectric Charging of Granular Polymers Previously Exposed to Dielectric Barrier Discharges in Atmospheric Air », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, n° 3, p. 3061-3067, 2020.**

[159] E. Németh, V. Albrecht, G. Schubert, F. Simon, « Polymer tribo-electric charging: dependence on thermodynamic surface properties and relative humidity », *Journal of Electrostatics*, vol. 58, n° 1-2, p. 3-16, 2003.

[160] H. R. Carlon, « Equilibrium ion content of water vapor in air », *Journal of Applied Physics*, vol. 52, n° 4, p. 2638-2641, 1981.

[161] R. Anderson, S. Roy, « Preliminary experiments of barrier discharge plasma actuators using dry and humid air », in *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, p. 369, 2006.

[162] N. Benard, N. Balcon, E. Moreau, « lectricWind Produced by a Surface Dielectric Barrier Discharge Operating over a Wide Range of Relative Humidity », *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA* Paper 2009-0488, Jan. 2009

[163] M. Wicks, F. O. Thomas, « Effect of relative humidity on dielectric barrier discharge plasma actuator body force », *AIAA Journal*, vol. 53, n° 9, p. 2801-2805, 2015.

[164] A. V. Nastuta, G. Popa, « Surface oxidation and enhanced hydrophilization of polyamide fiber surface after He/Ar atmospheric pressure plasma exposure », *Romanian Rep. Phys.*, vol. 71, n° 4, p. 1-16, 2019.

[165] C. Liu, N. Cui, N. M. Brown, B. J. Meenan, « Effects of DBD plasma operating parameters on the polymer surface modification », *Surface and Coatings Technology*, vol. 185, n° 2-3, p. 311-320, 2004.

[166] F. Cucchiella, I. D'Adamo, S. L. Koh, P. Rosa, « Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, p. 263-272, 2015.

[167] R. G. Charles, P. Douglas, I. L. Hallin, I. Matthews, G. Liversage, « An investigation of trends in precious metal and copper content of RAM modules in WEEE: Implications for long term recycling potential », *Waste management*, vol. 60, p. 505-520, 2017.

[168] J. L. Lyche, C. Rosseland, G. Berge, A. Polder, « Human health risk associated with brominated flame-retardants (BFRs) », *Environment International*, vol. 74, p. 170-180, 2015.

[169] H. S. Hendriks, R. H. Westerink, « Neurotoxicity and risk assessment of brominated and alternative flame retardants », *Neurotoxicology and Teratology*, vol. 52, p. 248-269, 2015.

[170] P. Arias, « Brominated flame retardants-an overview », *The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants. Stockholm: AB Firmatryck*, p. 17-19, 2001.

[171] M. Alaee, P. Arias, A. Sjödin, Å. Bergman, « An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release », *Environment International*, vol. 29, n° 6, p. 683-689, 2003.

[172] P. Hennebert, « Concentrations of brominated flame retardants in plastics of electrical and electronic equipment, vehicles, textiles and construction: a short review of occurrence and management », *Proceedings CRETE 2018, Sixth International Conference on Industrial & Hazardous Waste Management* Chania – Crete – Greece; 4 -7 September 2018.

[173] E. Malliari, O.-I. Kalantzi, « Children's exposure to brominated flame retardants in indoor environments-a review », *Environment international*, vol. 108, p. 146-169, 2017.

[174] J. Sun, Q. Chen, Y. Han, H. Zhou, A. Zhang, « Emissions of selected brominated flame retardants from consumer materials: the effects of content, temperature, and timescale », *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, n° 24, p. 24201-24209, 2018.

[175] Y.-J. Kim, M. Osako, S. Sakai, « Leaching characteristics of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) from flame-retardant plastics », *Chemosphere*, vol. 65, n° 3, p. 506-513, 2006.

[176] N. Kajiwara, O. Hirata, H. Takigami, Y. Noma, A. Tachifuji, Y. Matsufuji, « Leaching of brominated flame retardants from mixed wastes in lysimeters under conditions simulating landfills in developing countries », *Chemosphere*, vol. 116, p. 46-53, 2014.

[177] L. V. Nguyen *et al.*, « Exposure of Canadian electronic waste dismantlers to flame retardants », *Environment International*, vol. 129, p. 95-104, 2019.

[178] K. Pivnenko, K. Granby, E. Eriksson, T. F. Astrup, « Recycling of plastic waste: screening for brominated flame retardants (BFRs) », *Waste Management*, vol. 69, p. 101-109, 2017.

[179] Z. Katima, J. O. Okonkwo, A. P. Daso, « A review of brominated flame retardants in the environment with emphasis on atmospheric levels, knowledge and information gaps in the African continent », *Atmospheric Pollution Research*, vol. 8, n° 4, p. 767-780, 2017.

[180] G. Yu *et al.*, « Brominated flame retardants (BFRs): a review on environmental contamination in China », *Chemosphere*, vol. 150, p. 479-490, 2016.

[181] R. Weber, B. Kuch, « Relevance of BFRs and thermal conditions on the formation pathways of brominated and brominated–chlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans », *Environment International*, vol. 29, n° 6, p. 699-710, 2003.

[182] S. Kemmlein, D. Herzke, R. J. Law, « Brominated flame retardants in the European chemicals policy of REACH-Regulation and determination in materials », *Journal of Chromatography A*, vol. 1216, n° 3, p. 320-333, 2009.

[183] L. Jinhui, C. Yuan, et X. Wenjing, « Polybrominated diphenyl ethers in articles: a review of its applications and legislation », *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 24, n° 5, p. 4312-4321, 2017.

[184] P. Hennebert et M. Filella, « WEEE plastic sorting for bromine essential to enforce EU regulation », *Waste management*, vol. 71, p. 390-399, 2018.

[185] H. A. Leslie, P. E. G. Leonards, S. H. Brandsma, J. De Boer, N. Jonkers, « Propelling plastics into the circular economy—weeding out the toxics first », *Environment International*, vol. 94, p. 230-234, 2016.

[186] G. Dodbiba, K. Takahashi, J. Sadaki, T. Fujita, « The recycling of plastic wastes from discarded TV sets: comparing energy recovery with mechanical recycling in the context

of life cycle assessment », *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, n° 4, p. 458-470, 2008.

[187] M. Pöhlein, R. U. Bertran, M. Wolf, R. van Eldik, « Versatile and fast gas chromatographic determination of frequently used brominated flame retardants in styrenic polymers », *Journal of Chromatography A*, vol. 1203, n° 2, p. 217-228, 2008.

[188] M. Schlummer, L. Gruber, A. Mäurer, G. Wolz, R. Van Eldik, « Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management », *Chemosphere*, vol. 67, n° 9, p. 1866-1876, 2007.

[189] S. Kikuchi, K. Kawauchi, S. Ooki, M. Kurosawa, H. Honjho, T. Yagishita, « Non-destructive rapid analysis of brominated flame retardants in electrical and electronic equipment using Raman spectroscopy », *Analytical Sciences*, vol. 20, n° 8, p. 1111-1112, 2004.

[190] M. Stepputat, R. Noll, « On-line detection of heavy metals and brominated flame retardants in technical polymers with laser-induced breakdown spectrometry », *Applied Optics*, vol. 42, n° 30, p. 6210-6220, 2003.

[191] A. Aldrian, A. Ledersteger, R. Pomberger, « Monitoring of WEEE plastics in regards to brominated flame retardants using handheld XRF », *Waste Management*, vol. 36, p. 297-304, 2015.

[192] S. Król, B. Zabiegała, J. Namieśnik, « PBDEs in environmental samples: sampling and analysis », *Talanta*, vol. 93, p. 1-17, 2012.

[193] D. Caballero, M. Bevilacqua, J. M. Amigo, « Application of hyperspectral imaging and chemometrics for classifying plastics with brominated flame retardants », *Journal of Spectral Imaging*, vol. 8, p. a1, 2019.

[194] L. Tange, J. A. Van Houwelingen, J. R. Peeters, P. Vanegas, « Recycling of flame retardant plastics from WEEE, technical and environmental challenges », *Journal Homepage: apem-journal. org*, vol. 8, n° 2, p. 67-77, 2013.

[195] L. Delva, S. Hubo, L. Cardon, K. Ragaert, « On the role of flame retardants in mechanical recycling of solid plastic waste », *Waste management*, vol. 82, p. 198-206, 2018.

[196] E. Williams, R. Kahhat, B. Allenby, E. Kavazanjian, J. Kim, M. Xu, « Environmental, social, and economic implications of global reuse and recycling of personal computers », *Environmental Science & Technology*, vol. 42, n° 17, p. 6446-6454, 2008.

[197] L. Dascalescu, T. Zeghloul, A. Iuga, « Electrostatic separation of metals and plastics from waste electrical and electronic equipment », in *WEEE Recycling*, Elsevier, 2016, p. 75-106.

[198] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, R. Ouiddir, A. Bendaoud, L. Dascalescu, « Modeling and optimization of a separator for granular mixtures composed of multiple insulating materials », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, n° 6, p. 4743-4751, 2015.

[199] **A. Benabderrahmane, K. Medles, T. Zeghloul, P. Renoux, L. Dascalescu, A. Parenty, « Triboelectrostatic separation of brominated flame retardants polymers from mixed granular wastes », *Conf. Rec. IEEE/IAS Ann. Meet.*, Baltimore, Maryland, September 29th - October 3rd, 2019.**

[200] **A. Benabderrahmane, K. Medles, T. Zeghloul, P. Renoux, L. Dascalescu and A. Parenty, « Triboelectric charging and electrostatic separation of granular polymers containing brominated flame retardants», IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no 1, p. 915-922, 2020.**