

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Génie Électrique

Département d'Électrotechnique



Thèse présentée par :

FEKIR Djamel Eddine

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat 3^{ème} Cycle en Électrotechnique

Option : Haute Tension

Intitulé de la thèse :

Chargement triboélectrique et séparation électrostatique pour deux types de mélange granulaire binaire isolants de taille fine et ceux de grosse taille

Présentée devant le jury composé de :

TILMATINE Amar	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Président
MILOUDI Mohamed	MC A (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Directeur de thèse
BENDAOU Abdelber	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Examineur
ZELMAT Mohamed Mouloud	MC A (U.S.T. MB. Oran)	Examineur
HAMMADI Nacera	MC A (U.S.T. MB. Oran)	Examineur

Remerciements

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

Même si parfois les mots semblent fades à côté de la profondeur des sentiments, il faut pourtant les concrétiser en remerciements, pour honorer tous ceux qui nous ont aidés à franchir ce pas vers l'avenir.

Je remercie Dieu de m'avoir donné la force et le courage pour achever cette thèse.

Je rends un majestueux hommage au travail d'encadrement et aux qualités humaines et scientifiques de mon directeur de thèse M. **MILOUDI Mohamed**, Maître de Conférence A à l'Université de Sidi Bel Abbès, dont la disponibilité, le savoir-faire et le soutien ne m'ont jamais fait défaut.

Mes remerciements vont également au Pr. **TILMATINE Amar** (Professeur à l'Université de Sidi Bel Abbès) pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Mes plus vifs remerciements vont aux membres du jury, Pr. **BENDAOU Abdelber** (Professeur à l'Université de Sidi Bel Abbès), Dr. **ZELMAT Mohamed Mouloud** (Maître de Conférence A à l'Université USTO d'Oran) et au Dr. **HAMMADI Nacera** (Maître de Conférence A à l'Université USTO d'Oran), qui ont accepté de lire et juger mon travail à la lumière de leurs compétences notables dans ce domaine.

A cette occasion je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma gratitude au Pr. **Lucian DASCALESCU**, de l'IUT d'Angoulême Université de Poitiers (France), qui a accepté de me recevoir, m'orienter et corriger ma vision de la recherche scientifique à travers ces constats et observations qui resteront gravés dans ma mémoire.

Je tiens à remercier aussi mon père et ma mère qui m'ont encouragé depuis mon jeune âge à suivre le chemin de la science. Je les remercie pour leur amour, leur soutien et leur confiance. Ils m'ont appris à mettre l'honnêteté et le courage au-dessus de toutes les autres vertus.

Je dédie cette thèse à ma femme, pour honorer son amour, sa patience et son soutien pendant ces années dédiées à la recherche.

Je dédie cette thèse à mes frères, mes neveux, mon beau-père et à mes belles sœurs.

The page features a white background with several decorative red lines. A large, thin red arc curves across the top of the page. Below it, a larger, more complex red shape resembling a stylized leaf or a teardrop is positioned, with its top edge curving towards the right and its bottom edge curving towards the left. The text 'Table des matières' is centered in a bold, dark red font, flanked by two small red squares.

Table des matières

Table des matières

Introduction	01
---------------------------	-----------

Chapitre I. Etat de l'Art

I.1. Charge des matériaux granulaires	07
I.1.1. L'Effet couronne	07
I.1.2. L'effet d'induction	08
I.1.3. L'effet tribo-électrique.....	08
I.1.3.1. Phénomènes physiques.....	09
I.1.3.2. Forces aérodynamiques et électrostatiques	15
I.1.3.2.1. Forces de la pesanteur.....	15
I.1.3.2.2. Forces de London-Van der Waals	16
I.1.3.2.3. Forces de Coulomb	17
I.1.3.2.4. Forces aérodynamiques	18
I.2. Lit fluidisé	19
I.3. Conclusion	21

Chapitre II. Matériels et Méthodes

II.1. Matériaux	22
II.1.1. Polyamide (PA)	22
II.1.2. Polycarbonates (PC)	23
II.1.3. Acrylonitrile butadiène Styène (ABS)	25
II.1.4. High Impact polystyrene (HIPS)	26
II.1.5. Polychlorure de vinyle (PVC)	27
II.1.6. Polychlorure de vinyle pulvérulent (PVC en poudre).....	28
II.2. Techniques de mesure	29
II.2.1. Mesure de la charge	29
II.2.2. Mesure de l'humidité relative	31
II.2.3. Mesure de la masse granulaire	31
II.3. Dispositif de charge	32
II.3.1. Dispositif à vibration	32
II.3.2. Dispositif à cylindre rotatif	33
II.3.3. Dispositif à ventilateur	34
II.3.4. Dispositif à cyclone	35
II.4. Association de certains chargeurs triboélectriques avec les séparateurs électrostatiques les plus répandus pour les mélanges de matériaux granulaires isolants.....	35

II.4.1. Séparateur triboélectrique à tapis roulant associé à un chargeur triboélectrique statique.....	36
II.4.2. Séparateur à chute libre	37
II.4.3. Séparateur à lit fluidisé	41
II.5. Conclusion.....	48

Chapitre III. Réalisation et étude d'un dispositif de tribo-chargement aérodynamique à un seul axe de rotation à flux descendants

III.1. Historique et réalisation du dispositif de chargement triboélectrique à ventilateur à flux ascendants.....	49
III.2. Réalisation et étude analytique d'un nouveau dispositif de tribo-chargement aérodynamique à un seul axe de rotation à flux descendants.....	52
III.2.1. Principe de fonctionnement.....	53
III.2.2. Procédure expérimentale.....	54
III.3. Résultats et discussion.....	55
III.3.1. Matériaux granuleux.....	55
III.3.1.1. Effet de la masse sur la charge électrique acquise avec les trois types de parois.....	55
III.3.1.2. Effet de la vitesse de rotation des hélices sur la charge acquise.....	59
III.3.1.3. Effet du nombre d'hélices sur la charge acquise.....	62
III.3.2. Matériaux pulvérulents	66
III.3.2.1. Chargement triboélectrique des produits pulvérulents pour paroi en PMMA.....	66
III.3.2.2. Chargement triboélectrique des produits pulvérulents pour paroi en Acétate.....	67
III.3.2.3. Chargement triboélectrique des produits pulvérulents pour paroi en Aluminium.....	68
III.4. Conclusion.....	69

Chapitre IV. Applications dans la séparation électrostatique

IV.1. Séparation électrostatique à tapis roulant associé au chargeur triboélectrique à flux descendant	71
IV.1.1. Expériences de séparation électrostatique de mélanges granulaires binaires sur tapis roulant.....	74
IV.1.2. Expériences de séparation électrostatique de mélanges granulaires ternaires sur tapis roulant.....	76
IV.2. Séparation électrostatique à tambours tournants associé au chargeur triboélectrique à flux descendant pour matériaux pulvérulents.....	78
IV.3. Elaboration d'une nouvelle installation de séparation électrostatique concentrique...	82
IV.3.1. Réalisation d'un nouveau séparateur électrostatique à électrodes concentriques pour mélanges granulaires isolants	82

IV.3.2. Protocole et mise en marche du séparateur à électrodes concentriques associé au chargeur triboélectrique à flux d'air descendant.....	85
IV.3.3. Simulation du champ électrique dans le séparateur concentrique	87
IV.3.3.1. Dessin et dimension de la configuration.....	87
IV.3.3.2. Logiciel COMSOL Multiphysics.....	88
IV.3.3.3. Plan de décision et de construction du modèle.....	89
IV.3.4. Procédure expérimentale.....	93
IV.3.5. Résultats.....	94
IV.3.5.1. Application sur un mélange granulaire PA-PC.....	94
IV.3.5.2. Application sur un mélange granulaire PA-PVC.....	97
IV.3.5.3. Application sur un mélange granulaire PC-PVC.....	100
IV.3.6. Discussion sur l'ensemble des résultats obtenus.....	103
IV.4. Conclusion.....	104
Conclusion et perspectives.....	105
Références bibliographiques.....	108
Annexes.....	118



■ ■ Introduction ■ ■ générale

Introduction générale

L'accroissement considérable de la population mondiale, ces dernières décennies, fait face à des enjeux environnementaux de tailles où une raréfaction des ressources est accompagnée d'augmentation de déchets d'équipements électroniques et informatiques [1] alors le problème de l'environnement devient un enjeu essentiel associé à la vie moderne de ce siècle. Transformer les déchets en ressource est essentielle et constitue aujourd'hui l'essence même de l'économie circulaire.

Face à la diminution des ressources primaires l'augmentation de leur prix sur les marchés internationaux, toutes les sociétés commencent à s'orienter de plus en plus vers l'exploitation des matériaux récupérés à partir des produits usagés par des techniques de tri et de recyclage de plus en plus développées.

Avec 25 millions de tonnes de déchets plastiques produits chaque année en Europe seuls 25% sont recyclés, les réglementations qui ne cessent d'évoluer et des attentes croissantes des industriels, le recyclage des plastiques est un marché en pleine expansion. Bien que les plastiques soient entièrement recyclables, seule une faible proportion de déchets plastiques est actuellement valorisée. [94]

Le recyclage des matériaux plastiques provenant d'équipements informatiques en fin du cycle de vie constitue un domaine prioritaire de recherche sur le plan mondial. La séparation des divers constituants des mélanges de tels matériaux plastiques constitue la clé du succès du recyclage.

L'objectif de cette thèse de doctorat est de faire une présentation des différentes installations d'électroséparation mises en œuvre dans le domaine de récupération de matériaux isolants granulaires issus des déchets d'équipements électriques, électroniques et informatiques et élaborer et mettre au point deux nouveaux procédés contribuant ainsi à faire enrichir cette panoplie d'installations en améliorant leurs rendements.

Dans le **premier chapitre**, on a exposé la problématique de la récupération des matériaux plastiques d'équipements électriques et électroniques, où quelques concepts sur l'effet triboélectrique sont passés en revue. L'analyse de l'état de l'art dans le domaine de la triboélectrisation des matériaux plastiques granulaires nous a permis de dégager plusieurs pistes d'investigations expérimentales structurant notre travail en rapport avec celles-ci.

Les différents matériaux, les techniques de mesures et les procédures expérimentales utilisées sont décrits dans le **deuxième chapitre**. Il s'agit des polymères présents dans les proportions les plus importantes dans les déchets d'équipements électriques et informatiques (PA, PC, ABS, HIPS et PVC). Par la suite la construction et les principes de fonctionnement de certains dispositifs de triboélectrisation et de séparation électrostatique sont décrits.

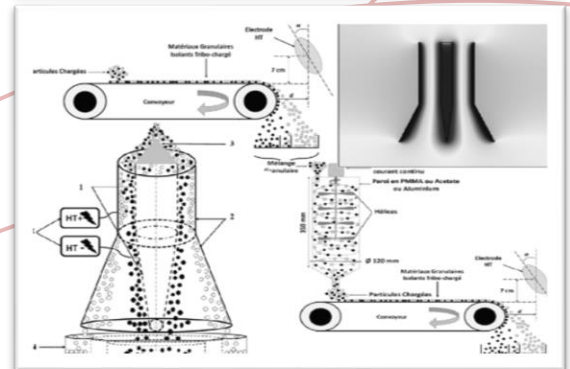
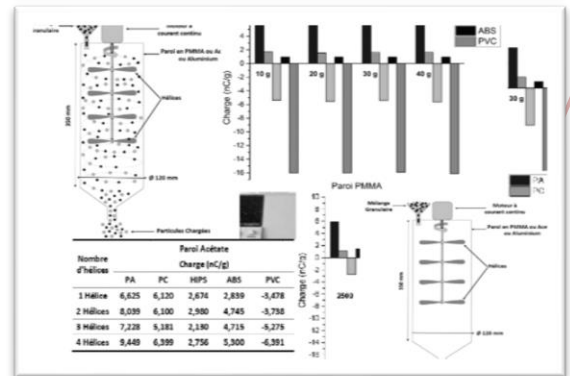
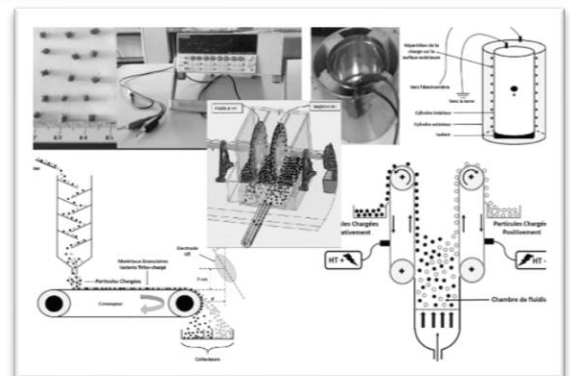
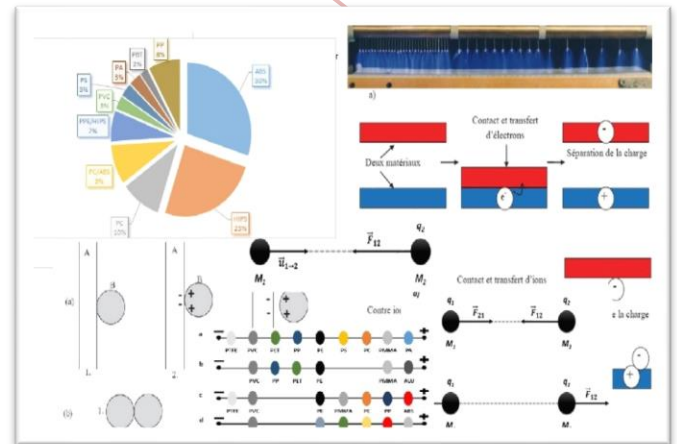
Le **troisième chapitre** est consacré principalement à la présentation d'un nouveau dispositif conçu et réalisé avec la contribution essentielle de l'auteur au sein du laboratoire IRECOM de la faculté de Sidi Bel Abbes, lequel a été breveté en Juin 2016. Le dispositif a été réalisé pour le chargement triboélectrique des mélanges granulaires isolants. Dans une première phase, l'étude du dispositif a permis de déterminer les facteurs influents sur la charge triboélectrique acquise. L'évaluation des performances de cette nouvelle installation a suscité une analyse profonde pour son éventuelle exploitation dans le domaine industriel.

Enfin le **quatrième** et dernier **chapitre** est scindé en parties, la première concerne l'évaluation des performances du dispositif de chargement triboélectrique et les résultats de son application dans la séparation avec un séparateur électrostatique de type tapis roulant et à deux tambours tournants où les résultats ont été très concluants. La deuxième partie a été consacrée à l'élaboration d'une nouvelle installation d'électro séparation qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet à la fin de l'année 2016 où son application avec le nouveau dispositif de tribo-chargement a donné de bons résultats.

Notre conclusion générale, sera consacré à la synthèse de notre contribution dans ce domaine ainsi que l'énoncé des perspectives ouvertes par ce travail.

Chapitre I

■ ■ Etat de l'art ■ ■



Chapitre I

Etat de l'art

Un Équipement Électrique et Électronique (EEE) [1] est un équipement fonctionnant grâce à un courant électrique ou à un champ électromagnétique, ou un équipement de production, de transfert ou de mesure de ces courants et champs. Il est conçu pour être utilisé à une tension ne dépassant pas 1 000 volts en courant alternatif et 1 500 volts en courant continu. Ce terme regroupe donc un grand nombre d'appareils aux dimensions et poids très variés : machine à laver, téléphone portable, télévision, perceuse, distributeur automatique, thermomètre électronique, lampe, outil d'analyse, etc.

Les EEE sont devenus une partie essentielle pour faciliter tous les aspects de la vie humaine à la maison, bureau, public et espace privé. Ces produits et équipements sont notamment utilisés dans l'industrie, l'éducation, la santé, les communications, la sécurité, les systèmes d'information, l'agriculture et l'alimentation, le commerce, militaire, divertissement, et d'autres domaines. La situation actuelle montre que des milliards d'ordinateurs et d'appareils électroniques sont produits et consommés chaque année, mais d'autre part, la vie de centaines de millions de ces appareils est arrivée à échéance. Cela conduit à un grand problème environnemental appelé E-déchets (DEEE). [4]

Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) [5] ou E-Déchets est un terme générique englobant diverses formes d'équipements électriques et électroniques qui ont cessé d'avoir une valeur pour leurs propriétaires.

La quantité croissante des DEEE a posé un défi important pour la gestion des déchets dans les pays développés et en cours de développement. L'augmentation rapide des ventes, les innovations et la durée de vie raccourcie des produits sont parmi les facteurs qui contribuent à la quantité croissante de déchets électriques et électroniques. [2]

Le taux de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) croît de plus en plus à un rythme alarmant. En 2014, les déchets de la population mondiale ont été estimés

à 41,8 millions de tonnes métriques (mégatonnes - Mt) de déchets d'équipements électriques et électroniques, et on prévoit une augmentation de volume des déchets de 21%. Le volume estimé pour l'année 2018 sera de 50 million de tonnes. [2]

Bien que ces déchets soient omniprésents et générés partout, les pays riches tels que les États-Unis, les pays de l'Union européenne, l'Australie, le Japon, etc., sont considérés comme les principales sources de déchets. Les DEEE constituent en moyenne 8% de la production de déchets solides totale dans ces pays. [4]

Tableau I.1 : Quantité Mondiale de déchets générés. [6]

Quantité globale de déchets générés			
Année	Déchets générés (Mt)	Population (Milliards)	Déchets générés (kg / hab.)
2010	33.8	6.8	5.0
2011	35.8	6.9	5.2
2012	37.8	6.9	5.4
2013	39.8	7.0	5.7
2014	41.8	7.1	5.9
2015	43.8	7.2	6.1
2016	45.7	7.3	6.3
2017	47.8	7.4	6.5
2018	49.8	7.4	6.7

Cela représente un défi imminent pour la réalisation des objectifs de développement durable. Bien que les pays technologiquement développés soient la principale source de production d'EEE et de la production des déchets, le volume généré a également augmenté dans les pays en développement. Par conséquent, ils sont dans une situation vulnérable en raison de l'insuffisance de politiques de gestion des déchets et de la technologie de pointe pour une gestion écologiquement rationnelle. [3]

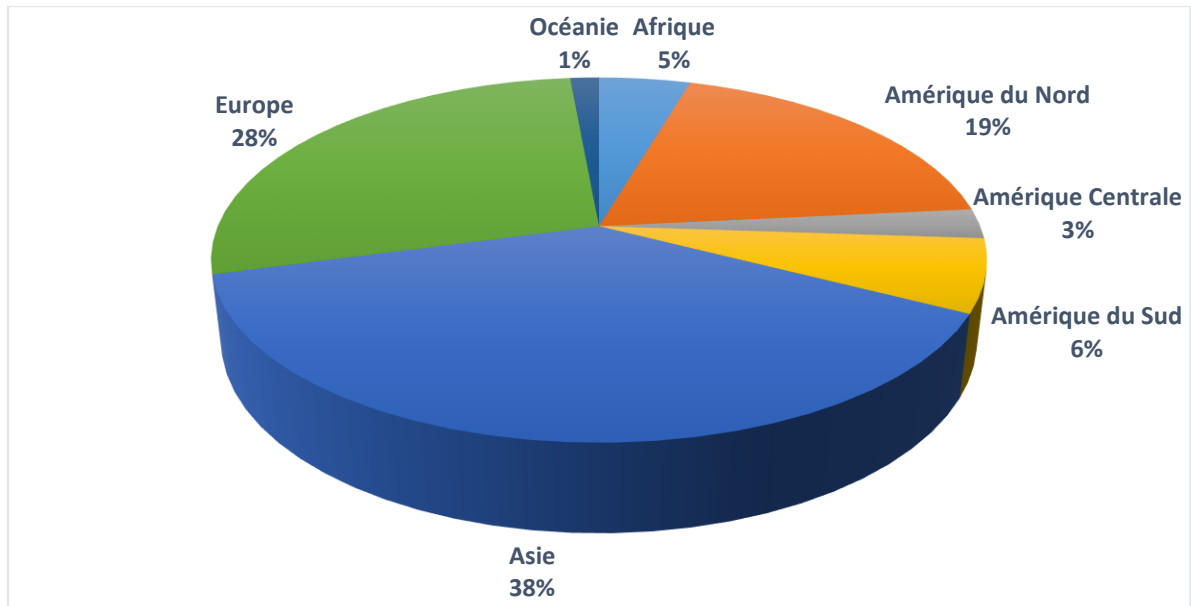


Figure I.1 : Quantité de déchets générés par continent 2014. [6]

On peut distinguer plusieurs catégories de produits, avec des taux et des types de plastiques différents sur cette famille d'équipements (figure I.2)

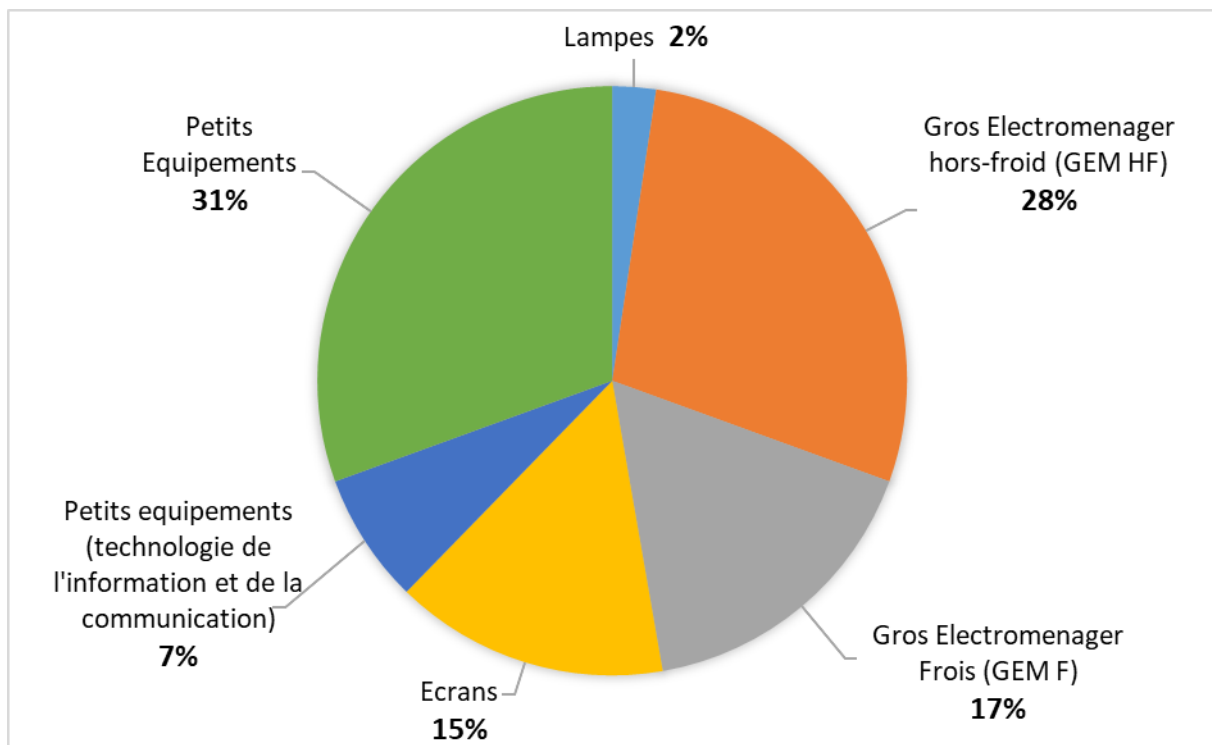


Figure I.2 : Répartition des tonnages de DEEE ménagers dans le monde en 2014 [6]

Malgré les efforts constatés, il existe encore une grande partie des déchets qui ne sont pas collectés et traités d'une manière écologiquement rationnelle. Sur un volume total de 41,8 Mt ,

seule une quantité minimale de 6,5 Mt a été documenté et recyclé avec les plus hauts standards, le sort de la majorité des déchets étant encore inconnu. [2]

Les DEEE ménagers sont composés quasiment pour moitié de métaux, l'acier (métaux ferreux) représentant 45 % et les métaux non ferreux (cuivre, cobalt, indium, tantale, etc.) représentant 8 % de la composition du DEEE. Les plastiques (18 %) et le verre (12 %) sont également des composants importants de ces déchets. [1]

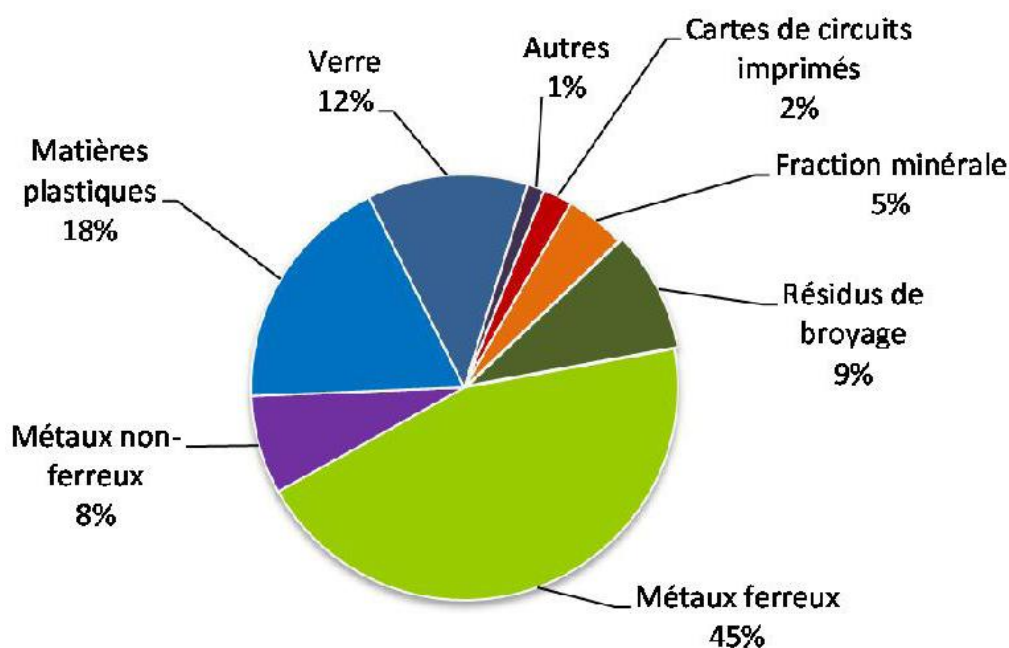


Figure I.3 : Composition des DEEE [1]

Le recyclage des DEEE est difficile, principalement parce que ces types de déchets sont constitués de nombreux et différents matériaux : métaux, verre, les élastiques et les plastiques. Les matières plastiques contiennent généralement des métaux incorporés dans leur structure, et pour cette raison, la séparation et le recyclage mécanique des composants de déchets DEEE contient une série de problèmes techniques et économiques. [7]

Une fraction typique DEEE contient 20-30% de plastiques. La composition peut varier, mais un exemple de la répartition de réelle DEEE collectés est : Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) 30%, high impact polystyrène (HIPS) 25%, polycarbonate (PC) 10%, PC/ABS 9%, Polypropylène (PP) 8%, Polyphénylène éther (PPE)/HIPS 7%, Polychlorure de vinyle (PVC) 3%, Polystyrène (PS) 3%, Polyamide (PA) 3%, Polytéraphtalate de butylène (PBT) 2% [8]. Une représentation schématique d'une composition de DEEE apparaît sur la figure I.4

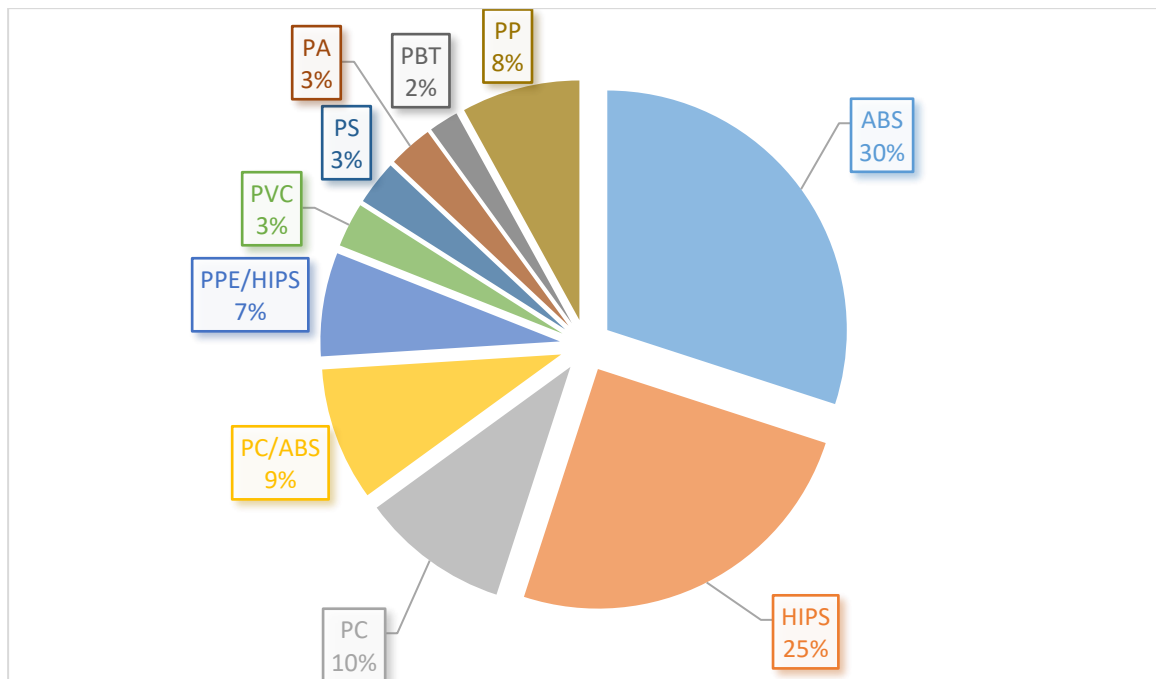


Figure I.4 : Composition typique de DEEE. [8]

C'est pourquoi le problème de la récupération et du traitement des équipements informatiques en fin de vie est devenu une préoccupation majeure pour toutes les entreprises qui travaillent dans ce secteur.

Séparation électrostatique [20] est le terme commun à toutes les technologies de traitement utilisant des forces électriques agissant sur des particules chargées ou polarisées dans un champ électrique statique. [27].

I.1. Charge des matériaux granulaires

I.1.1. L'Effet couronne

L'effet couronne, phénomène aujourd'hui bien connu, se manifeste sous forme d'une gaine lumineuse bleuâtre qui apparaît autour d'un fil mince, lorsque celui-ci est porté à un potentiel suffisant. Il rappelle le halo lumineux visible à la périphérie du soleil, au moment des éclipses, et qui lui a donné son nom. Du point de vue physique et électrique, l'effet de couronne se produit sur tous les conducteurs, dès que le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand (supérieur au champ d'ionisation de l'air, ≈ 30 kV/cm), l'air s'ionise et forme autour du conducteur une couronne lumineuse. [103,104]

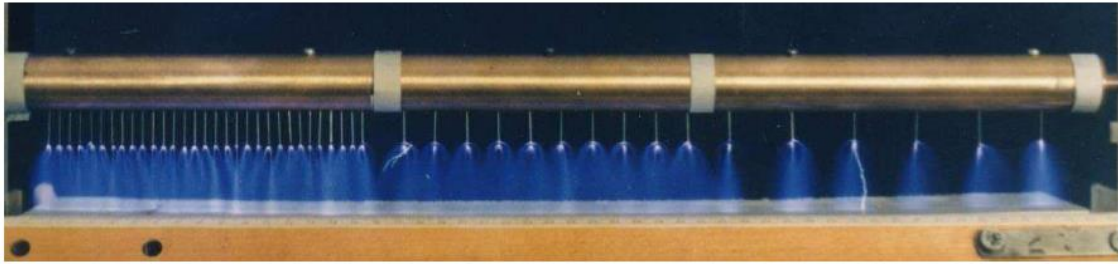


Figure I.5 : Photographie d'une décharge couronne avec une électrode à aiguilles

I.1.2. L'effet d'induction

On parle de phénomène d'induction électrostatique lorsqu'un objet électriquement chargé est employé pour créer un déplacement de charges électriques dans un deuxième objet, neutre, sans être en contact avec celui-ci. L'objet chargé, qui génère un champ électrique, provoque la polarisation de l'objet neutre. Si l'objet neutre est conducteur et temporairement en contact avec une électrode liée à la masse, les charges polaires situées au voisinage du point de contact vont s'écouler vers la terre. De ce fait, lorsque l'objet est déconnecté de la terre, il emporte une charge nette non nulle. Les charges ne s'écoulant pas dans un corps isolant, celui-ci n'est alors jamais chargé par induction électrostatique [105,106].

I.1.3. L'effet tribo-électrique

Les phénomènes d'électricité statique nous sont familiers, mais comment les charges s'accumulent-elles ? Des études récentes montrent que des transferts de matière sont parfois à l'œuvre.

L'électricité statique est l'un des premiers phénomènes à observer en physique. Il a suscité la curiosité de comprendre l'origine de la génération et le mouvement des charges électrostatiques. L'électrification par contact, ou charge triboélectrique, a été découverte dès l'an 600 av. J.-C.

La triboélectricité était déjà connue des Grecs anciens : le philosophe Thalès de Milet découvrit ainsi qu'en frottant de l'ambre sur de la laine, on créait un tel phénomène. D'ailleurs, le terme « triboélectrique » signifie en grec « frotter de l'ambre ». [10]. Le chargement des matériaux granulaires isolants se fait par deux mécanismes physiques en vue de leurs séparations dans un champ électrique intense : l'effet couronne, assurant la charge par bombardement ionique et l'effet tribo-électrique (figure I.6), impliquant le transfert de charge entre deux corps en contact. [9]

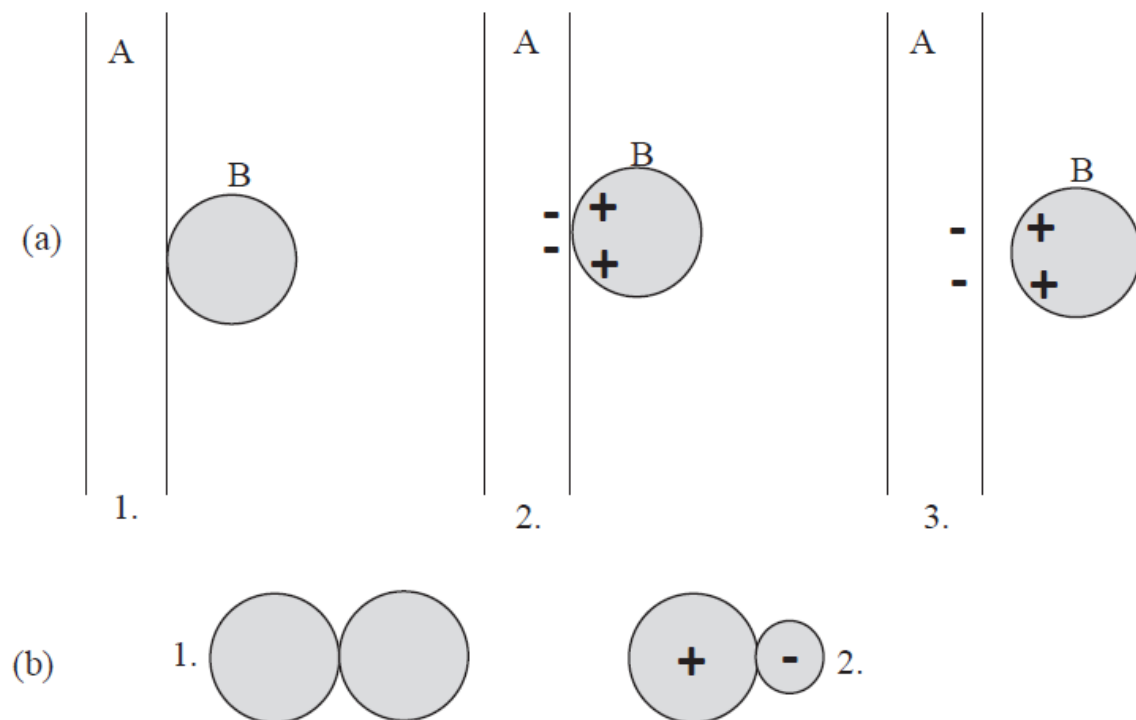


Figure I.6 : L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux surfaces : (a) :1. Surface A neutre, particule B est neutre ; 2. La surface A et la particule B sont en contact ; 3. Après la séparation, la surface A a la tendance de se charger négativement, et la particule B positivement ;(b) :1. Deux particules neutres de même taille en contact ; 2.les particules grandes ont la tendance de se charger positivement et les petites négativement. [9]

I.1.3.1. Phénomène physique

L'effet triboélectrique est associé à l'apparition de charges électriques lorsque deux surfaces initialement neutres entrent en contact. Un transfert de charge s'opère et aboutit à des matériaux chargés positivement et négativement les uns par rapport aux autres (figure I.7). [11] [12]. Si le matériau n'est pas conducteur (cas des isolants), ces charges générées persisteront dans le temps et autoriseront une séparation en soumettant les granules chargés à un champ électrique à fort potentiel qui attirera les particules de charges opposées et repoussera celles de même signe que le champ.

Le phénomène de tribo-chargement a cependant été très peu étudié. Quelle est la nature des particules chargées qui s'accumulent à la surface des matériaux ? Par quel mécanisme migrent-elles dans la zone de contact ? Depuis quelques années des chercheurs de diverses disciplines s'intéressent à ces questions.

En 1834 Péclet [1] montre que la densité électrique maximum obtenue avec une machine ne dépend pas de la pression du frottoir, ni de la vitesse de rotation.

En 1879 Helmholtz [2] propose une théorie qui stipule qu'au contact de deux matériaux quelconques il existe une double couche électrique de très faible épaisseur ; quand on sépare les deux surfaces, on sépare les charges positives et négatives ; le voltage croît en raison inverse de la capacité, d'où les forts potentiels obtenus.

En 1902, Oscar Knoblauch [15] a déterminé que les solides organiques acides tendent à se charger négativement, et les solides organiques bases tendent à se charger positivement. Il a proposé un mécanisme de transfert de proton pour l'effet tribo. Medley [16] a fait des observations similaires en 1953, et Diaz a proposé qu'un mécanisme de transfert de proton puisse expliquer la tribo électrisation d'un large éventail de matériaux isolants [17,26].

En 1980 Lowell et Rose-Innes [33] ont conclu que le transfert d'électron est indispensable au chargement par triboélectricité des isolants.

Un échange de charges peut aussi se produire quand les polymères ne contiennent pas d'ions mobiles, auquel cas un mécanisme supplémentaire doit intervenir. En 2008, Logan McCarty et George Whitesides [14], ont proposé l'hypothèse que dans la mince couche d'eau qui sépare les deux polymères, les molécules d'eau se dissocient et les ions hydroxyde (OH^-) s'adsorbent sur l'une des surfaces.

La plupart des chercheurs ont supposé que la tribo électrisation des isolants implique également le transfert d'électrons [21,31], mais les observations expérimentales semblent contredire ce point de vue. La tribo électrisation des isolants n'est pas en corrélation avec les propriétés électroniques des matériaux, tels que la constante diélectrique, ou des propriétés atomiques, tels que l'énergie d'ionisation, affinité électronique, ou électronégativité. [22,23]

En 2009 Liu et Brad [13] ont proposé que l'électron est le support de charge qui est transféré d'un isolant à l'autre au cours de l'électrification par contact. Reste que des expériences réalisées en 2011 par Bartosz Grzybowski [18] ont montré que l'échange de charges peut avoir lieu entre deux polymères non ioniques en l'absence totale d'eau. Cela indique donc l'existence d'un mécanisme distinct à la fois de celui proposé avec les ions hydroxyde et de celui par transfert d'ions. L'ensemble des diverses observations suggère que différents mécanismes sont en jeu et se manifestent selon les matériaux ou les conditions du contact.

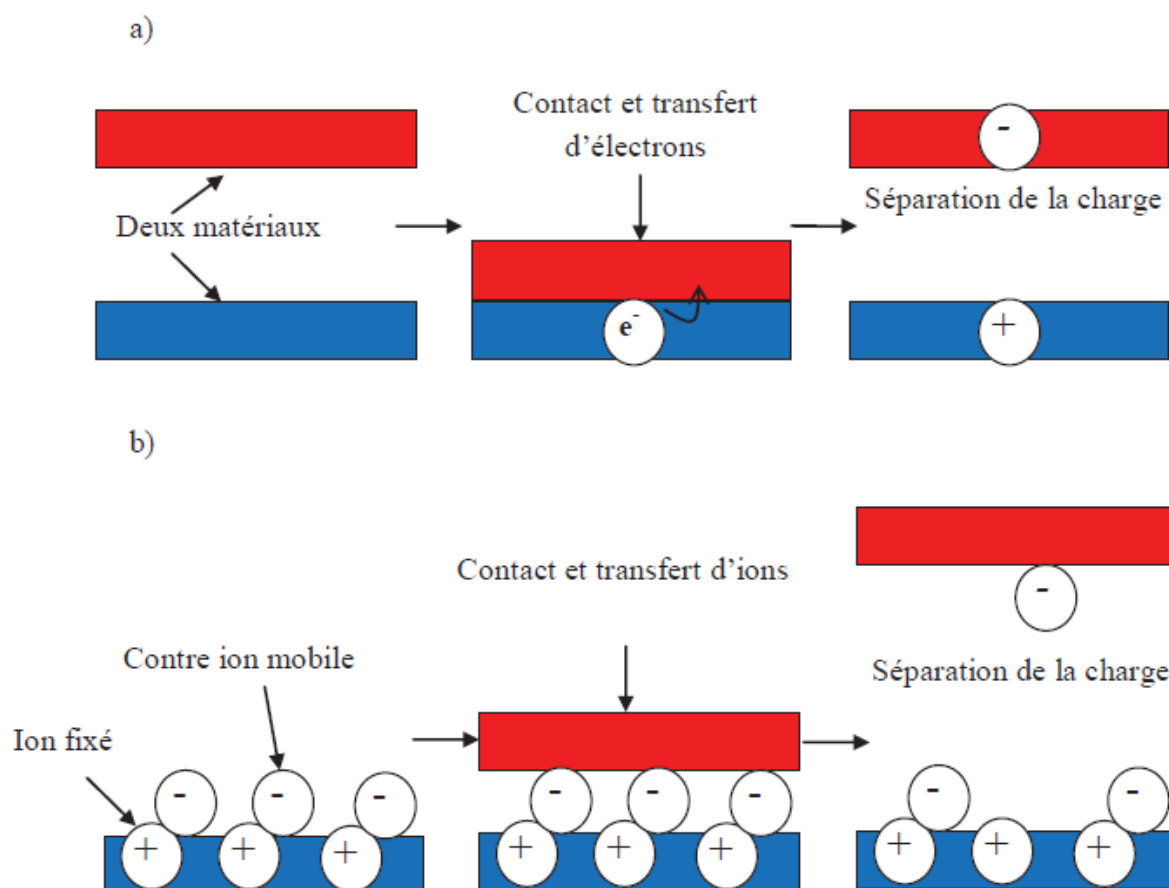


Figure I.7 : Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ;
b) Transfert d'ions. [14]

Pour les transferts de charge entre deux isolants, les physiciens ont développé des théories inspirées du mécanisme de transfert d'électrons, sans préciser la nature de charges. Ces théories n'ont eu qu'un succès limité dans le calcul de l'énergie nécessaire pour arracher des charges aux isolants. Elles en ont eu davantage pour expliquer que, dans certains cas, l'échange de charges est limité par le champ électrique créé. En d'autres termes, comme l'accumulation de charges crée un champ électrique, elle est limitée par la rigidité diélectrique de l'air ambiant, qui correspond à la valeur maximale du champ électrique que l'air peut supporter avant que ses molécules soient ionisées. Au-delà de cette limite, l'air devient conducteur et une décharge électrique se produit.

On sait depuis longtemps que le contact d'un polymère avec un autre matériau peut avoir pour effet de transférer une partie du polymère d'une surface à l'autre. En 2011, à l'aide de la microscopie à sonde de Kelvin (une technique d'analyse à haute résolution des propriétés électriques d'une surface), B. Crzybowski [18] et son équipe ont prouvé que quand deux

polymères sont pressés l'un contre l'autre, puis séparés, le transfert de matériau peut s'accompagner d'un échange de charges à l'échelle nanométrique.

Depuis des siècles, on supposait que les charges acquises par contact sur chaque surface étaient homogènes, l'une des surfaces étant uniformément positive et l'autre uniformément négative. L'équipe de B. Grzybowski a montré que, bien que chaque surface développe une charge nette soit négative, soit positive, elle présente en fait une mosaïque aléatoire de régions de taille nanométrique et diversement chargées, la charge nette étant égale à la somme algébrique des charges de chacune de ces régions (Figure I.8). Cette découverte signifie que davantage d'éléments chargé sont échangés qu'on ne le supposait auparavant : environ 100 fois plus.

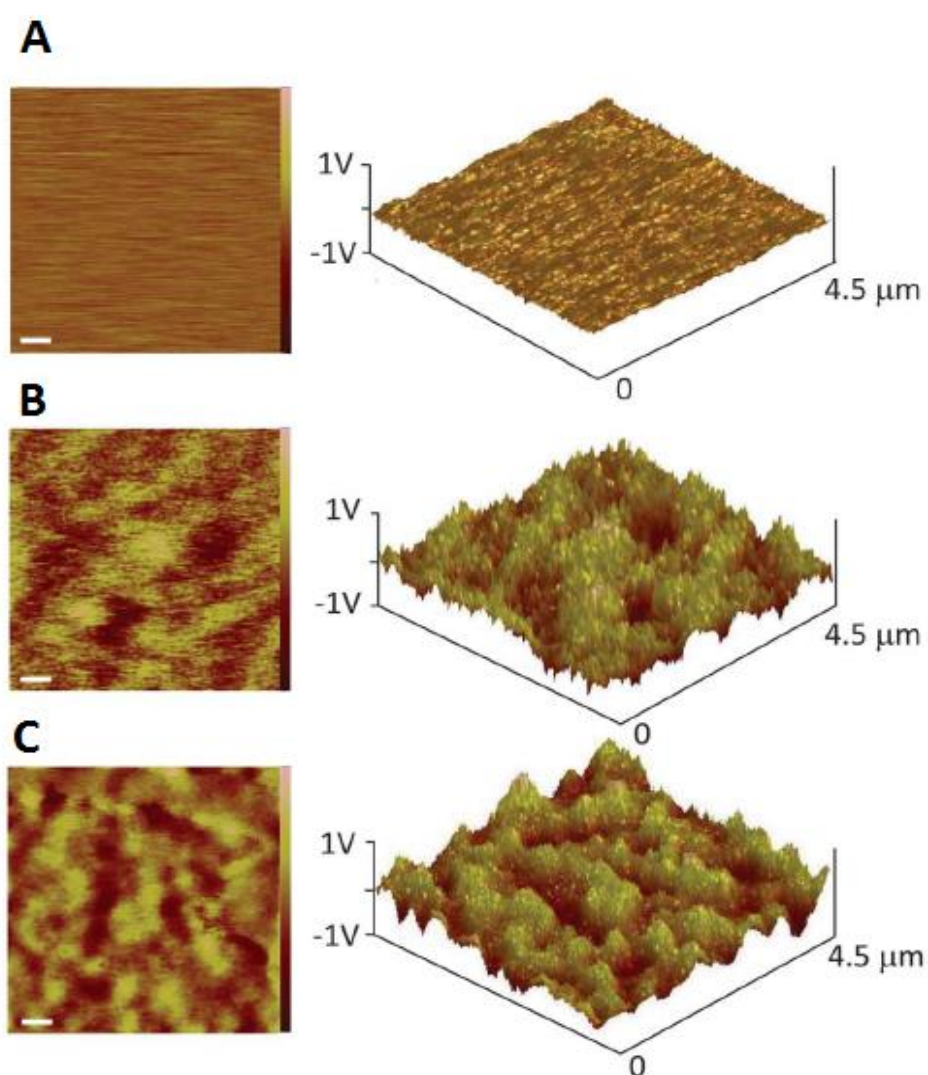


Figure I.8 : Transfert d'agrégats nanométriques, mis en évidence par microscopie à sonde de Kelvin, entre des surfaces de polymères mis en contact, puis séparés. Avant le contact, le matériau est relativement lisse [a]. Le contact avec un polymère identique [b] ou différent [c] produit divers motifs de transfert. [18]

Lorsque deux matériaux différents sont pressés ou frotté ensemble, la surface d'un matériau va généralement prendre quelques électrons de la surface de l'autre matériau [19]. Le matériau qui prend les électrons a une affinité plus forte pour la charge négative, et cette surface sera chargée négativement après la séparation des matériaux et l'autre matériau aura une quantité égale de charge positive.

L'effet triboélectrique [32] se produit lors d'un contact entre deux produits diélectriques : l'un se comporte comme donneur d'électron et l'autre comme accepteur et il apparaît une charge superficielle, et celle-ci engendre un champ électrique de l'ordre de mV/m, suffisant pour produire une décharge dans l'air.

On appelle série triboélectrique [10] un classement des corps selon leur tendance à se charger positivement ou négativement, un corps est placé avant un autre dans la série s'il a tendance à lui céder des électrons (à se charger positivement) quand les deux corps sont mis en contact ou frottés l'un contre l'autre. Cette série est déterminée par la permittivité, les permittivités les plus élevées appartenant aux polymères les plus fortement donneurs. D'une manière plus rigoureuse, le caractère donneur ou accepteur peut être lié au travail d'extraction [32], les polymères donneurs étant ceux dont le travail d'extraction est le plus faible. Le tableau I.2 indique que la corrélation entre ces deux paramètres n'est pas aussi parfaite.

Tableau I.2 : Travail d'extraction et constante diélectrique de quelques polymères (d'après Van Krevelen 1990). [32]

Polymère	Travail d'extraction (eV)	ε
Polytétrafluoroéthylène (PTFE)	5,75	2,1
Polychlorure de vinyle (PVC)	5,13	2,8-3,05
Polystyrène (PS)	4,90	2,55
Polyéthylène (PE)	4,90	2,5
Polycarbonate (PC)	4,80	2,6-3,0
Poly méthacrylate de méthyle (PMMA)	4,68	2,6-3,7
Polyamide 6,6 (PA)	4,3	4

Les séries triboélectriques varient d'un auteur à l'autre et il est tout à fait certain que l'état de surface des corps frottés est très important [10], ceci reflète principalement la culture matérielle de leurs époques respectives et souligne un certain facteur aléatoire de ces séries. En

effet, il a été démontré que certains facteurs externes pouvaient inverser les polarités obtenues lors des frottements.

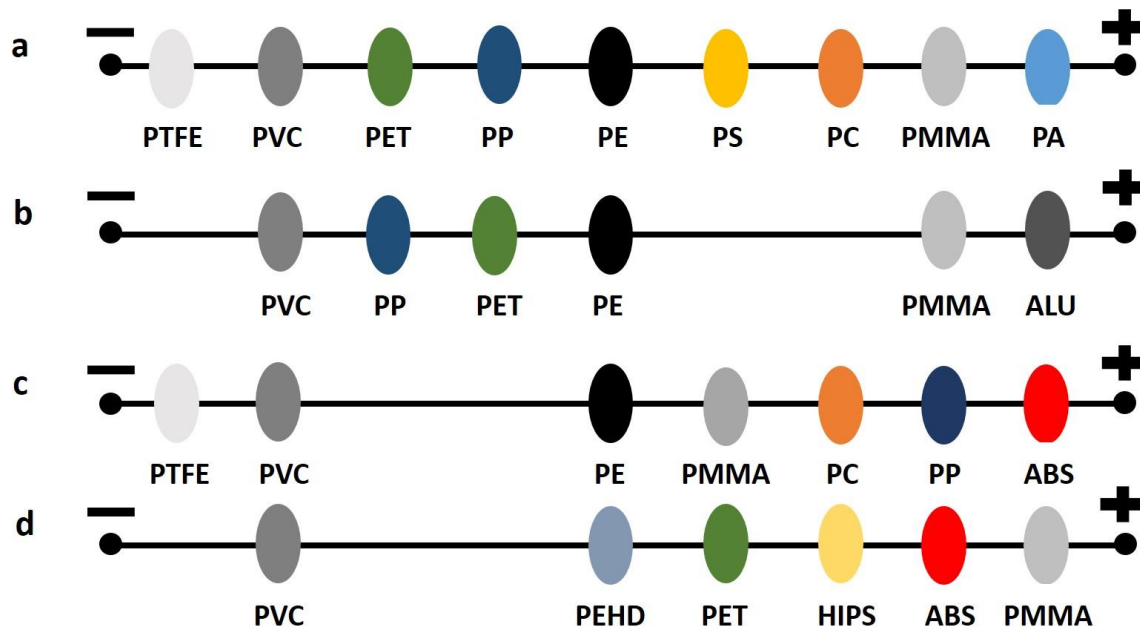


Figure I.9 : Série triboélectrique expérimentale pour différents matériaux plastiques utilisés dans la fabrication des équipements informatiques et électriques selon différents auteurs : a [48], b [45], c [41], d [50].

Bill Lee [90] introduit aussi le concept d'« affinité » triboélectrique : le rapport entre la charge triboélectrique échangée et l'énergie dépensée dans le frottement (Tableau I.3).

Tableau I.3 : Série triboélectrique réalisée par Bill Lee en 2009 [90].

Nom d'isolant	Affinité tribo- électrique [nC/J]	Charge acquise si frotté avec du métal (F : faible, N : normal)	Remarques
Polyuréthane solide	+40	+N	Un peu conducteur
Nylatron (nylon + MoS2)	+28	+N	/
Verre	+25	+N	Un peu conducteur
Papier	+10	-F	Un peu conducteur
Bois (pin)	+7	-F	/
Silicone	+6	+N	/
Coton	+5	+N	Un peu conducteur
Caoutchouc nitrile	+3	-F	/
Laine	0	-F	/

Polycarbonate	-5	-F	/
ABS	-5	-N	/
Poly méthacrylate de méthyle	-10	-N	/
Époxy (circuit imprimé)	-32	-N	/
Caoutchouc en styrène-butadiène (SBR, Buna S)	-35	-N	/
PET (mylar) solide	-40	+F	/
Polystyrène	-70	-N	/
Polyamide	-70	-N	/
Silicone	-72	-N	/
Oléfines (alcènes) : LDPE, HDPE, PP	-90	-N	/
PVC (vinyle rigide)	-100	-N	/
Latex (naturel) en caoutchouc	-105	-N	/
Caoutchouc en EPDM, remplie	-140	-N	Un peu conducteur
Téflon	-190	-N	Très électronégatif

I.1.3.2. Forces aérodynamiques et électrostatiques

Trois types de forces s'exercent sur les matériaux granulaires qui prennent naissance lors d'un frottement ou lors d'un simple contact :

- ✓ Les forces de la pesanteur
- ✓ Les forces électrostatiques
- ✓ Les forces aérodynamiques

I.1.3.2.1. Forces de la pesanteur

Le poids d'un corps de masse m s'exprime par : [102]

$$P = mg \quad (I.1)$$

Avec $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ et P en Newton (N).

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

I.1.3.2.2. Forces de London-Van der Waals

Ce sont des forces de nature électrostatique qui s'exercent sur des molécules ou des particules électriquement neutres. Il s'agit de forces attractives. Si on considère deux atomes (ou molécules) distant de r , la force d'interaction F entre moments dipolaires instantanés [99] obéit à la relation :

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

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



Figure I.10 : Force attractive de London-Van der Waals.

La force d'interaction entre deux sphères matérielles que représente la figure I.11, est la somme de toutes les forces d'interaction de London aux paires constitué d'un atome dans chaque sphère.

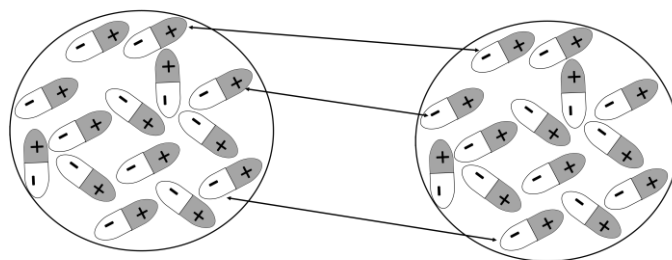


Figure I.11 : Force attractive de London-Van der Waals entre deux sphères matérielles.

Le calcul réalisé par *Hamaker* [100], pour deux sphères identiques de rayon R séparées de r (distance centre à centre) dans le vide conduit à :

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

Où A est la constante de *Hamaker*.

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

$$F_A = -\frac{AR}{12(r-2R)^2} \quad (\text{I.4})$$

I.1.3.2.3. Forces de Coulomb

La loi de Coulomb décrit l'interaction entre deux charges électriques ponctuelles immobiles dans le vide. Soit la charge q_1 , placée dans le point M_1 , et la charge q_2 , placée dans le point M_2 . [97,98]

La force exercée par la charge ponctuelle q_1 sur la charge ponctuelle q_2 a pour expression (Figure I.12) :

$$\vec{F}_{12} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2} \quad (\text{I.5})$$

\vec{F}_{12} Force de Newton (N)

q_1 et q_2 charges en Coulomb (C)

$r_{12} = M_1 M_2$ distance en mètre (m)

$\vec{u}_{1 \rightarrow 2}$ Vecteur unitaire (sans dimension)

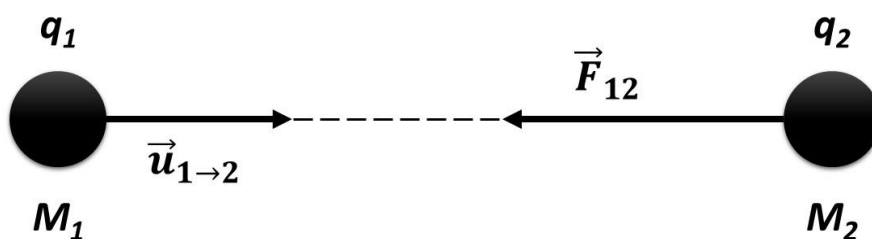


Figure I.12 : Force de Coulomb exercée par la charge q_1 sur la charge q_2 (q_1 et q_2 sont de signes opposés)

La constante k dépend du milieu. Dans le vide elle vaut :

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2, \text{ où } \epsilon_0 \text{ est la permittivité absolue du vide.}$$

Le vecteur unitaire $\vec{u}_{1 \rightarrow 2}$ est orienté de M_1 vers M_2 sur la droite ($M_1 M_2$)

$$\vec{u}_{1 \rightarrow 2} = \frac{\overrightarrow{M_1 M_2}}{M_1 M_2} \quad (\text{I.6})$$

De même, la charge q_1 subit de la part de la charge q_2 la force :

$$\vec{F}_{21} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{2 \rightarrow 1} = -k \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_{12} \quad (\text{I.7})$$

Ce résultat exprime la troisième loi de Newton de la mécanique, aussi appelé principe des actions réciproques :

Deux charges q_1 et q_2 de même signe se repoussent, alors que deux charges q_1 et q_2 de signes contraires s'attirent (Figure I.13). [97]

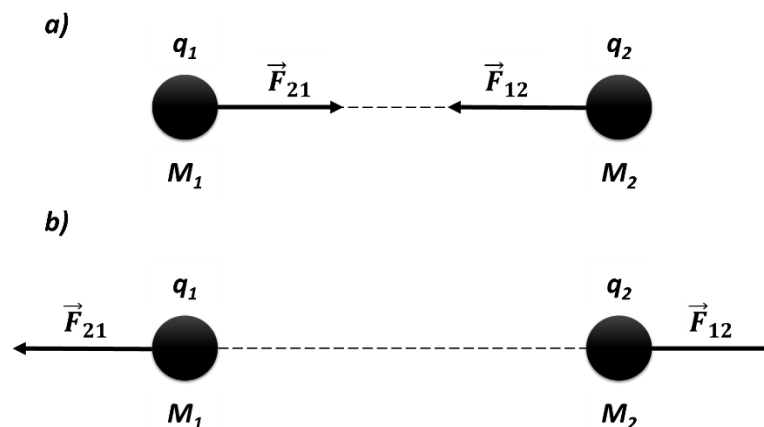


Figure I.13 : Forces de Coulomb exercé par les charges q_1 et q_2 . a) les charge q_1 et q_2 sont de signes opposés. b) les charges q_1 et q_2 sont de même signe.

I.1.3.2.4. Forces aérodynamiques

Lors de l'étude de mouvement des particules dans un procédé de chargement triboélectrique en présence ou en l'absence de champ électrique, il faut étudier les forces aérodynamiques agissant sur ces particules. [9]

Une particule chargée sous un champ électrostatique a pour équation de force la formule suivante :

$$F_i = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad (\text{I.8})$$

F_i : Force d'inertie

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

F_a : Force aérodynamique

F_g : Force gravitationnelle

La force d'inertie F_i est donnée par la relation :

$$F_i = W(\rho_s - K\rho) \frac{dv}{dt} \quad (\text{I.9})$$

Où :

v : vitesse de particule

K : coefficient de forme [101] (pour les particules sphériques $K = 0,5$)

W : volume d'une particule ayant la densité ρ_s

ρ : densité de l'air.

La force aérodynamique s'exprime par la relation :

$$F_a = \frac{C_d \pi R^2 \rho v_r^2}{2} \quad (\text{I.10})$$

C_d : étant en fonction du nombre du Reynolds

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

La force de friction est dépendante de la vitesse. Cette dépendance peut être très compliquée, et seuls les cas spéciaux peuvent être traités analytiquement. À des vitesses très faibles des particules, la résistance de l'air est approximativement proportionnelle à la vitesse et peut être exprimée sous la forme : [9]

$$F_f = -bv \quad (\text{I.11})$$

Où le signe négatif implique qu'il est directement opposé à la vitesse.

I.2. Lit fluidisé

Il existe plusieurs variantes de lits fluidisés, en fonction des applications [36]. Certains dispositifs de cette catégorie sont utilisés pour la charge triboélectrique des matériaux granulaires ou pulvérulents. [37]

Le fonctionnement du lit fluidisé (Figure I.14) dans les processus de triboélectrisation est délimité par la vitesse minimale de fluidisation et la vitesse terminale de chute libre des particules [30].

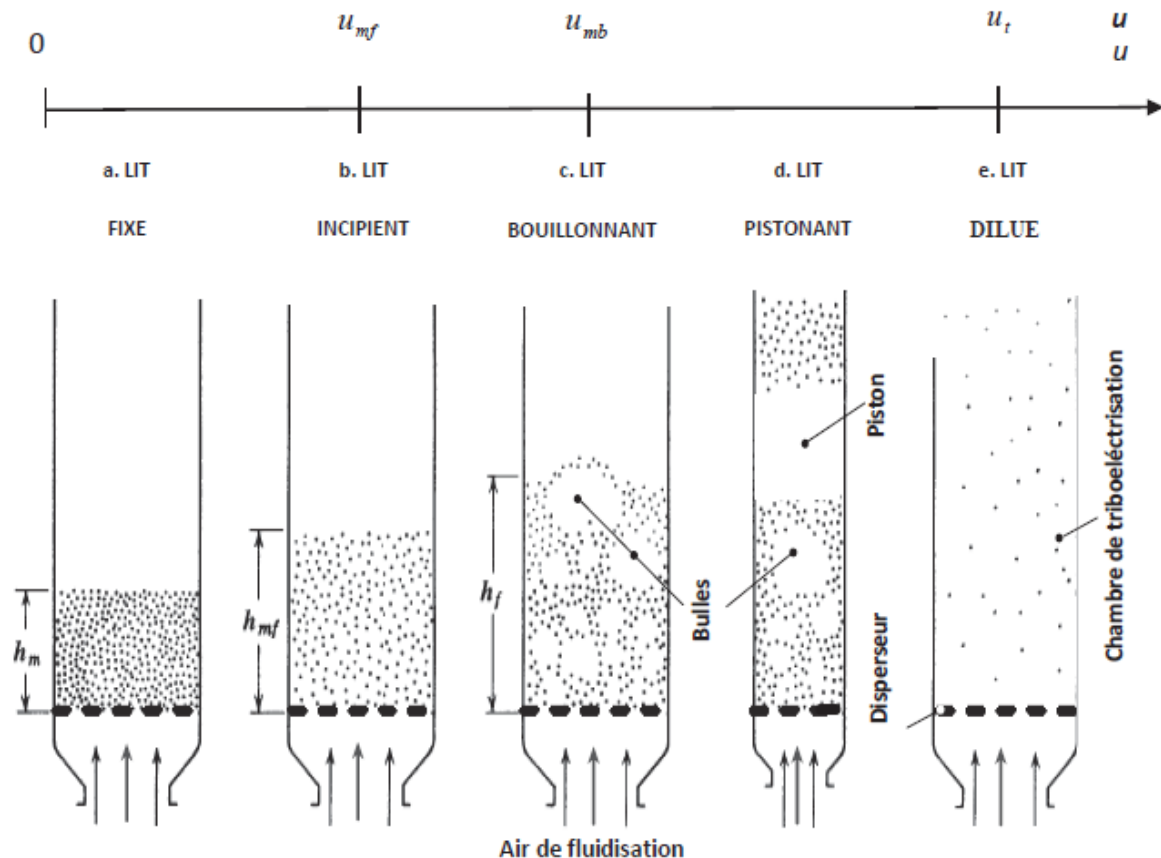


Figure I.14 : Les régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation ; U_{mf} – vitesse minimale de fluidisation ; U_{mb} – vitesse minimale d'apparition des boules ; U_t – vitesse de transport pneumatique.

Le début du processus de triboélectrisation dans les dispositifs à lit fluidisé correspond à la phase de « lit fixe » mais il devient efficace dans les phases appelées « lit bouillonnant » et « fluidisation turbulente », caractérisées par des impacts forts. On constate, expérimentalement, que la fluidisation des matériaux plastiques granulaires dans les phases « lit bouillonnant » et « fluidisation turbulente » est accompagnée par la présence des bulles dans tout le volume du matériau, (qui peuvent se réunir pour former courants gazeux voir zone sans particules) et l'agitation de la suspension ayant l'aspect d'un liquide bouillant. La vitesse minimale de fluidisation U_{mf} , la vitesse terminale de chute libre des particules U_t et la chute de pression du lit fluidisé Δp sont les principaux paramètres de contrôle du lit fluidisé. Un lit fixe de granules de plastique est transformé en état de fluidisation par un courant d'air qui dépasse la vitesse

minimale de fluidisation U_{mf} . Les particules sont maintenues en suspension par le courant d'air. [9]

La chute de pression Δp du lit fluidisé est égale à la différence entre le poids du matériau granulaire F_G et la force d'Archimède, divisée par l'aire de la section droite A_t de la chambre de triboélectrisation :

$$\Delta p = \frac{F_G - F_a}{A_t} = g(\gamma_p - \gamma_a) h (1 - \beta) \quad [\text{Pa}] \quad (\text{I.12})$$

Où : β représente la porosité du lit fluidisé – le rapport entre le volume d'air entre les particules et le volume total du lit fluidisé dont la hauteur est h [m]. ; γ_p - masse volumique du matériau plastique [kg/m³]; γ_a - masse volumique de l'air de fluidisation [kg/m³].

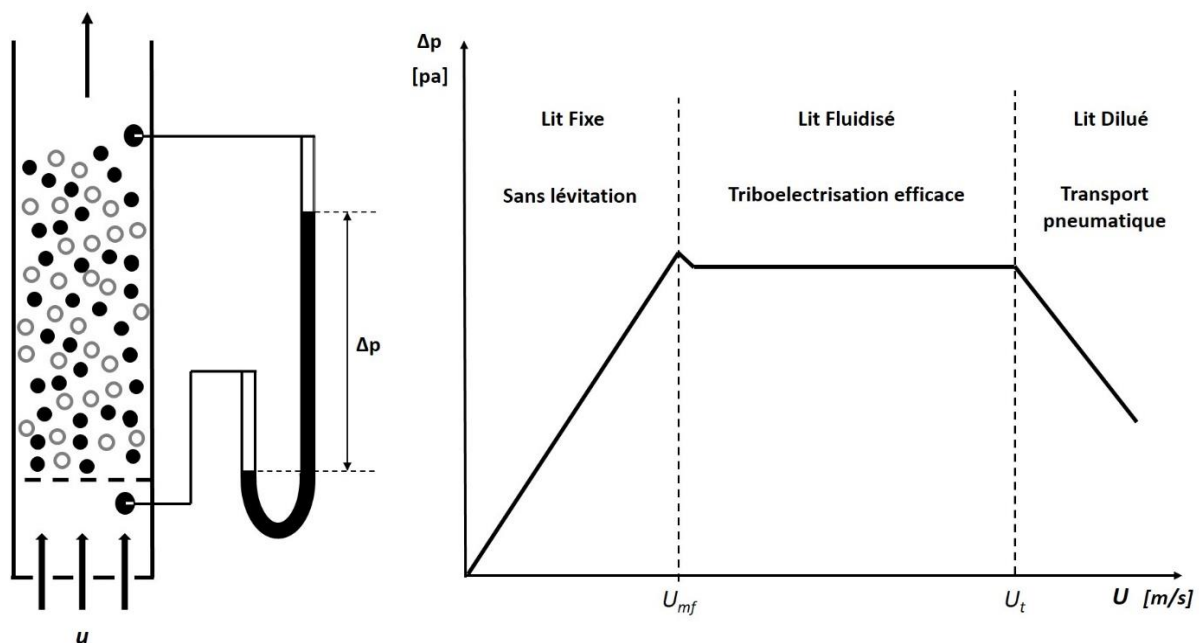


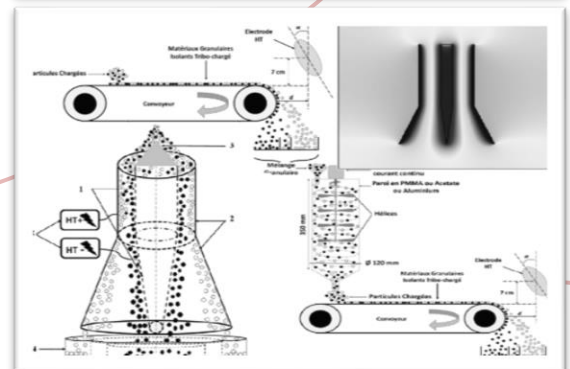
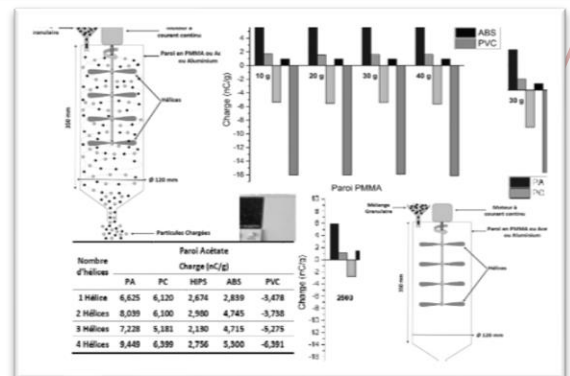
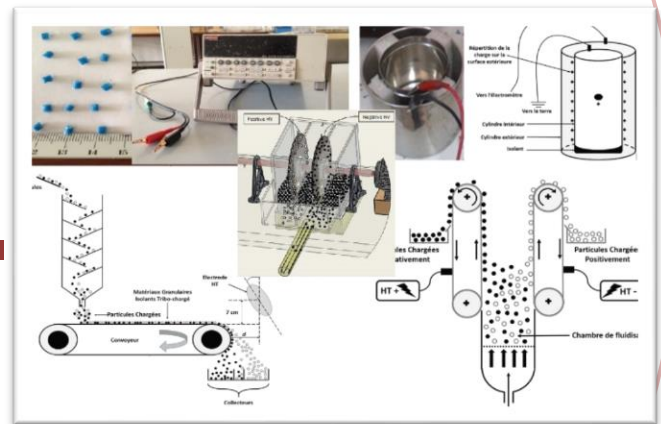
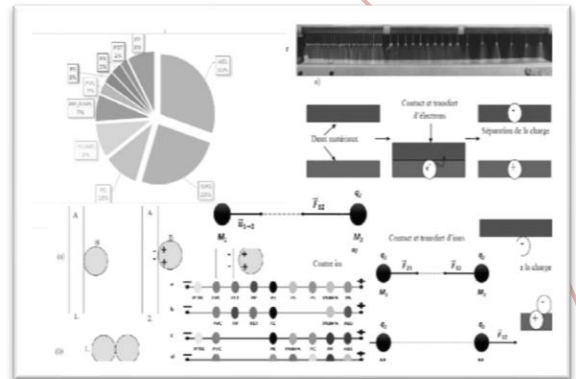
Figure I.15 : Variation de la perte de pression Δp en fonction de la vitesse d'air U pendant les différentes étapes de la fluidisation des matériaux plastiques granulaires [38].

I.3. Conclusion

Les phénomènes tribo-électriques étant extrêmement complexes et mal expliqués, sont difficiles à modéliser, il s'agit de l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux, une approche expérimentale est indispensable à l'étude de nouveaux chargeurs triboélectriques et séparateurs électrostatiques.

Chapitre II

Matériels et Méthodes



Chapitre II

Matériels et Méthodes

Les recherches sur la séparation électrostatique des matériaux isolants ont été réalisées sur plusieurs matériaux granulaires isolants issus des déchets d'équipement électrique et électronique (DEEE), traités par les sociétés APR2, France et CHIALI Tubes, Algérie, matériaux vierges ; PA (Polyamide) et PC (Polycarbonate), et matériaux récupérés issues de broyage des déchets d'équipements électriques et électroniques ; ABS (Acrylonitrile butadiène styrène), HIPS (high-impact polystyrène) et PVC (Polychlorure de vinyle).

II.1. Matériaux

II.1.1. Polyamide (PA) [60,66,67]

Le polyamide est le plus souvent appelé Nylon. Cette désignation indique une fabrication extrudée. La résistance mécanique, la rigidité et le pouvoir amortissant combinés à une excellente résistance à l'usure en font le matériau de référence pour la construction mécanique et l'entretien. Il associe de bonnes propriétés mécaniques, électriques et chimiques. Le polymère de polyamide (nylon) a été commercialisé pour la première fois par DuPont à la suite des importants travaux de recherche menés par W. H. Carothers dans les années 1930, qui menait des recherches approfondies au début sur les polyesters et les polyamides. Le premier polyamide important était le Nylon 66 produit par la réaction de l'acide adipique (un acide dibasique à 6 carbones) et de l'hexaméthylènediamine (une diamine aliphatique à 6 carbones). Plusieurs modifications structurelles avec différentes capacités de température sont devenues disponibles dans le commerce, y compris Nylon 46, 610, 612, 6, 11, etc.

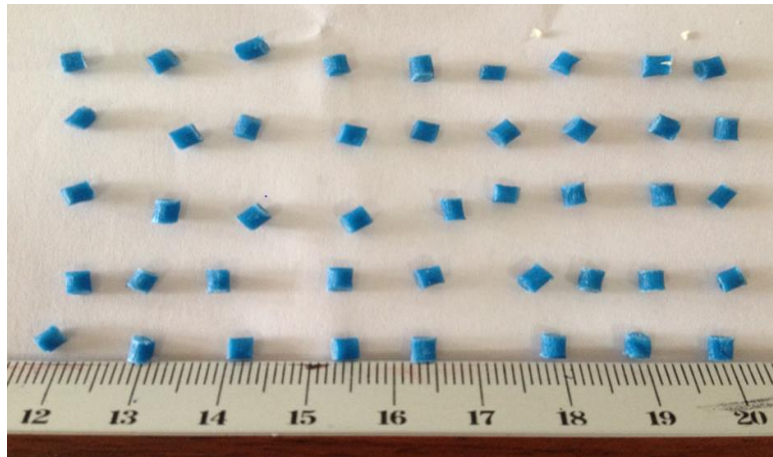


Figure II.1 : Aspect et dimension des granules de Polyamides PA.

Tableau II.1 : Propriétés physique du polyamide PA6.6. [66]

Propriétés physiques	
Couleur	Bleu
Forme	Cylindrique
Taille	Φ 2.5 x 3.4 mm
Masse	20 mg
Densité	1.15 g/cm ³
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 %	2.5 %
Résistance à la traction	80 N/mm ²
T°C d'utilisation en continu	-40/+120 °C
Rigidité diélectrique	15 KV/mm
Résistivité transversale	10 ¹³ Ω.cm

II.1.2. Polycarbonates (PC) [60,66,67,69]

Le polycarbonate est un thermoplastique amorphe qui présente une résistance aux chocs très élevée, une température de déformation sous charge élevée et une bonne résistance mécanique, dans une plage de température entre – 100 et 120°C. Grâce à ces caractéristiques, le polycarbonate convient pour de nombreuses applications : Automobile, Emballages, Appareil ménagers, Equipements électriques et électroniques. Plus récemment un intérêt additionnel a résulté en raison de la faible inflammabilité du polycarbonate.

Les polycarbonates (PC) ont d'abord été préparés par Einhorn en 1898 et ont fait l'objet de recherches approfondies jusqu'en 1930 où ils ont été abandonnés. La recherche a ensuite commencé au milieu des années 1950 par General Electric et en 1958, la popularité du polycarbonate s'est étendue à une communauté mondiale. Aujourd'hui, environ 75% du marché du polycarbonate est détenu par SABIC Innovative Plastics et Covestro (anciennement Bayer Material Science).

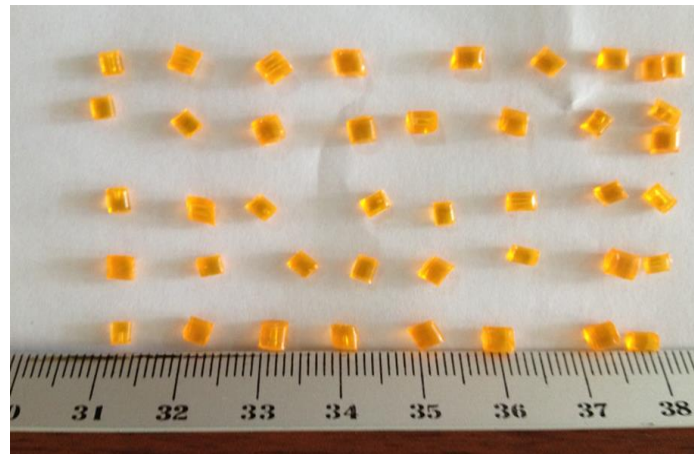


Figure II.2 : Aspect et dimension des granules de Polycarbonates PC.

Tableau II.2 : Propriétés physique du polycarbonate PC. [66]

Propriétés physiques	
Couleur	Orange
Forme	Cylindrique
Taille	Φ 3 x 3.6 mm
Masse	25 mg
Densité	1.2 g/cm ³
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 %	0.15 %
Résistance à la traction	70 N/mm ²
T°C d'utilisation en continu	-60/+115 °C
Rigidité diélectrique	30 KV/mm
Résistivité transversale	10 ¹⁵ Ω.cm

II.1.3. Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS) [60,66]

L'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) est un polymère amorphe fabriqué par émulsion ou polymérisation en masse d'acrylonitrile et de styrène en présence de polybutadiène. Les propriétés les plus importantes de l'ABS sont la résistance aux chocs, la dureté et une bonne rigidité. L'ABS se caractérise par sa bonne résistance à la déformation thermique et aux chocs même à basse température. Il est dur, résistant à l'abrasion et présente une bonne stabilité dimensionnelle.

Les résines ABS représentent l'un des mélanges les plus précieux de résine et d'élastomère et leur succès est dû aux excellentes propriétés provenant de cette alliance. Leurs propriétés fondamentales étant la ténacité, la résistance aux chocs et la dureté superficielle, elles sont surtout employées dans la fabrication de meubles, éléments pour l'industrie automobile, châssis de téléviseurs, panneaux et autres.



Figure II.3 : Aspect et dimension des granules d'Acrylonitrile Butadiène Styrène ABS.

Tableau II.3 : Propriétés physique d'Acrylonitrile Butadiène Styrène ABS. [66]

Propriétés physiques	
Couleur	Noir
Forme	Aléatoire
Taille	$\Phi 2.5 \times 3.4$ mm
Masse	20 mg
Densité	1.05 g/cm ³
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 %	0.3-0.7 %
Résistance à la traction	41-45 N/mm ²
T°C d'utilisation en continu	-40/+100 °C
Rigidité diélectrique	20-25 KV/mm
Résistivité transversale	10 ¹⁵ Ω .cm

II.1.4. High Impact Polystyrène (HIPS) [68]

Le HIPS appartient à la famille des polystyrènes compacté à haute densité, il est à faible coût et facile à usiner, il est souvent spécifié pour des applications structurales de faible résistance lorsque la résistance aux chocs, l'usinabilité, et le faible coût sont nécessaires. Il est fréquemment utilisé pour l'usinage des prototypes de pré-production, car il a une excellente stabilité dimensionnelle et facile à fabriquer. Il est généralement utilisé pour des appareils ménagers, des composants électriques et électroniques.



Figure II.4 : Aspect et dimension des granules de polystyrène à fort impact HIPS.

Tableau II.4: Propriétés physique de polystyrène à fort impact HIPS. [66]

Propriétés physiques	
Couleur	Blanc
Forme	Aléatoire
Taille	$\Phi 2.5 \times 3.4$ mm
Masse	20 mg
Densité	1.04 g/cm ³
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 %	0.05-0.6 %
Résistance à la traction	40 N/mm ²
T°C d'utilisation en continu	-40/+75 °C
Rigidité diélectrique	40 KV/mm
Résistivité transversale	10 ¹⁷ Ω .cm

II.1.5. Polychlorure de vinyle (PVC) [66]

Le PVC est un thermoplastique qui aujourd'hui est la matière plastique qui couvre le domaine d'application le plus vaste, de l'automobile aux emballages, des tuyaux pour le bâtiment à l'industrie du vêtement, il se présente sous des formes très différentes. La raison majeure de cette universalité d'usage du PVC réside dans les performances de ses propriétés physico-chimiques, et donc son aptitude à répondre à des exigences très diverses.

Le PVC présente de bonnes propriétés de protection et une résistance aux UV mais une plage de température opérationnelle limitée, devenant fragile à 5°C (à moins d'être modifié) et une température d'utilisation maximum de 50°C.

La teneur en chlore du PVC en fait a un matériau difficilement inflammable. La température nécessaire pour provoquer l'inflammation du PVC est supérieure de 150°C à la température de la flamme du bois. Dans tous les cas c'est un matériau auto-extinguible. Grâce à ces caractéristiques, le Polychlorure de vinyle convient pour de nombreuses applications : emballages, produits de loisirs, produits de construction, conduites et tuyaux, produits médicaux, couvertures, isolations et gaines et pour les applications automobiles.



Figure II.5 : Aspect et dimension des granules de polychlorure de vinyle PVC.

Tableau II.5 : Propriétés physique de polychlorure de vinyle PVC. [67,70]

Propriétés physiques	
Couleur	Gris
Forme	Aléatoire
Taille	$\Phi 2.5 \times 3$ mm
Masse	25 mg
Densité	1.45 g/cm ³
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 %	0.2 %
T°C d'utilisation en continu	0/+60 °C
Rigidité diélectrique	39 KV/mm
Résistivité transversale	$>10^{13}$ Ω .cm

II.1.6. Polychlorure de vinyle pulvérulent (PVC en poudre)

L'origine de la matière est simplement le broyage fin d'un PVC blanc Vierge et d'un PVC gris recyclé.

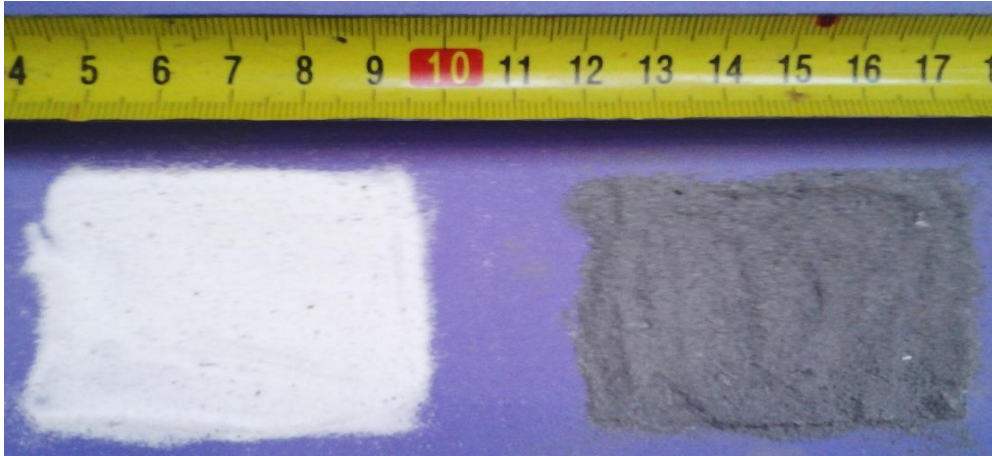


Figure II.6 : Poudre blanche (PVC pur) et Poudre grise (PVC recyclé)

II.2. Techniques de mesure

II.2.1. Mesure de la charge

Il est primordial de disposer de méthodes permettant de qualifier et/ou quantifier la polarité et le niveau des charges électrostatiques présentes au sein des particules. Cet objectif peut être atteint par différents dispositifs parmi eux la cage de Faraday [75].

Une cage de Faraday [71,72,73] ou un bouclier de Faraday est une enceinte formée par un matériau conducteur, ou par une maille de ce matériau. Une telle enceinte est utilisée pour bloquer les champs électriques statiques externes. Les cages de Faraday sont nommées d'après le scientifique anglais Michael Faraday, qui les a inventées en 1836. L'opération de la cage de Faraday dépend du fait qu'un champ électrique statique externe amènera les charges électriques dans le matériel conducteur de la cage à se redistribuer afin d'annuler l'effet champ à l'intérieur de la cage. Ce phénomène est utilisé, par exemple, pour protéger les équipements électroniques contre les coups de foudre et les autres décharges électrostatiques.

Lorsque la cage de faraday est utilisée pour la mesure, elle est constituée de deux cylindres concentriques conducteurs séparés par un isolant, le cylindre extérieur est relié à la terre qui fait office de blindage pour réduire les perturbations électriques extérieures et le second est connecté à un électromètre pour mesurer la charge électrique de l'objet introduit dans la cage. [71]

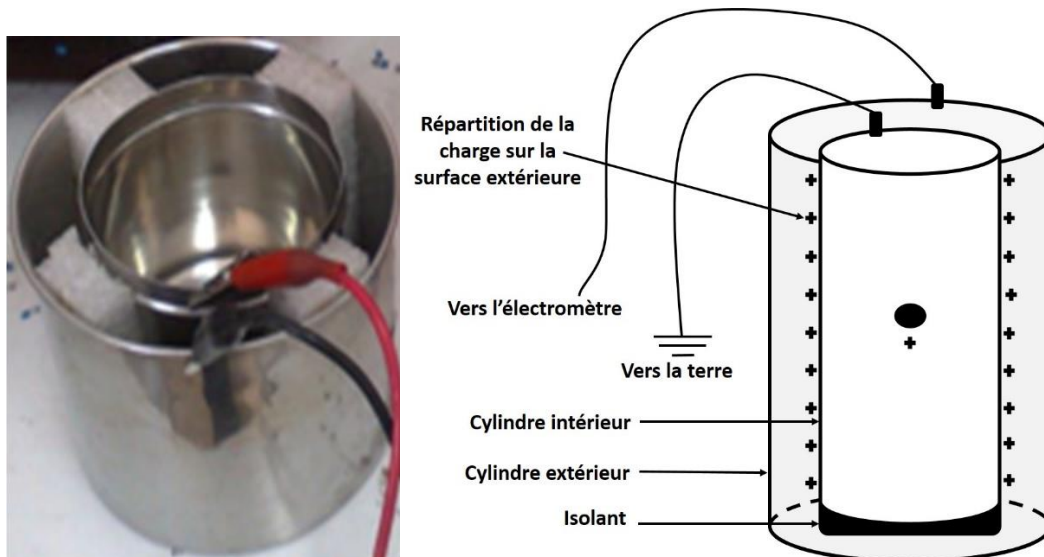


Figure II.7 : Aspect de la cage de Faraday utilisée pour mesurer la charge électrique : Photo du dispositif (a) et représentation schématique (b).

La mesure de la charge électrique acquise a été effectuée à l'aide d'un électromètre numérique Keithley model 6514 [76] (Figure II.8) qui possède les caractéristiques suivantes :

- Mesure de charge de 10fC à $20\mu\text{C}$.
- Mesure Rapide - jusqu'à 1200 mesures/seconde.
- Interfaces facilement avec les commutateurs, les ordinateurs et les gestionnaires de composants.
- Annule les décalages de tension et courant facilement.
- Impédance d'entrée $200\text{T}\Omega$ pour les mesures de tension.

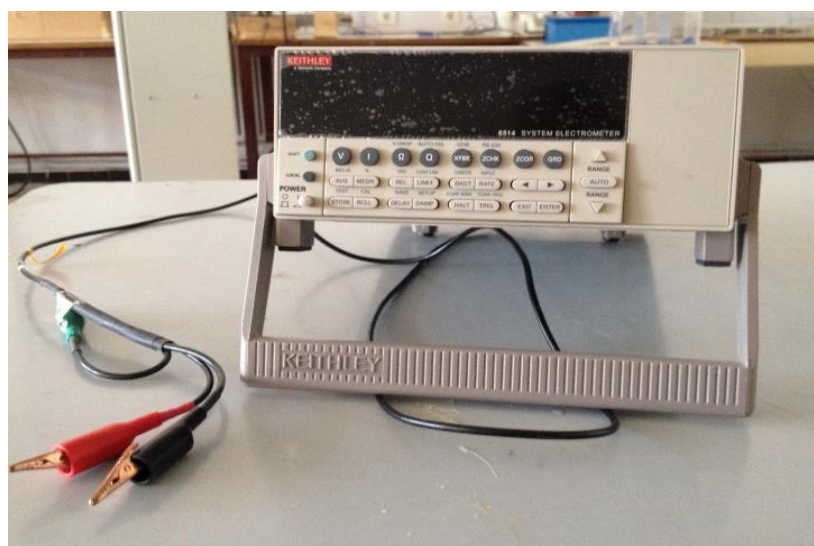


Figure II.8 : Electromètre Keithley model 6514.

II.2.2. Mesure de l'humidité relative

La mesure de l'humidité relative est un élément essentiel et un des paramètres principaux avant chaque série d'expériences pour une étude expérimentale en utilisant un thermo hygromètre numérique [74] (Amprobe TH-3) (Figure II.9), qui présente les caractéristiques principales suivantes :

- Double fonction : mesure d'humidité et de température.
- Sonde allongée qui permet d'effectuer des mesures à des endroits difficiles d'accès.
- Mesure de la température en degré Celsius et en fahrenheit.
- Mémoire de mesures intégrées (Data Hold).
- Mémorisation des valeurs minimales et maximales.
- Coupure automatique de l'alimentation.



Figure II.9 : Thermo hygromètre numérique Amprobe (TH-3).

II.2.3. Mesure de la masse granulaire

La masse granulaire est mesurée avant chaque expérience à l'aide d'une balance électronique de précision de marque CAS MWP-600H [77] qui présente les caractéristiques suivantes :

- Haute précision
- 8 unités de mesure
- Fonction comptage, pesage et pourcentage
- Affichage rétroéclairé
- Interface RS-232
- Alarme de surcharge
- Mise hors tension automatique

- Calibration automatique
- Capacité x précision : 600 x 0.01 g.



Figure II.10 : Balance numérique CAS MWP-600H.

II.3. Dispositif de charge

II.3.1. Dispositif à vibration

Ce dispositif a été développé par *Blajan and al* [29] au sein du laboratoire d'électrostatique d'Angoulême en France. L'idée consiste à charger le matériau granulaire par glissement dans les canaux en zigzag mis en mouvements vibratoires [25, 28] sur les deux axes X et Y. le dispositif se compose d'un moteur à vitesse variable, couplé à un bac par un mécanisme bielle à plusieurs positions. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif. En changeant la vitesse du moteur, il est possible de modifier le mouvement oscillant du dispositif de charge.

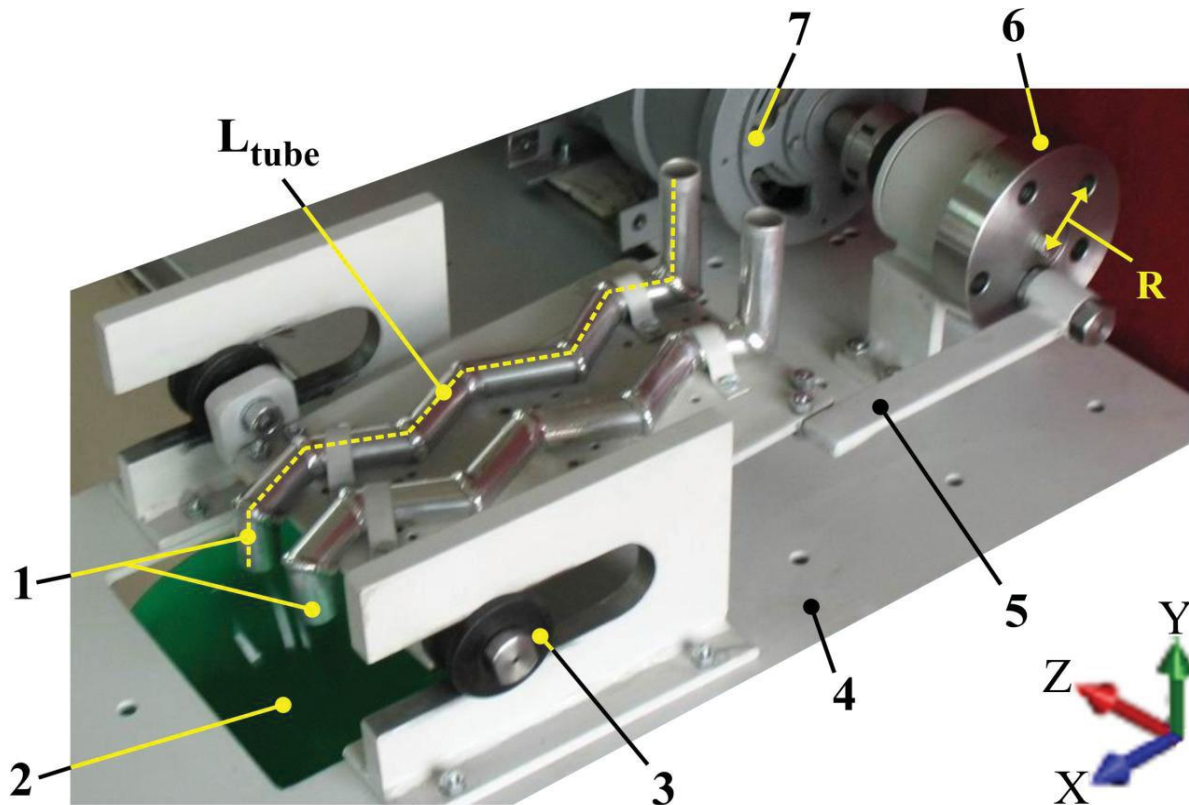


Figure II.11 : Dispositif à vibrations ; 1: tubes de charge; 2: sortie des particules chargées; 3: glissière; 4: support; 5: bielle; 6: manivelle; 7: moteur électrique; R: rayon; X, Y, Z: direction du mouvement des particules ; L_{tube} : longueur du tube.[29]

II.3.2. Dispositif à cylindre rotatif

Le dispositif consiste en un cylindre tournant où les particules entrent d'un côté du cylindre et sortent de l'autre côté totalement chargées, la rotation du cylindre à une vitesse bien définie provoque des collisions à l'intérieur du cylindre entre les particules et entre les particules et les parois, comme l'explique si bien la figure II.12 qui résume le fonctionnement du chargement triboélectrique par cylindre rotatif. [24.30]

Un flux de matériau granulaire isolant est introduit dans le cylindre en rotation où à l'intérieur duquel les particules culbutent ce qui engendre leur chargement par contacts répétés : c'est le phénomène de triboélectrisation.

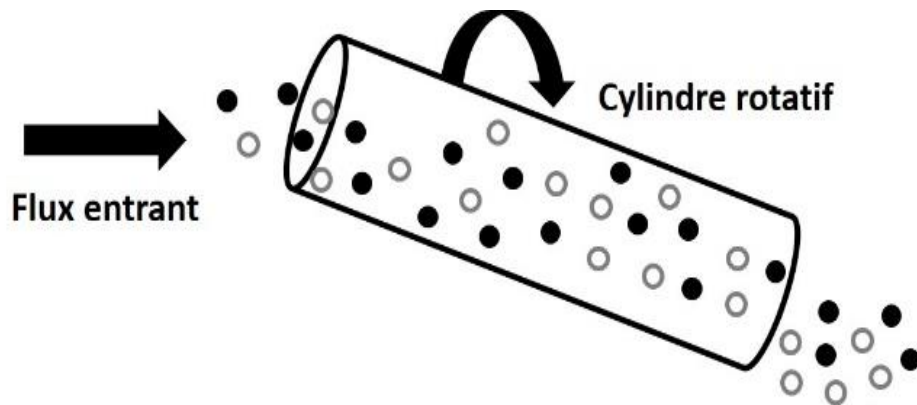


Figure II.12: Représentation schématique du chargement triboélectrique par cylindre tournant.

II.3.3. Dispositif à ventilateur

Le dispositif consiste en une chambre cylindrique en polyvinyle chlorure (PVC). A son extrémité inférieure, la chambre est munie d'une hélice coaxiale, entraînée par un moteur électrique à courant continu à vitesse variable. Ce dispositif entraîne les matériaux granulaires en un mouvement hélicoïdal qui est censé favoriser leur charge triboélectrique par collision entre granulés, entre granulés et hélice et collision granules et paroi. Le signe et l'ampleur de la charge de chaque granule sont déterminés par l'action combinée de ces trois mécanismes physiques comme l'explique si bien la figure II.13 qui résume le fonctionnement du dispositif à chargement par hélice. [34]

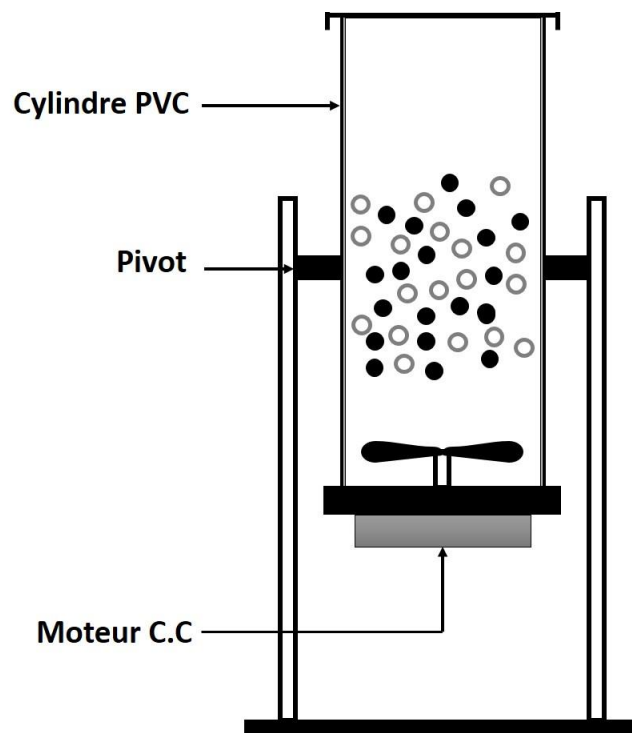


Figure II.13 : Représentation schématique du dispositif d'un chargement par ventilateur.

II.3.4. Dispositif à cyclone

Le dispositif consiste en une chambre cylindrique avec une section conique à son extrémité inférieure (Figure II.14), à son supérieur un ventilateur dans le rôle est de souffler un air qui va transporter les particules dans un vent cyclonique généré par ce souffle d'air, à l'intérieur du cylindres les particules subissent un frottement continu avec la paroi, qui est le mécanisme physique principal de chargement pour la charge acquise pas ces mêmes particules. [35,39]

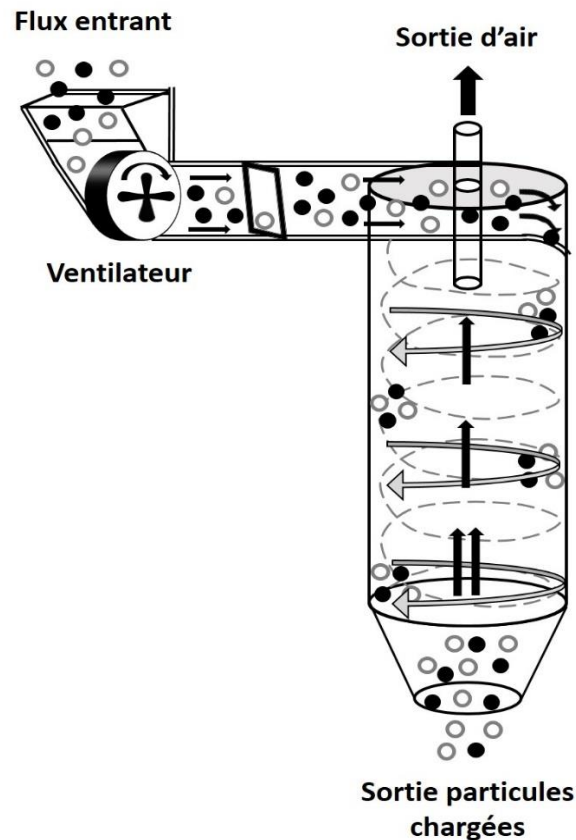


Figure II.14 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone. [39]

II.4. Association de certains chargeurs triboélectrique avec les séparateurs électrostatiques les plus répandus pour les mélanges de matériaux granulaires isolants

La séparation électrostatique [40,51] est connue comme une technologie efficace pour séparer les mélanges granulaires isolants en raison de son faible coût et de sa facilité de fonctionnement. Les matériaux réutilisables isolants sont chargés par triboélectrification et directement injectés dans un dispositif de séparation électrostatique pour la séparation.

Il existe une multitude d'installations destinées à la séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants par triboélectrisation dont l'efficacité a déjà été prouvée par le passé. On cite le séparateur à : tapis roulant, à chute libre, à tambour, à double tambour, à deux bandes transporteuses conductrices, à disques, à lit fluidisé ; qui constituent la panoplie la plus répandue dans le secteur.

II.4.1. Séparateur triboélectrique à tapis roulant associé à un chargeur triboélectrique statique

Le dispositif est constitué de deux parties, la première pour le chargement triboélectrique du mélange granulaire isolant par un chargement triboélectrique statique, et la deuxième d'un séparateur à tapis roulant à bande transporteuse (figure II.15) à son extrémité on place une électrode haute tension, possédant des degrés de liberté longitudinale, transversale et axiale et en bas du tapis on dispose de bacs de récupération. L'ensemble du dispositif est multifactoriel et nécessite beaucoup d'expériences [34,42] pour optimiser le rendement, car les différents facteurs interagissent entre eux, la représentation schématique de la figure II.15 définit le mode de fonctionnement de cette installation.

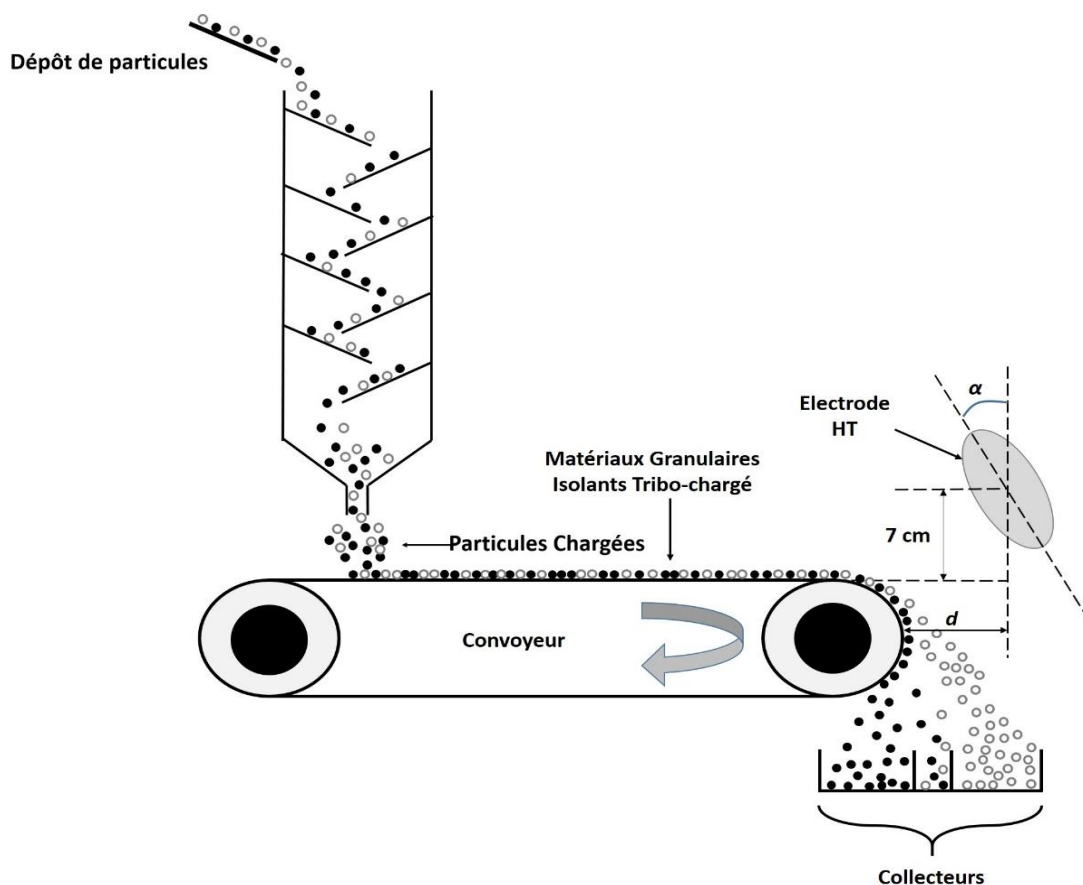


Figure II.15 : Représentation schématique d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant.

Les particules tombent en chute verticale et glissent dans le dispositif de chargement statique en forme d'enceinte parallélépipédique isolante avec des parois inclinées et détachables, le chargement s'effectue par frottement avec les parois. A leurs sorties du dispositif de chargement les particules tombent sur la bande transporteuse du séparateur où elles sont transportées jusqu'à la zone de séparation.

II.4.2. Séparateur à chute libre

Le séparateur à chute libre fait partie des installations les plus emblématiques dans ce domaine de récupération qui a constitué l'élément moteur de propulsion et de développement de ce type d'installations.

Il est composé de deux plaques conductrices disposées en « V » inversées dont l'inclinaison de l'une par rapport à l'autre est réglable selon le type de matériaux à séparer. [43,44]

Ce type de séparateur a été associé à :

a) Chargeur triboélectrique à cylindre tournant

Un flux de matériau granulaire isolant est introduit dans le cylindre en rotation où à l'intérieur duquel les particules culbutent ce qui engendre leur chargement par contacts répétés. A leurs sorties du cylindre rotatif les particules chargées tombent directement dans un séparateur électrostatique à chute libre où un fort champ électrique horizontal produit entre deux électrodes soumises à une haute tension de polarité opposées. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute suite au champ intense qu'elles traversent et chaque type de matériaux prend un côté dans les bacs de récupération. [43,44]

Les particules chargées négativement sont attirées par l'électrode haute tension positive et celles chargées positivement sont attirées par l'électrode haute tension négative.

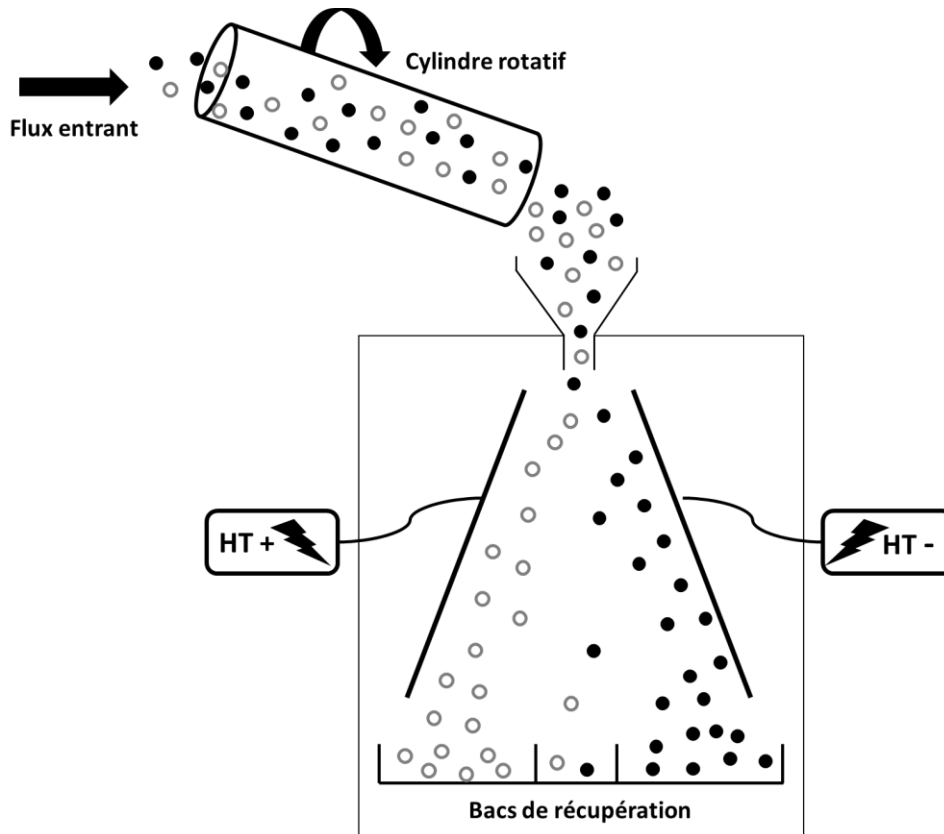


Figure II.16 : Représentation schématique d'un séparateur à chute libre associé à un chargeur à cylindre tournant.

b) Chargeur à cyclone

Ce dispositif se compose d'un tribo chargeur à cyclone qui va transporter les particules dans un vent cyclonique généré par un souffle d'air à l'aide d'un ventilateur à son extrémité supérieure, à l'intérieur du cylindre les particules subissent un frottement continu avec la paroi et avec d'autres particules [35,39,63]. A sa sortie du dispositif de chargement par cyclone le mélange de granules de plastique chargés passe par un séparateur à chute libre à électrodes plates avec un champ électrique intense où est réalisée la séparation électrostatique. Les particules chargées positivement sont attirées par l'électrode négative et les particules chargées négativement sont attirées par l'électrode positive.

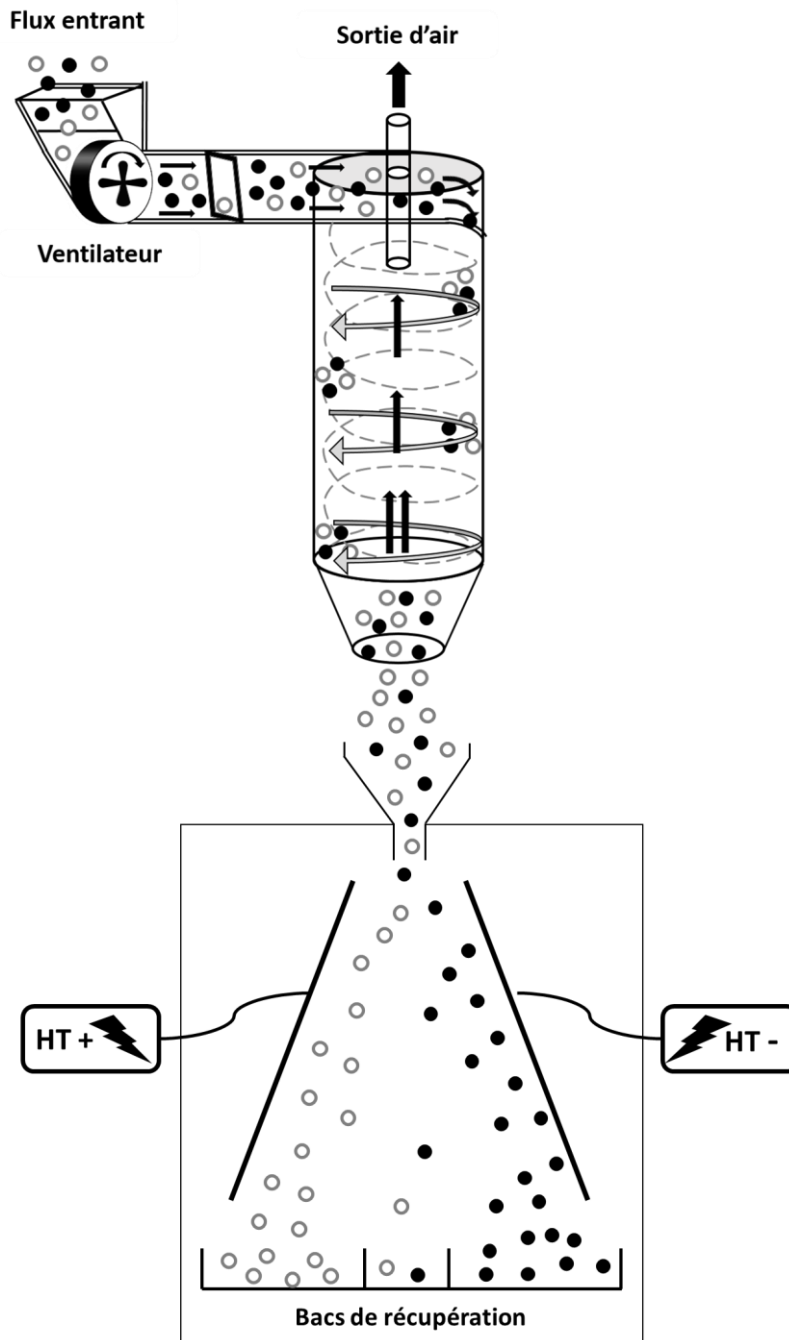


Figure II.17 : Représentation schématique d'un séparateur à chute libre associé à un chargeur cyclonique.

c) Séparateur électrostatique à chute libre à lit fluidisé

Le séparateur électrostatique à chute libre TESS (TriboElectroStatic Separator) présenté sur la figure II.18 a été conçu pour la recherche fondamentale et applicative dans le domaine de la triboélectrisation, de la séparation des matériaux granulaires plastiques et de la purification des minerais. [36,49,54,96] Il est composé de deux parties distinctes :

- D'une chambre de fluidisation où les mélanges granulaires sont mis et subissent un chargement triboélectrique à l'aide du flux d'air injecté, une fois chargées les particules sortent vers le séparateur à chute libre à travers un clapet commandé.
- D'un séparateur à chute libre (à plaque verticale) où les deux électrodes sont soumises à une haute tension continue de polarités opposées et des bacs de récupération des produits. L'ensemble est mis dans une enceinte en plexiglas transparente permettant de visualiser le processus de séparation.

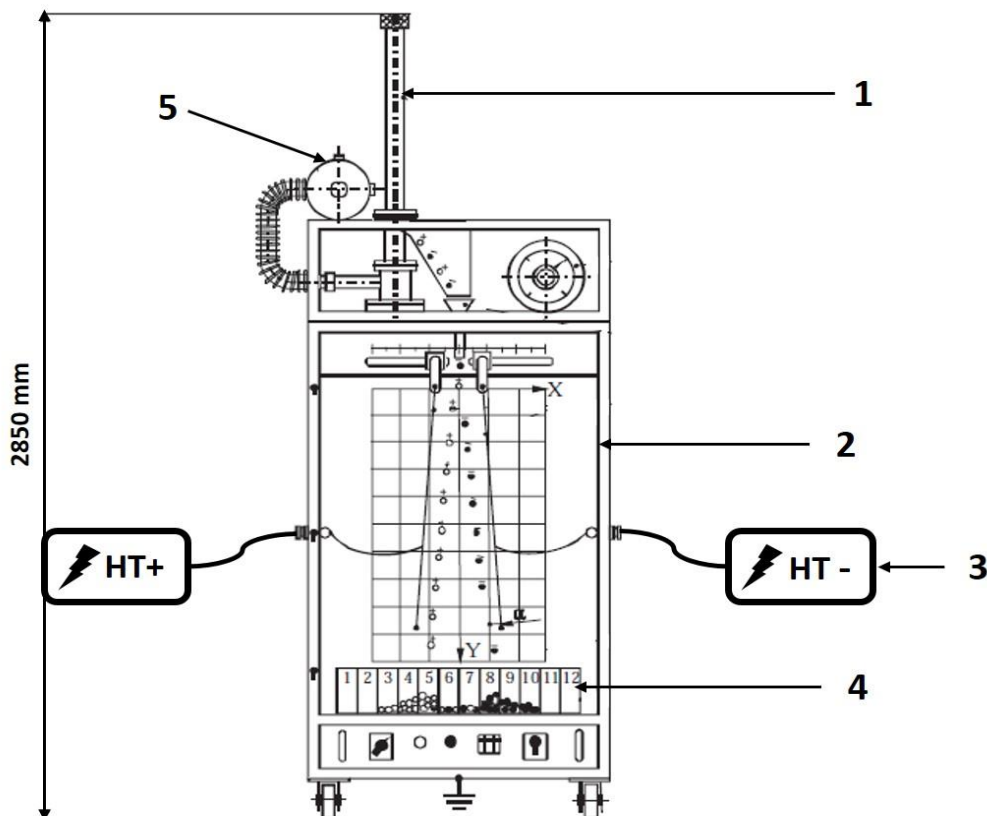


Figure II.18 : Représentation schématique du séparateur électrostatique à chute libre à lit fluidisé.

d) Séparateur à chute libre Carpco

Le séparateur Carpco [61,62] (Figure II.19), réalisé par la société américaine CARPCO est un séparateur tribo électrostatique à chute libre, de grande capacité, pour la séparation de deux ou plusieurs matériaux. Il se base sur l'introduction du mélange granulaire isolant dans un champ électrique intense généré par deux électrodes cylindriques rotatives de polarités opposées ; l'une attire les particules chargées positivement et l'autre attire les particules chargées négativement. Le nouveau design de cette installation est facilement adaptable aux

besoins des applications, notamment à la séparation des minerais et des plastiques dont la taille varie de 1 mm à 1 cm). Le séparateur utilise un champ électrostatique de 120 kV, produit par deux sources variables de haute tension, ajustables dans la gamme 0-60 kV.

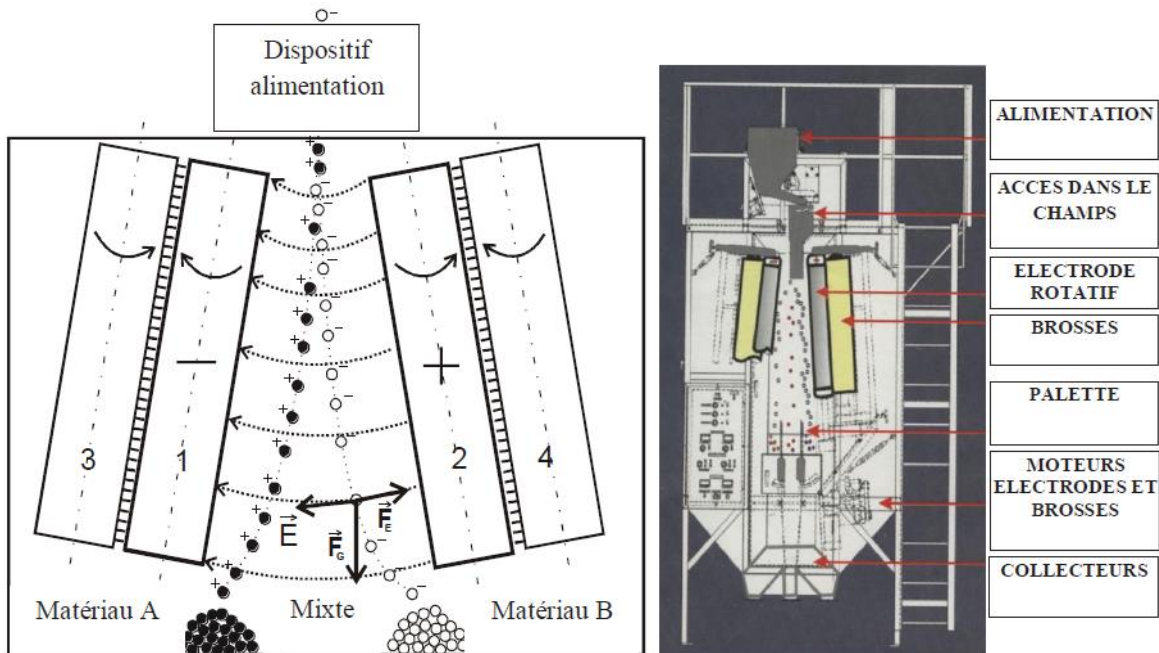


Figure II.19 : Représentation schématique d'un séparateur à chute libre Carpco.

II.4.3. Séparateurs à lit fluidisé

Les séparateurs à lit fluidisé sont conçus pour trier les mélanges granulaires de matériaux isolants dans un lit fluidisé soumis à un champ électrique perpendiculaire à la direction de l'air de fluidisation [46], l'avantage de ces dispositifs est la simultanéité des deux opérations qui sont le chargement triboélectrique par collisions entre particules dans le lit fluidisé et la séparation électrostatique de ces particules chargées dans un champ électrique intense généré par deux électrodes reliées à deux sources haute tension continues opposées. Les particules chargées négativement sont attirées vers l'électrode positive et ceux chargés positivement sont attirés vers l'électrode négative.

a) Dispositif de triboélectrisation à faible débit à électrode verticale

Ce dispositif est constitué de deux parties, d'un prisme rectangulaire (115 mm x 85 mm x 400 mm), avec deux parois verticales opposées en polycarbonate, les deux autres se composant de plaques en aluminium reliées à deux alimentations haute tension continue réglables de

polarité positive et négative, la seconde partie forme la chambre d'air en forme de cube en PMMA dont le rôle principal est la diffusion et l'uniformisation de l'air. [47,52,53]

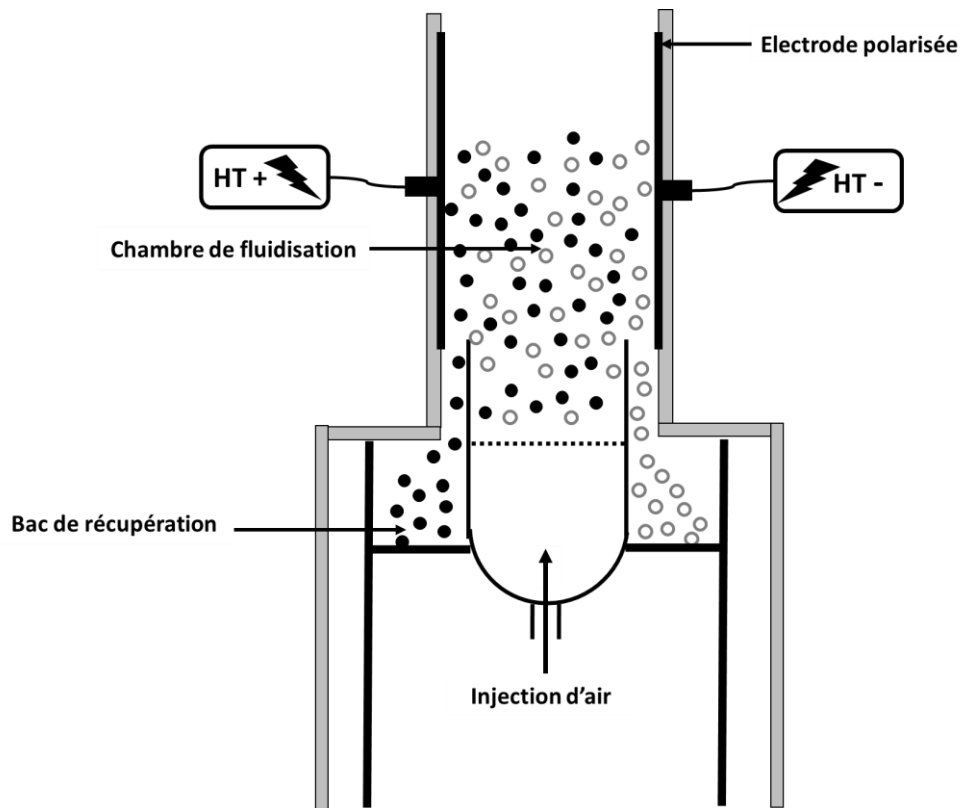


Figure II.20 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales.

b) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes conductrices

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux convoyeurs brevetés en 2010 a été conçu par *L. Calin* et *L. Dascalescu* [55] pour trier les mélanges granulaires de matériaux isolants dans un lit fluidisé soumis à un champ électrique perpendiculaire à la direction de l'air de fluidisation. Le prototype a prouvé son efficacité pour la séparation des granulés isolants ≤ 2 mm, atteignant des taux de récupération excellents. Ses performances étaient moins satisfaisantes pour les particules plus grandes (2 à 4,5 mm). En 2014 *M. Miloudi and al.* [46] ont contribué à l'amélioration de ce dispositif avec une nouvelle approche qui consiste à changer la position des bandes conductrices haute tension qui étaient inclinées au début et au changement de position du lit fluidisé par rapport aux électrodes de convoyeur, pour augmenter le temps de séjour des matériaux granulaires et donc la quantité de charge électrique acquise par chaque particule.

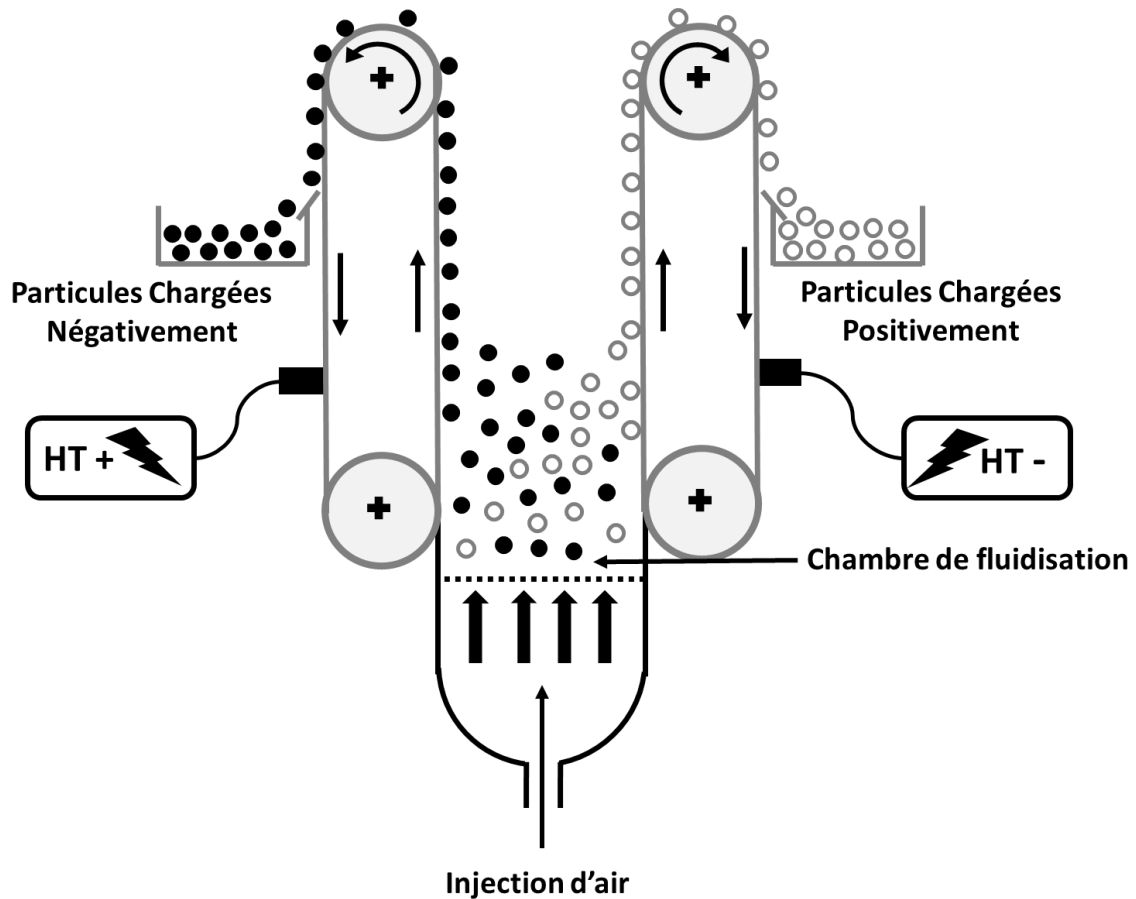


Figure II.21 : Représentation schématique du séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes conductrices.

c) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à double tambours

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes conçu au laboratoire IRECOM, de l'université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, est présenté sur les Figures II.22 et II.23. Le mélange pulvérulent ou granuleux est introduit dans la chambre de fluidisation qui sert aussi de chambre de séparation. Celle-ci a les dimensions de $23 \times 8 \times 7$ cm³, de parois en PMMA transparent. L'injection de l'air est faite à vitesse variable par une soufflante d'une puissance nominale de 1,1 kW. [56,57,59]

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

produits séparés sont récupérés dans les deux bacs collecteurs placés de part et d'autre de la chambre de séparation [91].

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

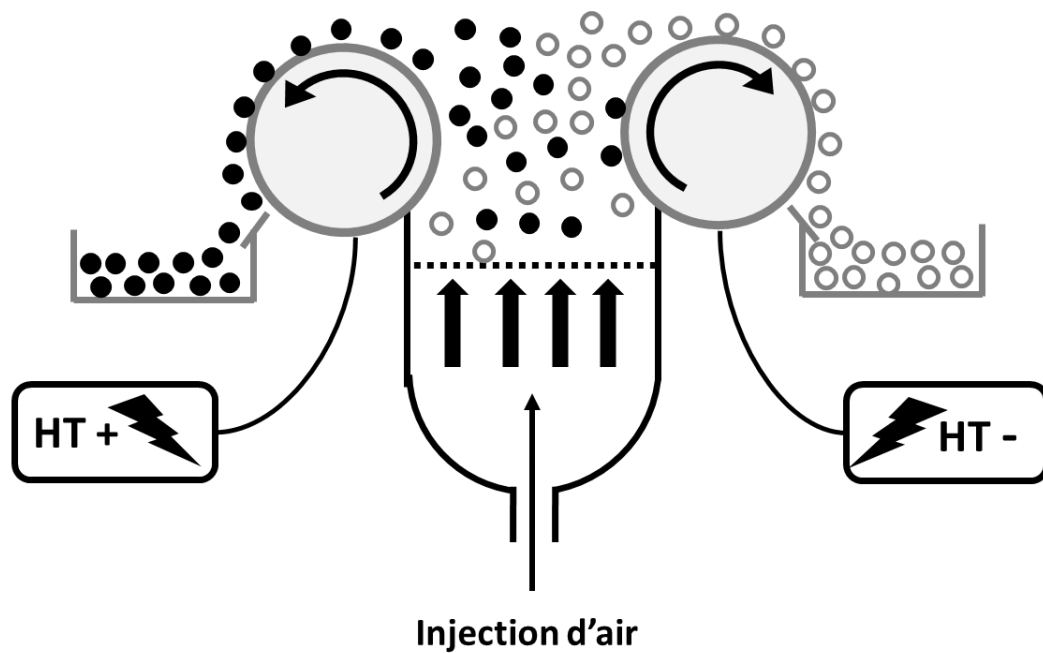


Figure II.22 : Représentation schématique du séparateur tribo-aéro-électrostatique à tambours tournants.

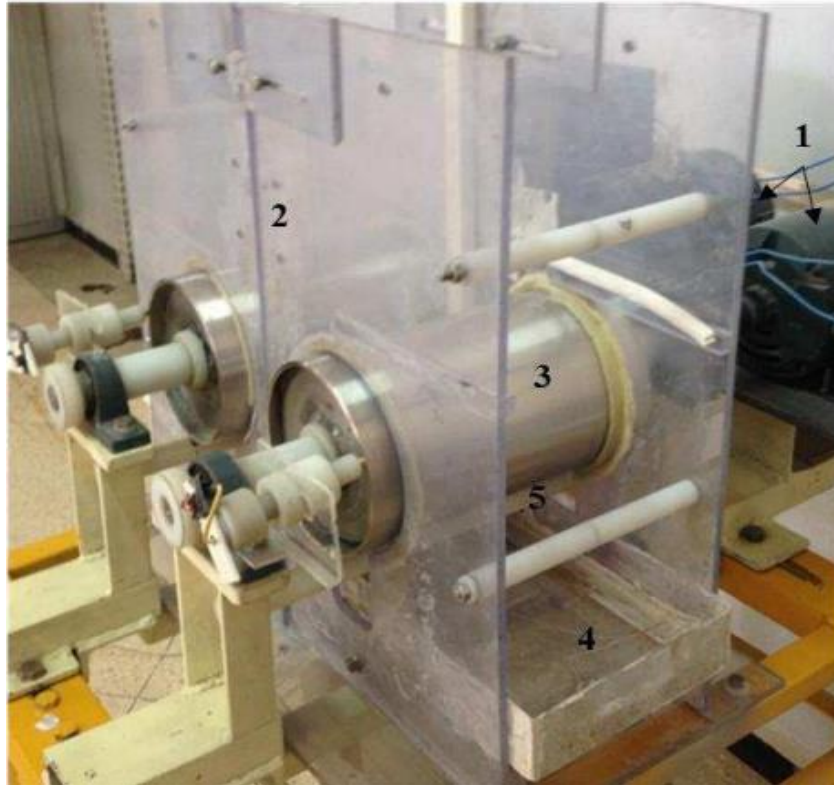


Figure II.23 : Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux tambours tournants ;
1 : Moteur DC ; 2 : Chambre de séparation ; 3 : Electrodes cylindriques tournantes ; 4 : Bacs
collecteur, 5 : Racleurs [91].

d) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants

Le séparateur représenté dans la figure II.24, a été conçu et réalisé au niveau du laboratoire APELEC de l'université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés, il se compose d'une chambre de séparation fait de parois en PMMA (21 x 22,5 x 18 cm) où à l'intérieur le matériau granulaire est introduit dans le lit fluidisé généré par l'injection de l'air à une vitesse variable. Un champ électrique est généré entre deux électrodes en disque d'acier rotatif (diamètre : 22 cm, épaisseur : 4,0 mm) distancées à un intervalle variable allant de 4 à 12 cm et immergées dans le lit fluidisé. Les disques sont alimentés à partir de deux alimentations haute tension de polarités opposées et entraînés à vitesse variable par un moteur à courant continu. Les particules sont attirées par des électrodes de polarités opposées, et collectées dans deux boîtes placées de part et d'autre de la chambre de séparation. Cette installation est particulièrement adaptée à la séparation des particules de plastiques fines. [58]

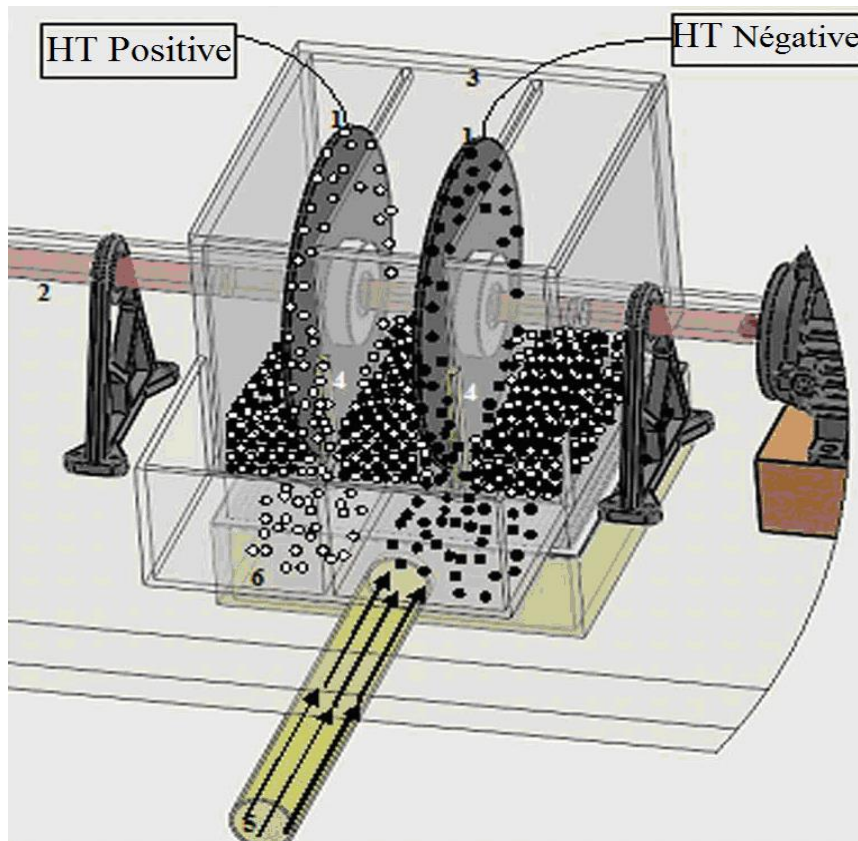


Figure II.24 : Représentation schématique du séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants. [58]

e) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages

L'installation est composée de deux étages superposés, détachables, attachés à un même support vertical. Le séparateur tribo-aéro-électrostatique, situé à l'étage supérieur, est une enceinte parallélépipédique (hauteur : 500 mm ; largeur : 130 mm ; profondeur : 110 mm), ayant deux parois transparentes, afin de permettre la visualisation des phénomènes. Les parois latérales, opaques, ont des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces internes. Ces électrodes sont connectées à deux alimentations haute tension continue variable (0... 60 kV) de polarités différentes, afin de créer un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules chargés et contrôler ainsi leurs trajectoires. La charge des granules se produit par effet triboélectrique dans le lit fluidisé créé à l'intérieur de cette enceinte (figure II.25). [65, 80]

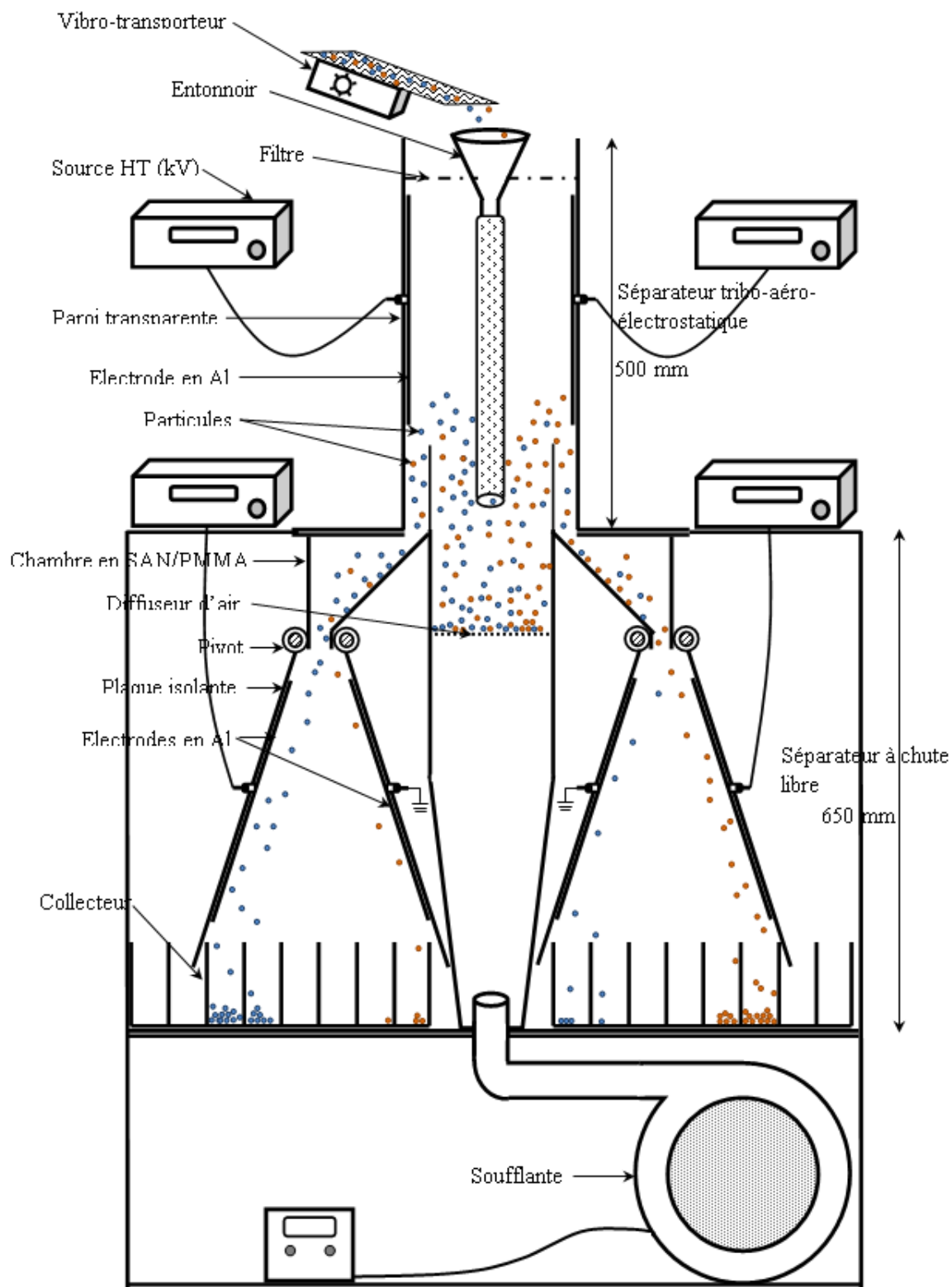


Figure II.25 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages.

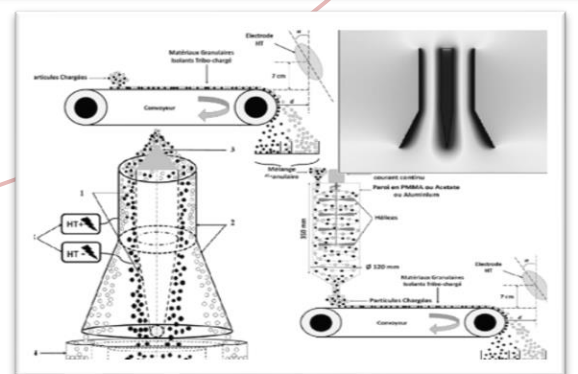
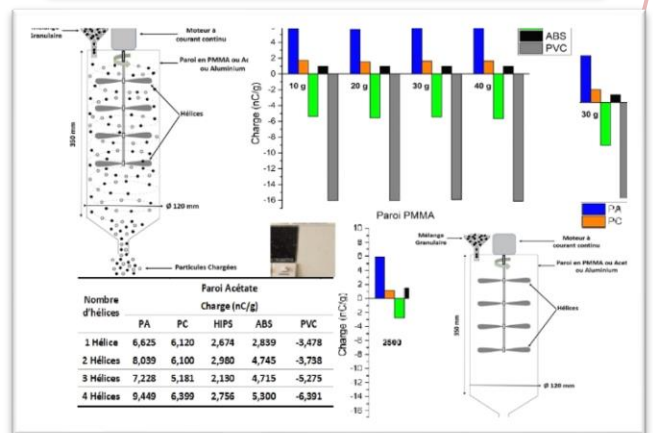
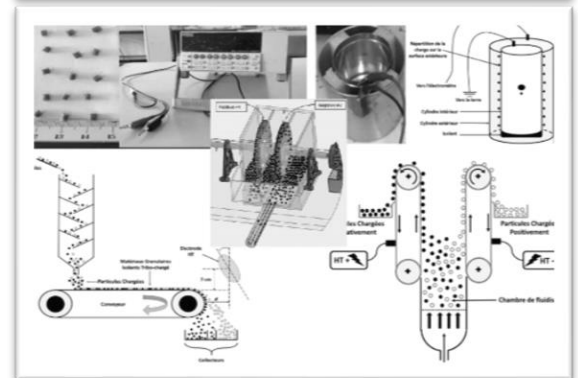
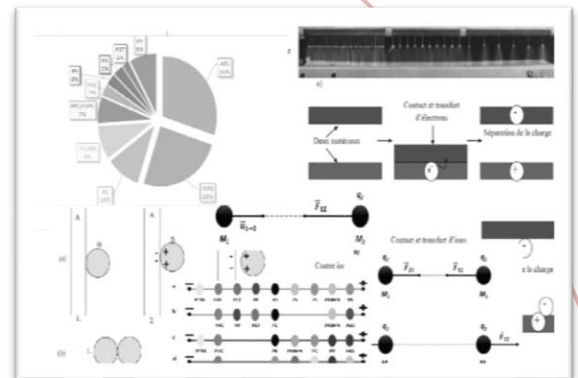
II.5. Conclusion

Il existe une multitude de dispositifs de charge triboélectrique (rotatifs, à vibrations, à lit fluidisé) dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières. Les études réalisées par d'autres chercheurs ont montré que les séparateurs triboélectriques à lit fluidisé ont apporté d'irréprochables avantages à la séparation électrostatiques des mélanges granulaires isolants du fait que ces installations combinent le chargement des particules et leur séparation dans une même zone.

Le rendement des installations de séparation électrostatique utilisant des dispositifs de charge tribo-électrique est lié à l'efficacité du processus de charge. L'un des objectifs de cette thèse est la réalisation d'un nouveau dispositif de chargement tribo électrique à hélices à flux descendants assurant une électroséparation en régime continu et doit s'associer facilement à tout type de séparateur électrostatique ; ceci fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

- ■ Réalisation et étude d'un dispositif de tribo-chargement aérodynamique à un seul axe de rotation à flux descendants



Chapitre III

Réalisation et étude d'un dispositif de tribo-chargement aérodynamique à un seul axe de rotation à flux descendants

Le chargement électrostatique des matériaux granulaires isolant est primordial pour leur séparation dans un champ électrique intense [78] d'où le besoin d'atteindre un haut niveau de chargement. Dans le chapitre précédent nous avons cité différents types de tribo chargeur utilisés ces derniers temps, chacun d'eux atteint une certaine charge pour les matériaux granulaires isolants en vue de la séparation électrostatique, cette charge diffère d'un dispositif à un autre. D'autres études ont prouvé qu'un meilleur chargement triboélectrique est obtenu avec les dispositifs à tribocyclone [79].

Dans le présent chapitre nous allons donner dans un premier temps un petit historique d'un chargeur triboélectrique qui était à l'origine de notre nouvelle réalisation et qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet en juin 2016 et validé en Septembre 2017 (Annexe 1) par l'INAPI (Institut National Algérien de Propriété Industrielle), cet aperçu sera suivi par la présentation et un ensemble d'expérimentations de ce nouveau chargeur triboélectrique.

III.1. Historique et réalisation du dispositif de chargement triboélectrique à ventilateur à flux ascendants

En 2010, Dans le cadre de la préparation d'une thèse [12], le laboratoire IRECOM de l'université Djillali Liabes a bénéficié de la réalisation d'un dispositif de chargement triboélectrique basé sur l'emploi d'un ventilateur à flux ascendant.

Le dispositif est constitué d'un moteur à courant continu entraînant une hélice dans un cylindre en Plexiglas (PMMA) de diamètre 10 cm et de hauteur de 35 cm (Figure III.1) [81], [92], [93], [107]. La rotation de l'hélice crée un courant d'air ascendant donnant naissance à des turbulences aérodynamiques hélicoïdales multipliant les collisions des particules à l'intérieur du cylindre.

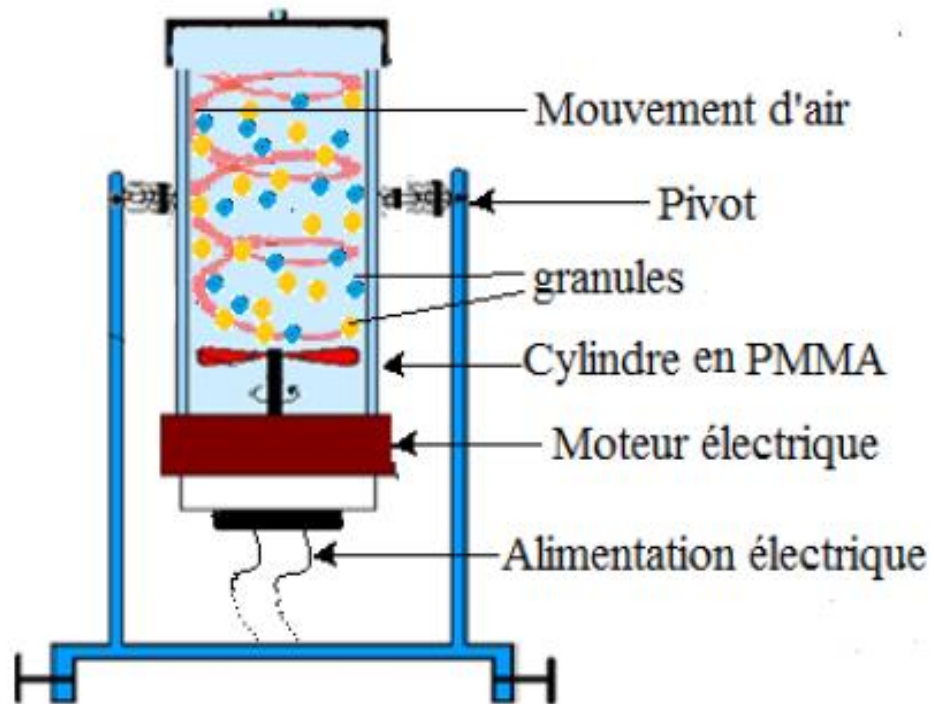


Figure III.1 : Synoptique du dispositif de chargement triboélectrique à mouvement ascendant à base d'un ventilateur

La structure de base de cette installation a été conçue de sorte que la récupération du mélange granulaire chargé, après l'écoulement d'un temps bien défini, s'effectue par le pivotement du cylindre du dispositif par rapport à un axe dédié. Ceci se fait sans arrêter le moteur, afin d'éviter le collage des particules contre les parois et de vider tout le contenu (voir figure III.2). Trois types de collisions ont lieu dans ces dispositifs :

- Collisions entre particules de la même famille.
- Collisions entre particules de familles différentes.
- Collisions entre particules et les parois de la chambre qui les contient.

Cet ensemble de collisions constitue le mode de chargement triboélectrique de ces particules, le signe et la valeur des charges électriques acquises sont déterminés par la combinaison de l'action de ces mécanismes.

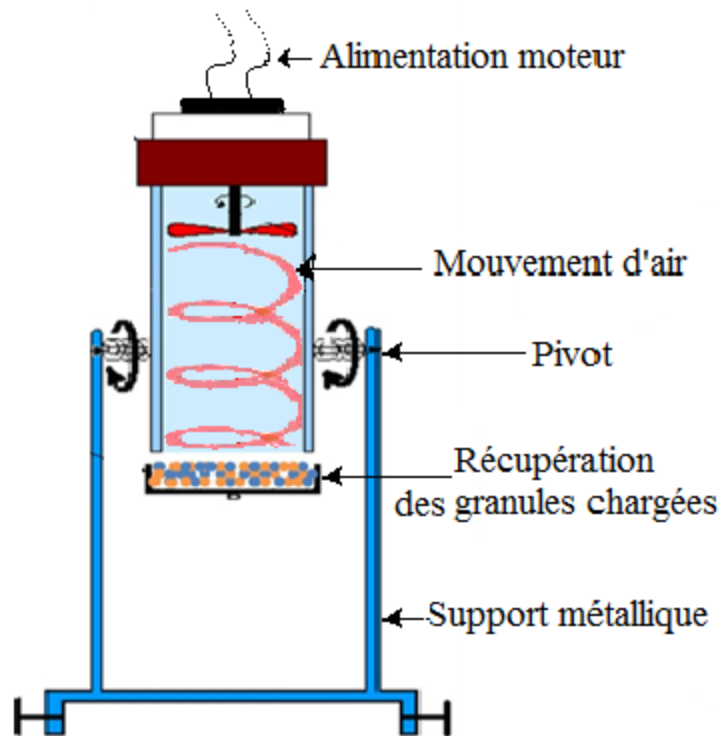


Figure III.2 : Mode de récupération du mélange granulaire chargé dans le dispositif à base de ventilateur

Pour l'ensemble des expériences, les échantillons de plastique granulaire étaient de couleurs différentes, afin de faciliter l'analyse des résultats. Dans le dispositif de chargement triboélectrique à base de ventilateur (Figure III.1), trois variables ont été étudiées, à savoir :

- a. La masse des particules utilisées « m ».
- b. La vitesse de rotation de l'hélice « n ».
- c. Le temps de séjour des particules en mouvement « t ».

L'idée de base est née par l'exploitation du principe de fonctionnement du chargeur triboélectrique à base de ventilateur à flux ascendant (Figure III.1 & Figure III.2) qui a donné un bon chargement des mélanges granulaires [34], mais il présentait une contrainte de faisabilité dans un contexte d'usage industriel dont on cite le fonctionnement en intermittence où on chargeait le mélange granulaire dans un premier temps puis le contenu sera versé vers un vibro-transporteur pour une éventuelle électroséparation ; cet inconvénient nous a poussé à inverser la construction de l'ancienne installation.

L'objectif de notre travail est la réalisation d'un nouveau dispositif de chargement triboélectrique à hélices à flux descendants qui peut être placé directement sur une installation d'électroséparation et l'évaluation des effets des principaux facteurs qui influencent sur le chargement triboélectriques des particules isolantes dont on cite principalement : la masse du produit utilisé, la vitesse de rotation du moteur d'entraînement, la nature de la paroi et le nombre d'hélice placées sur l'axe de rotation.

III.2. Réalisation et étude analytique d'un nouveau dispositif de tribo-chargement aérodynamique à un seul axe de rotation à flux descendants

Ce dispositif de tribo-chargement aérodynamique à un seul axe de rotation a été conçu et réalisé au sein du laboratoire d'électrostatique IRECOM en 2015, à l'université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès. Le dispositif expérimental (Figure III.3) est composé d'une chambre cylindrique (diamètre : 120 mm ; longueur : 350 mm), faite en Polyméthyle Méthacrylate (PMMA). Sur son axe de rotation sont empilées entre une à quatre hélices (Figure III.3) coaxiales sur un axe, qui sont entraînées par un moteur à courant continu dont sa vitesse varie entre $n=2500$ tr/min à 4000 tr/min. le mélange granulaire est injecté dans le dispositif depuis son extrémité supérieure à l'aide d'un entonnoir. [82,83,85]

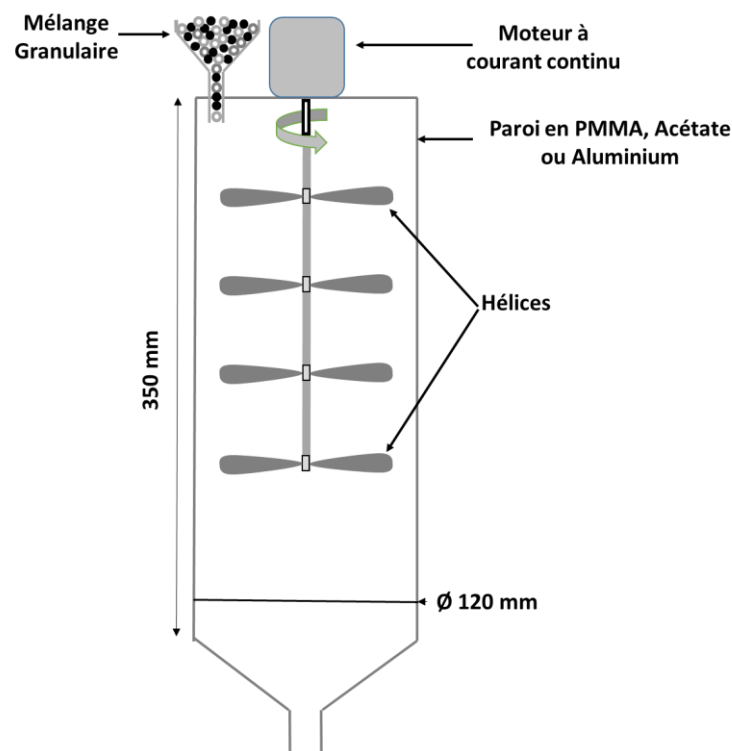


Figure III.3 : Dispositif de tribo-chargement à base d'un ventilateur à flux ascendants.

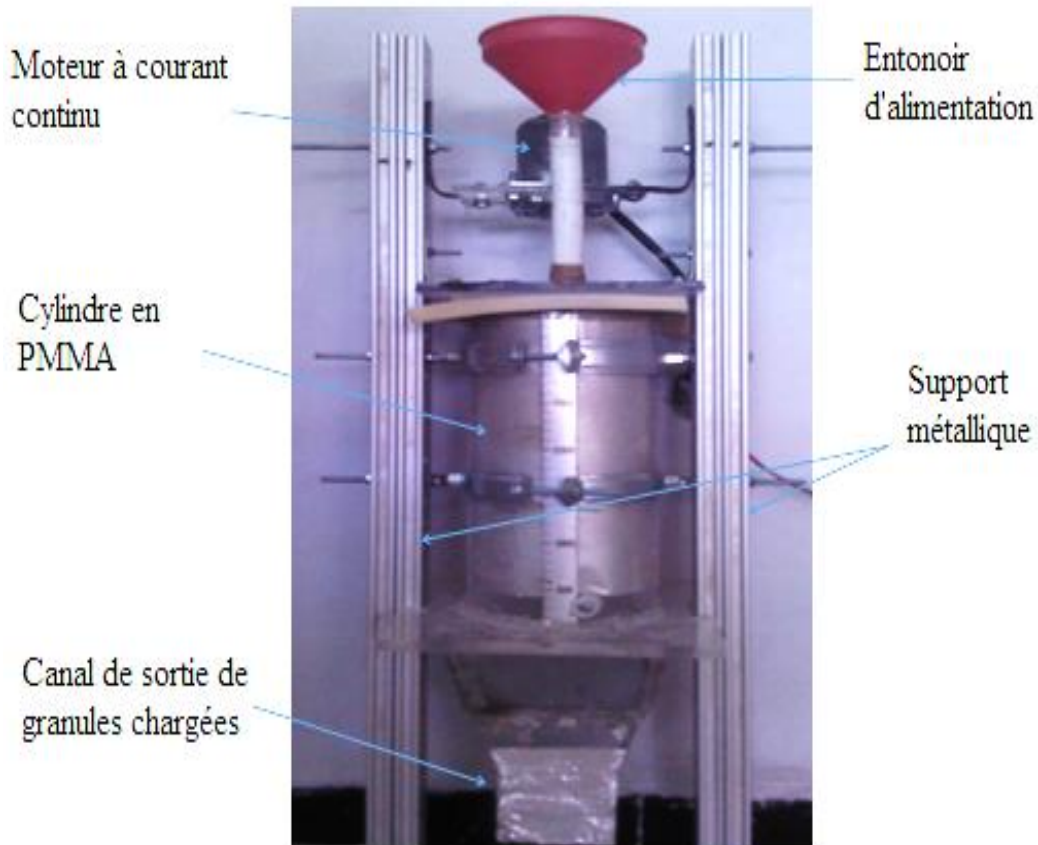


Figure III.4 : Photographie du dispositif de tribo-chargement à base d'un ventilateur à flux descendants.

III.2.1. Principe de fonctionnement

Après la mise en marche du moteur à courant continu, l'axe tourne et entraîne avec lui la et/ou les hélices à une certaine vitesse qui vont créer un mouvement d'air ascendant afin de laisser le plus longtemps possible les particules dans la chambre de chargement, le mélange granulaire isolant est ensuite injecté dans le dispositif de tribochargement à l'aide d'un entonnoir où les matériaux granulaires sont entraînés dans un mouvement hélicoïdal (Figure III.5) qui devrait favoriser leurs chargements triboélectriques par collisions entre paroi et granule et entre granule et granule. Le signe et l'ampleur de la charge de chaque granule sont déterminés par l'action combinée de ces deux mécanismes physiques.

Après le passage dans le dispositif de chargement triboélectrique, les particules tombent directement dans une cage de Faraday reliée à un électromètre (Keithley Instruments, modèle 6514) [76] pour quantifier la charge. Trois mesures sont effectuées pour chaque échantillon et la moyenne des valeurs est prise en compte pour évaluer la charge triboélectrique.

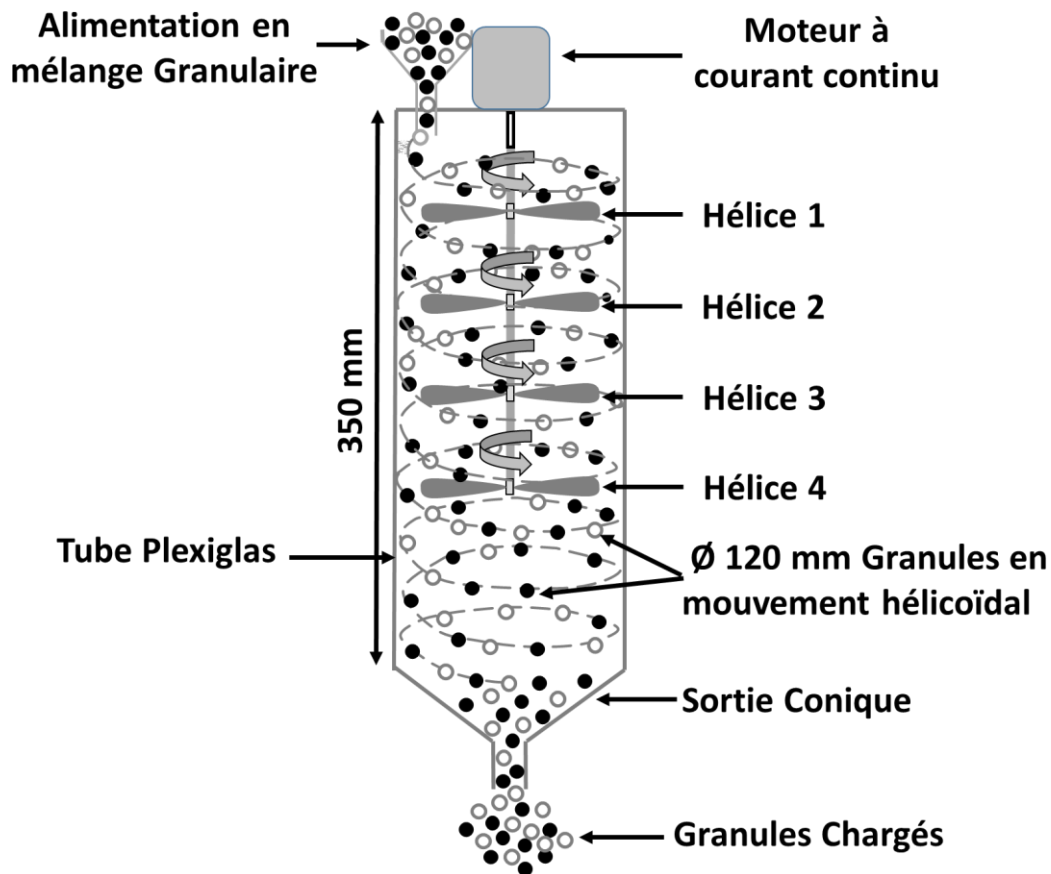


Figure III.5 : Dispositif de chargement tribo électrique des granules isolants.

Il a été constaté lors des essais préliminaires que la rotation de l'hélice crée un courant d'air descendant donnant naissance à des turbulences aérodynamiques multipliant les collisions des particules granulaires à l'intérieur de cylindre. Il se produit deux types de collisions permettant le chargement triboélectrique.

Cas A : Collisions entre les particules et la paroi du cylindre

Cas B : Collisions entre les particules de même matière.

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

III.2.2. Procédure expérimentale

Les expériences ont été effectuées sur deux types de produits :

1. Pulvérulents de taille sous millimétrique : PVC blanc et PVC gris recyclé auprès de la société « Chiali Tube » de Sidi Bel Abbés.

2. granuleux : cinq types de granules isolants utilisés dans la plasturgie : Polyamide (PA), Polycarbonate (PC), Polystyrène à fort impact (HIPS), Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et Polychlorure de vinyle (PVC), tailles de grains ≤ 5.5 mm, provenant du déchetage des déchets EE (Equipement Electriques) et fournis par la société APR2, France où la couleur de chacun était différente afin de faciliter l'analyse des résultats.

Pour le dispositif de tribochargement électrique à flux descendant à un seul axe, quatre facteurs ont été étudiés, à savoir :

- La masse des particules utilisée « m ».
- La vitesse de rotation de ou des hélices « n ».
- Le nombre d'hélice utilisée « N ».
- La nature de la paroi de la chambre de tribo chargement (PMMA, Acétate, Aluminium).

La méthode expérimentale consiste à faire varier un seul facteur à la fois tout en fixant les trois autres selon des résultats obtenus lors des essais préliminaires de l'opérateur, afin d'examiner l'effet de chaque facteur sur la charge acquise par les différents matériaux granulaires utilisés.

III.3. Résultats et discussion

Par emploi des deux types de matériaux pulvérulents et granuleux, les résultats obtenus sont en fonction de chaque facteur pouvant influencer sur la quantité de charge acquise.

III.3.1. Matériaux granuleux

III.3.1.1. Effet de la masse sur la charge électrique acquise avec les trois types de parois

Les expériences sont menées avec une vitesse de rotation des quatre hélices de 3500 tr/min et avec des échantillons de diverses masses comprises entre 10 g et 40 g, pour les parois PMMA, Acétate et Aluminium du dispositif de chargement triboélectrique. Les résultats obtenus concernant la mesure de la charge électrique massique (le rapport charge / masse) acquise par les granules pour les différentes parois sont représentés dans le tableau III.1, III.2 et III.3 et illustrés par la figure III.6, III.7 et III.8 ; la température ambiante était de l'ordre de 22.8 °C et le taux d'humidité était de 39.8%.

Tableau III.1 : Effet de la masse sur la charge pour différents matériaux pour une paroi en PMMA.

Masse	Paroi PMMA				
	Charge (nC/g)				
	PA	PC	HIPS	ABS	PVC
10 g	5,750	1,725	-5,380	0,970	-16,050
20 g	5,670	1,550	-5,561	0,975	-16,045
30 g	5,930	1,633	-5,433	0,988	-15,930
40 g	5,975	1,643	-5,659	0,988	-16,125

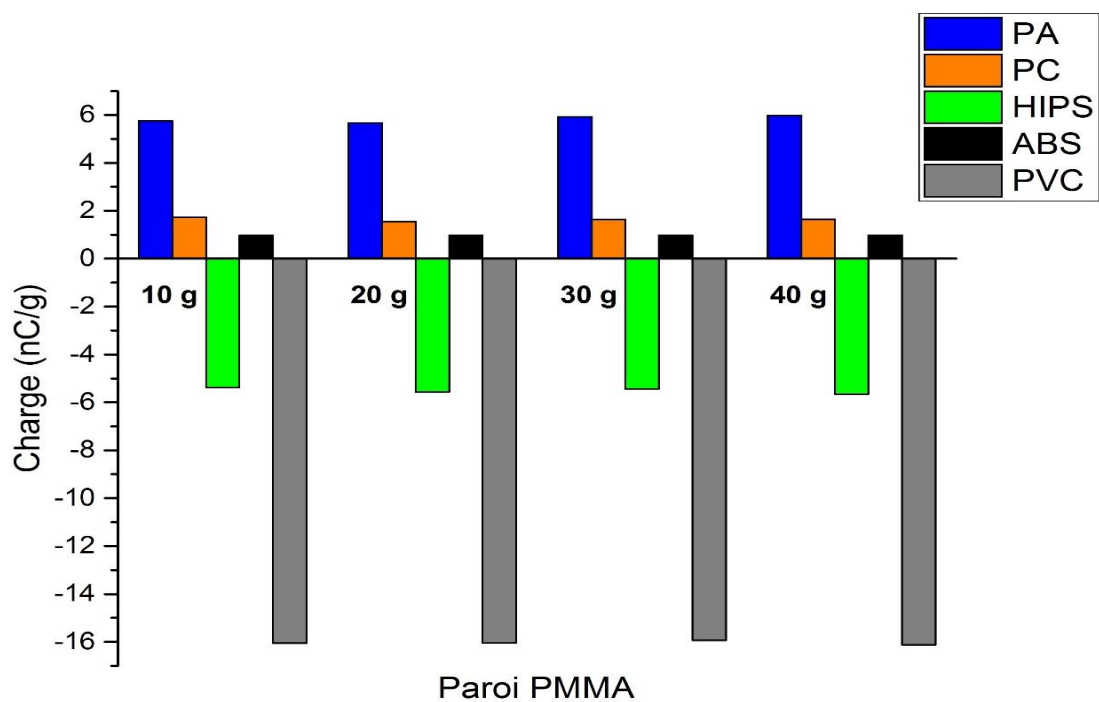


Figure III.6 : Effet de la masse sur la charge pour différents matériaux et paroi en PMMA.

Tableau III.2 : Effet de la masse sur la charge pour différents matériaux et paroi en Acétate.

Masse	Paroi Acétate				
	Charge (nC/g)				
	PA	PC	HIPS	ABS	PVC
10 g	5,900	4,850	2,121	3,600	-7,750
20 g	6,065	4,478	2,160	3,650	-7,645
30 g	6,124	4,550	2,328	3,760	-7,440
40 g	5,826	4,903	2,375	3,975	-7,370

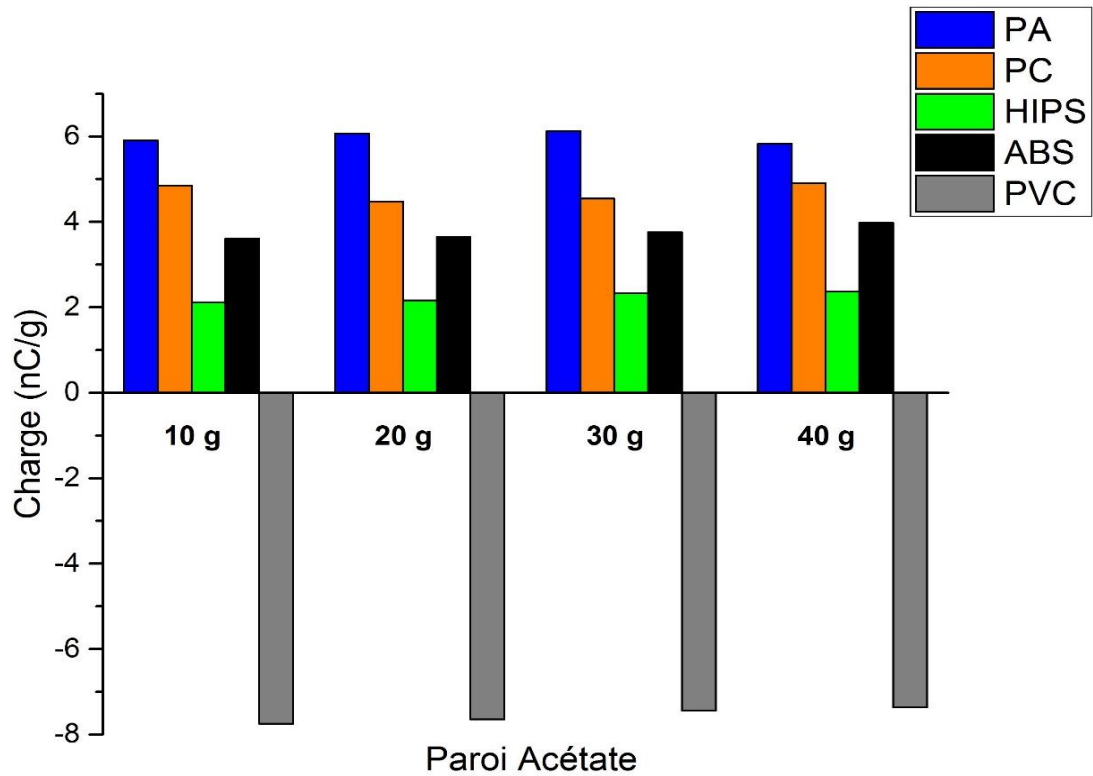


Figure III.7 : Effet de la masse sur la charge pour différents matériaux et paroi en Acétate.

Tableau III.3 : Effet de la masse sur la charge pour différents matériaux et paroi en Aluminium.

Masse	Paroi Aluminium				
	Charge (nC/g)				
	PA	PC	HIPS	ABS	PVC
10 g	4,500	3,134	-10,290	3,160	-22,589
20 g	4,550	3,186	-10,415	3,141	-22,120
30 g	4,367	3,422	-10,243	3,133	-22,430
40 g	4,500	3,134	-10,290	3,160	-22,589

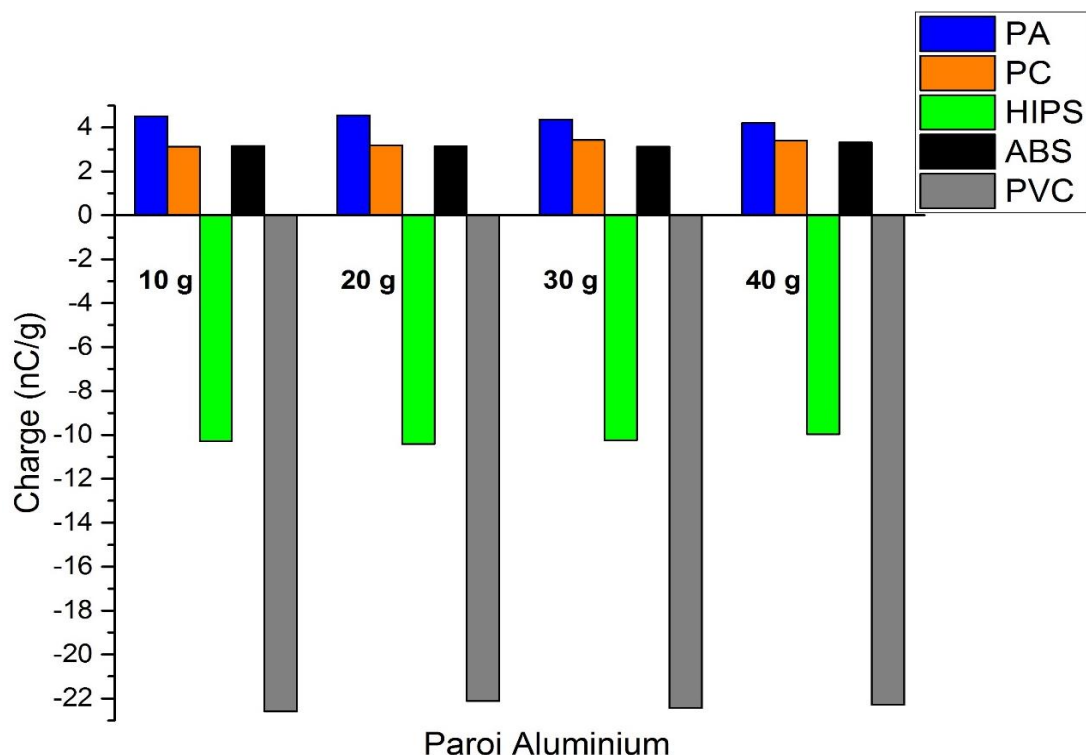


Figure III.8 : Effet de la masse sur la charge pour différents matériaux et paroi en Aluminium.

Les résultats représentés sur les figures III.6, III.7 et III.8 montrent que la masse de l'échantillon n'a pas d'effet considérable sur la charge spécifique (rapport charge/masse) acquise par les granules mais cet ensemble de résultats nous permet de dresser une bonne classification de ces matériaux dans la série triboélectrique selon le signe et l'amplitude de la charge acquise.

Selon le tableau III.1, on peut affirmer que les matériaux peuvent être classés selon une série triboélectrique propre, du plus positif vers le plus négatif, comme suit : PA, PC, ABS, **PMMA**, HIPS et enfin PVC

Selon le tableau III.2, le classement est le suivant : PA, PC, ABS, HIPS, **Acétate** et le PVC

Selon le tableau III.3, le classement triboélectrique est : PA, PC, ABS, **AL**, HIPS et PVC

On remarque que les trois constats coïncident et se concordent. En croisant ces trois résultats obtenus, on aboutit à une série triboélectrique globale :

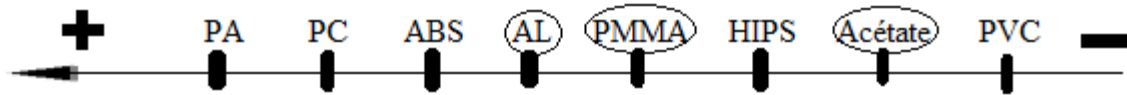


Figure III.9 : Classement dans une série triboélectrique des différents matériaux utilisés

III.3.1.2. Effet de la vitesse de rotation des hélices sur la charge acquise

L'influence de la vitesse de rotation « n » de l'hélice sur le processus de chargement peut être jugée à partir des résultats présentés sur les figures. III.10, III.11 et III.12, pour les trois types de dispositif (avec paroi en PMMA, Acétate et aluminium respectivement). Le nombre d'hélices N et l'alimentation en masse m sont maintenus constants ($N= 4$; $m = 40$ g). La température ambiante était de l'ordre de 22°C et le taux d'humidité était de 40.5%.

Tableau III.4 : Effet de la vitesse de rotation des hélices sur la charge pour différents matériaux et paroi en PMMA.

Vitesse de rotation hélices (tr/min)	Paroi PMMA				
	Charge (nC/g)				
	PA	PC	HIPS	ABS	PVC
2500	5,925	1,169	-2,753	1,485	-11,498
3000	6,550	1,410	-2,860	1,420	-12,618
3500	7,365	1,443	-3,418	1,348	-13,875
4000	8,158	1,403	-3,585	1,160	-15,475

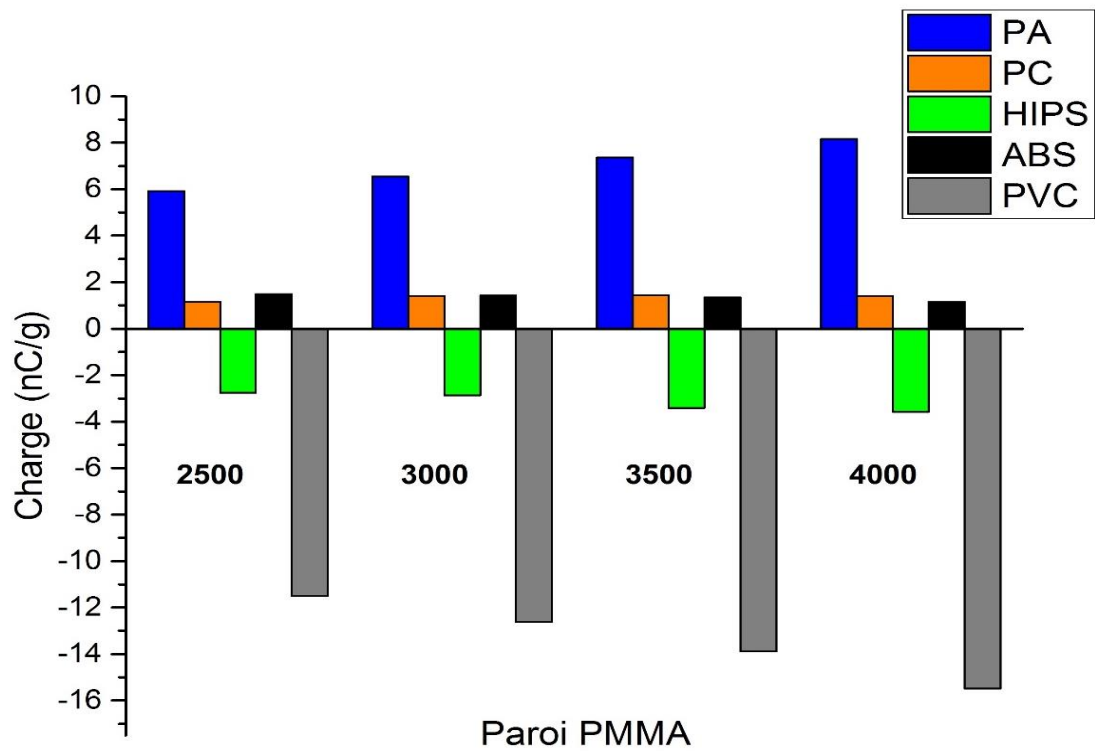


Figure III.10 : Effet de la vitesse de rotation des hélices sur la charge pour différents matériaux et paroi en PMMA.

Tableau III.5 : Effet de la vitesse de rotation des hélices sur la charge pour différents matériaux et paroi en Acétate.

Vitesse de rotation hélices (tr/min)	Paroi Acétate				
	Charge (nC/g)				
	PA	PC	HIPS	ABS	PVC
2500	6,996	4,960	1,695	4,775	-5,766
3000	7,621	5,863	2,650	5,005	-5,765
3500	9,449	6,399	2,756	5,300	-6,391
4000	13,292	7,053	2,849	6,043	-6,321

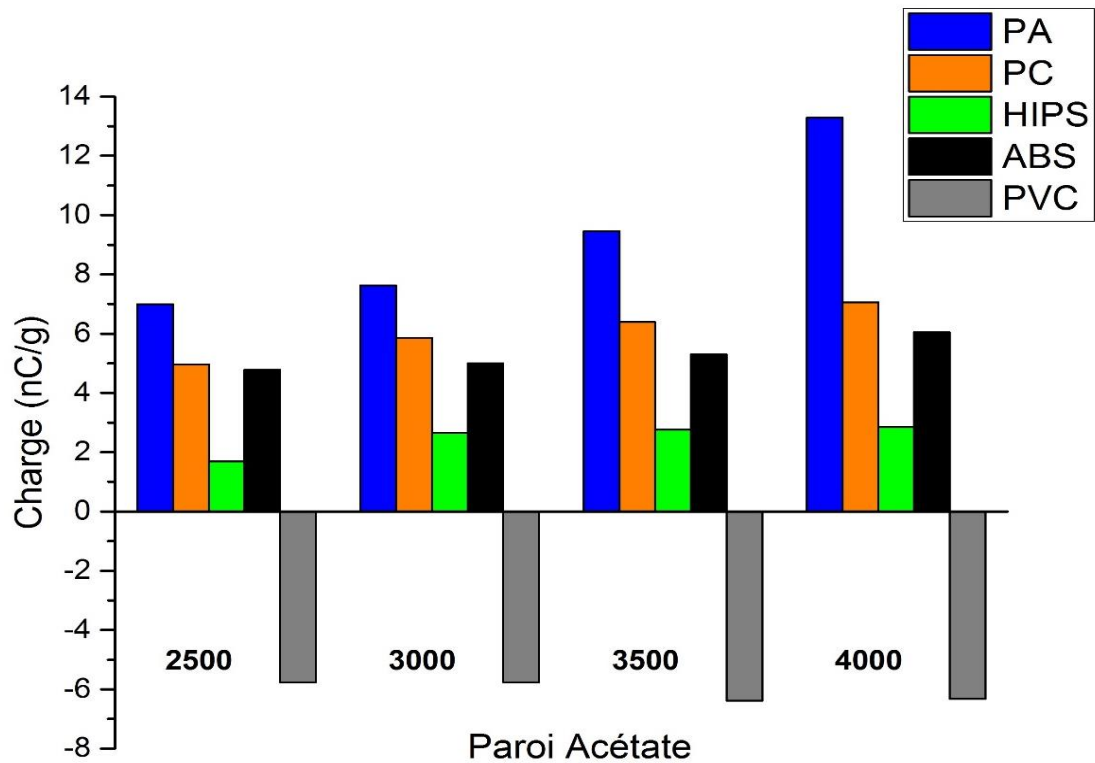


Figure III.11 : Effet de la vitesse de rotation des hélices sur la charge pour différents matériaux et paroi en Acétate.

Tableau III.6 : Effet de la vitesse de rotation des hélices sur la charge pour différents matériaux et paroi en Aluminium.

Vitesse de rotation hélices (tr/min)	Paroi Aluminium				
	Charge (nC/g)				
	PA	PC	HIPS	ABS	PVC
2500	4,171	2,309	-11,278	2,190	-18,300
3000	4,988	3,091	-12,320	2,614	-20,825
3500	5,419	3,650	-13,593	2,910	-22,520
4000	5,754	4,017	-15,250	3,090	-24,575

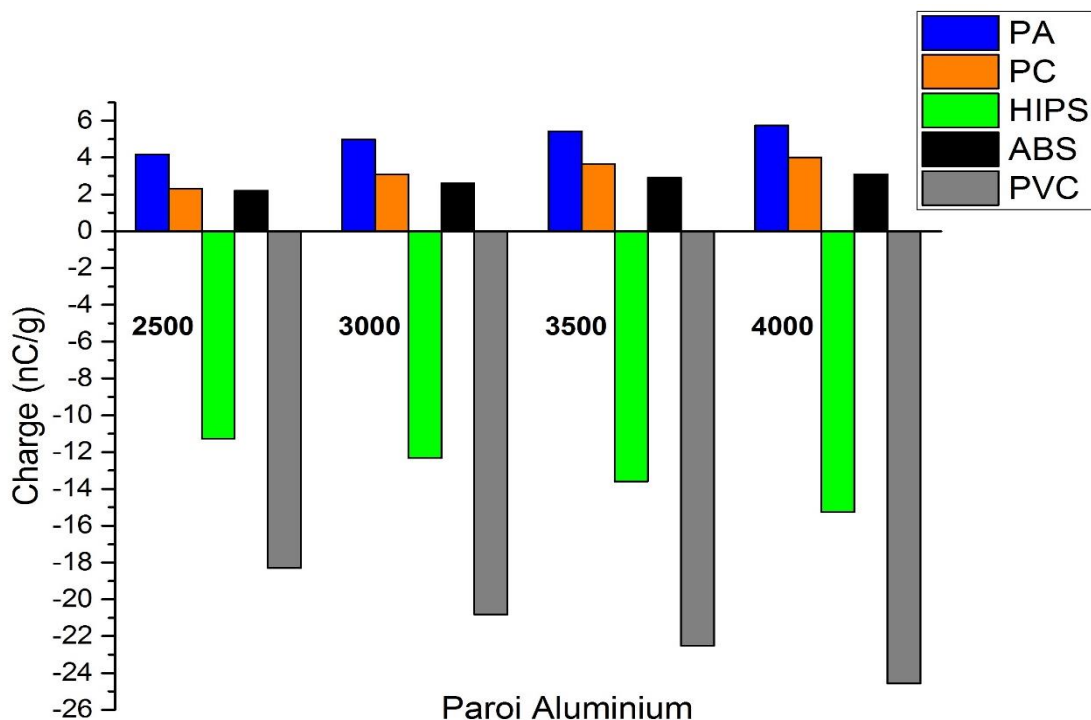


Figure III.12 : Effet de la vitesse de rotation des hélices sur la charge pour différents matériaux et paroi en Aluminium.

On voit clairement que l'augmentation de la vitesse de rotation « n » des hélices s'accompagne d'une élévation du nombre de chocs entre particules et entre particules et paroi, ce qui justifie une augmentation de la charge acquise par les granules à l'exception de l'ABS pour une parois en PMMA où la charge est inversement proportionnelle à l'augmentation de vitesse de rotation des hélices ce qui peut être expliqué par la rapide saturation de ce matériau où le phénomène de chargement peut s'inverser. A cet effet nous avons opté pour un choix d'une vitesse $n = 3500$ tr / min, qui sera choisie comme vitesse de rotation d'hélice dans l'expérience conçue pour l'optimisation du processus de charge tribo.

III.3.1.3. Effet du nombre d'hélices sur la charge acquise

Les résultats obtenus concernant la mesure de la charge électrique acquise par les différents granulés isolants en fonction du nombre d'hélices pour les différentes parois sont représentés dans le tableau III.7, III.8 et III.9 et illustrés par la figure III.13, III.14 et III.15 ; la température ambiante était de l'ordre de 21°C et le taux d'humidité été de 41%. La vitesse de rotation des hélices ainsi que la masse introduite dans le dispositif de tribochargement sont maintenues constantes ($n=3500$ tr/min, $m=40\text{g}$). Le nombre d'hélices varie de un à quatre.

Tableau III.7 : Effet du nombre d'hélices sur la charge pour différents matériaux et paroi en PMMA.

Nombre d'hélices	Paroi PMMA				
	Charge (nC/g)				
	PA	PC	HIPS	ABS	PVC
1 Hélice	5,810	1,128	-2,325	1,035	-9,735
2 Hélices	5,805	1,115	-2,933	0,985	-12,225
3 Hélices	5,350	1,455	-3,093	0,780	-10,500
4 Hélices	7,365	1,443	-3,418	1,348	-13,875

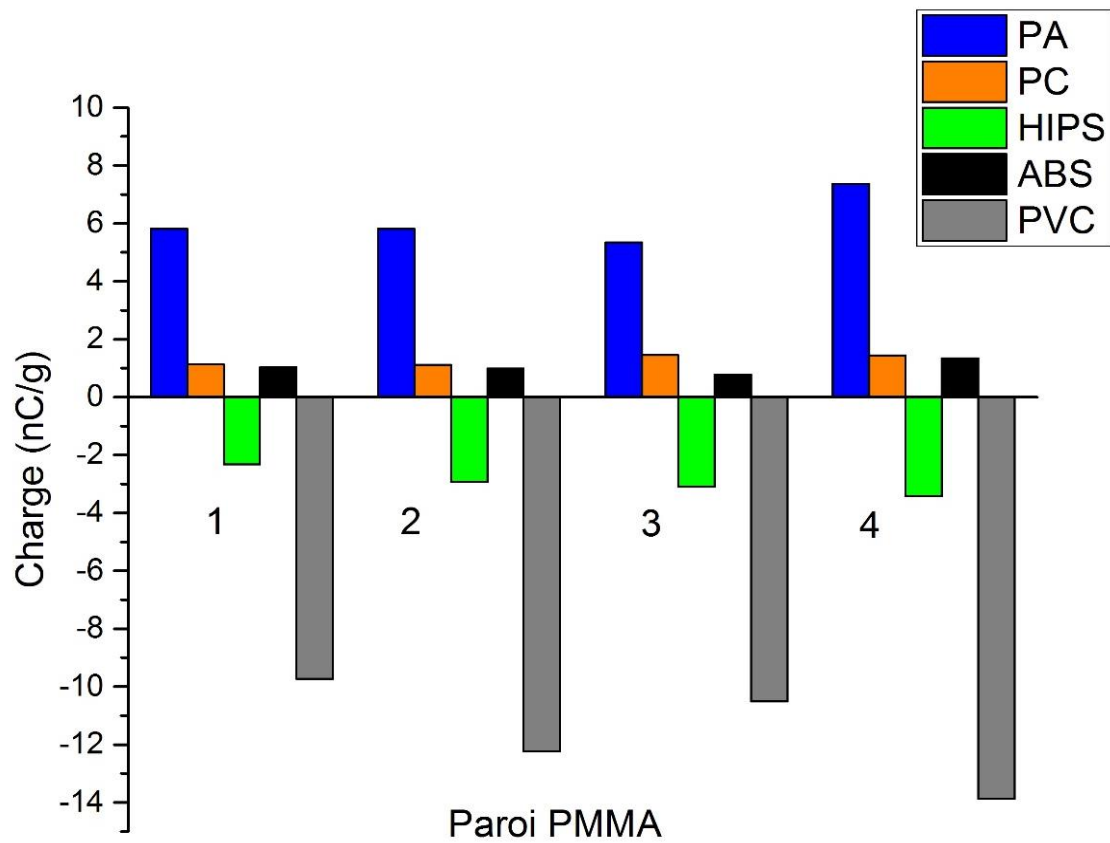


Figure III.13 : Effet du nombre d'hélices sur la charge pour différents matériaux et paroi en PMMA.

Tableau III.8 : Effet du nombre d'hélices sur la charge pour différents matériaux et paroi en Acétate.

Nombre d'hélices	Paroi Acétate				
	Charge (nC/g)				
	PA	PC	HIPS	ABS	PVC
1 Hélice	6,625	6,120	2,674	2,839	-3,478
2 Hélices	8,039	6,100	2,980	4,745	-3,738
3 Hélices	7,228	5,181	2,130	4,715	-5,275
4 Hélices	9,449	6,399	2,756	5,300	-6,391

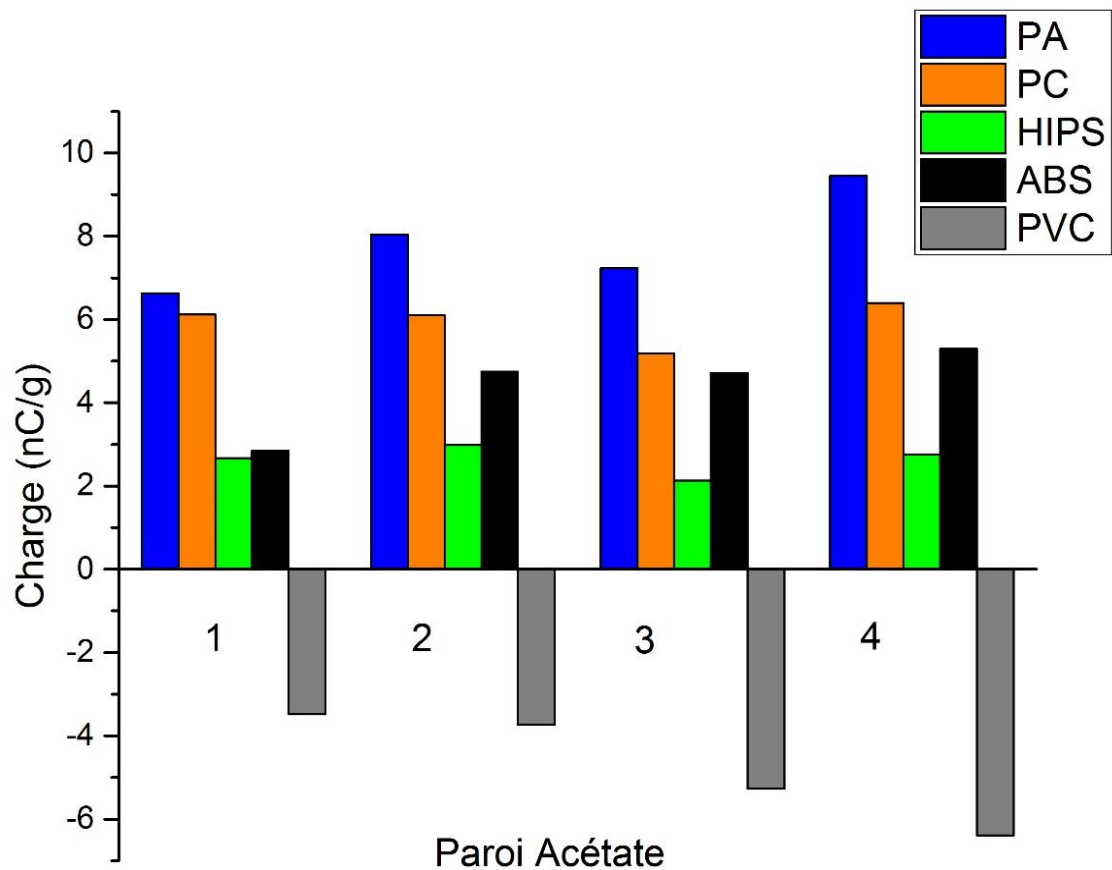


Figure III.14 : Effet du nombre d'hélices sur la charge pour différents matériaux et paroi en Acétate.

Tableau III.9 : Effet du nombre d'hélices sur la charge pour différents matériaux et paroi en Aluminium.

Nombre d'hélices	Paroi Aluminium				
	Charge (nC/g)				
	PA	PC	HIPS	ABS	PVC
1 Hélice	1,901	1,591	-1,990	1,690	-9,233
2 Hélices	2,608	1,445	-5,775	1,578	-14,525
3 Hélices	4,010	2,311	-8,380	2,620	-17,375
4 Hélices	5,419	3,650	-13,593	2,910	-22,520

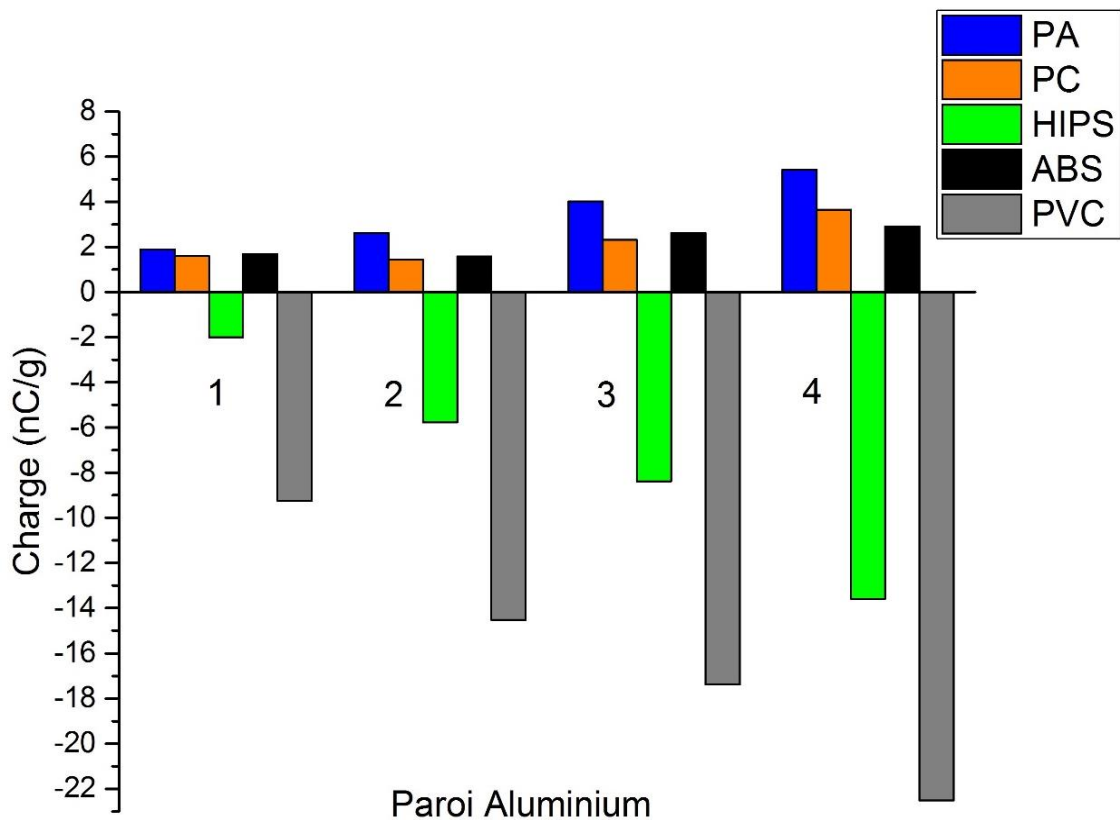


Figure III.15 : Effet du nombre d'hélices sur la charge pour différents matériaux et paroi en Aluminium.

Selon les figures III.13, III.14 et III.15 où le dispositif est équipé successivement de différentes parois et d'un nombre d'hélices qui varie de un à quatre, l'augmentation du nombre d'hélices est accompagnée d'une croissance importante de charge. Les granules sont maintenus

en rotation pour un temps plus long et ont plus de chances d'entrer en collision avec les parois du dispositif tribo-chargeur.

Pour la paroi en PMMA, deux hélices sont suffisantes pour saturer les granules du PC et ABS, mais pour le HIPS, PVC et PA, la charge augmente proportionnellement avec l'addition de la troisième et la quatrième hélice.

Pour le dispositif avec des parois en acétate, le PC et ABS atteignent rapidement leurs charges maximales etaturent dès qu'une seconde hélice est ajoutée mais pour le HIPS, la charge de saturation est atteinte seulement après l'utilisation de la troisième hélice. Dans le cas du PVC et PA, la charge augmente proportionnellement avec chaque hélice supplémentaire.

III.3.2. Matériaux pulvérulents

Les produits pulvérulents proviennent d'un broyage fin d'un objet jusqu'à obtention d'une poudre afin de dissocier la multitude de composantes le constituant ce qui permettra l'usage d'une électroséparation pour une éventuelle récupération de produits purs faisant objet d'un recyclage.

Deux produits de taille micronisée ont été utilisés dans nos expériences de chargement triboélectrique, le PVC blanc et le PVC gris recyclé provenant de la société Chiali Tube de Sidi Bel Abbés.

Avec trois parois différentes (PMMA, Acétate et Aluminium), l'ensemble des expériences de chargement triboélectrique ont été menées en fonction de deux variables : la vitesse de rotation des hélices et le nombre des hélices.

III.3.2.1. Chargement triboélectrique des produits pulvérulents pour paroi en PMMA

En fixant le nombre d'hélices à un, on a fait varier la vitesse de rotation du moteur de 2500 tr/min à 4000 tr/min, puis en fixant chaque vitesse, on a fait varier le nombre d'hélice de 1 à 4 pour mesurer la charge acquise, l'ensemble des résultats obtenus sont présentés dans les Tableaux III.10 et III.11 pour les deux matériaux utilisés.

Tableau III.10 : Effet du nombre d'hélices et de la vitesse sur la charge du PVC Blanc pour paroi en PMMA

Vitesse de rotation hélices (tr/min)	Charge Poudre PVC blanc (nC/g)			
	Paroi PMMA			
	1 hélice	2 hélices	3 hélices	4 hélices
2500	-0,583	-1,551	-4,392	-7,507
3000	-0,719	-2,715	-6,160	-8,519
3500	-0,911	-2,108	-6,533	-9,885
4000	-0,881	-1,882	-6,800	-9,519

Tableau III.11 : Effet du nombre d'hélices et de la vitesse sur la charge du PVC gris recyclé pour paroi en PMMA

Vitesse de rotation hélices (tr/min)	Charge Poudre PVC recyclé gris (nC/g)			
	Paroi PMMA			
	1 hélice	2 hélices	3 hélices	4 hélices
2500	-9,260	-8,683	-16,200	-37,147
3000	-10,168	-9,515	-27,333	-39,133
3500	-10,227	-11,615	-30,620	-47,667
4000	-13,016	-11,770	-32,745	-43,200

On constate que pour les deux matériaux utilisés, la charge croit proportionnellement avec le nombre d'hélices, le même constat est fait pour l'augmentation de vitesse à l'exception de la dernière ligne et la dernière colonne où la charge a diminué.

La charge la plus élevée obtenue est pour (3500 tr/min, 4 hélices) respectivement de -9,89 nC/g et de -47,67 nC /g pour le PVC blanc (pur) et le PVC gris recyclé.

III.3.2.2. Chargement triboélectrique des produits pulvérulents pour paroi en Acétate

De la même façon que précédemment, on a fixé chaque vitesse en variant le nombre d'hélices de 1 à 4, les résultats de chargement obtenus sont groupés dans les tableaux III.12 et III.13 respectivement pour le PVC blanc et le PVC gris recyclé.

Tableau III.12 : Effet du nombre d'hélices et de la vitesse sur la charge du PVC blanc pour paroi en Acétate

Vitesse de rotation hélices (tr/min)	Charge Poudre PVC blanc (nC/g)			
	Paroi Acétate			
	1 hélice	2 hélices	3 hélices	4 hélices
2500	-0,515	-2,556	-1,853	-1,167
3000	-0,833	-3,814	-3,361	-1,308
3500	-2,132	-3,868	-3,684	-3,532
4000	-2,300	-4,445	-4,143	-3,827

Pour le PVC blanc, la charge est proportionnelle à l'augmentation de la vitesse mais pour une même vitesse et lors du passage de 1 à 2 hélices, la charge croit aussi, par contre à partir de l'emploi de la troisième hélice, la charge commence à décroître et la charge la plus importante obtenue est de 64,445nC/g pour (4000 tr/min, 4 Hélices)

Tableau III.13 : Effet du nombre d'hélices et de la vitesse sur la charge du PVC gris recyclé pour paroi en Acétate

Vitesse de rotation hélices (tr/min)	Charge Poudre PVC recyclé gris (nC/g)			
	Paroi Acétate			
	1 hélice	2 hélices	3 hélices	4 hélices
2500	-7,658	-11,862	-16,325	-23,067
3000	-10,406	-13,994	-21,181	-28,192
3500	-13,489	-16,912	-26,429	-33,522
4000	-12,018	-16,237	-28,793	-41,977

Le comportement du PVC gris recyclé est totalement différent de l'autre produit utilisé, la charge est proportionnelle à la vitesse et aux nombres d'hélices utilisées où la quantité de charge acquise est de -41,98 nC/g et cette charge est de dix fois supérieure à celle obtenue pour le PVC blanc.

III.3.2.3. Chargement triboélectrique des produits pulvérulents pour paroi en Aluminium

L'ensemble des résultats pour ce type de paroi (Aluminium) en fonction de la vitesse et le nombre d'hélices, est présenté dans les deux tableaux III.14 et III.15.

Tableau III.14 : Effet du nombre d'hélices et de la vitesse sur la charge du PVC blanc pour paroi en Aluminium.

Vitesse de rotation hélices (tr/min)	Charge Poudre PVC blanc (nC/g)			
	Paroi Aluminium			
	1 hélice	2 hélices	3 hélices	4 hélices
2500	-2,605	-2,717	-9,643	-10,400
3000	-2,494	-4,085	-11,066	-20,983
3500	-2,687	-6,476	-18,193	-25,343
4000	-3,262	-9,950	-24,327	-25,257

Tableau III.15 : Effet du nombre d'hélices et de la vitesse sur la charge du PVC gris recyclé pour paroi en Aluminium.

Vitesse de rotation hélices (tr/min)	Charge Poudre PVC recyclé gris (nC/g)			
	Paroi Aluminium			
	1 hélice	2 hélices	3 hélices	4 hélices
2500	-6,885	-14,038	-18,143	-18,033
3000	-8,091	-16,698	-24,170	-27,636
3500	-12,017	-19,818	-31,050	-34,702
4000	-13,030	-20,617	-33,667	-40,993

Par emploi de ce type de paroi, la charge est pratiquement proportionnelle à l'augmentation de la vitesse et au nombre d'hélice utilisées dans ce chargeur triboélectrique et aucun de point de saturation n'est atteint.

III.4. Conclusion

Dans le passé les dispositifs de chargement triboélectrique à lit fluidisé [80] étaient considérés comme le moyen le plus efficace pour faire acquérir des charges électriques aux différentes matières plastiques granulaires, mais comparée aux résultats de notre nouveau dispositif à ventilateur, la charge électrique acquise pour le nouveau dispositif est nettement supérieure aux dispositifs à lit fluidisé.

L'étude expérimentale de l'ensemble des paramètres de réglage d'un dispositif d'acquisition de charge à ventilateur montre que la vitesse de rotations et le nombre des hélices influent considérablement sur la charge électrique acquise des particules, contrairement à la masse

granulaire injectée dans le dispositif qui n'a aucun effet significatif. La nature de la paroi du dispositif influe sur la valeur ainsi que sur la polarité de la charge acquise.

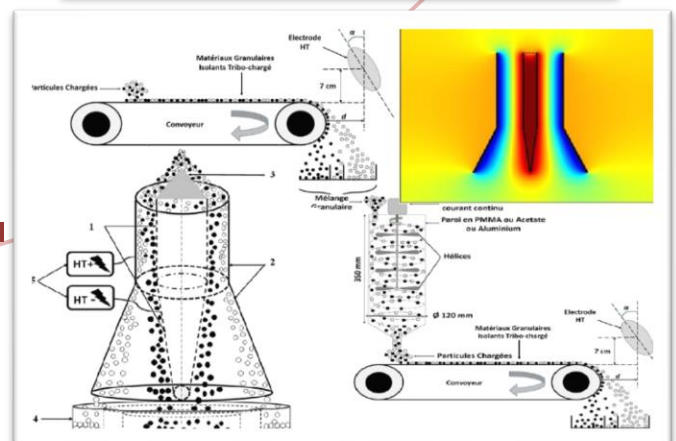
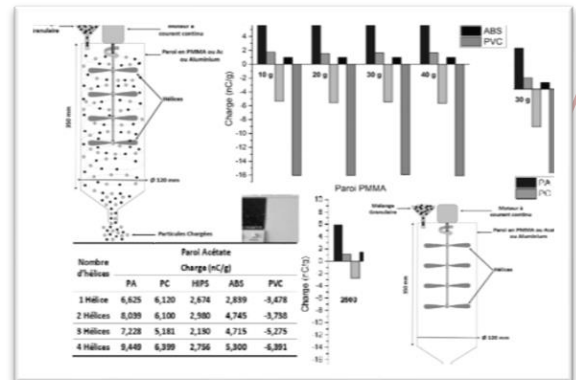
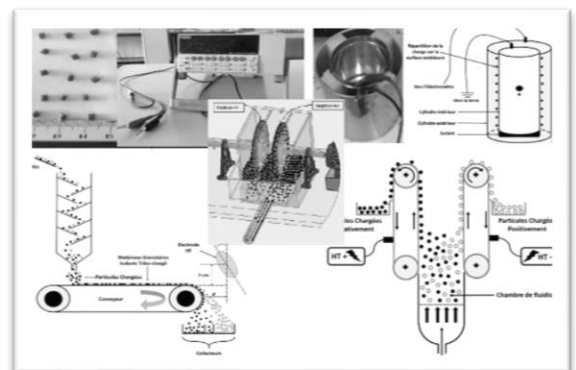
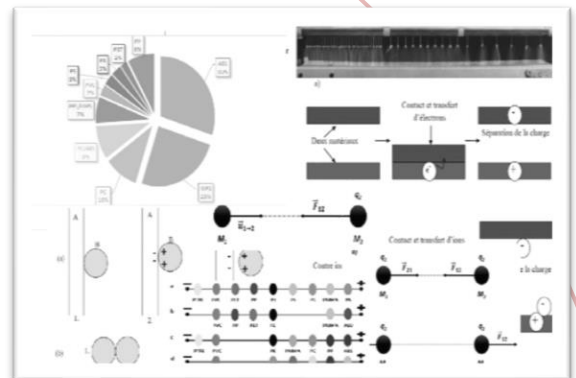
Ce dispositif entraîne les matériaux granulaires ou pulvérulents dans un mouvement hélicoïdal qui favorise leurs chargements triboélectriques par types de collision : collisions entre paroi et granule et entre granule et granule de même type, Le signe et l'ampleur de la charge de chaque granule sont déterminés par l'action combinée de ces deux mécanismes physiques, le troisième type de collision (entre granules différents) intervient intensément dans notre nouveau dispositif, ce nouveau facteur peut inverser les signes obtenus.

La principale conclusion qui peut être déduite de l'ensemble des résultats nous conduit à dire qu'une vitesse de rotation de 3500 tr/min peut être utilisée comme facteur optimal pour le dispositif par contre le choix de parois dépend du mélange utilisé.

Dans le chapitre suivant nous allons va présenter une étude expérimentale du dispositif de chargement triboélectrique avec une application sur trois séparateurs électrostatiques : le séparateur à tapis, un nouveau séparateur à électrode concentrique pour des mélanges granulaires et le séparateur à deux tambours pour un mélange binaire de matériaux pulvérulents afin de montrer la bonne adaptation de cette nouvelle installation et les bons résultats obtenus peuvent appuyer notre travail.

Chapitre IV

Applications dans la séparation électrostatique



Chapitre IV

Applications dans la séparation électrostatique

La séparation électrostatique [87] est le triage sélectif de particules chargées ou corps polarisés, dans l'action d'un champ électrique. Les séparateurs électrostatiques sont caractérisés par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien, elle représente une technologie économiquement viable pour le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques [89].

Dans ce chapitre plusieurs expériences ont été effectuées sur la séparation des mélanges pulvérulents et des mélanges granulaires (binaires ou ternaires), par l'emploi de trois séparateurs électrostatiques associés à notre nouveau chargeur triboélectrique à flux d'air descendant précédemment décrit; la première installation est à base de tapis roulant, la seconde installation est à base de deux tambours tournants et la dernière est une nouvelle installation constituée de deux électrodes cylindriques concentriques qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet auprès de l'INAPI (Institut National Algérien de Propriété Industrielle) en Décembre 2016 (Annexe 2).

IV.1. Séparation électrostatique à tapis roulant associé au chargeur triboélectrique à flux descendants

Conçu en 2009 au laboratoire IRECOM, le séparateur électrostatique à tapis est composé d'une bande transporteuse en néoprène, d'une longueur de 90 cm et une largeur de 15 cm. La bande est entraînée par un moteur à courant continu pour un éventuel control de vitesse. A l'extrémité du tapis, est placée une électrode statique elliptique (axe 15 cm et 5 cm), alimentée à partir d'une alimentation à haute tension continue dont le rôle est de créer un champ électrique polarisé.

Le chargement triboélectrique des mélanges granulaires est assuré par le chargeur à ventilateur à flux descendants placé sur l'autre extrémité du tapis roulant. La difficulté de commande et de réglage des paramètres de l'électro séparateur réside dans le fait que la

séparation électrostatique est un processus multifactoriel interdépendant, il est donc très important de formuler l'ensemble des paramètres qui ont une grande influence sur les critères de performance du dispositif. Les différents paramètres du séparateur électrostatique à tapis roulant sont principalement :

- La tension appliquée à l'électrode statique (elliptique).
- La position angulaire « α » de l'électrode statique.
- La position radiale « d » de l'électrode statique par rapport à l'extrémité du tapis.

Ce type de séparateur électrostatique a déjà fait l'objet d'une étude [88], qui a identifié les conditions de fonctionnement optimal suivantes : vitesse du tapis, 10 cm/s ; distance inter-électrode, $d = 6.2$ cm ; haute tension appliquée, $U = 30$ kV ; position angulaire de l'électrode haute tension $\alpha = 33^\circ$.

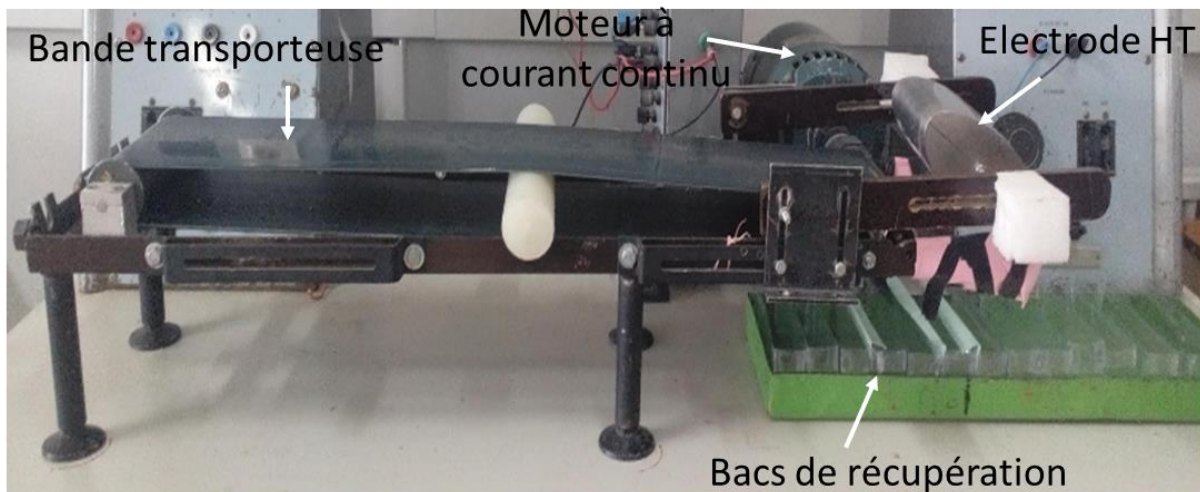


Figure IV.1 : photo du séparateur à tapis roulant (convoyeur métallique)

Les dispositifs de chargement triboélectrique entraînent les matériaux granulaires dans un mouvement hélicoïdal qui devraient favoriser leur chargement triboélectrique par collisions entre paroi et granule et entre granule et granule, Le signe et l'ampleur de la charge de chaque granule sont déterminés par l'action combinée de ces deux mécanismes physiques [82.83.85].

Après le passage dans le dispositif de chargement triboélectrique, les particules tombent directement dans le convoyeur (Figure IV.3), qui transporte les matériaux granulaires jusqu'à la zone de champ électrique intense générée entre l'électrode elliptique haute tension de polarité positive et la bande métallique du convoyeur mise à la terre. Les particules chargées négativement sont soumises à une force d'attraction exercée par l'électrode de polarité opposée, tandis que les charges positives sont soumises à une force de répulsion où elles sont fixées à la surface de la bande, jusqu'à ce qu'une brosse les enlève mécaniquement.

Deux séries d'expériences d'électro séparation sont menées par l'association du nouveau dispositif de tribo-chargement et le séparateur électrostatique à tapis roulant. La première série se compose de la séparation de 40 g de mélange granulaire binaire (50% PA - 50% PVC, 50% PA - 50% PC et 50% HIPS - 50% PVC).

La seconde série d'essais est effectuée sur deux mélanges granulaires de 45 g de trois matériaux différents : 15 g PA - 15 g PC - 15 g PVC et 15 g PA - 15 g HIPS - 15 g PVC.

Les essais sont effectués pour trois types de parois (PMMA, L'acétate et l'aluminium), avec des conditions optimales, quatre hélices et une vitesse de rotation des hélices fixée à 3500 tr/min. Après séparation la charge massique de chaque produit est mesurée à l'aide de l'électromètre Keithley 6514.

Les expériences sont réalisées à des températures comprises entre 25 ° C et 27 ° C, à une humidité relative ambiante qui varie entre 37% et 43%.

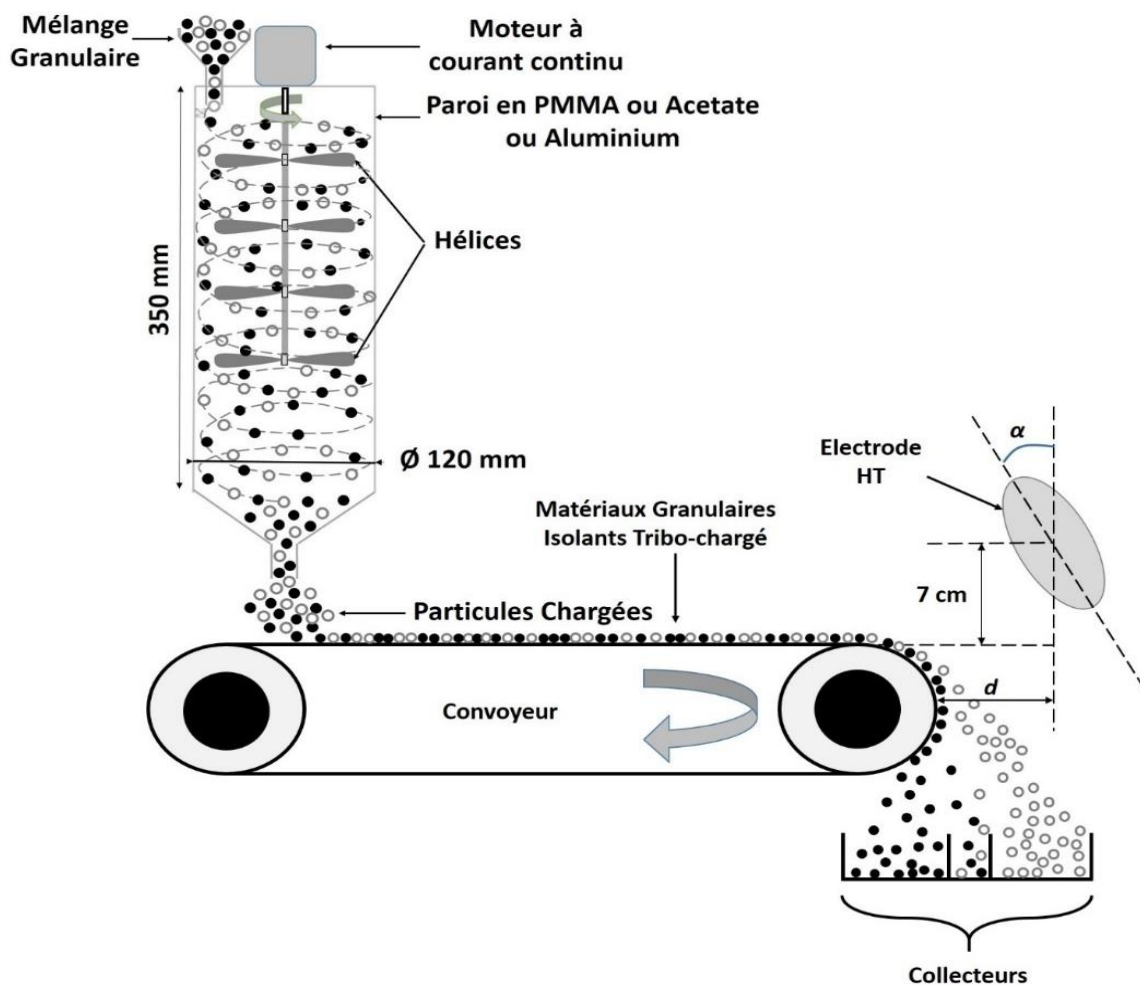


Figure IV.2 : Principe de fonctionnement de l'installation du Séparateur électrostatique à tapis associé au chargeur à ventilateur.

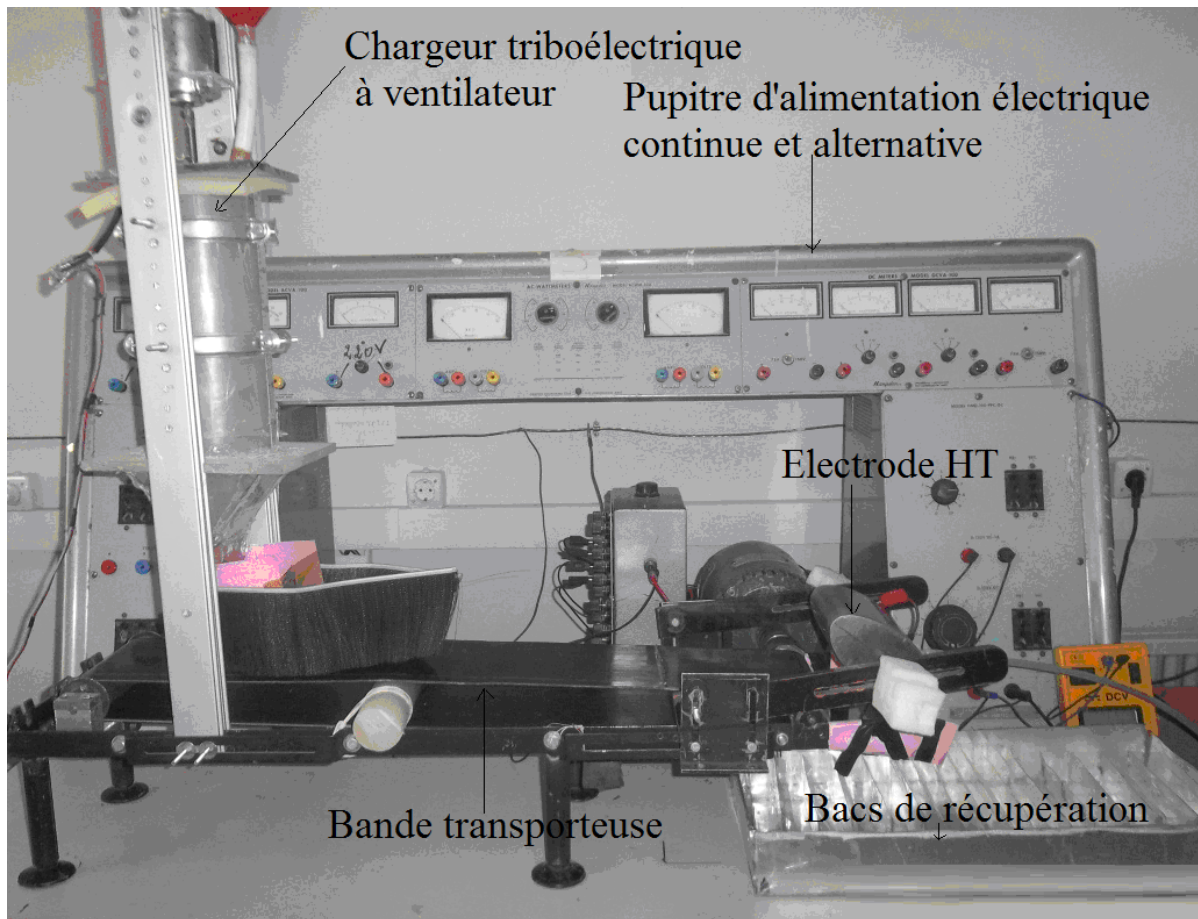


Figure IV.3 : Photo du dispositif de chargement tribo-aéro-électrique à un seul axe avec un séparateur électrostatique à tapis roulant

IV.1.1. Expériences de séparation électrostatique de mélanges granulaires binaires sur tapis roulant

Les expériences d'électro séparation sont menées sur quatre mélanges granulaires binaires de 40 g de proportions égales, le premier mélange se compose de PA et de PVC, le second de PA et de PC, le troisième de HIPS et de PVC et le dernier se compose de ABS et de HIPS.

Le choix de ces mélanges binaires n'était pas hasardeux mais il tenait compte de la classification triboélectrique de ces matériaux dans la série déduite de nos expériences en compagnie des différentes parois utilisées dans le Chapitre III ; on rappelle que dans cette série, ces matériaux sont classés dans l'ordre suivant (Figure III.9) du plus positif vers le plus négatif : PA-PC-ABS-AL-PMMA-HIPS-Acétate-PVC.

Les résultats de séparation pour chaque mélange binaire pour les différentes parois sont représentés sur les tableaux IV.1, IV.2 et IV.3.

Tableau IV.1 : Séparation électrostatique de mélanges binaires en utilisant un dispositif de tribo-chargeur à ventilateur avec paroi en PMMA.

Mélange de produit (A+B)	Récupération avec parois PMMA					
	Produit A			Produit B		
	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)
PA+PVC	20	6.0	100	20	-15.8	100
PA+PC	18.6	3.5	95.51	19	-1.8	97.03
HIPS +PVC	19.3	5.3	96.82	19.7	-10.8	95.33
ABS+HIPS	18.8	7.5	98.36	19.5	-8.1	91.33

Tableau IV.2 : Séparation électrostatique de mélanges binaires en utilisant un dispositif de tribo-chargeur à ventilateur avec paroi en Acétate.

Mélange de produit (A+B)	Récupération avec parois Acétate					
	Produit A			Produit B		
	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)
PA+PVC	19.95	2.8	99.75	19.9	-12.1	99.89
PA+PC	15.4	5.1	85	14.8	-0.4	84.33
HIPS +PVC	19.1	5.7	98.62	18.4	-9.9	98.73
ABS+HIPS	17.9	4.3	94.86	19.2	-3.2	92.64

Tableau IV.3 : Séparation électrostatique de mélanges binaires en utilisant un dispositif de tribo-chargeur à ventilateur avec paroi en Aluminium.

Mélange de produit (A+B)	Récupération avec parois Acétate					
	Produit A			Produit B		
	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)
PA+PVC	19.9	3.99	99.95	19.85	-11.00	99.93
PA+PC	19.1	3.44	98.32	18.1	-3.8	99.12
HIPS +PVC	18.8	4.00	95.1	19.4	-5.25	97.55
ABS+HIPS	18.9	2.96	95.58	18.3	-7.24	94.63

Avec les granules isolants PA et PVC situés aux extrémités opposées de la série triboélectrique, le résultat de la séparation tribo-électrostatique était excellent (c.-à-d. récupération et pureté proche de 100%, tableaux IV.1 à IV.3).

La position du PVC à l'extrémité négative de la série triboélectrique facilite également sa séparation d'un mélange qui contient des particules HIPS, qui ont tendance à se charger positivement. La meilleure pureté pour la séparation d'un mélange HIPS-PVC est réalisée en utilisant un dispositif avec des parois d'acétate (98,62% et 98,73% pour HIPS et PVC, respectivement) (Tableau IV.2).

Le cas de la séparation de l'ABS et du HIPS est plus complexe. Les deux matériaux, pris séparément, obtiennent une charge positive en contact avec la paroi de l'acétate. Lorsqu'ils sont traités ensemble (tableau IV.2), l'ABS se charge positivement (+ 4,3 nC / g), et le HIPS prend une charge négative (- 3,2 nC / g), ce qui signifie que l'effet du contact particule-particule a dominé celui des particules- paroi. Cependant, les meilleurs résultats de séparation ont été obtenus avec des dispositifs ayant des parois en aluminium ou PMMA, qui chargent distinctement les particules ABS et HIPS.

Pour le mélange PA / PC la séparation est encore plus difficile, quel que soit le type de paroi du dispositif de tribo-chargement. Les deux se chargent positivement avec les parois, mais peuvent être séparés en raison de l'effet de charge des impacts particules-particules. Le plus faible résultat a été obtenu avec le dispositif de paroi d'acétate, car le PA et le PC ont tendance à obtenir des niveaux élevés de charge positive en contact avec ce matériau.

IV.1.2. Expériences de séparation électrostatique de mélanges granulaires ternaires sur tapis roulant

Les expériences d'électro séparation sont menées sur deux mélanges granulaires ternaires de 45 g de même proportions (15 g chacun), le premier mélange ternaire se compose de PA/PC/PVC et le seconde de PA/HIPS/PVC.

Les résultats de séparation pour chaque mélange binaire pour les différentes parois sont représentés sur les tableaux IV.4, IV.5 et IV.6 pour le dispositif à un seul axe dans les conditions de température de l'ordre de $22^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$ et d'un taux d'humidité de $40.5\% \pm 2\%$.

Tableau IV.4 : Séparation électrostatique de mélanges ternaire en utilisant un dispositif de tribo-chargement avec paroi en PMMA.

Mélange de produit (A+B+C)	Récupération avec parois PMMA								
	Produit A			Produit B			Produit C		
	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)
PA+PC+PVC	14	7.3	96.43	13.6	2.0	88.82	14.8	-13.6	99.86
PA+ HIPS+PVC	14.5	7.4	94.48	13.5	-2.6	90.37	13.6	-19.4	94.12

Tableau IV.5 : Séparation électrostatique de mélanges ternaire en utilisant un dispositif de tribo-chargement avec paroi en Acétate.

Mélange de produit (A+B+C)	Récupération avec parois Acétate								
	Produit A			Produit B			Produit C		
	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)
PA+PC+PVC	15.7	7.7	92.36	13.6	4.2	91.91	15.41	-12.7	96.13
PA+ HIPS+PVC	13.4	8.9	94.03	12.6	4.1	93.65	14.63	-14.6	96.58

Tableau IV.6 : Séparation électrostatique de mélanges ternaire en utilisant un dispositif de tribo-chargement avec paroi en Aluminium.

Mélange de produit (A+B+C)	Récupération avec parois Acétate								
	Produit A			Produit B			Produit C		
	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)	Masse (g)	Charge (nC/g)	Pureté (%)
PA+PC+PVC	14.7	5.9	97.28	12.8	3.5	96.88	14.8	-19.3	96.62
PA+ HIPS+PVC	14.3	5.5	93.71	14	-5.1	90	13.8	-19.4	96.38

Pour le premier mélange ternaire (PA + PC + PVC), la meilleure pureté a été obtenue avec une paroi en aluminium. Cela s'explique par le fait que ni le PA ni le PC n'ont reçu une charge positive excessive en contact avec ce matériau.

La clé de la séparation ternaire est l'équilibre entre les effets de charge tribo des particules-particules et des collisions particules-paroi. Ceci explique les résultats obtenus avec le deuxième mélange ternaire (PA + HIPS + PVC), pour lequel les parois de l'acétate ont donné les meilleurs résultats (Tableaux IV.4 à IV.6).

IV.2. Séparation électrostatique à tambours tournants associé au chargeur triboélectrique à flux descendants pour matériaux pulvérulents

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes conçu au laboratoire IRECOM, de l'université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès. Le mélange pulvérulent chargé à l'aide du dispositif de chargement triboélectrique à un seul axe de rotation, est injecté directement dans la chambre de séparation de dimensions suivantes ; $23 \times 8 \times 7$ cm³, de parois en PMMA transparent. Le champ électrique est généré entre les deux électrodes cylindriques tournantes (Diamètre : 16 cm ; Longueur : 30 cm) qui sont éloignées de 8 cm et situées dans la chambre de séparation. Un champ électrique intense est créé entre les deux électrodes métalliques qui sont alimentées par deux sources de tensions continues ayant des polarités opposées. Les particules chargées négativement sont attirées vers l'électrode positive et les particules chargées positivement sont attirées vers l'électrode négative. Les cylindres métalliques servent en même temps d'électrodes et de moyen de transport des particules chargées, récupérant les produits séparés dans des collecteurs appropriés [91].

Le mélange de matériaux pulvérulents qui a été testé sur cette installation comprend deux types de PVC, l'un vierge de couleur blanche et l'autre recyclé de couleur grise provenant de la société de fabrication de tuyaux plastiques (CHIALI Tube, Sidi-Bel-Abbès, Algérie). La taille des particules est typiquement comprise entre 150 μ m et 250 μ m.

Une représentation schématique du chargement et de séparation du mélange binaire pulvérulents est illustrée dans la figure IV.4.

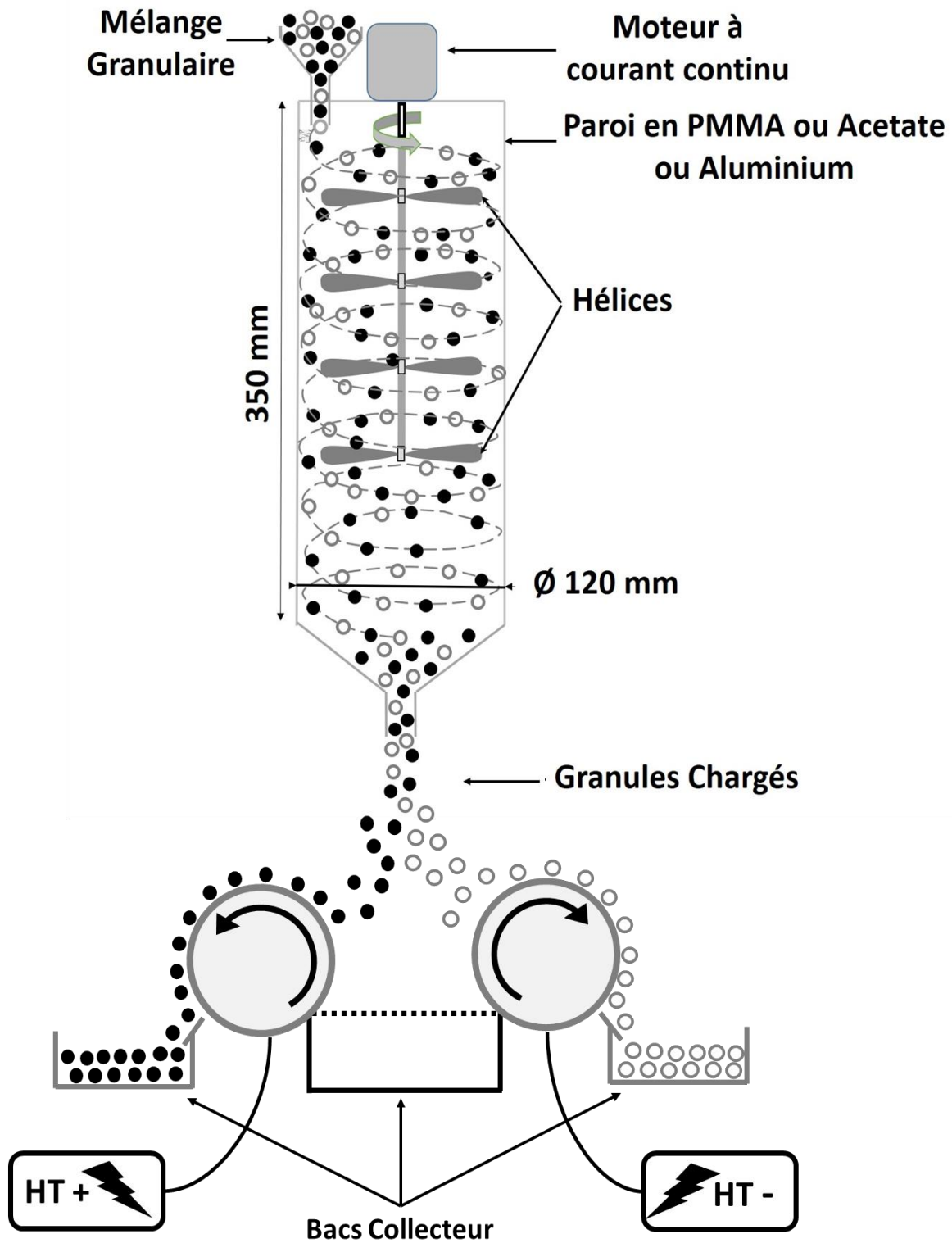


Figure IV.4 : Principe de fonctionnement de l'installation du Séparateur électrostatique à deux tambours tournants associé au chargeur à ventilateur.

L'étude expérimentale présentée dans cette partie a été réalisée avec une paroi en aluminium, 4 hélices et une vitesse de 3500 tr/min sous des tensions appliquées aux électrodes allant de 8 KV (4KV /-4KV) jusqu'à 36 KV (18KV/-18KV).

Notons que les valeurs de certains paramètres sont fixées et maintenues constantes pour toutes les expériences.

- Vitesse de rotation des électrodes tournantes : 70 tr/min
- Masse du mélange pulvérulent : 400g (50% PVC recyclé gris / 50% PVC vierge Blanc)

Les résultats obtenus sont représentés au tableau IV.7.



Figure IV.5 : Echantillon du mélange pulvérulent (50% PVC recyclé gris / 50% PVC vierge Blanc)

Tableau IV.7 : Résultats de séparation de la poudre en fonction de la HT appliquée aux électrodes tournantes

Tension(kV) En module	Masse récupérée(g)		Masse récupérée (%)	
	PVC Gris	PVC Blanc	PVC Gris	PVC Blanc
8	97.41	134.17	48.71	67.09
16	151.82	165.51	75.91	82.76
20	171.57	166.51	85.79	83.26
24	197.00	181.80	98.50	90.90
28	198.85	182.37	99.43	91.19
32	197.22	181.62	98.61	90.81
36	199.62	182.93	99.81	91.47

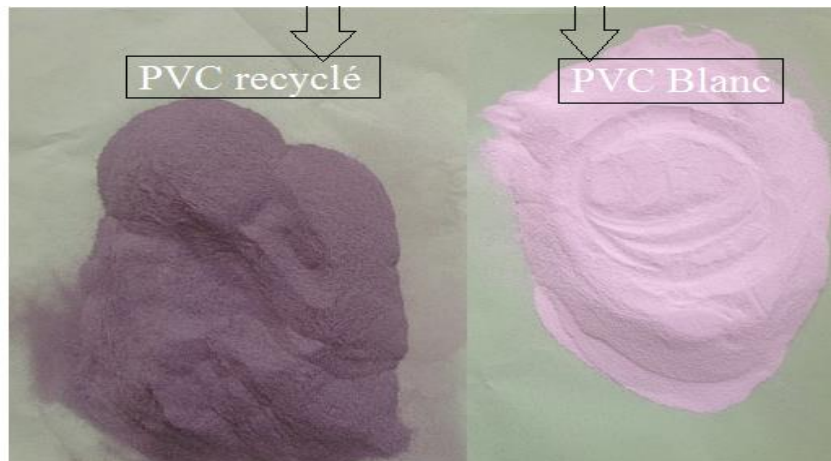


Figure IV.6 : Echantillon de séparation de poudre de PVC vierge (blanc) et recyclé (gris).

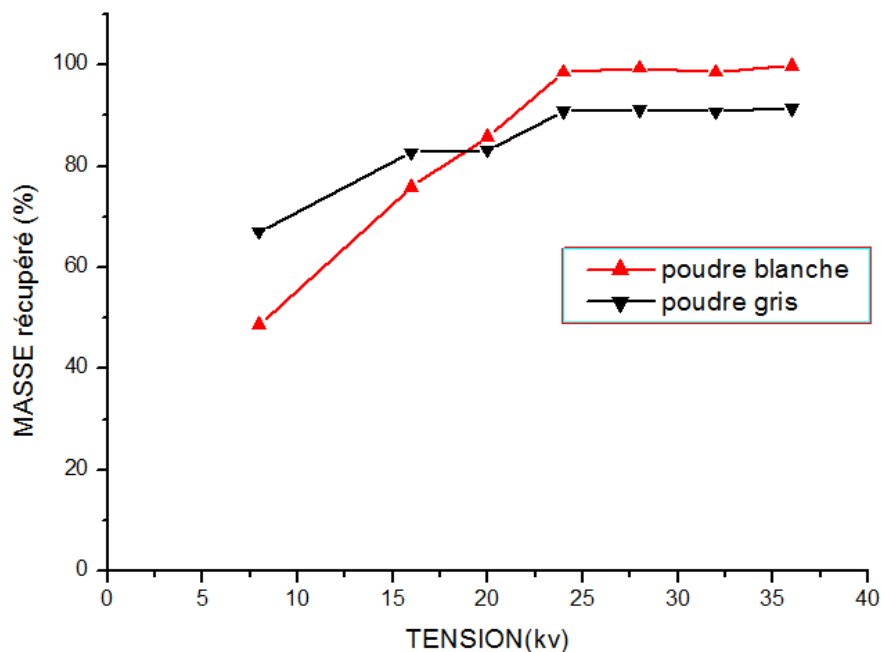


Figure IV.7 : Séparation de la poudre en fonction de la HT appliquée aux électrodes.

On constate que les taux de récupération des produits poudreux croient avec la haute de tension appliquée et qu'à partir de 24 kV (+12 kV/-12 kV) la masse de PVC blanc récupérée dépasse les 98 % et 90 % pour le PVC gris. Ces taux restent pratiquement constants d'où une première conclusion pour son utilisation pour une tension de 24 kV sera suffisante pour l'électroséparation des produits fins.

La pureté des produits récupérés, visuellement, est très élevée mais nous n'avons pas pu la quantifier avec les outils disponibles notamment « par traitement d'image » où nous sommes confrontés à un problème de reproductibilité des résultats sur un même échantillon.

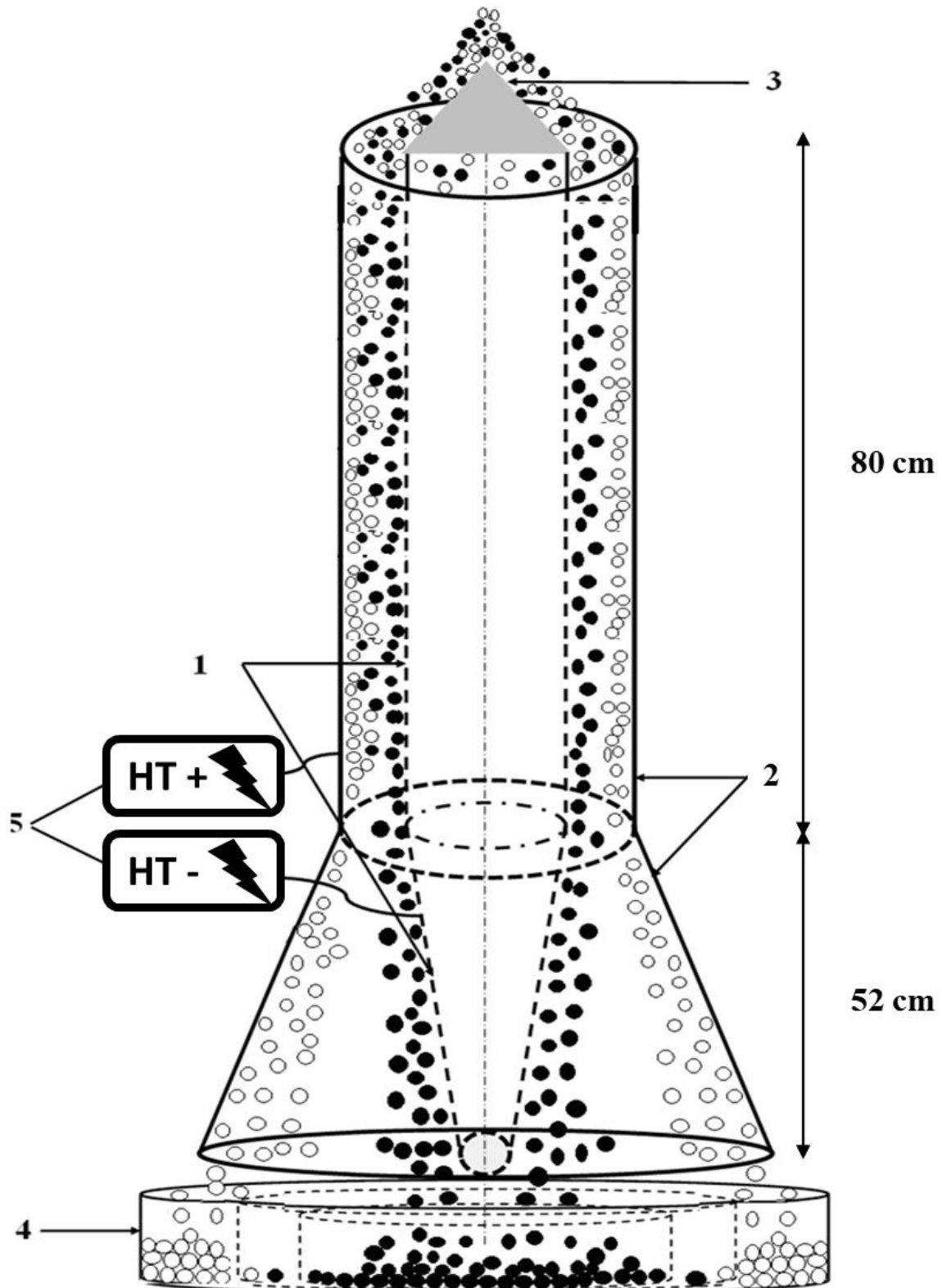
IV.3. Elaboration d'une nouvelle installation de séparation électrostatique concentrique

La séparation électrostatique des granules isolants a connu des développements significatifs ces dernières décennies ; Il existe plusieurs méthodes pour la séparation électrostatique avec différents dispositifs à savoir : séparation à chute libre, séparation à tapis roulant, séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes conductrices, séparateur tribo-aéro-électrostatique à tambours transporteurs, séparateur tribo-aéro-électrostatique à cylindres tournants, séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales.

La réalisation d'un séparateur électrostatique ne possédant pas d'éléments mobiles, de volume réduit, de construction simple et ayant un champ électrique uniforme et intense sur toute la trajectoire des particules à séparer a été notre challenge durant toute cette période de préparation de thèse ou nos efforts ont été récompensés par la conception et la mise en œuvre d'une nouvelle installation à base d'électrodes concentriques qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet en fin 2016 auprès de l'INAPI (Annexe 2).

IV.3.1. Réalisation d'un nouveau séparateur électrostatique à électrodes concentriques pour mélanges granulaires isolants

Ce dispositif de séparation électrostatique à électrodes concentriques pour mélanges granulaires isolant a été conçu et réalisé en 2016 au sein du laboratoire d'électrostatique IRECOM, à l'université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés, et a fait l'objet d'un brevet [95]. Le dispositif expérimental (Figure IV.8) est constitué de deux électrodes concentriques cylindriques en aluminium de longueur totale de 1100 mm ; la première est d'un diamètre faible (60mm) à sa partie supérieure puis conique (longueur 520mm) vers le bas (1) et la deuxième est cylindrique d'un diamètre beaucoup plus grand (300mm) puis en forme de cône inversé (2) (longueur 520mm), à son extrémité supérieure est placé un cône (3) dont le rôle est de disperser uniformément les granules chargés dans la zone de séparation. A l'extrémité inférieure des deux électrodes, on trouve des bacs cylindriques concentriques (4) de récupération de produits purs ouverts du côté supérieur et fermé en bas. Les deux électrodes concentriques sont reliées à deux sources de hautes tensions continues de polarité opposée (5). L'objectif est d'obtenir un champ électrique intense dans toute la surface inter électrodes afin de changer la trajectoire des granules selon leur charge acquise et vers l'électrode adéquate, ce qui constitue le principe de base de la séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants binaires ou ternaires.



1. Electrodes concentriques Internes, 2 : Electrodes concentriques externes, 3 :cône de répartition de matière,
4 : Bacs de récupération de matériaux, 5 : Sources de Haute tension, 6 : Chargeur triboélectrique

Figure IV.8 : Vue de coupe du séparateur à électrodes concentriques

La réalisation de cette nouvelle installation a suscité une grande préparation car nous avons rencontré plusieurs difficultés surtout au niveau de la partie conique du dispositif nécessitant des calculs de géométrie pour découper une tôle rectangulaire en aluminium en forme conique où nous avons conçu un support en bois pour cette partie de l'installation (Figure IV.10).

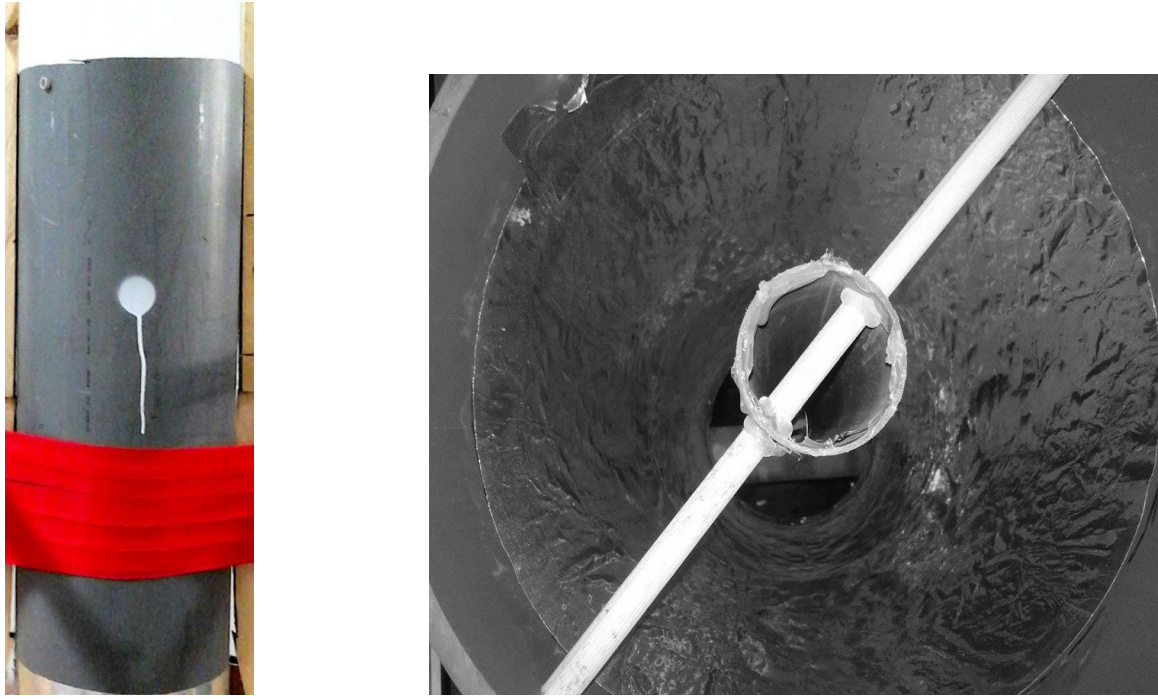


Figure IV.9 : photo du dispositif montrant la partie des électrodes cylindriques du séparateur.



Figure IV.10 : Photo du dispositif montrant le support de la partie conique des électrodes.

Après la construction du support de séparateur conique nous avons formé l'électrode conique extérieure par une tôle d'aluminium (Figure IV.11).

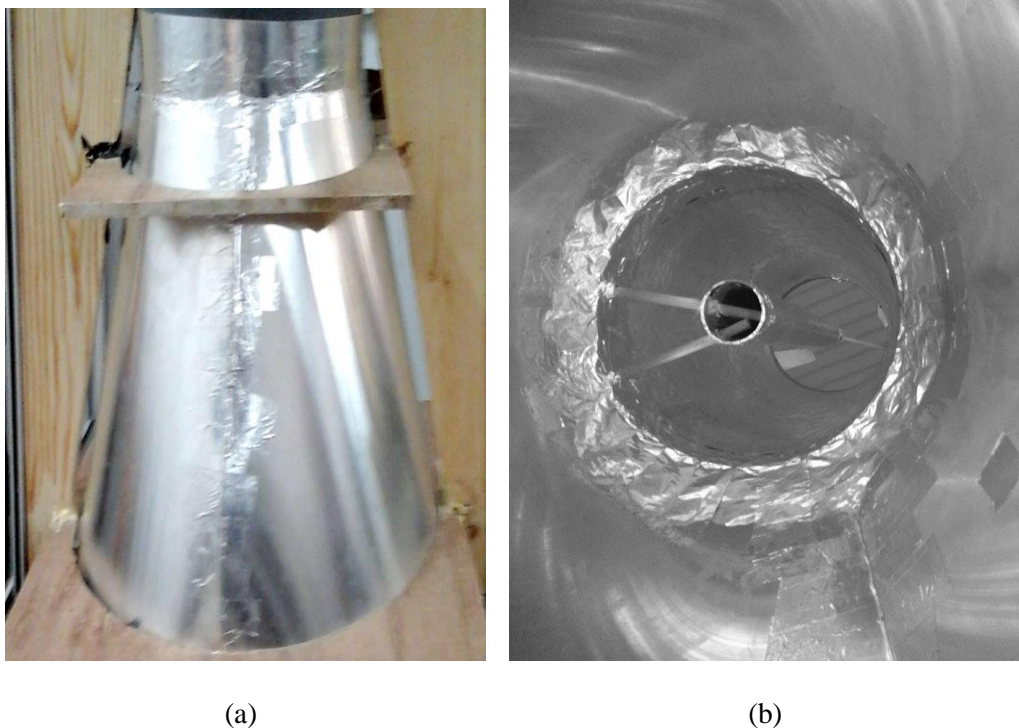


Figure IV.11 : Photo du dispositif montrant la partie des électrodes coniques du séparateur ;
(a) vue de face, (b) vue de l'intérieure.

La réalisation des électrodes cylindriques a nécessité l'emploi d'un cylindre en PVC de diamètre 300 mm (pour l'électrode extérieure) dont la surface intérieure a été habillé d'un film d'aluminium par contre pour l'électrode intérieure nous avons utilisé un tube d'inox de diamètre 60 mm ; une fois ces deux électrodes assemblées, le chargeur triboélectrique à ventilateur est placé au-dessus pour une éventuelle opération d'électroséparation.

IV.3.2. Protocole et mise en marche du séparateur à électrodes concentriques associé au chargeur triboélectrique à flux d'air descendant

La mise en marche de l'installation (Figure IV.12) débute par la mise sous haute tension des deux électrodes en polarités inversées, le mélange granulaire isolant est déposé dans le dispositif de chargement tribo-électrique à ventilateur placé en haut de l'installation ou les matériaux seront chargés et canalisés vers le séparateur à électrodes concentriques où les granules qui ont acquis une charge négative seront attirés par l'électrode haute tension positive et seront repoussé par l'électrode haute tension négative ; le même phénomène est constaté pour les

particules chargées positivement qui sont attirées par l'électrode négative et repoussées par l'électrode positive.

Après le passage dans le dispositif d'électro-séparation, les particules tombent directement dans les six bacs de récupérations (5) des produits purs qui sont numérotés de l'intérieur vers l'extérieur.

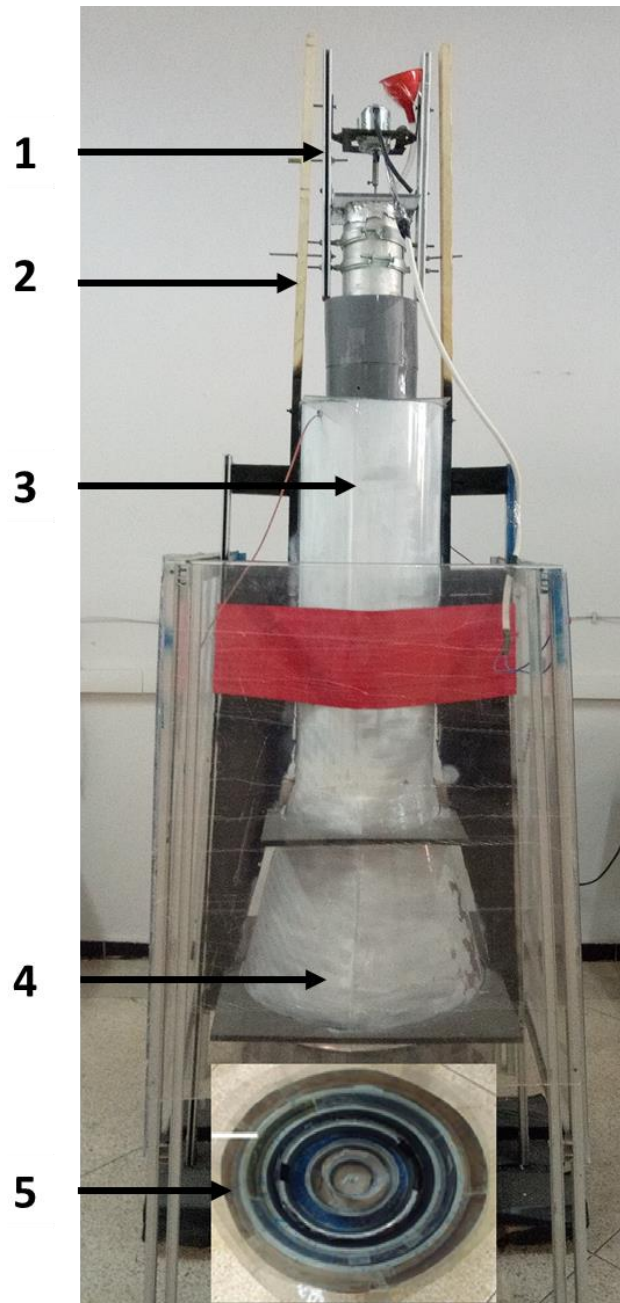


Figure IV.12 : Photo du dispositif de séparation électrostatique à électrodes concentriques cylindriques ; 1. Dispositif de tribo chargement, 2. support en bois, 3. support en aluminium, 4. électrode cylindrique, 5. Electrode conique, 6. Bacs de récupération.

IV.3.3. Simulation du champ électrique dans le séparateur concentrique

La séparation électrostatique est une technologie multifactorielle difficilement contrôlable, plusieurs variables internes et externes peuvent agir sur le rendement de ces dispositifs, cette dernière dépend d'une multitude de facteurs, en particulier le champ électrique généré par le système d'électrodes : son intensité, sa distribution, ses lignes, sa direction...etc.

Notre étude a fait recours à l'utilisation des deux logiciels :

- SolidWorks 2016
- COMSOL Multiphysics 5.1

IV.3.3.1. Dessin et Dimension de la configuration

L'idée de ce nouveau dispositif consiste à effectuer deux techniques de séparation à chute libre en cascade, la première partie en utilisant deux électrodes concentriques cylindriques, tandis que la deuxième partie deux électrodes coniques inversées ont été utilisées. Le dispositif a été dessiné à partir du logiciel SolidWorks 2016, qui permet de dessiner les formes géométriques des électrodes complexes avec une grande précision (forme, dimension et position).

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur, Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, et racheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes, il utilise le principe de conception paramétrique et génère trois types de fichiers qui sont liés : la pièce, l'assemblage, et la mise en plan. Ainsi toute modification sur un de ces trois fichiers sera répercutée sur les deux autres. [85].

Les dimensions tracées dans le logiciel sont réelles (Figure IV.13), le dispositif a été dessiné en trois dimensions (3D), afin de l'exporter vers le COMSOL.

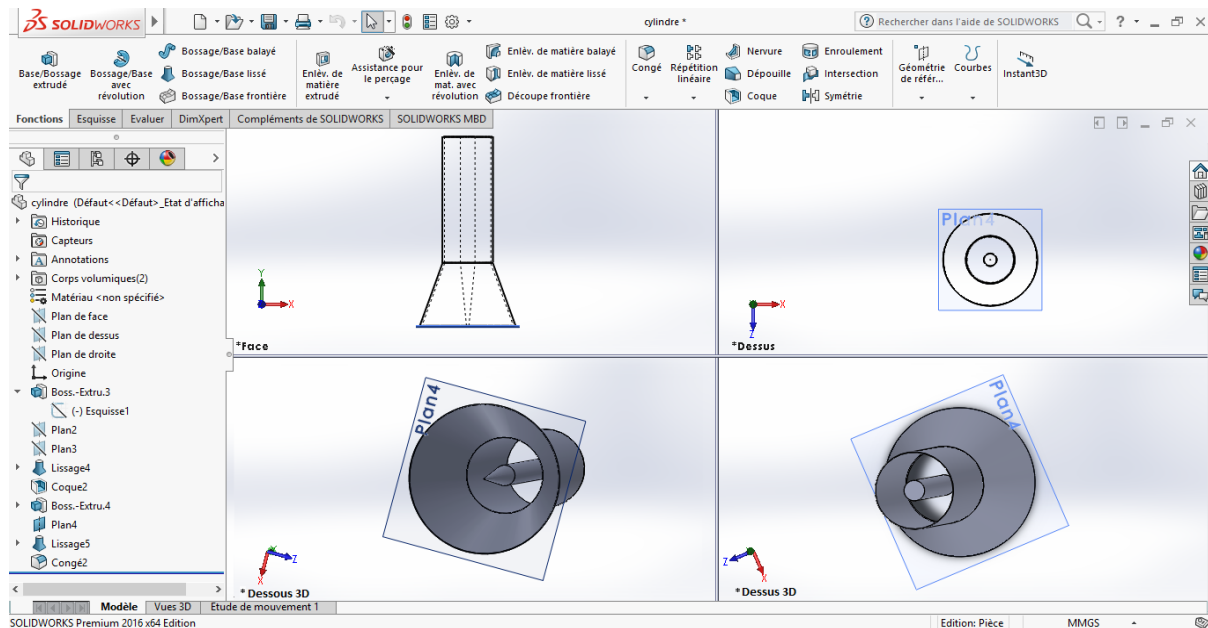


Figure IV.13 : Système d'électrodes dessiné à l'aide de SolidWorks 2016.

IV.3.3.2. Logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics® est une plate-forme logicielle générale qui autorise la modélisation et la simulation des phénomènes physiques à l'aide de méthodes numériques avancées. COMSOL Multiphysics permet de coupler des physiques "simples" ou d'étudier des phénomènes multiphysiques. Pour étendre les simulations possibles, COMSOL Multiphysics comprend plus de 30 modules complémentaires qui offrent des interfaces et des outils spécialisés en génie électrique, mécanique, fluide et chimique. De plus, des interfaces bidirectionnelles relient les simulations réalisées dans COMSOL Multiphysics à des logiciels tiers de calcul, de CAO (CAD) et de CAO (ECAD). [86]

L'utilisateur sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation (définir la géométrie, les propriétés des matériaux, le maillage, choisir la ou les physiques, résoudre et afficher les résultats) sont intégrées dans une seule interface.

COMSOL Multiphysics contient la plupart des équations, peu de programmation directe, il utilise des interfaces graphiques spécialisées grâce aux modules d'applications optionnels (Figure IV.14).

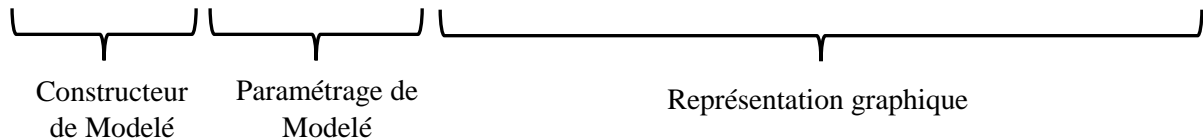
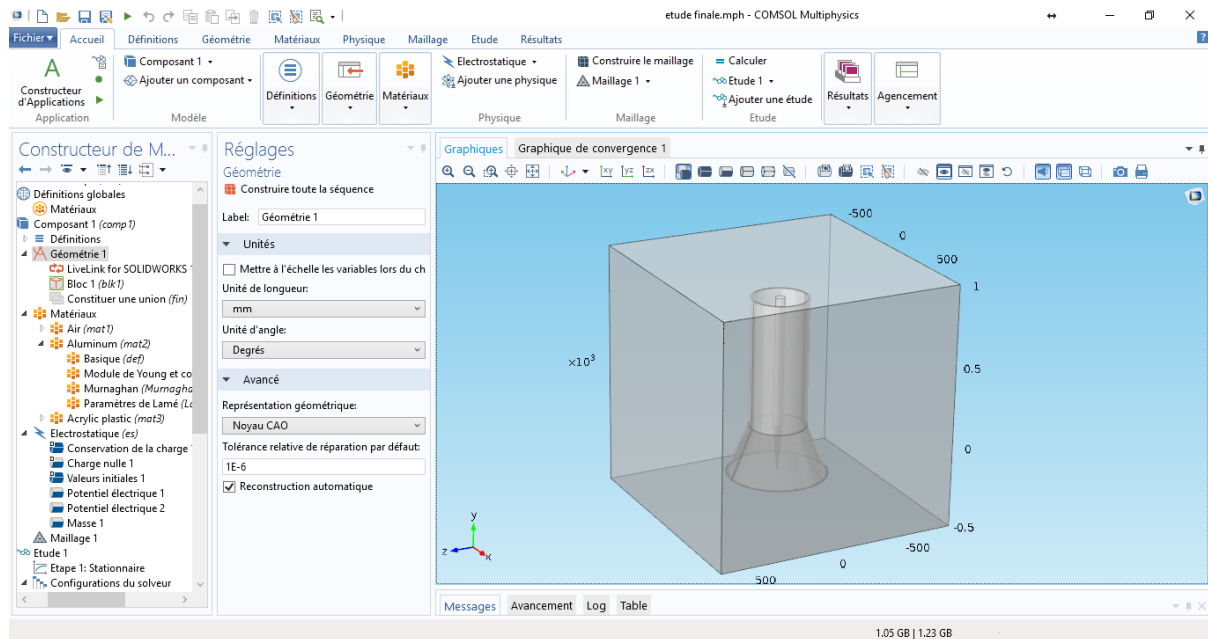


Figure IV.14 : Interface graphique du logiciel COMSOL Multiphysics 5.1.

IV.3.3.3. Plan de décision et de construction du modèle

Après création d'un nouveau fichier COMSOL, les paramètres du modèle sont définis comme suit :

- ✓ Choix de la dimension : la dimension 3D a été prise.
- ✓ Choix des modules physiques : on a choisi l'électrostatique comme domaine.
- ✓ Choix du type d'étude : l'étude a été réalisée en régime stationnaire.
- ✓ Construction de la géométrie : la géométrie a été construite sous SolidWorks 2016 et a été importée directement.
- ✓ Choix du ou des matériaux : on définit les matériaux comme suit : les électrodes intérieures et extérieures en aluminium et l'environnement en air.
- ✓ Paramétrage du ou des modules physiques : on a introduit les valeurs des hautes tension appliquées aux deux électrodes comme le montre la Figure IV.15.

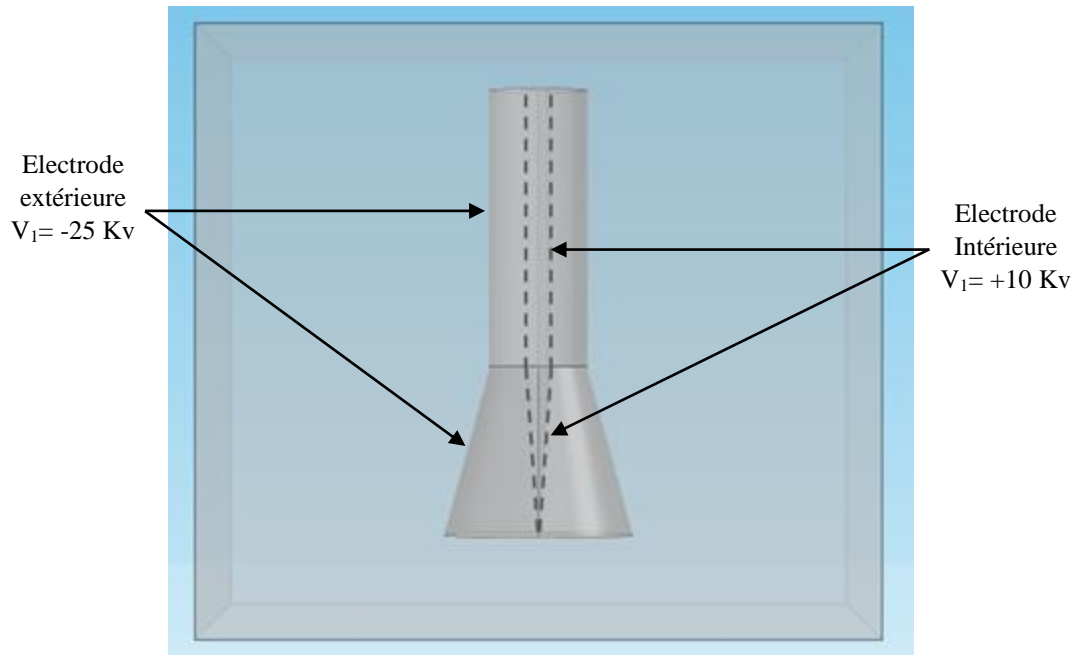


Figure IV.15 : Valeurs des Hautes tensions appliquées aux électrodes.

- ✓ Paramétrage et calcul du maillage : le maillage tétraédrique libre comme élément de triangulation a été sélectionné pour notre étude.

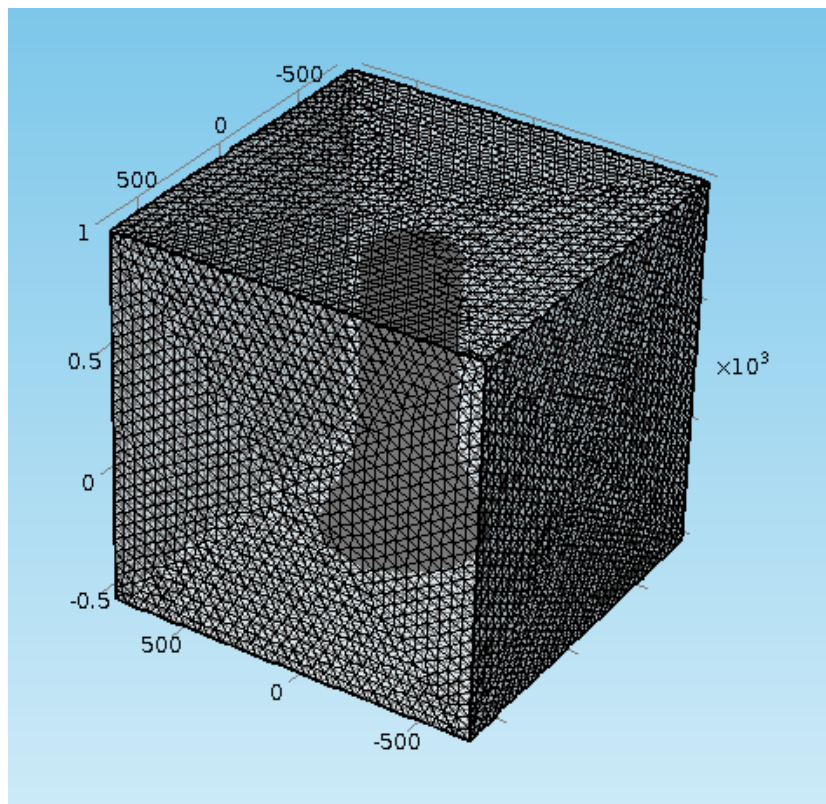


Figure IV.16 : Maillage du domaine étudié effectué par le logiciel COMSOL.

- ✓ Paramétrage et calcul de l'étude : après définition de tous les paramètres, il reste à lancer le calcul du champ électrique dans le domaine d'étude.
- ✓ Représentation graphique des résultats : le COMSOL offre plusieurs représentations des résultats de calcul, par exemple : les lignes équipotentielles (Figure IV.17), les isovaleurs du champ électrique (Figure IV.18), et une représentation vectorielle (Figure IV.19).

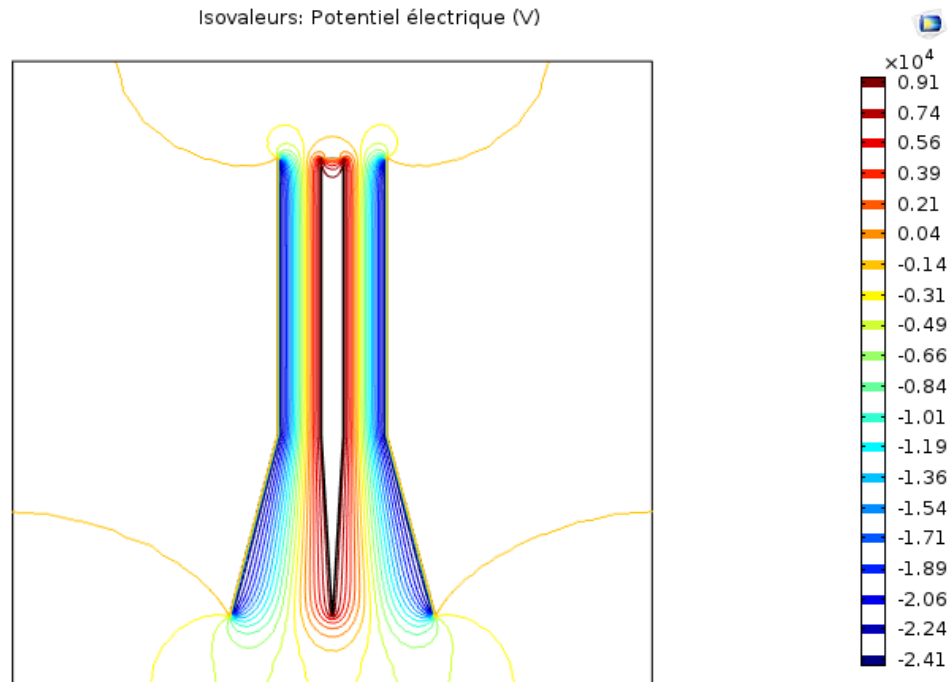


Figure IV.17 : Représentation des lignes équipotentielles dans le modèle.

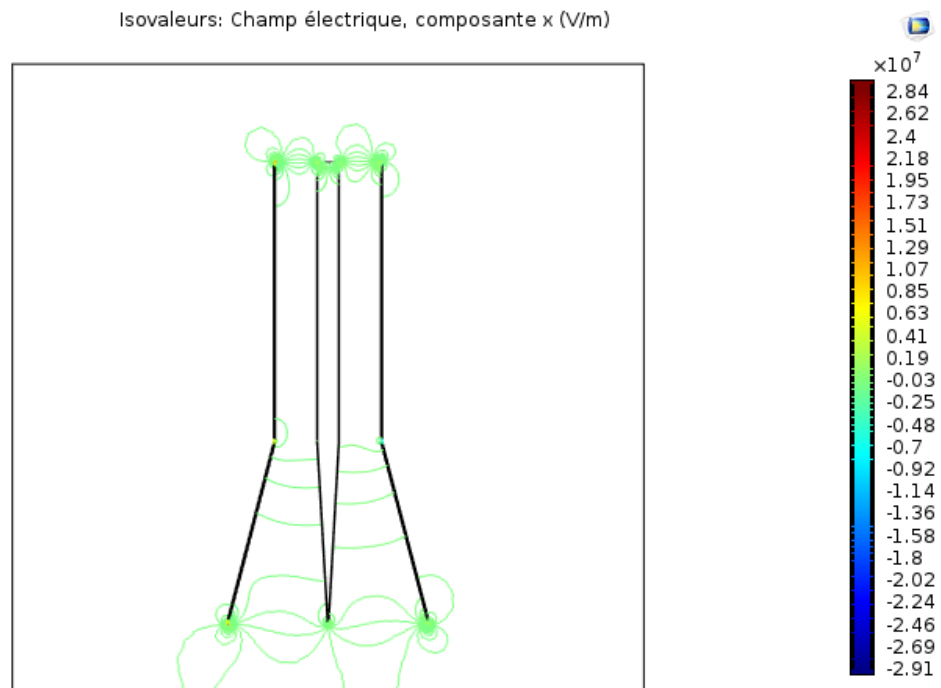


Figure IV.18 : Représentation graphique des isovaleurs du champ électrique.

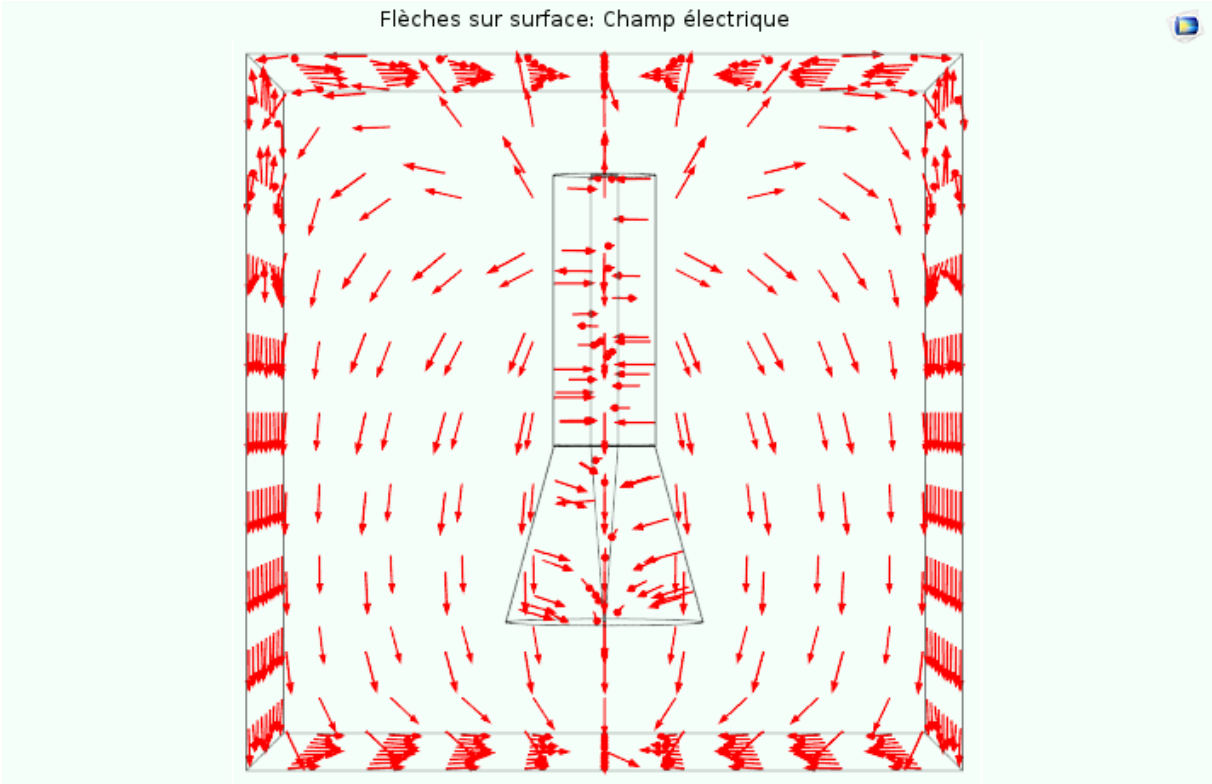
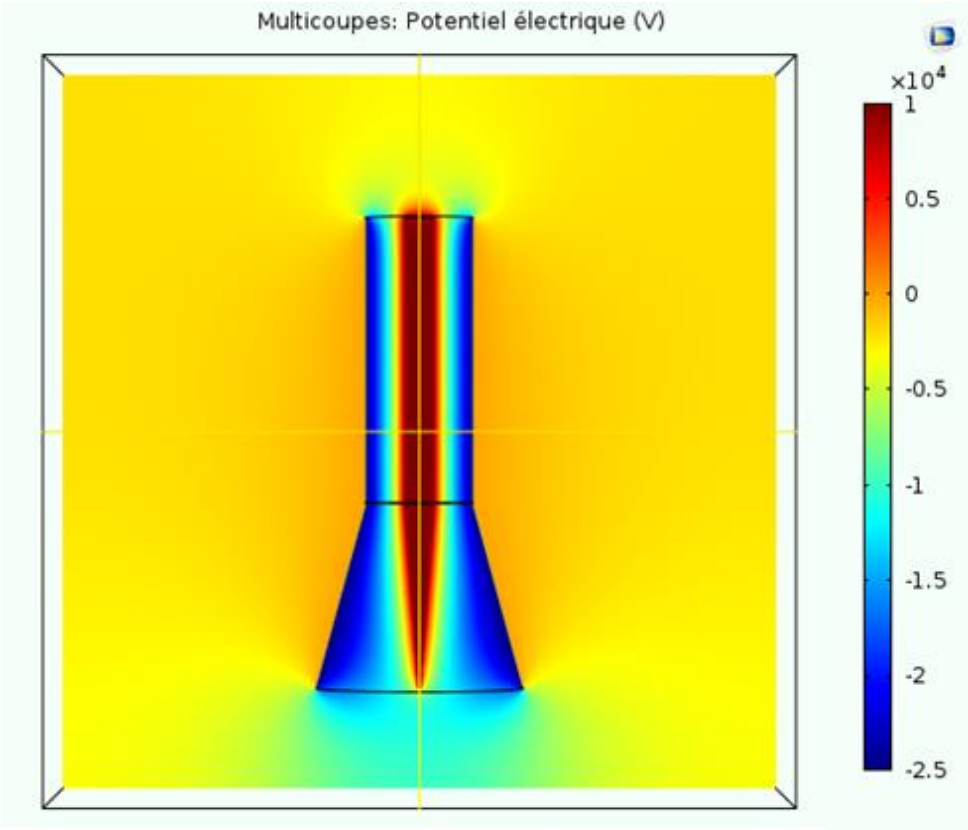
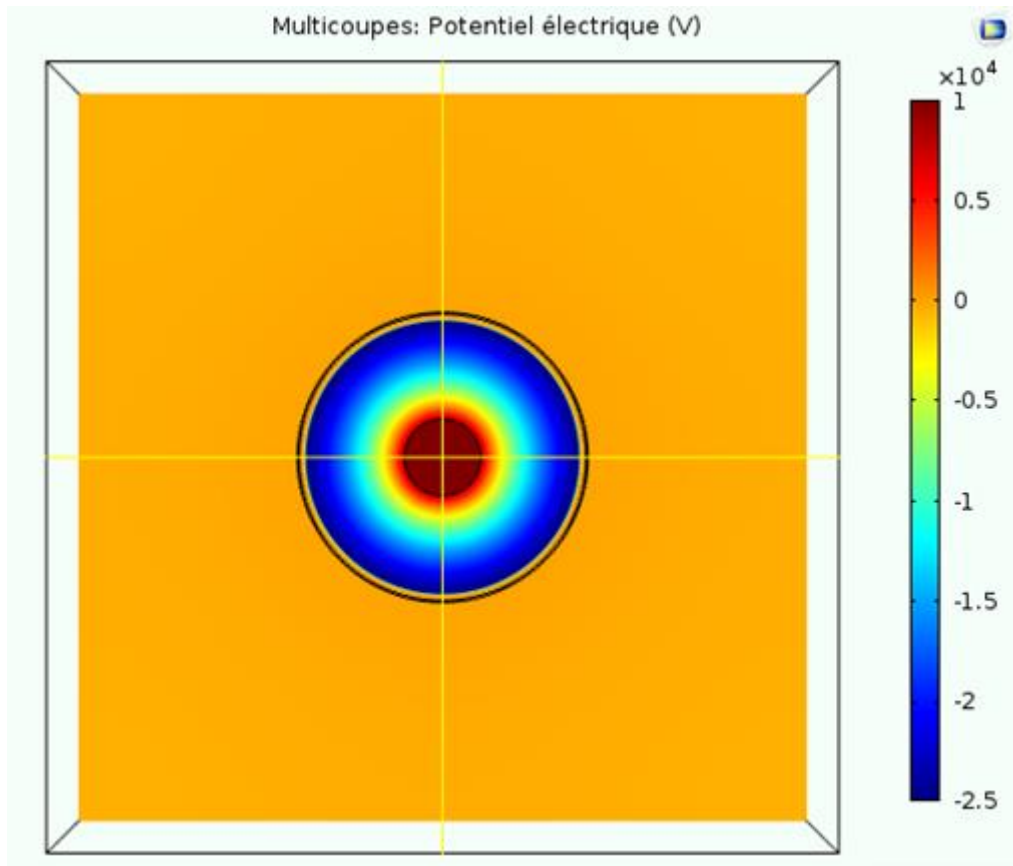


Figure IV.19 : Représentation vectorielle du champ électrique.



(a)



(b)

Figure IV.20 : Représentation graphique du potentiel électrique.

(a) : Vue de coupe de face, (b) Vue de dessus

IV.3.4. Procédure expérimentale

Les expériences ont été effectuées sur trois types de granules isolants utilisés dans la plasturgie : Polyamide (PA), Polycarbonate (PC) et Polychlorure de vinyle (PVC), tailles de grains ≤ 5 mm, provenant du déchetage des déchets EEE et fournis par la société APR2, France et de la société CHIALI Tubes où la couleur de chaque produit est différente afin de faciliter l'analyse des résultats. Pour le dispositif de séparation un seul facteur a été étudié, à savoir :

- La Haute tension appliquée aux électrodes.

La méthode expérimentale consiste à faire varier la valeur de la haute tension appliquée à l'électrode extérieure et intérieure pour différentes configurations, afin d'examiner son effet sur la séparation électrostatique des différents matériaux granulaires.

- Configuration 1 ; électrode extérieure -25 KV, électrode intérieure +10 KV.
- Configuration 2 ; électrode extérieure -15 KV, électrode intérieure +10 KV.
- Configuration 3 ; électrode extérieure -10 KV, électrode intérieure +5 KV.

Après la mise en marche de l'installation où les deux électrodes sont soumises à la haute tension, le mélange granulaire isolant chargé par le dispositif de tribo-chargement à un seul axe passe dans le séparateur à électrodes concentriques, après le passage dans le dispositif d'électro-séparation, les particules tombent directement dans des bacs de récupération des produits purs.

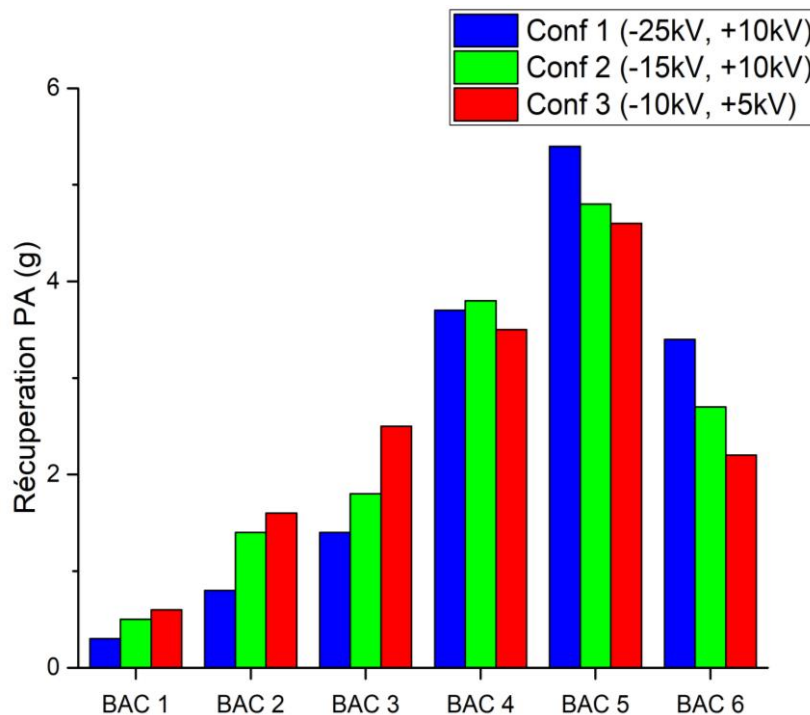
IV.3.5. Résultats

Les expériences d'électro séparation sont menées sur un mélange granulaire binaire de 30 g (50% +50%).

IV.3.5.1. Application sur un mélange granulaire binaire PA-PC

Les résultats obtenus concernant l'électro séparation pour le mélange binaire (PA-PC) sont représentés dans les Figure IV.21 et IV.22 pour les différentes configurations de la haute tension appliquée pour les électrodes; la température ambiante était de l'ordre de $23.8\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ et le taux d'humidité était de $38.9\%\pm 3\%$.

Après avoir séparé le produit granulaire, la masse des granules récupérés dans chacun des six compartiments du collecteur, a été mesurée en utilisant une balance électronique.



(a)

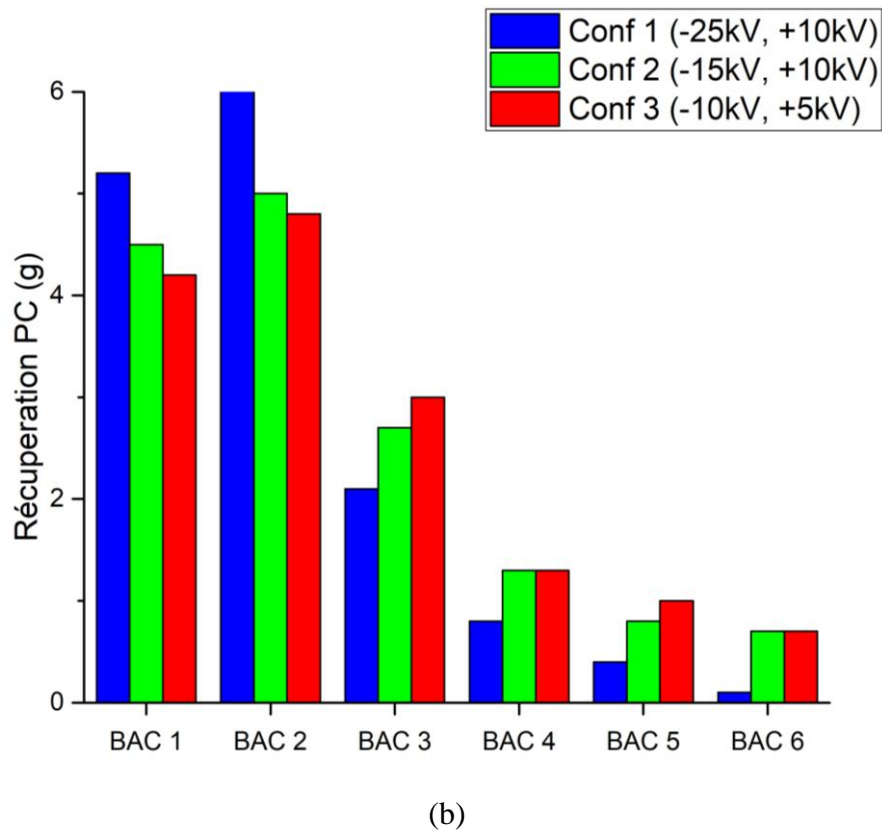
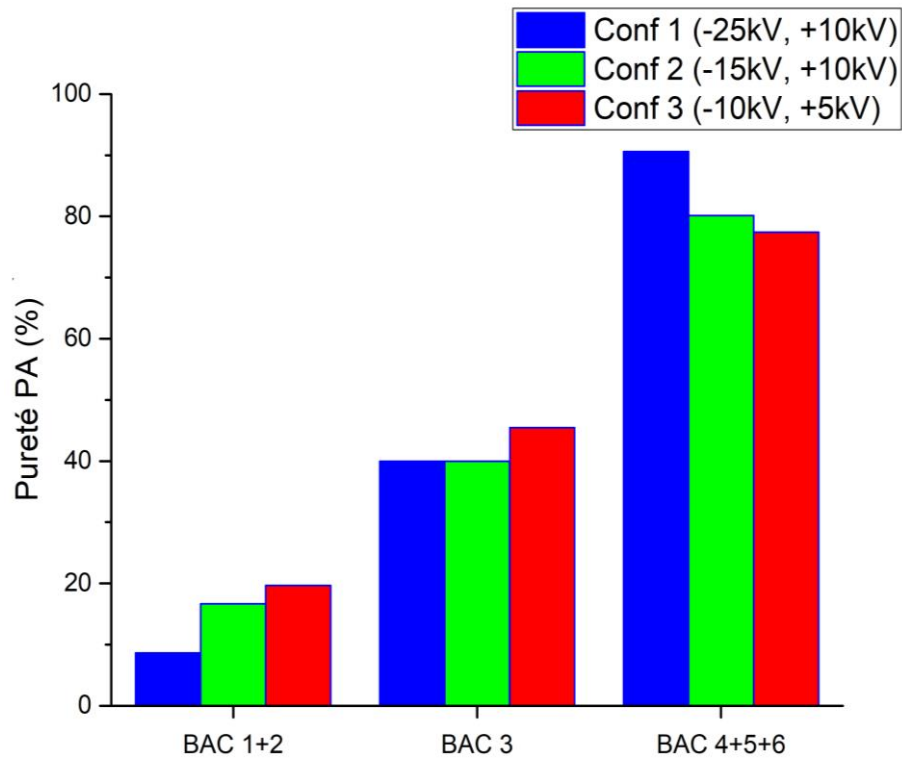
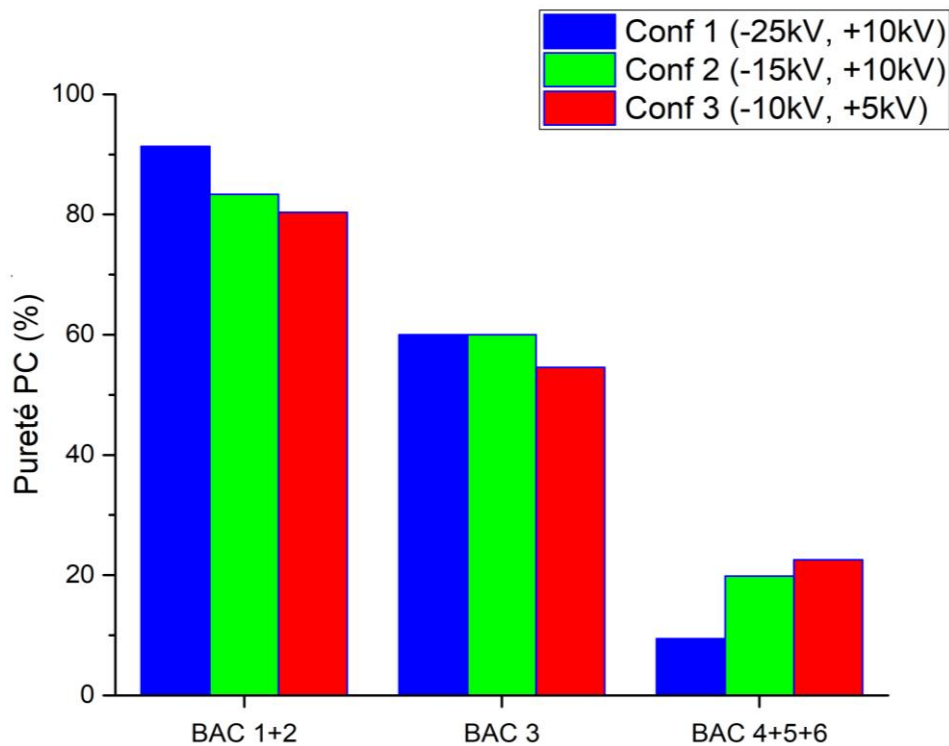


Figure IV.21 : Récupération du PA (a) et du PC (b) dans les différents bacs de collecteur, pour les différentes configurations des électrodes.

Les figures IV.17 (a) et (b) montrent la masse récupérée dans les différents bacs du collecteur pour les deux matériaux (PA et PC). Pour les trois configurations le premier produit (PA) est majoritairement récupéré dans le 4^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} bac, par ailleurs le deuxième produit (PC) est majoritairement récupéré dans le 1^{er} et le 2^{ème} bac et le troisième bac est considéré comme un bac mixte vue la quantité égale des deux produits dans ce bac.



(a)



(b)

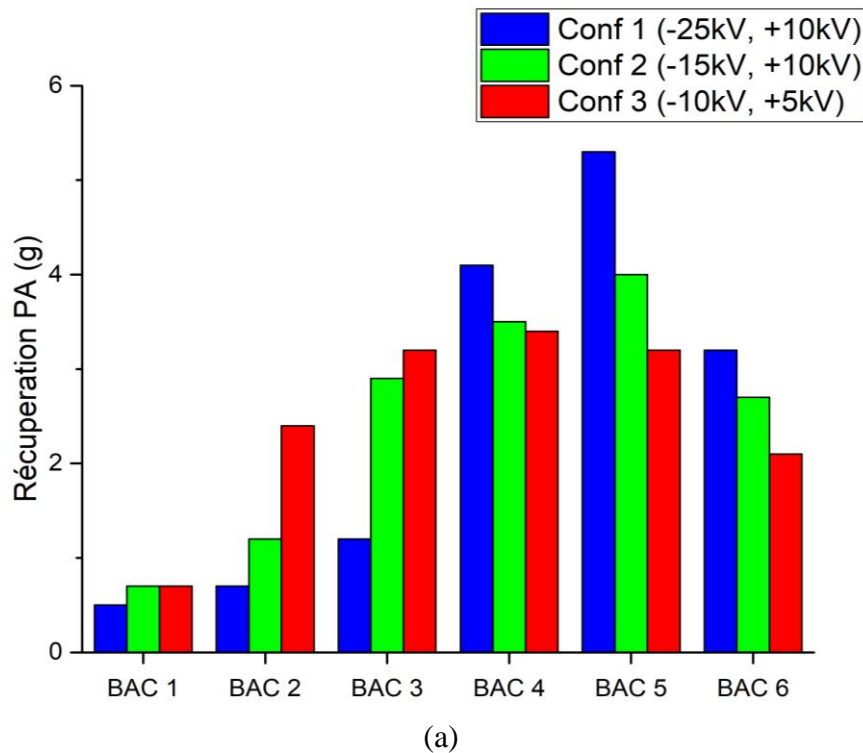
Figure IV.22 : Pureté du PA (a) et du PC (b) dans les différents bacs du collecteur, pour les différentes configurations des électrodes.

Les figures IV.22 (a) et (b) montrent la pureté du produit récupéré dans les différents compartiments du collecteur pour le mélange PA-PC.

Ces figures montrent que la configuration 1 des électrodes avec une tension de -25KV et +10Kv, donne une meilleure récupération des matériaux avec une pureté qui peut atteindre les 91.34% pour le PA et 90.58% pour le PC pour un mélange PA-PC. La pureté augmente avec l'augmentation de la haute tension appliquée sur les électrodes.

IV.3.5.2. Application sur un mélange granulaire PA-PVC

Les résultats obtenus concernant l'électro séparation pour le mélange binaire (PA-PVC) sont représentés dans les Figure IV.23 et IV.24 pour les différentes configurations de la haute tension appliquées pour les électrodes; la température ambiante était de l'ordre de $24\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ et le taux d'humidité était de $39.2\text{ }\%\pm 3\%$.



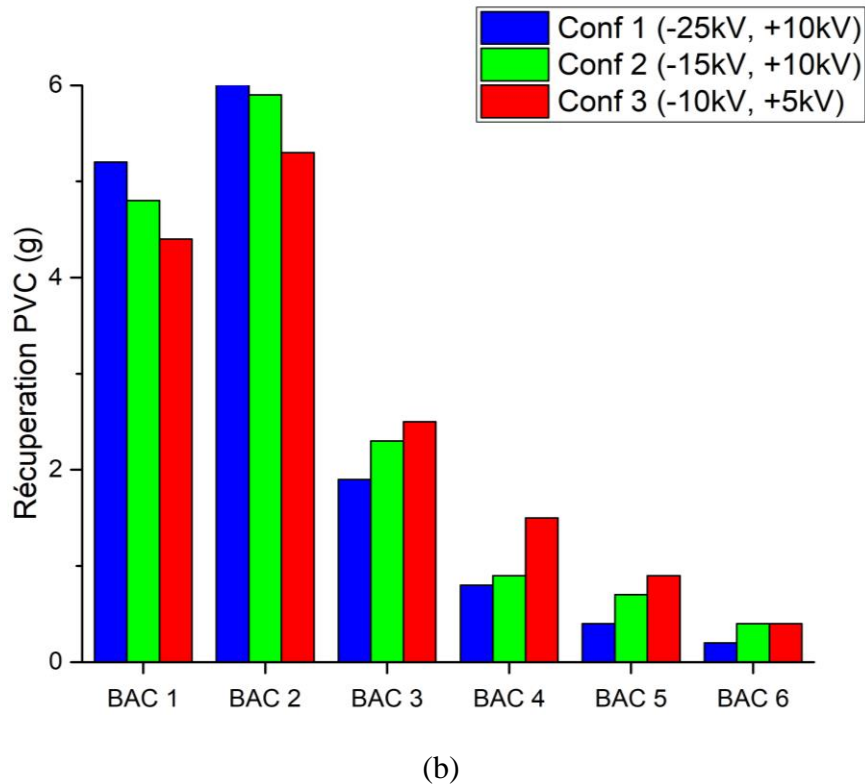


Figure IV.23 : Récupération du PA (a) et du PVC (b) dans les différents bacs de collecteur, pour les différentes configurations des électrodes.

Les figures IV.23 (a) et (b) montrent la masse récupérée dans les différents bacs du collecteur pour les deux matériaux (PA et PVC) où on constate que pour les trois configurations le premier produit (PA) est majoritairement récupéré dans le 4^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} bac, par ailleurs le deuxième produit (PVC) est majoritairement récupéré dans le 1^{er} et le 2^{ème} bac et le troisième bac est considéré comme un bac mixte vue la quantité égale des deux produits dans ce bac.

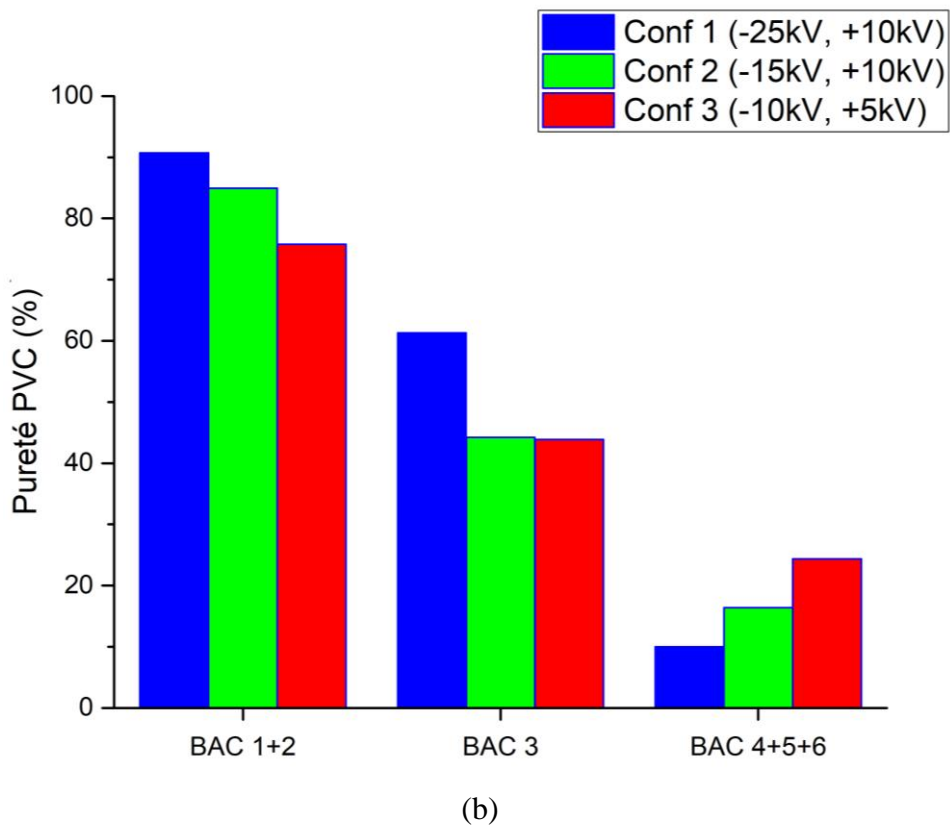
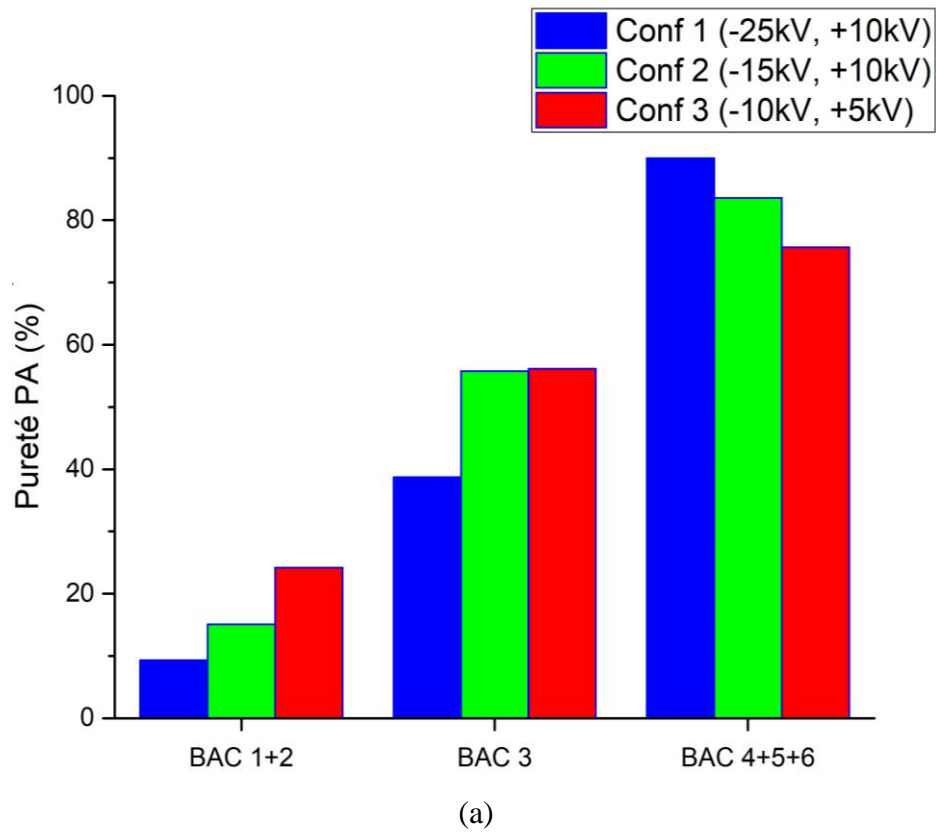


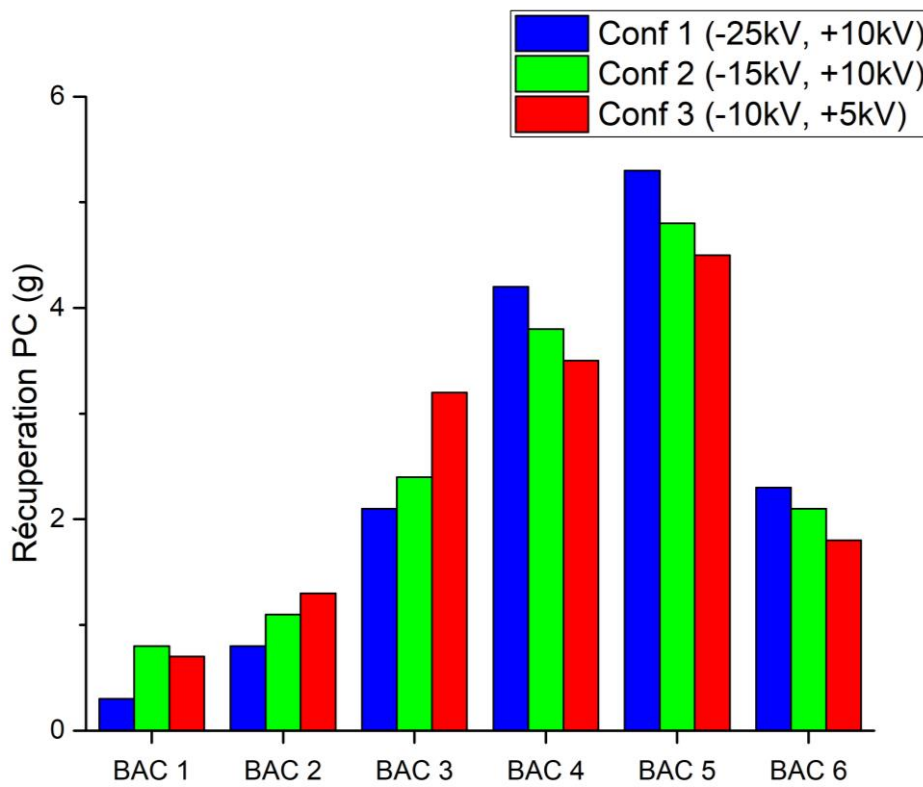
Figure IV.24 : Pureté du PA (a) et du PVC (b) dans les différents bacs du collecteur, pour les différentes configurations des électrodes.

Les figures IV.24 (a) et (b) montrent la pureté du produit récupéré dans les différents compartiments du collecteur pour le mélange PA-PVC.

Ces figures montrent que la configuration 1 des électrodes avec une tension de -25KV et +10Kv, donne une meilleure récupération des matériaux avec une pureté qui peut atteindre les 90.70% pour le PA et 90% pour le PVC pour un mélange PA-PVC. La pureté augmente avec l'augmentation de la haute tension appliquée sur les électrodes.

IV.3.5.3. Application sur un mélange granulaire PC-PVC

Après introduction du mélange PC/PVC dans l'installation de chargement et de séparation électrostatique, dans les conditions ambiantes de températures de $25.1\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ et d'humidité de $42.2\text{ }\%\pm\%$; nous avons obtenu pour les trois configurations les résultats représentés dans les Figures IV.25 et IV.26.



(a)

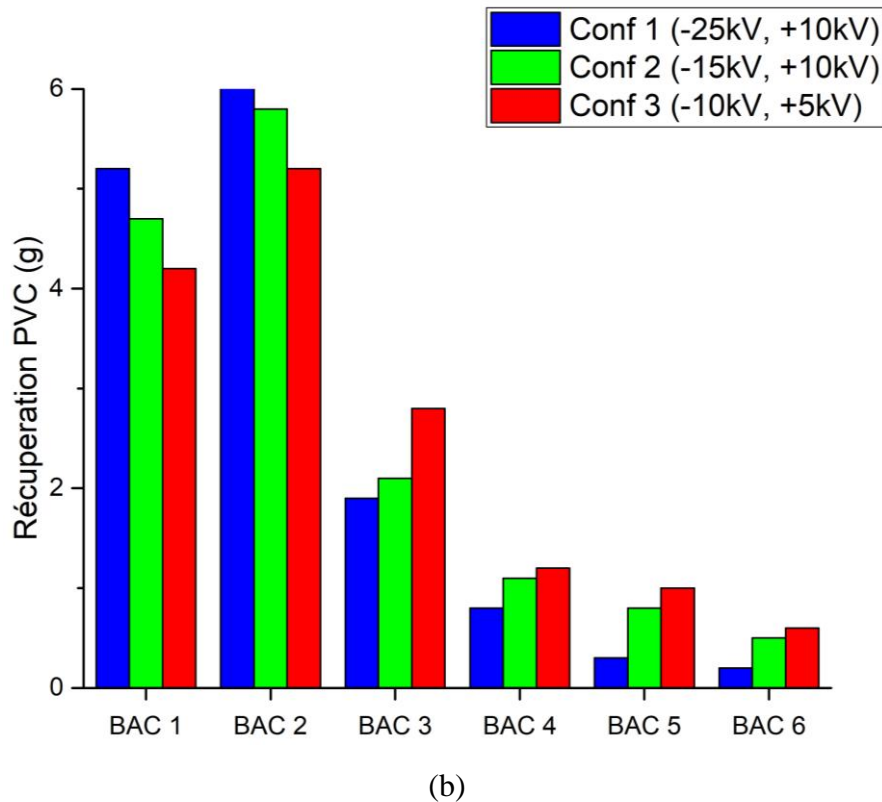


Figure IV.25 : Récupération du PC (a) et du PVC (b) dans les différents bacs de collecteur, pour les différentes configurations des électrodes.

Les figures IV.25 (a) et (b) montrent que la masse récupérée dans les différents bacs du collecteur pour les deux matériaux (PC et PVC) où on constate que pour les trois configurations le premier produit (PC) est majoritairement récupéré dans le 4^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} bac, par ailleurs le deuxième produit (PVC) est majoritairement récupéré dans le 1^{er} et le 2^{ème} bac et le troisième bac est considéré comme un bac mixte vue la quantité égale des deux produits dans ce bac.

Un autre constat peut être cité : le PC est attiré par l'électrode négative (L'électrode extérieure) ce qui montre qu'il s'est chargé positivement mais le PVC est attiré vers l'électrode positive (L'électrode interne) ce qui indique qu'il a pris une charge négative ; cela concorde bien avec leur classification dans la série triboélectrique déduite et illustrée dans la figure III.9.

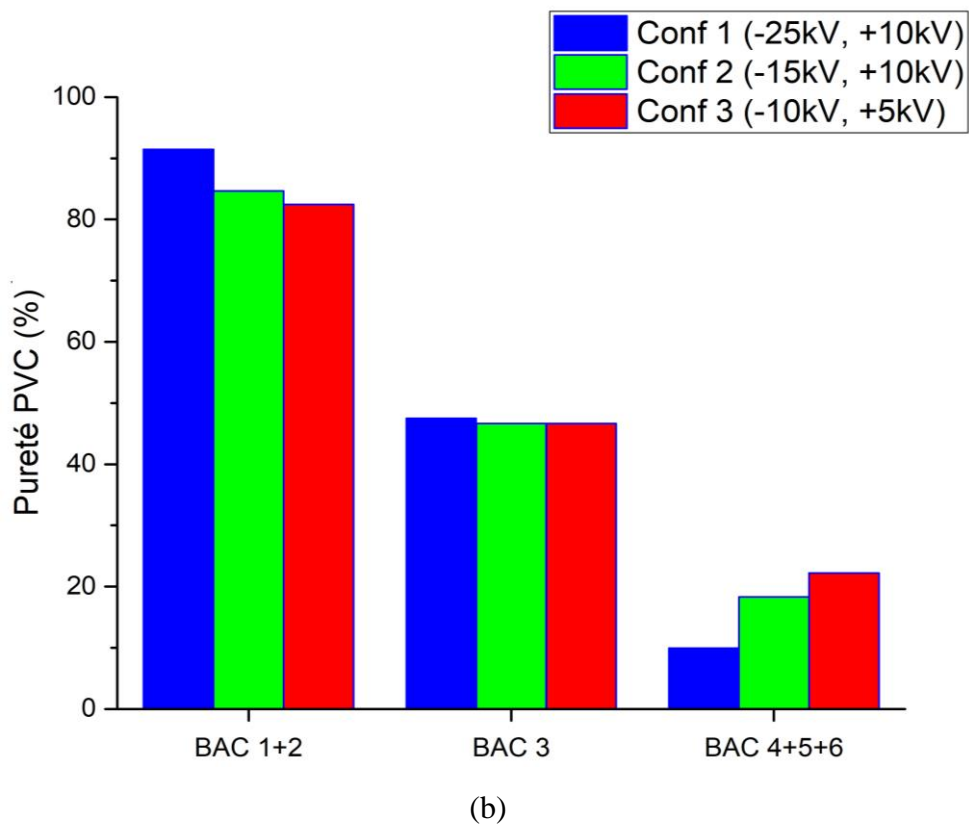
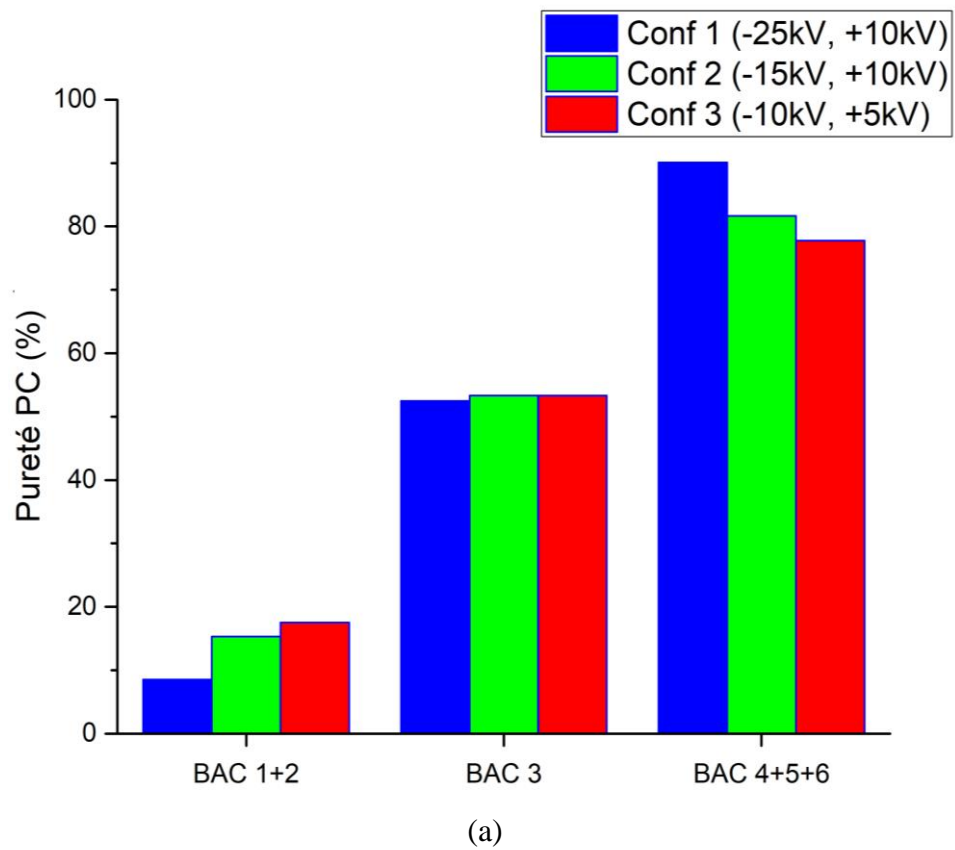


Figure IV.26 : Pureté du PC (a) et du PVC (b) dans les différents bacs du collecteur, pour les différentes configurations des électrodes.

Les figures IV.26 (a) et (b) montrent la pureté du produit récupéré dans les différents compartiments du collecteur pour le mélange PC-PVC.

Nous constatons que pour la configuration 1 des électrodes avec une tension de -25KV et +10Kv, donne une meilleure récupération des matériaux avec une pureté qui peut atteindre les 91.47% pour le PC et 90.08% pour le PVC, ceci nous permet d'affirmer que la pureté augmente avec l'augmentation de la haute tension appliquée aux électrodes.

IV.3.6. Discussion sur l'ensemble des résultats obtenus

Les figures IV.21 (a) et (b), IV.23 (a) et (b), IV.25 (a) et (b) pour la masse récupérée et les figures IV.22 (a) et (b), IV.24 (a) et (b), IV.26 (a) et (b) pour la pureté obtenue, montrent que la première configuration des électrodes avec une tension de -25KV et +10Kv, donne une meilleure récupération et une meilleure pureté des matériaux granulaires pour les trois mélanges granulaires (PA-PC, PA-PVC, PC-PVC), ainsi la masse récupérée et la pureté sont proportionnelles à la haute tension appliquée aux électrodes.

Pour le premier mélange PA-PC, le PA se charge positivement, ainsi il est automatiquement attiré par la polarité négative (HT -25 Kv) ; en diminuant cette tension (configuration 2, HT -15Kv) la pureté diminue à 80.14%, et jusqu'à 77.44% si la tension appliquée passe à -10Kv (configuration 3). La même remarque en ce qui concerne le PC qui se charge négativement et qui est influencé par la polarité positive (configuration 1, HT 10Kv), en diminuant cette tension (Configuration 3, HT 5Kv) la pureté diminue jusqu'à 80.36%.

La même chose se produit pour les autres mélanges (PA-PVC et PC-PVC), le meilleur taux de récupération et de pureté est atteint pour une configuration avec une tension de -25Kv +10Kv.

On remarque que la diminution de la différence des tensions (configuration 1 ; $|-25\text{Kv}-10\text{Kv}|=35\text{Kv}$, configuration 2 ; $|-15\text{Kv} - 10\text{Kv}|= 25\text{Kv}$, configuration 3 ; $|-10\text{Kv} - 5\text{Kv}|=15\text{Kv}$) influe considérablement sur la séparation et la pureté, donc on peut dire que quand la différence de tension entre les deux électrodes intérieure et extérieure diminue de 35Kv à 25Kv puis à 15Kv les forces exercées sur les particules sont de plus en plus faibles ce qui se répercute sur la séparation et la pureté.

IV.4. Conclusion

Le nouveau dispositif de tribo-chargement à un seul axe de rotation à flux descendants donne de meilleurs résultats lorsqu'il est équipé de quatre hélices, tournant à grande vitesse (3500 tr/min dans les conditions des présentes expériences).

Le choix de la nature des parois du dispositif de tribo-chargement a une importance primordiale sur l'efficacité de la séparation électrostatique car le fait de passer d'une paroi à une autre affecte considérablement la pureté et la quantité de produit récupéré.

L'association de ce nouveau dispositif de charge triboélectrique avec le séparateur électrostatique à tapis roulant donne un très bon rendement d'électroséparation pour le mélange binaire et ternaire.

pour une première mise en marche, le nouveau dispositif de séparation électrostatique à électrodes concentriques associé au chargeur triboélectrique à flux descendants, a donné des résultats très encourageants du point de vue séparation électrostatique où nous avons atteint 91% de matière récupérée, avec une faible consommation énergétique ce qui augmente l'efficacité de cette installation mais il reste encore d'autres investigations et problèmes à résoudre sur cette installation notamment le rebond des particules récupérées qui passe d'un bac à un autre affectant la pureté des produits purs.



■ ■ Conclusion générale ■ ■ et perspectives

Conclusion générale et Perspectives

Les déchets d'équipements électriques et électroniques sont composés d'une grande diversité de matériaux plastiques dont la récupération et le recyclage nécessite la recherche et le développement de nouvelles technologies de séparation physique, en vue de leur récupération et de leur valorisation.

Après une brève synthèse de l'état de l'art dans ces domaines, nous avons présenté d'une part l'installation de chargement triboélectrique et l'installation de séparation électrostatique, conçues et mises au point au laboratoire IRECOM à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, et d'autre part les résultats des recherches que nous avons effectuées sur la tribo-électrification des matériaux plastiques et sur la séparation tribo-aéro-électrostatique des mélanges de polymères, et ce pour répondre aux besoins de la recherche sur le tri des mélanges des matériaux granulaires isolants et aux exigences des partenaires industriels. La conclusion générale de notre travail peut être formulée ainsi : la charge triboélectrique avec des dispositifs à hélices suivi de la séparation en champ électrostatique est un procédé efficace de récupération des principaux matériaux polymères provenant des équipements électriques et électroniques en fin de cycle de vie. Par ailleurs, ces procédés non-polluants sont caractérisés par des coûts d'exploitation et d'entretien relativement réduits, ainsi que par une faible consommation d'énergie.

Le chargement par effet triboélectrique est un système multifactoriel difficile à modéliser, pour obtenir un bon rendement de notre dispositif triboélectrique d'acquisition de charge il faut régler correctement les paramètres suivants : la vitesse de rotation des hélices, le choix de la paroi du cylindre de chargement, et prendre en considération les conditions climatiques (la température de l'environnement et l'humidité)

D'après les résultats obtenus avec ce nouveau dispositif, nous pouvons dire que ces résultats sont satisfaisants pour obtenir une bonne séparation des mélanges granulaires. Plusieurs constats peuvent être dressés :

- a) La quantité de matière introduite n'a aucun effet sur la charge acquise.
- b) La vitesse de rotation des hélices est pratiquement prépondérante pour l'acquisition de charge pour un bon nombre de matériaux.
- c) Le choix d'une paroi du cylindre du chargeur peut être privilégié pour une meilleure électroséparation.
- d) L'ensemble des résultats obtenus peut constituer une base pour d'autres recherches.

Finalement le dispositif d'acquisition de charge que nous avons réalisé est adaptable à tout type de séparateur. D'une part, il facilite l'utilisation et surtout il peut être utilisé pour une électro séparation en régime continu.

Notre contribution majeure se situe au niveau du séparateur à électrodes cylindriques coaxiales qui peut faire l'objet de nombreuses études et recherches notamment dans le domaine de l'électroséparation pour l'éventuel récupération de matériaux isolants en particulier ceux de tailles supérieures à > 5 mm. Sa construction lui permet d'être mis dans une chambre climatique où un control de température et d'humidité peut améliorer considérablement son rendement et permettre ainsi une économie importante d'énergie électrique de broyage.

a. Principales contributions originales

1. Identification des problèmes scientifiques et techniques à résoudre dans le domaine du chargement triboélectrique pour une large gamme de matériaux granulaires.
2. Description des phénomènes physiques associés au processus de tribo-électrisation des matériaux plastiques granulaires.
3. Réalisation de deux installations expérimentales ; la première met en œuvre l'effet tribo-électrique pour la charge des matériaux isolants et la seconde pour une électroséparation de mélange granulaire isolant binaire où les deux nouvelles installations ont fait l'objet de brevets.
5. Evaluation des facteurs influents du processus de charge triboélectrique des matériaux granulaires isolants dans des installations de tribo-chargeement (PA, PC, ABS, HIPS et PVC).
6. Etude de l'effet des parois des dispositifs de tribo-chargeement sur la charge triboélectrique des matériaux plastiques.

7. Etude expérimentale de la séparation tribo-électrostatique des mélanges binaires (PA–PVC, HIPS –PVC et ABS–HIPS), provenant des déchets d'équipements informatiques, en proportions égales.
8. Etude expérimentale de la séparation tribo-électrostatique des mélanges ternaires de matériaux plastiques provenant des déchets d'équipements informatiques, mélange constitué de PA, PC, PVC et HIPS, en proportions égales.
9. Analyse de la reproductibilité du signe et de la valeur de la charge triboélectrique des granules de matériaux plastiques après séparation électrostatique.

b. Perspectives

La thèse ouvre des perspectives sur de nouveaux sujets de recherche dans le domaine de la séparation tribo-aéro-électrostatique des matériaux plastiques provenant d'équipements informatiques :

- a. Etude du rôle d'autres types de parois dans les dispositifs de tribo-chargement.
- b. Recherche et amélioration de la nouvelle installation d'électroséparation à électrodes concentriques pour des applications industrielles.
- c. Etude qualitative de l'électroséparation des particules de taille sous-millimétrique dans des dispositifs de tribo-chargement, en vue de l'élargissement du domaine d'application des procédés de séparation électrostatique pour les matériaux pulvérulents.



“**Références**”
bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] ADEME, Rapport annuel sur la mise en œuvre de la réglementation relative aux Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) données 2013. Octobre 2014
- [2] C.P. Baldé, F. Wang, R. Kuehr. Transboundary movements of used and waste electronic and electrical equipment, United Nations University, Vice Rectorate in Europe – Sustainable Cycles Programme (SCYCLE), Bonn, Germany. 2016
- [3] Md. Sahadat Hossain, M. Z. F. Sulala. Al-Hamadani, and Md. Toufiqur Rahman. E-waste: A Challenge for Sustainable Development. *Journal of Health and Pollution*: December 2015, Vol. 5, No. 9, pp. 3-11. 2015.
- [4] S. A. Hameed. controlling computers and electronics waste: Toward solving environmental problems, International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE 2012), 3-5 July 2012, Kuala Lumpur, Malaysia
- [5] R. Widmera, H. Oswald-Krapf, D. Sinha-Khetriwalb, M. Schnellmann, H. Boni. Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review* 25 (2005) 436– 458. 2005.
- [6] C. P. Baldé, F. Wang, R. Kuehr, J. Huisman. The global e-waste monitor – 2014, United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany. 2015.
- [7] I. de Marco, B.M. Caballero, M.J. Chomón, M.F. Laresgoiti, A. Torres, G. Fernandez, S. Arnaiz. Pyrolysis of electrical and electronic wastes. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 82 (2008) 179– 183. 2008.
- [8] D. S. Achilias and E. V. Antonakou. *Chemical and Thermochemical Recycling of Polymers from Waste Electrical and Electronic Equipment*. isbn 978-953-51-2142-8, published: july 15, 2015.
- [9] C. Dragan. Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aero-electrostatique de matériaux plastiques granulaires. Thèse de doctorat. Université de Poitiers. France. 2010.

- [10] Geneviève Sutra. La triboélectricité. *J. Phys. Radium*, 1950, 11 (8-9), pp.S1-S6.
- [11] M. K. Forward, D. J. Lacks and R. Mohan Sankaran. Triboelectric Charging of Granular Insulator Mixtures Due Solely to Particle-Particle Interactions. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009, 48, 2309–2314.
- [12] M. Miloudi. (2012). Application de la charge par effet triboélectrique des matériaux granulaires dans la séparation Electrostatique. Thèse de Doctorat. Université de Sidi Bel Abbes, Algérie
- [13] Chong-yang Liu, Allen J. Bard. “Electrons on dielectrics and contact electrification”. *Chemical Physics Letters* 480 (2009) 145–156 .
- [14] Logan S. McCarty and George M. Whitesides. Electrostatic Charging Due to Separation of Ions at Interfaces: Contact Electrification of Ionic Electrets. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2008, 47, 2188 – 2207.
- [15] *Journal of the Chemical Society, Abstracts.* 1902. Volume 82. 117-130.
- [16] J. A. Medley. Frictional electrification of polar polymers. nature publishing group. 1953.
- [17] A. F. Diaz. (1998). Contact Electrification of Materials: The Chemistry of Ions on Polymer Surfaces, *The Journal of Adhesion*, 67:1-4, 111-122, DOI: 10.1080/00218469808011102
- [18] H. T. Baytekin, A. Z. Patashinski, M. Branicki, B. Baytekin, S. Soh, B. A. Grzybowski. The Mosaic of Surface Charge in Contact Electrification. *Science* 333, 308 (2011). DOI: 10.1126/science.1201512.
- [19] I. Holme, J. E. McIntyre, and Z. J. Shen. (1998). Electrostatic charging of textiles. *Textile Progress.* 28. 1-85. 10.1080/00405169808688872.
- [20] J. E. Lawver, W. P. Dyrenforth, “Electrostatic separation”. In: *Electrostatics and Its Applications.* A.D. Moore (Editor). New York, John Wiley&Sons, 221-249, 1973.
- [21] Malay K. Mazumder. *Electrostatic Processes.* Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. 1999. 15-39. DOI: 10.1002/047134608X.W3708.
- [22] G. S. P. Castle, L. B. Schein. General model of sphere-sphere insulator contact electrification. *Journal of Electrostatics* 36 (1995) 165-173.

- [23] G. S. P. Castle. Contact Charging Between Insulators. *Journal of Electrostatics* 40&41 (1997) 13-203
- [24] A. Tilmatine, S. E. Bendimerad, K. Medles, A. Bendaoud, M. Younes, L. Dascalescu. (2008). Set-Point Identification and Robustness Testing of a Free-Fall Triboelectrostatic Separation Process. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*. 1 - 7. 10.1109/08IAS.2008.102.
- [25] L. Dascalescu, Alin Urs, S. Bente, M. Huzau, A. Samuila. Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices, *Journal of Electrostatics*, Volume 63, Issue 6, 2005, 705-710, ISSN 0304-3886, <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2005.03.042>.
- [26] A. F. Diaz, J. Guay. Contact charging of organic materials: Ion vs. electron transfer. *IBM Journal of Research and Development*. Volume: 37, Issue: 2, 249 – 260. March 1993.
- [27] L. Brands, P. M. Beier, I. Stahl. *Electrostatic Separation*. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag, USA. 2001.
- [28] Y. Higashiyama, Y. Ujiie, K. Asano. Triboelectrification of Plastic Particles on a Vibrating Feeder Laminated with a Plastic Film. *Journal of Electrostatics* 42 (1997) 63-68.
- [29] M. Blajan, R. Belega, 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*. Volume: 46, Issue: 4:1558 – 15630. 2010.
- [30] S. Leon Escalante, G. Touchard, G. Dominguez. Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes. *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2002.
- [31] L. B. Schein, and G. S. P. Castle. *Triboelectricity*. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. 1999.
- [32] H. Kausch, N. Heymans. C. J. G. Plummer, P. Decroly. *Matériaux Polymères: Propriétés Mécaniques et Physiques*. Editeur PPUR presses polytechniques. 657. 2001.
- [33] J. Lowell, A. C. Rose-Innes. (1980). Contact electrification, *Advances in Physics*, 29:6, 947-1023.

- [34] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahamia, L. Dascalescu. (2011). Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials. *Journal of Electrostatics*. 69. 631-637.
- [35] D. A. Pandya, B. H. Dennis. (2011). A Low Cost Micro Scale Cyclone Microparticle Separator - Design and CFD Analysis. ASME. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Volume 2: 135-147. DOI:10.1115/DETC2011-48792.
- [36] L. Calin , A. Mihalcioiu , A. Iuga, L. Dascalescu. (2007). Fluidized Bed Device for Plastic Granules Triboelectrification, *Particulate Science and Technology: An International Journal*, 25:2, 205-211. DOI: 10.1080/02726350701257782
- [37] M. Lungu. (2004). Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect. *Minerals Engineering - MINER ENG*. 17. 69-75. 10.1016/j.mineng.2003.10.010.
- [38] D. Geldart. (1973). Types of gas fluidization. *Powder Technology*. 7. 285-292. 10.1016/0032-5910(73)80037-3.
- [39] G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki, and T. Fujita. (2002). "Electrostatic Separation of the Shredded Plastic Mixtures Using A Tribo-Cyclone," *Magnetic and Electrical Separation*, vol. 11, no. 1-2, pp. 63-92. doi:10.1080/07313630290002626
- [40] R. Morar, A. Iuga, L. Dascalescu, A. Samuila. (1993). Factors which influence the insulation-metal electroseparation. *Journal of Electrostatics*. Volume 30, 403-412
- [41] T. Fujita, Y. Kamiya, N. Shimizu and T. Tanaka. (1995). Basic study of polymer particles separation using vibrating feeder and electrostatic high voltage generator. *Proceedings of the Third International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology*, pp. 155–164.
- [42] M. Rezoug, M. Miloudi, K. Medles, R. Ouiddir, A. Tilmatine. (2013). Mise en œuvre d'un séparateur à bandes transporteuses et d'un chargeur triboélectrique statique dans la séparation électrostatique de mélange granulaire isolant/isolant. *Ajot Algerian Journal of Technology*. 9^{ème} conférence national sur la haute tension. 337-341. CNHT 2013.
- [43] S. Bendimerad , A. Tilmatine , M. Ziane & L. Dascalescu. (2009). Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator. *International Journal of Environmental Studies*. 66:5, 529-538, DOI: 10.1080/00207230902722838

- [44] 1. 1. Inculet, G.S.P. Castle, J. D. Brown. (1994). Tribo-electrification system for electrostatic separation of plastics. Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE.
- [45] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, L. Dascalescu. (2005). Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device. *Journal of Electrostatics*. 63. 937-942. 10.1016/j.elstat.2005.03.064.
- [46] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, K. Medles, A. Tilmatine. (2014). Performance improvement of a separator tribo-electrostatic aero for granular materials plastics recycling of waste electrical and electronic equipment. Industry Applications Society Annual Meeting, 2014 IEEE.
- [47] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, A. Samuila. (2011). Tribocharging and Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids in Fluidized Bed Devices. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Volume: 18, Issue: 5, 1476 – 1483.
- [48] A. F. Diaza, R. M. Felix-Navarro. (2004). A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties. *Journal of Electrostatics* 62 (2004) 277–290.
- [49] L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, L. Dascalescu. (2005). “Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation”. In: IEEE Industry Applications Society 40th Annual Meeting, 2-6 Oct. 2005 Hong Kong. Conference Record. 2, 1435 - 1441.
- [50] C. Hyun Park, J. Koo Park, H. Seok Jeon, B. Chul Chun. (2008). Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger. *Journal of Electrostatics*. 66, 578–583.
- [51] J. Wei, M. J. Realf. (2005). Design and Optimization of Drum-type Electrostatic Separators for Plastics Recycling. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005, 44, 3503-3509.
- [52] M. Bilici, L. Dascalescu, T. György, V. Barna, F. Rahou, A. Samuila. (2011). Experimental Modeling of the Triboaero- electrostatic Separation of Mixed Granular Plastics. *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics* 2011.

- [53] C. Dragan, O. Fati, M. Radu, L. Calin, A. Samuila, L. Dascalescu. (2011). Tribocharging of Mixed Granular Plastics in a Fluidized-Bed Device. *IEEE transactions on industry applications*, vol. 47, no. 4.
- [54] L. Calin, A. Mihalcioiu, A. Iuga, L. Dascalescu. (2004). “Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification”. In: *Proceedings of the 4th International Workshop Materials for Electrotehnics, Bucuresti, Romania*. 203-208.
- [55] L. Calin, L. Dascalescu. (2010). “Procédé de séparation électrostatique d’un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en oeuvre,” French patent FR2943561, Oct. 1, 2010.
- [56] M. F. Boukhoulda, M. Miloudi, A. Tilmatine, L. Dascalescu. (2013). Experimental Modeling of a New Triboelectrostatic Separation Process for Mixed Granular Polymers. *IEEE transactions on industry applications*, vol. 49, no. 6, november/december 2013.
- [57] M. F. Boukhoulda, K. Medles, M. Miloudi, A. Tilmatine, A. Bendaoud, L. Dascalescu. (2013). Effect of Ambient Humidity on the Outcome of electrostatic Separation Process for Mixed Granular Polymers. *Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE*.
- [58] A. Tilmatine, A. Benabboun, Y. Brahmi, A. Bendaoud, M. Miloudi, L. Dascalescu. (2014). Experimental Investigation of a New Triboelectrostatic Separation Process for Mixed Fine Granular Plastics. *IEEE transactions on industry applications*, vol. 50, no. 6, november/december 2014.
- [59] A. Samuila, M. Bilici, V. Ilies, L. Dascalescu. (2014). Design and Test of a Novel Fluidized-bed Two-insulated-rolls-type Tribo-aero- Electrostatic Separator for Granular Plastics. *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics 2014*.
- [60] www.plastics.ulprospector.com
- [61] *** Carpco Inc., Jacksonville, USA. “Carpco application sheet. Rejection of PVC from PET flake using the Carpco V-STAT separator”. In: *Bulletin No. 97713*.
- [62] *** Carpco Inc., Jacksonville, USA. “The Solution to Separation”. *Tehcnical Information Bulletin, 1997*.
- [63] R. Gent Malcolm, M. Menendez, J. Toraño, S.Torno. (2011). Optimization of the recovery of plastics for recycling by density media separation cyclones. *Resources, Conservation and Recycling* 55 (2011) 472–482.

- [64] S. Messal, R. Corondan, I. Chetan, R. Ouiddir, K. Medles, L. Dascalescu. (2015). "Electrostatic separator for micronized mixtures of metals and plastics originating from waste electric and electronic equipment." *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 646.
- [65] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, M. Boukhoulda, M. Bilici, and L. Dascalescu. (2013). "Two stage electrostatic separator for the recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment." *Journal of Electrostatics*, Vol. 71, pp.681-688.
- [66] www.novaplest.fr
- [67] www.metaux-detail.com
- [68] www.plasticsintl.com
- [69] www.plasticseurope.fr
- [70] www.icmindustrie.com
- [71] Noras, Maciej. (2002). Non-contact surface charge/voltage measurements Capacitive probe - principle of operation. *Trek Appl. Note. 3001*.
- [72] M. Aguet, M. Ianoz. (2001). *Traité d'électricité : Haute tension*. PPUR presses polytechniques. 38-40
- [73] F. P. Miller, A. F. Vandome, J. McBrewster. (2009). *Faraday Cage*. VDM Publishing. 94
- [74] www.amprobe.com
- [75] K. SALEH, P. GUIGON. (2009). *Caractérisation et analyse des poudres- Propriétés comportementales des solides divisés*. Techniques de l'ingénieur.
- [76] www.tek.com/keithley
- [77] www.cas-usa.com
- [78] W. Aksa, M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu. (2011). Réalisation et optimisation d'un diapositive de chargement triboélectrique par air comprimé pour les particules isolantes. *Ajot Algerian journal of technology*, 8eme conférence nationale sur la haute tension CNHT. 288-292.
- [79] A. Benabboun , A. Tilmatine , Y. Brahami , S. E. Bendimerad , M. Miloudi, K. Medles. (2014). *Experimental Investigation of Electrostatic Separators of Plastic Particles using*

Different Charging Devices, Separation Science and Technology, 49:3, 464-468, DOI: 10.1080/01496395.2013.843008

[80] W. Aksa. (2013). Réalisation et étude d'un séparateur aérodynamique semi-industriel pour récupération de particules isolantes. Thèse Doctorat. Université de Sidi Bel Abbes. Algérie.

[81] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, L. Dascalescu. (2009). "Modélisation et optimisation d'un procédé de charge triboélectrique pour les particules isolantes", International conférence of électrotechnique, ICEL'2009, USTO Oran, 10-11 Nov. 2009.

[82] **Djamel Eddine Fekir**, M. Miloudi, F. Miloua, K. Medles, L. Dascalescu. (2015). "New aero-dynamic tribo-charging device with application to the electrostatic separation of granular mixtures of insulating materials" conference Ind. Applications Dallas Octobre 2015.

[83] **Djamel Eddine Fekir**, M. Miloudi, F. Miloua, K. Medles, L. Dascalescu. (2017). "New Propeller-Type Tribocharging Device With Application to the Electrostatic Separation of Granular Insulating Materials". J IEEE Transactions on Industry Applications. 53 (3). 2017. 2416-2422

[84] M. Miloudi, **Djamel Eddine Fekir**. (2016) « Dispositif de chargement tribo-Aéro-électrique à un seul axe de rotation à flux descendants ». Brevet d'invention N°9611. Institut National de la Propriété Industrielle INAPI. Algérie.

[85] www.Solidworks.com

[86] www.comsol.fr

[87] K. Haga. (1995). "Applications of the electrostatic separation technique", in J.S.Chang, A.J. Kelly, and J.M. Crowley (Eds), Handbook of Electrostatic Processes, New York: Marcel Dekker.

[88] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, A. Bendaoud, L. Dascalescu. (2013). "Optimization of Belt-Type Electrostatic Separation of Triboaerodynamically Charged Granular Plastic Mixtures," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 49 , pp. 1781 – 1786.

[89] J. E. Lawver and W.P. Dyrenforth. (1973). "Electrostatic Separation." Electrostatics and Its Applications, (A.D. Moore, Ed.) New York: Wiley, pp. 221-249.

[90] Trifield, "Tribo-electric series." [En ligne], Disponible sur <https://www.trifield.com/content/tribo-electric-series/>.

- [91] A. Mekhalef, K. Medles, F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, L. Dascalescu, "Study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials." *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 51, pp. 4166– 4172, 2015.
- [92] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, M. Bilici, S. El-Moussaoues, K. Medles. (2012). "Conception d'un séparateur tribo-Aéro électrostatique amélioré pour le recyclage des déchets granulaires d'équipements électriques et électroniques", Conférence Francophone sur l'Eco-conception dans le Génie Electrique, Ecole de Technologies supérieures de Montréal, Canada, 28-30 Mai 2012.
- [93] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, L. Dascalescu. (2011). "Optimization of belt-type electrostatic separation of granular plastic mixtures tribocharged in a propeller-type device". *Journal of Physics: Conference Series* , vol. 301; N°1.
- [94] SUEZ environnement, "le recyclage des plastiques, un enjeu de l'économie circulaire," communiqué de presse. Septembre 2014.
- [95] M. Miloudi, **Djamel Eddine Fekir**. (2016) « Installation de séparation électrostatique à électrodes concentriques pour mélanges granulaires isolants ». Brevet d'invention PV dépôt N°160671. Institut National de la Propriété Industrielle INAPI. Algérie.
- [96] L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, L. Dascalescu. (2008). "Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation". *IEEE Transactions on Industry Applications*. 44 : 4. 1435 - 1441.
- [97] P. Krempf. (2003). *Électromagnétisme PCSI*. Editions Bréal. 8 - 15.
- [98] Douglas C. Giancoli. (1993). *Physique générale*. Editions De Boeck Supérieur. 8 - 9.
- [99] F. London, *Z. Physik*. (1930). intermolecular interactions. p63, 245.
- [99] H. C. Hamaker. The London van der waals attraction between spherical particles. *Physica*, Volume 4, Issue 10, Pages 1058-1072.
- [100] HAMAKER H. C. (1937). The london--van der waals attraction Between spherical particles. *Physica* 4, 1058-1072.
- [101] Samuilă, A., Dăscălescu, L. (1999). *Comportarea materialelor granulare în câmp electric*. Cluj-Napoca, Editura Mediamira,
- [102] Elie Lévy. (1988) *Dictionnaire de physique*. Paris. p 601.

- [103] C. Gary. (1998). Effet couronne sur les réseaux électriques aériens. Techniques de l'ingénieur. Editions T.I.
- [104] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, M. Huzau, L. Dascalescu. (2008). "Characterization of dual corona electrodes for electrostatic processes applications." IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 44, pp. 692-698.
- [105] S. Messal. (2016). Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire. Thèse Doctorat Génie électrique. Poitiers. Université de Poitiers,
- [106] Govi. (1875). "Quelques expériences sur l'induction électrostatique." J. Phys. Theor. Appl., Vol. 4, pp.264-266.
- [107] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, L. Dascalescu. (2010). "Modélisation et optimisation d'un procédé de charge triboélectrique pour les particules isolantes". 7th Conference of the French Society of Electrostatics, Montpellier, France.



“ Annexes ”

Annexe 1



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
المعهد الوطني الجزائري للملكية الصناعية
INSTITUT NATIONAL ALGERIEN DE LA PROPRIETE INDUSTRIELLE

⑲ DZ

براءة إختراع BREVET D'INVENTION

R2-FO-10

②② Date de dépôt: 23.06.2016

①① du brevet : 9611

②① N° Dépôt: 160319

⑤④ Titre de l'invention:

Dispositif de chargement tribo-Aéro-électrique à un seul axe de rotation à flux descendants

⑦① Déposant :
FEKIR ,DJAMEL EDDINE
213 CITE 317 LOGEMENTS HAY ZITOUNE , AIN TEMOUCHENT .

⑦② Inventeur :
FEKIR ,DJAMEL EDDINE -MILOUDI, MOHAMED

⑦③ Titulaire :
FEKIR ,DJAMEL EDDINE
213 CITE 317 LOGEMENTS HAY ZITOUNE , AIN TEMOUCHENT .

⑦④ Mandataire :

③① Données relatives à la priorité:

Annexe 2

Brevet classique Brevet classique DZ/P/2016/00671 reçu le 29/12/2016
09:06:39 par ZENAD MOHAMED

المعهد الوطني للبراءات الصناعية
INSTITUT NATIONAL ALGÉRIEN
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

in pi
Institut National Algérien de la Propriété Industrielle

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE
DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

R2-FO-03
E1

Nature de la demande de protection *		
Brevet d'invention <input checked="" type="checkbox"/>	Extension de la demande internationale selon le PCT <input type="checkbox"/>	Certificat d'addition <input type="checkbox"/>

[71] - DEPOSANT[S] : *Nom, Prénom, [dénomination], et Adresse complète*
FEKIR, DJAMEL EDDINE, 213 CITE 317 LOGEMENTS HAY ZITOUNE, AIN TEMOUCHENT

Nationalité du ou des déposants

[72] - INVENTEUR[S] : *Nom, Prénom, Adresse*
MILOUDI, MOHAMED, N°2 Bloc 2 CITE DES 144 LOGEMENTS AADL (Benhamouda), SIDI BEL ABBES
FEKIR, DJAMEL EDDINE, 213 CITE 317 LOGEMENTS HAY ZITOUNE, AIN TEMOUCHENT

[54] - TITRE DE L'INVENTION :
Installation de séparation électrostatique à électrodes concentriques pour mélanges granulaires isolants (INSEEC)

[30] - REVDICATION DE PRIORITE (S)

[31] - N°[s] de dépôt	[32] - date[s] :	[33] - pays d'origine	Nature de la demande

Numéro de dépôt	Date de dépôt	Heure
160671	29 DEC. 2016	09h06

N° de la demande internationale et date internationale de dépôt

Visa

New propeller-type tribo-charging device with application to the electrostatic separation of granular insulating materials

Djamel Eddine Fekir

Member, IEEE

Mohamed Miloudi,

Member, IEEE,

Research Unit, IRECOM,

Djillali Liabes University of

Sidi-Bel-Abbes BP 89

22000, Algeria

miloudi.mohamed67@gmail.

com

Farid Miloua,

Member, IEEE,

Research Unit, APELEC,

Djillali Liabes University of

Sidi-Bel-Abbes BP 89

22000, Algeria

milouafarid@gmail.com

Karim Medles

Member, IEEE,

Research Unit, IRECOM,

Djillali Liabes University of

Sidi-Bel-Abbes BP 89

22000, Algeria

kmedles1972@yahoo.fr

Lucian Dascalescu

Fellow, IEEE,

Institut PPRIME, CNRS –

Université de Poitiers -

ENSMA

IUT, 4 avenue de

Varsovie, 16021 Angoulême

Cedex, France

lucian.dascalescu@univ-

poitiers.fr

Abstract:The aim of this paper is the development and functional optimization of a new propeller-type aero-dynamic tribo-charging device with application in the field of electrostatic separation. The originality of the system consists in its modular structure: one or several propellers can be stacked in the same device, to provide appropriate tribocharging conditions to a wide variety of granular mixtures containing two or more of insulating materials. The study is conducted with samples of various of the following insulating materials: PC (Polycarbonate), PA (Polyamide), ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PVC (Polyvinyl Chloride) and HIPS (High Impact Polystyrene), grain sizes up to 4 mm in diameter, for several values of the propeller rotation speed, and of the mass of the particles in the tribocharging device, the wall of which are made of acetate, PMMA or Aluminium. The efficiency of the device is tested by processing the charged granular mixture in a metal-belt conveyor-type electrostatic separator.

The Aluminium-wall device enables better charging that PMMA and acetate. The mass introduced in the device has no significant effect on the outcome of the process, but the speed of the propellers does. Successful separation of a mixture of three insulating materials is reported.

KEYWORDS: Dielectric materials, Electrostatic measurements, Electrostatic processes, Electrostatic devices, Environmental factors, Particle charging, Separation, Test equipment, Triboelectricity, Waste materials.

I. INTRODUCTION

Recycling of plastics has become a hot issue due to the ever increasing quantities of obsolete information technology (IT) equipment that need to be processed every year [1]-[4]. Land-fill or incineration cannot be considered as end-of-life solutions for these materials, because of their negative ecological impact.

Plastics represent at least 30% in weight of IT wastes. The vast majority of such wastes are subject to a mechanical treatment involving shredding, granulation, magnetic separation, and classification. Whenever possible, plastics must be manually sorted prior to mechanical recycling according to polymer type and/or color. New technologies have been introduced for automatically sorting of granular plastics, using X-ray fluorescence, infrared and near infrared spectroscopy, electrostatic separation and flotation [5].

Electrostatic separation is the selective sorting of charged or polarized bodies, under the action of an electric field [6]. The metal/insulation electrostatic separation technologies [8] have already proven their efficiency in the recycling of electric cable and PCB waste [8-10]. Electrostatic solutions have also been found for the separation of various types of plastics [14]-[15]. However, their wider industrial usage is hindered by the difficulty to obtain the appropriate electrical charging of the granules to be separated.

In a previous paper, the authors have described a laboratory scale propeller-type tribo-charger [16]. The device consists of a PVC cylinder and a co-axial propeller entrained the plastic granules into a helical motion that favored their triboelectric charging by combining the mechanical and aerodynamical effects. However, its intermittent operation makes it un-operational in an industrial process. The aim of the present work is to optimize the operation of a modified version of that device that could ensure effective triboelectric charging of plastics prior to their selective sorting in the high-intensity electric field of a belt-type electrostatic separator.

This type of electrostatic separator has been the subject of a previous study, which identified the following optimal operating conditions: belt speed 10 cm/s; inter-electrode distance $d = 6.2$ cm; applied high voltage $U = 30$ kV; angular position of the high-voltage electrode $\alpha = 33^\circ$ [17].

II. EXPERIMENTAL PROCEDURE

A. Propeller-type tribocharging device

The experimental device (Fig. 1) consisted in a cylindrical chamber (diameter: 120 mm; length: 350 mm), made of Polymethyl Methacrylate (PMMA). At its upper end, the chamber is provided with one to four co-axial aluminium propellers, driven by a variable-speed DC electric motor. The speed of the motor was adjusted between $n = 2500$ rpm and 4000 rpm. This device entrained the granular materials into a helical motion that was expected to favour their triboelectric charging by granule-to-cylinder wall, granule-to-granule, and granule-to-propeller collisions. The mass flow rate in the device was of the order of 10 g/s (the maximum capacity of this laboratory installation). The sign and the magnitude of the charge of each granule were determined by the combined action of these three physical mechanisms.

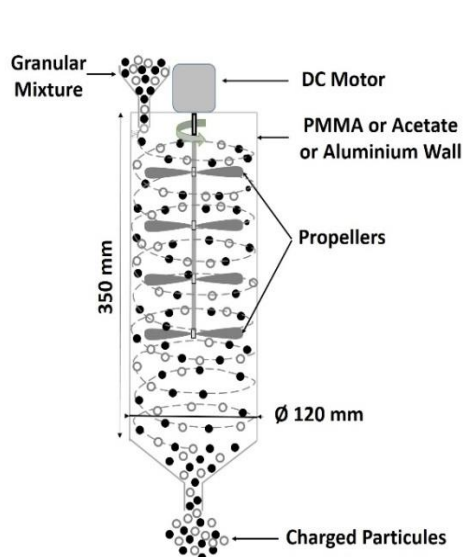


Fig.1. Propeller-type device for the tribocharging of plastic granules.

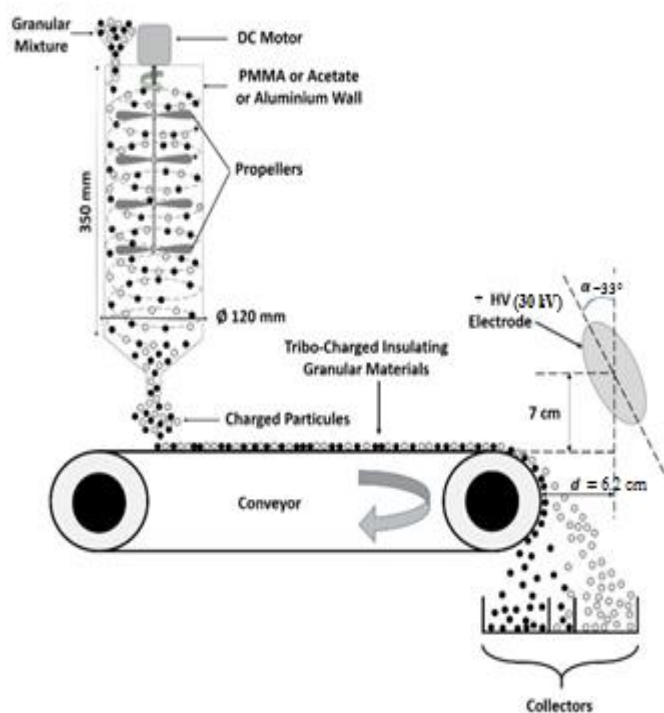


Fig.2. Experimental set-up: propeller-type device for the tribocharging of plastic granules and electrostatic-belt separator.

B. Experimental set-up

The experiments were carried out using a belt-type tribo-electrostatic separator consisting in a custom-designed tribocharging device (Fig. 2), a conveyor (roll diameter: 5 cm), an elliptical electrode (axis: 15 cm and 5 cm), energized from a fully-adjustable DC high voltage power supply (- 30 kV; 1 mA) and a three-compartment collector. The positively charged particles are more or less attracted by the high-voltage electrodes and collected in the central and right-hand boxes, while the negative ones are recovered in the left-hand boxes.

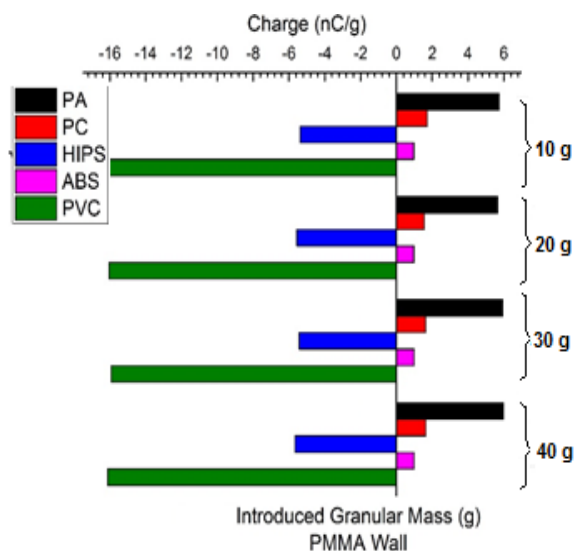


Fig. 3. Effect of the mass on the charge of different materials in a device with PMMA walls.

The purity of the product A is determined by manual sorting of the particles collected in a given box i , and calculating the ratio (mass of product A in box i)/(total mass of product in box i).

C. Materials and Method

The tribocharging experiments were conducted with samples of several insulating materials: PC, PA, ABS, PVC and HIPS, grain sizes up to 4 mm, originating from shredding of waste electrical, electronical and information technology equipment.

After the passage in the triboelectric device, the particles fell directly into a Faraday cage connected to an electrometer (model: Keithley 6514), to quantify the charge. Three measurements were done for each sample and the average values were considered for evaluating the triboelectric charge.

The experimental method consisted in varying the in-feed mass, the number and the speed of the propellers, as well as the nature of the inner wall of the cylinder (PMMA, Acetate and Aluminium), in order to examine the effect of each factor on the charge acquired by the different granular materials.

Two sets of tribo-electrostatic separation experiments were then conducted by associating the new four-propeller triboelectric charging device and the metal-belt conveyor-type electrostatic separator. The first set consisted in the separation of 40 g of three binary granular mixtures: 50% PA - 50% PVC, 50% PA - 50% PC and 50% HIPS - 50% PVC.

The second group of tribo-electrostatic separation experiments was performed with two 45 g mixtures of three different materials: 15 g PA - 15 g PC - 15 g PVC and 15 g PA - 15 g HIPS - 15 g PVC

The experiments were carried out for three types of walls (PMMA, Acetate and Aluminium), the rotational speed of the propellers being set at 3500 rpm, at stable ambient conditions: air temperature ranging between 25°C and 27°C, and relative humidity varying between 37% and 43%.

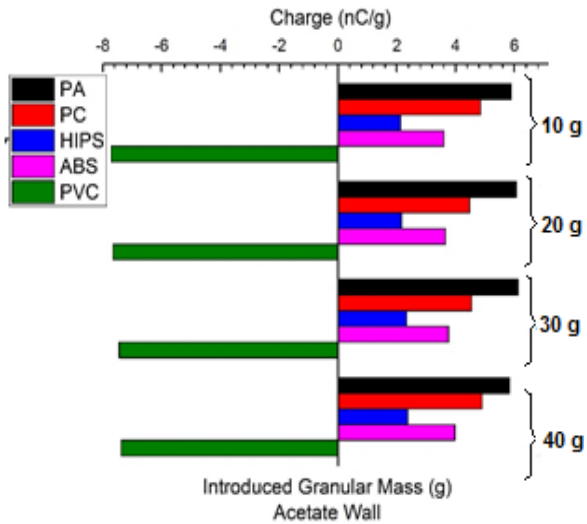


Fig. 4. Effect of the mass on the charge of different materials in a device with Acetate walls.

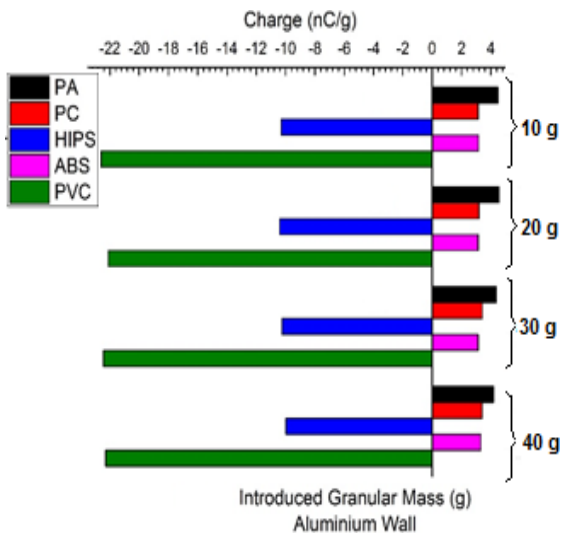


Fig. 5. Effect of the mass on the charge of different materials in a device with Aluminium walls.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Tribocharging experiments

a. Effect of the in-feed mass

The experiments are conducted with the propeller rotating at a speed of 3000 rpm and with samples of various masses ranging between 10 g and 40 g, for PMMA, Acetate and Aluminium walls of the tribocharging device. The results are represented in Figs 3, 4 and 5. They point out that, within the domain of variation imposed in this experiment, the mass of the sample has absolutely no effect on the specific charge (i.e., charge/mass ratio) acquired by the granules.

The results of the tribocharging experiments carried out with the new device are summarized in Table I. Based on these results, the five polymers under study can be arranged in the following triboelectric series starting from the negative polarity: PVC - Acetate - HIPS - Aluminium - PMMA - ABS - PC -PA.

TABLE I

Signs of the charges acquired by the five polymers under study

PMMA Wall	Material	PVC	HIPS	ABS	PC	PA
	Charge sign	-	-	+	+	+
Acetate Wall	Material	PVC	HIPS	ABS	PC	PA
	Charge sign	-	+	+	+	+
Aluminium Wall	Material	PVC	HIPS	ABS	PC	PA
	Charge sign	-	-	+	+	+

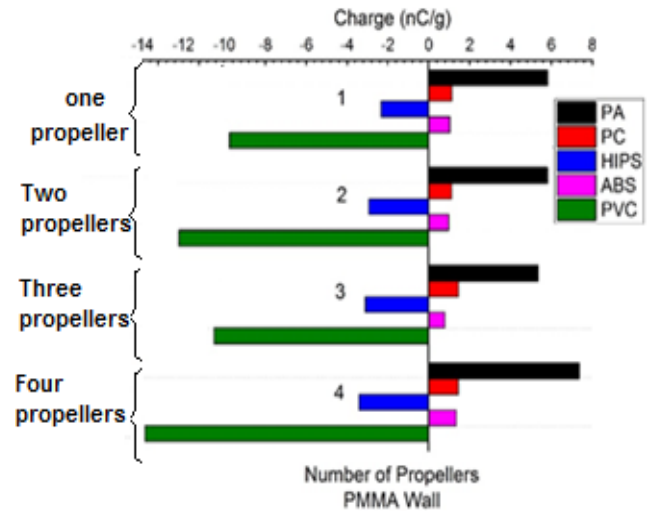


Fig. 6. Effect of the number of propellers on the charge of different materials in a device with PMMA walls.

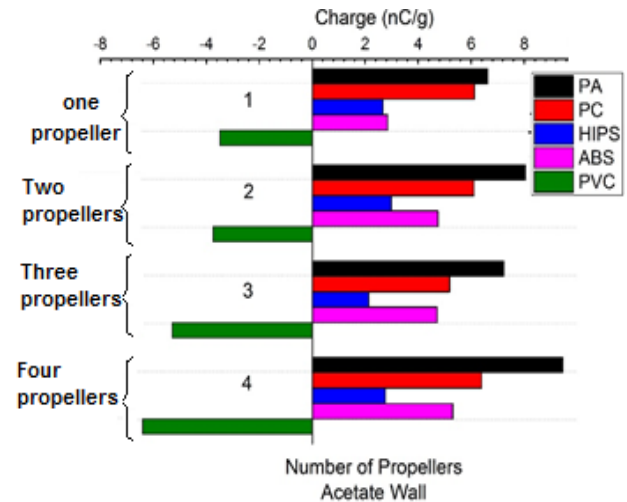


Fig. 7. Effect of the number of propellers on the charge of different materials in a device with Acetate walls.

b. Effect of propeller number

The experiments are carried out with 40-g samples of different materials. The rotational speed of the propellers is adjusted at 3500 rpm. The number of propellers varied from one to four. The device is successively equipped with one of the In all cases (Figs. 6 to 8), increasing the number of propellers is accompanied by a large charge growth. The granules are maintained in rotation for a longer time and have more chances to collide with the walls of the tribocharging device.

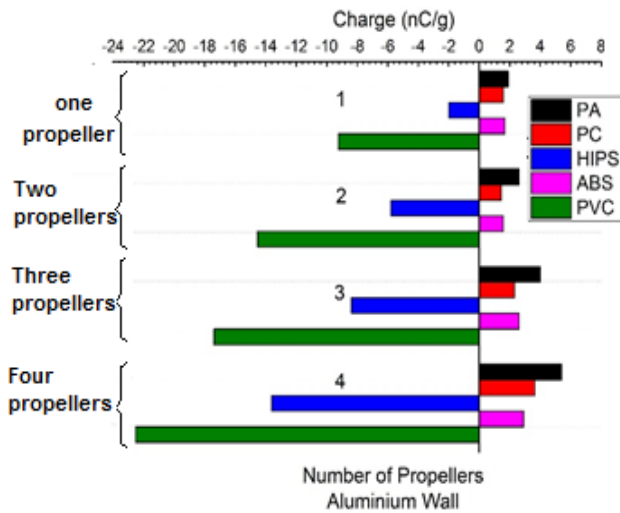


Fig. 8. Effect of the number of propellers on the charge of different materials in a device with Aluminium walls.

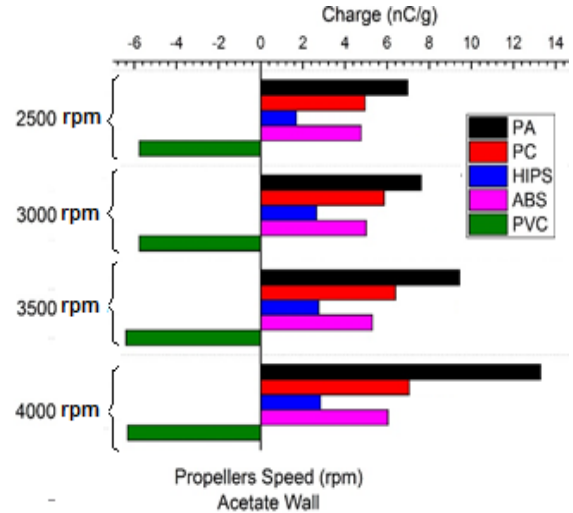


Fig. 10. Effect of propeller speed on the charge of different materials in the device with Acetate walls.

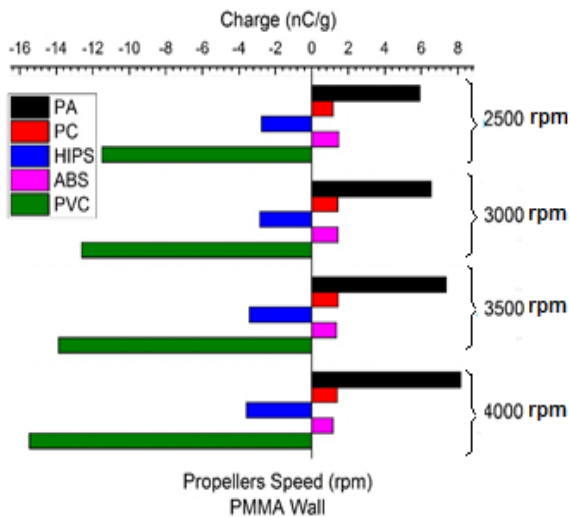


Fig. 9. Effect of propeller speed on the charge of different materials in the device with PMMA walls.

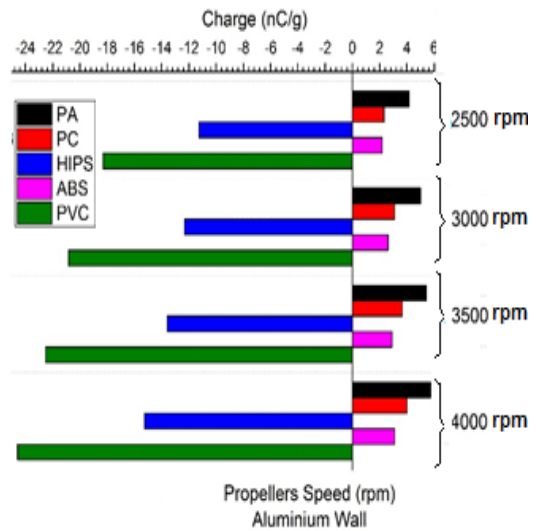


Fig. 11. Effect of propellers speed on the charge of different materials in the device with Aluminium walls.

For a PMMA wall, two propellers were enough to saturate the PC and ABS granules, but for HIPS, PVC and PA, the charge increased proportionally with the addition of the third and fourth propeller.

For the device with Acetate walls, the PC and ABS got quickly their maximum charge and saturated as soon as a second propeller was used but for HIPS, the saturation charge was attained only with the use of the third propeller. In the case of PVC and PA granules, the charge increased proportionally with each additional propeller.

For the tribocharging device with Aluminium walls, the charge of different materials increased proportionally with the number of propellers.

c. Effect of the rotational speed of the propellers

The influence of propeller rotational speed n on the tribocharging process can be judged from the results presented in Figs. 9, 10 and 11, for the three types of device (with PMMA, Acetate and Aluminium walls, respectively). The number of propellers N and the in-feed mass m were maintained constant ($N=4$; $m=40$ g).

The increase of propeller speed n was accompanied by more intense particle-wall, particles-propellers and particle-particle shocks, which improved the tribocharging of the samples. This effect was noticeable for $n \geq 3500$ rpm, which will be chosen as the propeller speed in the experiment designed for the optimization of the tribocharging process.

B. Electrostatic separation experiments

a. Electrostatic separation of binary granular mixtures

With PA and PVC situated at the opposite ends of the triboelectric series, the outcome of the tribo-electrostatic separation was excellent (i.e., recovery and purity close to 100%; Tables II to IV).

The position of PVC at the negative end of the triboelectric series facilitates also its separation from a mixture that contains HIPS particles, which tend to charge positively. The best purity for the separation of a HIPS-PVC mixture is achieved by using a device with Acetate walls (98.62% and 98.73% for HIPS and PVC, respectively) (Table III).

TABLE II
ELECTROSTATIC SEPARATION OF BINARY MIXTURES USING A TRIBOCHARGING DEVICE WITH PMMA WALLS

Mixture product (A+B)	Recovery with PMMA Walls					
	Product A			Product B		
	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)
PA+PVC	20	6.0	100	20	-15.8	100
PA+PC	18.6	3.5	95.5	19	-1.8	97.0
HIPS +PVC	19.3	5.3	96.8	19.7	-10.8	95.3
ABS+HIPS	18.8	7.5	98.4	19.5	-8.1	91.3

TABLE III
ELECTROSTATIC SEPARATION OF BINARY MIXTURES USING A TRIBOCHARGING DEVICE WITH ACETATE WALLS

Mixture product (A+B)	Recovery with Acetate Walls					
	Product A			Product B		
	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)
PA+PVC	19.9	2.8	99.8	19.9	-12.1	99.9
PA+PC	15.4	5.1	85	14.8	-0.4	84.3
HIPS +PVC	19.1	5.7	98.6	18.4	-9.9	98.7
ABS+HIPS	17.9	4.3	94.9	19.2	-3.2	92.6

TABLE IV
ELECTROSTATIC SEPARATION OF BINARY MIXTURES USING A TRIBOCHARGING DEVICE WITH ALUMINIUM WALLS

Mixture product (A+B)	Recovery with Aluminium Walls					
	Product A			Product B		
	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)
PA+PVC	19.9	3.99	99.95	19.85	-11.00	99.93
PA+PC	19.1	3.44	98.32	18.1	-3.8	99.12
HIPS +PVC	18.8	4.00	95.1	19.4	-5.25	97.55
ABS+HIPS	18.9	2.96	95.58	18.3	-7.24	94.63

The case of the ABS/HIPS separation is more complex. Both materials, taken separately, acquire positive charge in contact with the Acetate wall (Fig. 10). When processed together (Table III), ABS remained positively charged (+ 4.3 nC/g), and HIPS got a negative charge (- 3.2 nC/g), which means that the effect of particle-particle contact prevailed over that of particle-wall collisions. However, the best separation results were obtained with devices having Aluminium or PMMA walls, which distinctively charge the ABS and HIPS particles.

PA/PC is an even more difficult separation, no matter which of the three tribocharging devices is employed. Both of them charge positively with the walls of the devices, but can be separated because of the charging effect of the particle-particle impacts. The worst result was obtained with the Acetate-wall device, as both PA and PC tend to get elevated levels of positive charge when in contact with this material.

TABLE V
ELECTROSTATIC SEPARATION OF TERNARY MIXTURES USING A TRIBOCHARGING DEVICE WITH PMMA WALLS

Mixture Product (A+B+C)	Recovery with PMMA Walls								
	Product A			Product B			Product C		
	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)
PA+PC+PVC	14.0	7.3	96.4	13.6	2.0	88.8	14.8	-13.6	99.9
PA+ HIPS+PVC	14.5	7.4	94.5	13.5	-2.6	90.4	13.6	-19.4	94.1

TABLE VI
ELECTROSTATIC SEPARATION OF TERNARY MIXTURES USING A TRIBOCHARGING DEVICE WITH ACETATE WALLS

Mixture Product (A+B+C)	Recovery with Acetate Walls								
	Product A			Product B			Product C		
	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)
PA+PC+PVC	15.7	7.7	92.4	13.6	4.2	91.9	15.4	-12.7	96.1
PA+ HIPS+PVC	13.4	8.9	94.0	12.6	4.1	93.7	14.6	-14.6	96.6

TABLE VII
ELECTROSTATIC SEPARATION OF TERNARY MIXTURES USING A TRIBOCHARGING DEVICE WITH ALUMINIUM WALLS

Mixture Product (A+B+C)	Recovery with Aluminium Walls								
	Product A			Product B			Product C		
	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)	Mass (g)	Charge (nC/g)	Purity (%)
PA+PC+PVC	14.7	5.9	97.3	12.8	3.5	96.9	14.8	-19.3	96.6
PA+ HIPS+PVC	14.3	5.5	93.7	14	-5.1	90	13.8	-19.4	96.4

b. Electrostatic separation of ternary granular mixtures

For the first ternary mixture (PA + PC + PVC), the best purity was obtained with an Aluminium wall. This can be explained by the fact that neither PA nor PC got an excessive positive charge when in contact with this material.

The key of ternary separation is the balance between the tribocharging effects of particle-particle and particle-wall collisions. This explains the results obtained with the second ternary mixture (PA + HIPS + PVC), for which the acetate walls gave the best results (Tables V to VII).

IV. CONCLUSIONS

(1) The charge acquired by the granules in the tribo-charging device result from a complex combination of triboelectric effects: particle-wall, particle-propeller and particle-particle shocks. These effects depend on the positions of the materials in the triboelectric series and the overall outcome reflects the prevalence of the particle-particle collisions.

(2) The co-axial propellers entrain the plastic granules into a helical motion that favour their triboelectric charging by combining the mechanical and aerodynamical effects.

- (3) All tribocharging devices give best results when equipped with several propellers, rotating at high speed (3500 rpm, in the conditions of the present experiments).
- (4) The choice of the nature of the walls of the tribocharging device is of paramount importance for the efficiency of the electrostatic separation.
- (5) The association of this new triboelectric charging device with the electrostatic separator gives very good separation efficiency for ternary mixtures, too (i.e., recovery and purities higher than 90%).

REFERENCES

- [1] U. Hansen, *Product cycles. The key for sustainable development*. Stuttgart: IRB Verlag, Stuttgart, 2000.
- [2] H. I. Kang and J. M. Schoenung, "Electronic waste recycling: A review of U.S. infra-structure and technology options," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 45, pp. 368-400, 2005.
- [3] UNEP, *The Great E-waste Recycling Debate*, UN Environmental Program, 18 Jan 2007.
- [4] M. Goosey and R. Kellner, "Recycling technologies for the treatment of end of life printed circuit boards (PCBs)," *J. Circuit World*, vol. 29, pp. 33-37, 2003.
- [5] J. E. Lawver and W. P. Dyrenforth, "Electrostatic separation," in A.D. Moore (Ed.), *Electrostatics and Its Applications*. New York: Wiley, 1973.
- [6] K. Haga, "Applications of the electrostatic separation technique", in J.S.Chang, A.J. Kelly, and J.M. Crowley (Eds), *Handbook of Electrostatic Processes*, NewYork: Marcel Dekker, 1995.
- [7] Y. Higashiyama and K. Asano, "Recent progress in electrostatic separation technology," *Particulate Science and Technology*, vol. 16, pp. 77-90, 1998.
- [8] A. Tilmatine, K. Medles, S. Bendimerad, F. Boukhoulda, and L. Dascalescu, "Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures." *Waste Management*, vol. 29, pp. 228-232, 2009.
- [9] I.I. Inculat, G.S.P. Castle, and J.D.Brown, "Electrostatic separation of plastics for recycling," *Particulate Science and Technology*, vol. 16, pp. 91-100, 1998.
- [10] Miloudi M., Dascalescu L., Li J., El-Mossouess S., and K. Medles "Tribo-aero- electrostatic separator for coarse granular insulating materials", *IEEE Trans. Diel. Electr. Insul.*, vol. 20, p. 1510-1515, 2013.
- [11] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, "Experimental study of the optimum operating conditions of a pilot-scale tribo-aero-electrostatic separator for mixed granular solids", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, p. 699-706, 2013.
- [12] H. Aizawa, H. Yoshida, and S. Sakai, "Current results and future perspectives for Japanese recycling of home electrical appliances", *Res. Cons. Recycl*, vol. 52, p. 1399-1410, 2008.
- [13] S. M. Al-Salem, P. Lettieri, and J. Baeyens, "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review". *Waste Management*, vol. 29, p. 2625-2643, 2009.
- [14] H. Nagatomo, "Design-for-recycling of household appliances using a simple design-for-disassembly method", *Mitsubishi Electr. Adv.*, vol. 96, p. 22-24, 2004.
- [15] F. O. Ongondo, I. D. Williams, and T. J. Cherrett, "How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes", *Waste Management*, vol. 31, p. 714-730, 2011.
- [16] M. Miloudi, K.Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, and L. Dascalescu, "Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials," *J. Electr. Stat.*, vol. 69, pp. 631-637, 2011.
- [17] M. Miloudi, K.Medles, A. Tilmatine, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, "Optimization of belt-type electrostatic separation of triboaerodynamically charged granular plastic mixtures," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, pp. 1781 – 1786, 2013.
- [18] I.I. Inculat, *Electrostatic Minerals Separation*, John Wiley and Sons, Inc., New York ,N.Y., 1984.
- [19] D. E. Fekir, M. Miloudi, F. Miloua, K. Medles, and L. Dascalescu, "New aero-dynamic tribo-charging device with application to the electrostatic separation of granular mixtures of insulating materials."

Proc. 2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Addison, TX USA, October 18- 22, 2015.



Djamel Eddine Fekir was born in Ain Temouchent, Algeria, in 1988. He received the Dipl – Eng in electrical engineering from the University Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, Algeria, in 2011. After having spent several years in industry, since 2014 he is enrolled for a Ph.D. thesis at IRECOM laboratory of the University Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, Algeria. His research interests include high-voltage engineering, triboelectricity, and electrostatic separation technologies.



Mohamed Miloudi (M'12) was born in Sidi Bel Abbes, Algeria, in 1967. He received the Dipl.-Eng. and the Magister (Dr.-Eng.) degrees in electrical engineering from the University Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, Algeria, in 1991 and 2006 respectively. He spent fifteen years in the electronics industry and industrial production; from 2006 he is an Assistant Professor at the University Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, Algeria. He obtained his PhD degree in 2012, with a thesis he partly prepared under the supervision of Prof. Lucian Dascalescu at the University Institute of Technology, Angoulême, France. He has published several scientific papers in international and national journals, as well as in conference proceedings. His research interests include high-voltage engineering, triboelectricity, and electrostatic separation technologies.



Farid Miloua received the MS degree and the Magister (Dr. Eng.) in electrical engineering from the University of Sidi Bel Abbes, Algeria, in 1998 and 2004, respectively. He has been teaching electric field theory and high-voltage techniques at the Department of Electrical Engineering, University Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbes, Algeria. Actually, he is Head of the Electrostatics and High-Voltage Engineering Research Unit of APELEC Laboratory.



Karim MEDLES (M11) was born in Tipaza, Algeria, in 1972. He received the MS degree and the Magister (Dr. Eng.) in electrical engineering from the University Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, Algeria, in 1994 and 1999, respectively. He joined the faculty of that university in 1999, as a Senior Lecturer with the department of Electrical Engineering, where he currently is Full Professor. He obtained his PhD degree in 2006 from the Electrical Engineering

Department, University Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, Algeria, with a thesis he partly prepared at the University Institute of Technology, Angoulême, France, with a 18-month research scholarship awarded by the French Government. He has published several scientific papers in international and national journals, as well as in conference proceedings. He was invited several times as a visiting scientist in France. His current research interest includes power systems, high-voltage engineering and electrostatics



Lucian Dascalescu (M'93, SM'95, F09) graduated with first class honors from the Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Cluj-Napoca, Romania, in 1978, and received the Dr. Eng. degree in electrotechnical materials, from the Polytechnic Institute of Bucharest, Romania. He obtained the Dr. Sci. degree and then the "Habilitation à Diriger de Recherches" diploma in physics, both from the University "Joseph Fourier", Grenoble, France. His professional carrier began at CUG (Heavy Equipment Works), Cluj-Napoca, Romania. In 1983, he moved to the Technical University of Cluj-Napoca, as Assistant Professor, later becoming an Associate

Professor of Electrical Engineering. From October 1991 to June 1992, he received a Research Fellowship at the Laboratory of Electrostatics and Dielectric Materials (LEMD), Grenoble, France, where he returned in January 1994, after one year as an Invited Research Associate and Lecturer at Toyohashi University of Technology, Japan, and three months as a Visiting Scientist at the University of Poitiers, France. For four years, he taught a course in electromechanical conversion of energy at the University Institute of Technology, Grenoble, France. In September 1997, he was appointed Professor of Electrical Engineering and Automated Systems and Head of the Electronics and Electrostatics Research Unit at the University Institute of Technology, Angoulême, France. Since 1999, he has also been Head of the Department of Management and Engineering of Manufacturing Systems. At present he is the Head of the Applied Electrostatics Research Unit, which is part of the EHD Group, PPRIME Institute, UPR 3346 CNRS – University of Poitiers – ENSMA, in Angoulême, France. L. Dascalescu is the author of several textbooks in the field of electrical engineering and ionized gases. He holds 16 patents, has written more than 230 papers, and was invited to lecture on the electrostatics of granular materials at various universities and international conferences all over the world. Prof. Dascalescu is a former Vice-president of IEEE France Section, and Past Chair of the Electrostatic Processes Committee. He is associate editor of several scientific journals, including IEEE Transactions on Industry Applications, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Journal of Electrostatics and Particulate Science and Technology. He is a member of Electrostatics Society of America, Electrostatics Society of Romania, and Club Electrotechnique, Electronique, Automatique (EEA) France.

Résumé

La croissance permanente des quantités des déchets des équipements électriques et informatiques et leurs mauvaises images auprès du public ont conduit au développement d'une politique de traitement des déchets visant à diminuer leurs volumes et à réduire leurs impacts sur l'environnement. Un traitement efficace met toutefois en œuvre des filières et des procédés différents selon les matériaux et nécessite de ce fait un tri préalable.

L'objectif de cette thèse a été de mettre au point un procédé utilisant l'effet triboélectrique pour assurer la charge sélective des granules de plastique et les forces du champ électrique en vue de les séparer en fonction de leur nature et de réaliser une nouvelle installation d'électro-séparation à électrode concentrique et son utilisation avec ce nouveau dispositif. L'étude est faite avec les échantillons des divers isolants suivants : PC, PA, ABS, PVC et HIPS, avec des tailles de grain (allant jusqu'à 5 mm de diamètre). L'efficacité de ces deux installations ont été testées, pour le premier en présentant un mélange granulaire chargé dans un séparateur électrostatique à tapis roulant et pour le deuxième en introduisant un mélange granulaire chargé avec le nouveau dispositif de tribo-chargement dans notre nouvelle installation d'électro-séparation. La séparation d'un mélange de trois isolants a été atteinte.

Mot clés : Dispositif, Séparation électrostatique, Champ électrique, Isolant, Matériaux, Triboélectricité.

Abstract

The continuing growth in waste quantities of computer equipment and their bad images with the public has led to the development of a waste management policy aimed at reducing volumes and reducing their impact on the environment. However, an efficient treatment uses different methods and processes depending on the materials and therefore requires prior sorting.

The objective of this thesis was to develop a process using the triboelectric

effect to ensure the selective charging of plastic granules and the forces of the electric field to separate them according to their nature and also the realization of a new installation of electro-separation with concentric electrode and its use with this new device. The study is made with samples of the following insulators: PC, PA, ABS, PVC and HIPS, with grain sizes (up to 4 mm diameter). The efficiency of these two installations was tested for the first one by presenting a granular mixture loaded in an electrostatic conveyor belt separator and for the second by introducing a loaded granular mixture with the new tribo-loading device in our new installation of electro-separation. The separation of a mixture of three insulators was achieved.

Key words: Device, Electrostatic separation, Electric field, Insulation, Materials, Triboelectricity.

ملخص

النمو الدائم في كمية النفايات من معدات الحاسوب وصورتهم السيئة للجمهور أدت إلى وضع سياسة لإدارة النفايات تهدف إلى خفض الأحجام والحد من تأثيرها على البيئة. ومع ذلك، فإن العلاج الفعال يستخدم أساليب وعمليات مختلفة اعتماداً على المواد، وبالتالي يتطلب الفرز المسبق.

الهدف من هذه الأطروحة تطوير طريقة استخدام تأثير كهرباء الاحتكاك لضمان الشحن لحبيبات البلاستيك وقوى المجال الكهربائي لفصلها وفقاً لطبيعتها وأيضاً أعداد تركيبة جديدة لفصل كهربائي ذو أقطاب متحدة المركز واستخدامه مع جهاز الشحن الجديد. أجريت الدراسة بعينات من العوازل التالية: PC، PA، ABS، HIPS وPVC، مع أحجام الحبيبات (حتى قطر 4 مم). وقد تم اختبار كفاءة هاتين التركيبتين، للأولى من خلال حقن خليط حبيبي مشحون في فاصل الكترولستاتيكي ذو حزام ناقل والثانية عن طريق إدخال خليط حبيبي مشحون بجهاز الشحن الجديد في تركيبتنا الجديد للفرز الكترولستاتيكي. وقد تحقق فرز خليط من ثلاثة عوازل.

الكلمات مفتاحية: جهاز، الفرز الكهربائي، الحقل الكهربائي، عازل، مواد، كهرباء الاحتكاك.