

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



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Technologie

Département d'Électrotechnique

Thèse présentée par :

REZOUG Mohammed

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en sciences en Électrotechnique

Option : Haute Tension

Intitulé de thèse :

*Contribution à l'étude de la neutralisation des charges
électriques dans les particules isolantes*

Présentée devant le jury composé de :

Président :	Pr. Tilmatine Amar	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès
Directeur de thèse :	Pr. Ouiddir Rabah	Professeur	UST MB Oran
Co-directeur de thèse :	Pr. MEDLES Karim	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès
Examineurs :	Pr. Bendaoud Abdelber	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès
	Pr. Hamid Azzeddine	Professeur	UST MB Oran
	Pr. Rizzouga Mohamed	Professeur	UST MB Oran

Soutenue en: 2015

Remerciements

Ce travail de recherche a été effectué au sein du laboratoire d'APELEC de l'Université Djilali Liabes de sidi bel abbés.

Mon remerciement, avant tout, à DIEU tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a données durant toutes ces longues années d'étude afin que je puisse arriver à ce stade.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Rabah Ouiddir pour le thème du sujet intéressant qu'il m'a proposé, son aide et ses encouragements au cours de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Medles karim pour son aide et ses précieux conseils qu'il m'a prodigué durant la réalisation de cette thèse et sa confiance à mon égard.

Cela a été un grand privilège pour moi d'avoir coopérer avec Monsieur le Professeur Lucien DASCALESCU du laboratoire d'étude aérodynamique IUT d'Angoulême de l'université de Poitier.

J'adresse ma profonde reconnaissance à Messieurs :Tilmatine Amar, Hamid Azzedine, BENDAOUD Abdelber, REZZOUGA Mohamed pour avoir accepté d'examiner, évaluer et juger ce travail.

Je suis très reconnaissant envers l'équipe de laboratoire IRECOM et APELEC particulièrement à Mr MOUKADEM Djilali et Aicha Senoussaoui.

On cette occasion, je suis reconnaissant à toute ma famille et en particulier à mon père, ma mère, ma sœur, mon frère, ma grande mère, mon oncle pour leur soutien indéfectible et quotidien. Qu'ils trouvent dans ce travail le témoignage de mon affection.

Je n'oublierais pas de remercier mes amis (Wassim, Fodil, Seddik, Mohamed, hamada, Yacine, , Farouk, Boumediene, Adel,) et à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: ETAT DE L'ART	
I.1. CATEGORIE DES DECHET	4
I.1.1. Les déchets inertes	5
I.1.2. Les déchets dangereux	5
I.1.3. Les déchets non-dangereux	6
I.2. LES MATIERES PLASTIQUES	7
I.2.1. Les catégories de plastiques	8
I.2.2. Les origines des déchets plastique	9
I.2.3. Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)	9
I.3. TECHNIQUES DE SEPARATION BASEES SUR L'ELECTROSTATIQUE	10
I-3.1 Séparateurs électrostatiques isolants-conducteurs	10
I-3.2 Séparateurs tribo-électrostatique isolants-isolants:	11
I.4 NEUTRALISATION DES PARTICULES ISOLANTES	20
I.4.1. Techniques de neutralisation des charges de surface	20
I.4.2. Neutralisation par décharge couronne	21
I.5 CONCLUSION	22
CHAPITRE II : ETUDE DE CHARGEMENT DES PARTICULES ISOLANTES	
II.1. INSTALLATION EXPERIMENTALE	24
II.1.1 Présentation du dispositif	24
II.1.2. Matériaux utilisés	26
II.1.3. Matériels de mesure et méthode	29
II.1.4 Déroulement d'expériences	31
II.2 . RESULTATS ET ANALYSES	32
II.2.1. Chargement sans chargeur statique	32
II.2.2. Chargement avec chargeur statique	35
II-3. ETUDE EXPERIMENTALE DE SEPARATION DES MELANGES PLASTIQUES	

SOMMAIRE

II.3.1 Préparation des mélanges granulaires de plastique	39
II.3.2 Procédure expérimentale	39
II.3.3 Résultats et discussion	40
II.4 CONCLUSION	46

CHAPITRE III: SIMULATION NUMERIQUE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES ISOLANTES

III.2 PRESENTATION DES LOGICIELS UTILISES	49
III.2.1. Logiciel <i>COMSOL Multiphysics</i> 4.3	50
III.2.2. Présentation de la géométrie du séparateur	50
III.2.3. Logiciel MATLAB	56
III.3 MODELE MATHEMATIQUE DES TRAJECTOIRES DES PARTICULES ISOLANTES DANS LE SEPARATEUR TRIBO -AERO ELECTROSTATIQUE	57
III.3.1 Forces agissant sur la trajectoire des particules	58
III.3.2 Influence du type de parois	60
III.4. SIMULATION NUMERIQUE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES ISOLANTES	61
III.4.1 Simulation numérique de la trajectoire des particules isolantes dans l'étage supérieur	62
III.4.2 Simulation numérique de la trajectoire des particules isolantes à l'étage inférieur	66
III.5 SIMULATION NUMERIQUE DE LA TRAJECTOIRE DE TROIS PARTICULES	70
III.6 CONCLUSION	72

CHAPITRE IV: SEPARATION D'UN MELANGE DE TROIS PARTICULES

IV.1 Méthodologie des plans d'expériences	73
IV.2 MODELISATION DES PARAMETRES PAR LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES	74
IV.2.1 Intervalle d'étude de la tension positive	75
IV.2.2 Intervalle d'étude de la tension négative	75
IV.2.3 Intervalle d'étude du temps de chargement des particules	75
IV.3 APPLICATION DE LA METHODE DU PLAN D'EXPERIENCE COMPOSITE	75

SOMMAIRE

IV.3.1 Représentation matricielle	79
IV.3.2 Calcul des coefficients	81
IV.3.3 Analyse statistique des modèles	83
IV.3.4 Qualité descriptive du modèle	85
IV.5 INFLUENCE DES FACTEURS CHOISIS SUR LES REPONSES	86
IV.6 DETERMINATION DU POINT DE FONCTIONNEMENT OPTIMAL	89
IV.7. SEPARATION DE TROIS PARTICULES AVEC LE SEPARATEUR A TAPIS ROULANT	91
IV.7.1 Déroulement des expériences	92
IV.8. CONCLUSION	95
 CHAPITRE V: NEUTRALISATION DES MATERIAUX GRANULAIRES ISOLANTS	
V.1 PROCEDURE EXPERIMENTALE	96
V.2 ESSAIS PRELIMINAIRES	100
V.2.1 Influence de l'angle d'inclinaison	101
V.2.2 Influence de la tension appliqué	102
V.2.3 Influence de la hauteur de l'électrode	105
V.3. MODELISATION PAR PLAN D'EXPERIENCE COMPOSITE	107
V.3.1 Influence des facteurs choisis sur les réponses	113
V.3.2 Détermination du point de fonctionnement optimale	117
V.4. CONCLUSION	120
CONCLUSION GENRALE	121
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	123
ANNEXES	127

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Lorsqu'ils sont hors d'usage, les ordinateurs, les réfrigérateurs, les photocopieurs, les téléphones mobiles ou encore les tablettes numériques deviennent des déchets d'équipements électriques ou électroniques (DEEE). Dans un monde où la technologie occupe une place de plus en plus importante, le recyclage de ces DEEE devient donc un enjeu fondamental pour soutenir une vision globale du développement durable. Le traitement des DEEE revêt une dimension à la fois environnementale, économique et sanitaire. Il permet de réduire les émissions de CO₂, de préserver les populations des dangers de composants spécifiques contenus dans ces déchets mais aussi de créer des emplois[1].



Figure.1 : photos des déchets d'équipements électriques et électroniques

Selon *Pike Research*, nous avons produit 74 millions de tonnes de déchets et d'équipements électriques et électroniques en 2014 soit 2346 kilos par seconde. Les plastiques représenteraient environ 31 % de l'ensemble des différentes catégories de DEEE; il est donc nécessaire de poursuivre les efforts visant à réduire le volume de ces matières[2].

Le recyclage des matériaux plastiques provenant d'équipements électriques et électroniques 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. Pour atteindre cet objectif il est nécessaire de rechercher et de développer de nouvelles technologies de séparation physique [3].

Néanmoins, la technologie actuelle ne prend en charge que la séparation de deux matériaux, alors que le principal obstacle qui se pose à l'industrie de transformation de plastiques contenus dans les DEEE lors de leur récupération et de leur recyclage reste leur diversité. Pour remédier à ce problème, nous avons contribué dans cette thèse à l'étude de chargement des particules pour l'optimisation d'un nouveau séparateur électrostatique pour trois matériaux de nature différente.

De nombreux secteurs industriels sont touchés par des problèmes liés aux phénomènes électrostatiques. En effet, de nombreux matériaux non-conducteurs tel que : les matières plastiques, le caoutchouc, le papier, les hydrocarbures... auront tendance à se charger en électricité statique par frottement lors de ces manipulations qui se font souvent à des vitesses élevées (séparation, transport sur tapis, pneumatiques...). Les particules isolantes non-conducteurs comme l'isolant risquent de se charger pendant les phases de séparation dans les sacs de récupération, dans ce cas de figure, le risque pour la sécurité des individus est le problème principal, en effet, une étincelle peut provoquer des accidents majeurs.

Cette thèse répartit en cinq chapitres, Le premier chapitre présentera l'état de l'art qui donne une vision succincte sur les différentes catégories de déchets et les matières plastiques, ainsi que les techniques de séparation des isolants basés sur l'électrostatique; la deuxième partie du chapitre nous verrons le problème d'accumulation de charge statique dans les particules isolantes après séparation et la nécessité de trouver une solution pour les neutraliser.

Dans le deuxième chapitre, on donnera les résultats de mesure de la charge ainsi que leurs analyses. Ces derniers nous ont permis de décider de la combinaison des matériaux et de la nature des parois que nous utiliserons dans le reste de nos travaux.

Le troisième chapitre consiste à étudier le tracé des trajectoires de particules chargées lorsqu'elles traversent le champ électrique généré par les différents systèmes d'électrodes HT de notre séparateur. Pour ce faire, le logiciel *COMSOL Multiphysics* 4.3 et un programme écrit sous MATLAB 7.12.0 ont été utilisés respectivement pour analyser le champ électrique et simuler la trajectoire des particules en fonction de plusieurs facteurs influents.

Dans le quatrième chapitre, les expériences de séparation basées sur les résultats obtenus précédemment feront l'objet d'une modélisation et d'une optimisation du dispositif, en utilisant la méthodologie des plans d'expériences pour la quantification des effets du séparateur. Finalement, pour confirmer la performance de ces plans, deux expériences ont été réalisées pour la vérification du point optimal. Dans la deuxième partie du chapitre nous verrons une autre technique de séparation qui va nous permettre de séparer un mélange de trois particules.

Dans le cinquième chapitre nous présenterons une solution pour la neutralisation des charges électriques pour des particules isolantes en utilisant une haute tension alternative. Une modélisation et une optimisation du dispositif de neutralisation sera faite dans cette partie.

Enfin, on terminera par une conclusion générale mettra en valeur les apports de cette thèse et présente les perspectives de notre travail.

CHAPITRE I

Etat de l'art

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

Dans un monde où la technologie occupe une place de plus en plus importante, le recyclage des déchets d'équipements électriques ou électroniques (DEEE) devient un enjeu fondamental pour soutenir une vision globale du développement durable. 352 millions d'ordinateurs, 214 millions d'ordinateurs portables, 48 millions de tablettes, 73 millions de consoles de jeux, 468 millions de smartphones et 1,8 milliard de téléphones mobiles... Tous ces objets en circulation dans le monde en 2011 font ou feront un jour partie des DEEE, lorsqu'ils seront hors d'usage, ils deviendront des déchets d'équipements électriques ou électroniques (DEEE)[2].

De ce fait le recyclage de ce plastique est devenu une industrie qui consiste à récupérer les granules de polymère séparées afin de les réutiliser comme matière première secondaire. Cette opération de récupération nécessite l'emploi de techniques fiables dont les procédés gravitationnels ou par flottation ont montré dans certaines applications une efficacité modeste par rapport aux dispositifs électrostatiques caractérisés par une faible consommation d'énergie et par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien[5].

Le principe de base de tout dispositif de séparation électrostatique des mélanges de matériaux isolants granulaire est de charger par effet triboélectrique les divers constituants et de les soumettre ensuite à l'action d'un champ électrique intense. La charge acquise par les granules séparées s'accompagne des nuisances électrostatiques dont la prise en compte est indispensable dès la phase de conception d'un nouveau procédé.

La première partie de ce chapitre sera consacré aux différentes catégories de déchets, et plus particulièrement les déchets plastiques et les DEEE. La deuxième partie est une synthèse sur les différentes techniques de séparation des matériaux plastiques basée sur l'électrostatique et enfin la troisième partie nous verrons le problème d'accumulation de charge statique dans les particules isolantes après séparation et la nécessité de trouver une solution pour les neutraliser.

I.1. CATEGORIE DES DECHETS

On peut classer les déchets en trois catégories :

- Les déchets inertes qui représentent approximativement 60% de la production totale de déchets de l'Union Européenne.
- Les déchets dangereux dont la production s'élevait à 94,5 millions de tonnes dans l'Union Européenne en 2010, soit un peu moins de 4% de la production totale de déchets.
- Les déchets non-dangereux qui représentent environ 1/3 de la production de déchets de l'Union Européenne... [1]

■ Déchets dangereux ■ Déchets non-dangereux ■ Déchets inertes

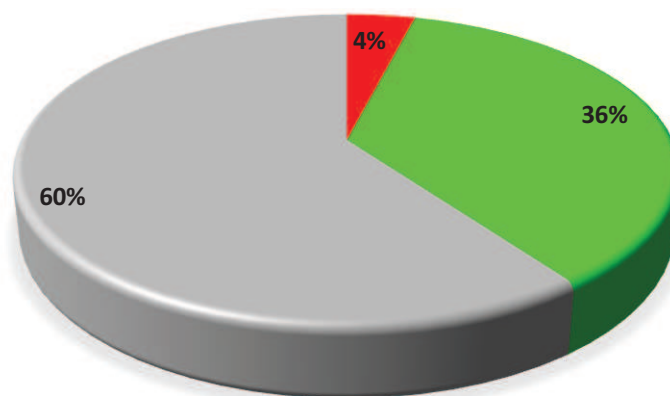


Figure.I.1 :Taux de production des différents types de déchets de l'union européenne

I.1.1. Les déchets inertes

Ce sont des déchets qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique avec l'environnement (Figure.I.2). Ils ne sont pas biodégradables et ne présentent pas de danger pour l'homme et l'environnement (remblais ou gravats). Ils sont issus soit de l'industrie extractive (exploitation des carrières ...), ou non extractive (déchets produits par le secteur de la construction tels que les matériaux minéraux : pierre, marbre, grès, ardoise...) [1].



Figure.I.2 : Photo sur la récupération des déchets inertes

I.1.2. Les déchets dangereux

Ce sont des déchets qui contiennent, en quantité variable d'éléments toxiques ou dangereux, nuisibles à la santé humaine et à l'environnement (via leurs effets directs ou indirects). Ils sont de nature organique (solvants, hydrocarbures...), minérale (acides, boues d'hydroxydes métalliques...) ou gazeuse (Figure. I.3) [1].

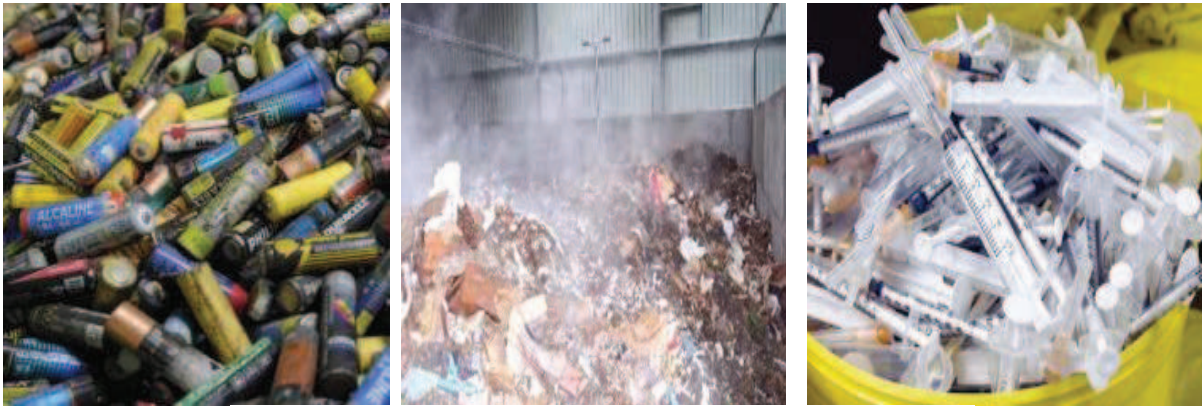


Figure. I.3 : Quelques exemples sur les déchets dangereux

I.1.3. Les déchets non-dangereux

Ce sont des déchets qui peuvent brûler, produire des réactions chimiques, physiques ou biologiques, mais sans présenter de caractère dangereux ou toxique vis-à-vis de l'environnement ou de la santé humaine. On distingue deux types :

a) Déchets biodégradables

Les biodéchets sont des déchets biodégradables produits par les entreprises et les particuliers comme les résidus alimentaires (épluchures de légumes, coquilles d'œuf,..), de branchages, de feuilles, de papiers, de cartons. Ils sont générés par les collectivités, les grandes et moyennes surfaces, le secteur de la restauration et l'industrie agroalimentaire. Les boues de stations d'épurations sont également considérées comme des biodéchets (Figure I.4) [1].



Figure. I.4: Photos de déchets biodégradables

b) Déchets recyclables « déchets industriels banals (DIB) »

Un déchet recyclable est un déchet qui peut être transformé en matières premières secondaires, permettant ainsi la production d'autres produits. Les déchets recyclables se répartissent en quatre grandes catégories : plastique, verre, papier/carton et métal (Figure.I.5). Ils comprennent également le bois, les déchets d'équipements électriques et électroniques, le caoutchouc[1].

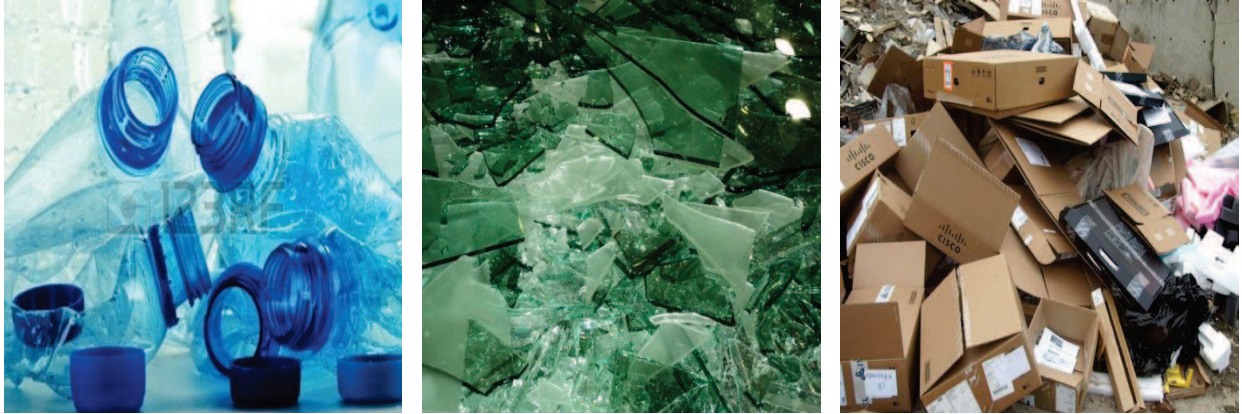


Figure.I.5 : Photos de déchets recyclables

I.2. LES MATIERES PLASTIQUES

La production mondiale de plastiques augmente régulièrement ; en 1990 elle était de 100 Mt et elle arrive en 2012 à près de 300 Mt[5].

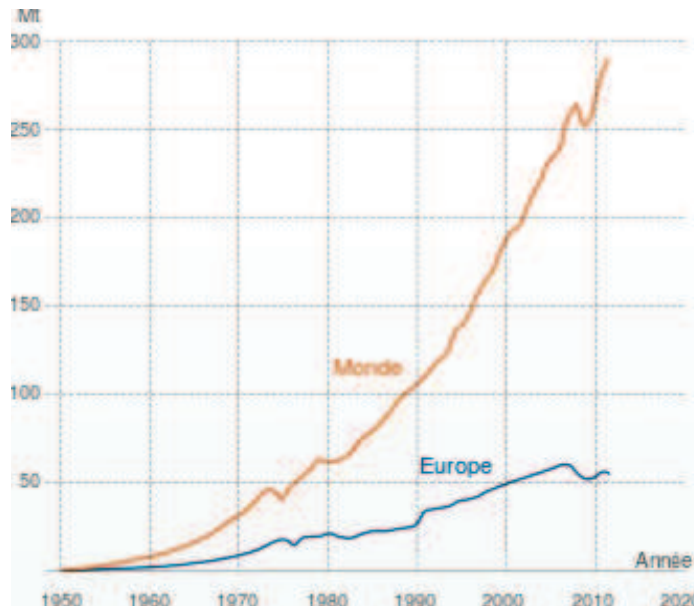


Figure I.6 Évolution de la production des plastiques entre 1950 et 2012

Les plastiques sont omniprésents dans notre vie : conception des ordinateurs, production d'une simple seringue médicale, le secteur du bâtiment, de l'automobile, de l'électricité-électronique et de l'agriculture ou encore la mise au point d'un cœur artificiel...Au-delà de leurs atouts, une fois consommés, ils génèrent des déchets volumineux par rapport à leur poids.

Ces déchets occupent un volume important dans les points de collecte et autres installations de gestion de déchets dont les centres d'enfouissements techniques. Leur dissémination dans la nature est durable et inesthétique car leur biodégradabilité est dans la plupart des cas faible. Il y a donc lieu d'encourager leur recyclage. Chaque tonne de plastiques recyclés permet d'économiser 800 kg de pétrole brut[5].

I.2.1. Les catégories de plastiques

Il existe deux grandes catégories de plastiques :

Les thermoplastiques: ils fondent sous l'effet de la chaleur et reprennent leur rigidité en refroidissant. Techniquement ils peuvent être recyclés ou régénérés à la fabrication d'objets divers [4].

- Le PVC (polychlorure de vinyle), composant le plus connu du grand public, principalement consacré au conditionnement des eaux, boissons rafraîchissantes, vin et vinaigre tuyaux de canalisations, gaines électriques,.
- Le PEHD (polyéthylène haute densité) utilisé pour fabriquer les bouteilles et flacons contenant lait, lessives pour lave-linge ou lave-vaisselle, adoucissants, assouplissants, détergents, bidons (huiles de moteur), caisses, casiers...
- Le PET (polyéthylène téréphtalate) servant à la fabrication des bouteilles d'eau, boissons gazeuses ou plates, vin, cidre, huile...
- PEBD : sacs et emballages plastiques, palettes, films étirables, bouteilles (shampooing),
- PP : sachets et films transparents (emballages biscuits), automobiles (pare-chocs...),
- PS : pots de yaourts, gobelets, emballages.

Les thermodurcissables :La transformation d'un matériau thermodurcissable fait intervenir une polymérisation, laquelle est irréversible et conduit à un produit fini solide, généralement rigide. Ce dernier est infusible donc non transformable, ce qui empêche son recyclage. Les polyuréthanes réticulés, la bakélite, les polyesters insaturés, formica sont des matières initialement liquides qui durcissent sous l'effet de la chaleur et de la pression. Leur transformation est irréversible, ils sont inaptes à la régénération. Les matériaux thermodurcissables sont généralement plus résistants que les matériaux thermoplastiques, on leur reconnaît une très bonne résistance diélectrique, mécanique, ainsi qu'aux produits chimiques (matériaux non réactifs), et à la chaleur. La plupart des résines utilisées dans l'industrie des composites sont thermodurcissables. Il existe également des plastiques composites à base de thermoplastiques ou de thermodurcissables mélangés à d'autres pour en améliorer les propriétés mécaniques (fibres de verre)[4].

I.2.2. Les origines des déchets plastiques

Les déchets plastiques ont différentes origines :

- Les déchets de l'industrie du plastique (rebus et ratés de production et de transformation).
- Les plastiques contenus dans les ordures ménagères (bouteilles, flacons, gobelets, films...).
- Les déchets de démolition du bâtiment.
- Les emballages industriels et commerciaux.
- Les résidus de broyage automobiles.
- Les plastiques agricoles (films, paillages...).
- Les plastiques issus des déchets d'équipements électriques et électroniques [4].

I.2.3. Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)

Selon l'Université des Nations Unies (UNU), le plastique représente un enjeu crucial du recyclage des DEEE. Dans l'Union européenne, si 50% de ce plastique était réutilisé, cela économiserait 5 millions de kilowattheures d'énergie et 2 millions de tonnes d'émission de CO₂, soit l'équivalent de 1,6 millions d'allers - retours Paris New-York en avion[7]. Les déchets d'équipements électriques et électroniques DEEE, sont une catégorie de déchets constituée des équipements en fin de vie, fonctionnant à l'électricité ou via des champs électromagnétiques, ainsi que les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs (ce sont surtout des ordinateurs, imprimantes, téléphones portables, appareils photos numériques, réfrigérateurs, jeux électroniques ou télévisions) (Figure I.6).



Figure.I.6 : exemple sur les déchets d'équipement électrique et électronique

Un EEE devient un DEEE dès lors que son propriétaire l'a abandonné ou le destine à l'abandon parce qu'il n'en a plus l'utilité. Dans une société où le taux d'équipement est de plus en plus élevé et où les produits sont très rapidement obsolètes avec l'évolution rapide des technologies, les quantités de DEEE s'accroissent de 3 à 5% par an. Les plastiques représenteraient environ 31 % de l'ensemble des différentes catégories de DEEE; il est donc nécessaire de poursuivre les efforts visant à réduire le volume de ces matières.

La principale caractéristique des plastiques contenus dans les DEEE est la dominance des produits tels que le PC, l'ABS, le PVC et le HIPS représentant plus de 70% du contenu total des matières plastiques dans ces déchets (figure I-7) [4,5].

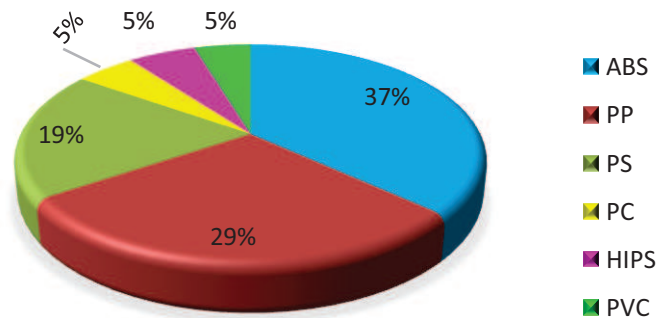


Figure.1.7. Proportion des différents constituants des déchets plastiques dans DEEE.

Beaucoup de travaux sont menés pour déterminer et mettre au point des techniques de valorisation des DEEE les mieux adaptées, La récupération et le recyclage de ce type de déchets constitue actuellement une grande importance dans notre vie quotidienne.

La séparation des divers constituants des mélanges de tels matériaux plastiques constitue la clé du succès du recyclage. Pour atteindre cet objectif il est nécessaire de rechercher et de développer de nouvelles technologies de séparation physique.

La séparation électrostatique s'est imposée comme l'alternative la plus fiable et un procédé qui permet d'obtenir des matériaux d'une grande pureté avec une multitude d'avantages : continuité de système(automatique), emploi facile, faible consommation d'énergie (n'atteint pas les 10kW pour le modèle le plus puissant et le plus complet), écologique (0% de génération d'émission),préservation des propriétés physico chimiques, coût réduit pour la maintenance .

I.3. TECHNIQUES DE SEPARATION BASEES SUR L'ELECTROSTATIQUE

Il existe plusieurs types de séparateurs électrostatiques, traitants différents catégories de mélanges, ils sont présentés ci-après :

I-3.1 Séparateurs électrostatiques isolants-conducteurs :

Il existe une multitude de séparateurs avec différentes techniques, nous citerons le séparateur électrostatique à tambour, comme celui montré sur la figure (I-8), est le modèle le plus utilisé dans l'industrie.

Son principe de fonctionnement consiste en la création de charges électriques par ionisation de l'air grâce à une électrode (1) et ainsi les granules déposées par le vibro-transporteur (2) sur le cylindre tournant (tambour) (3) acquièrent tous une charge électrique de même signe que le potentiel HT.

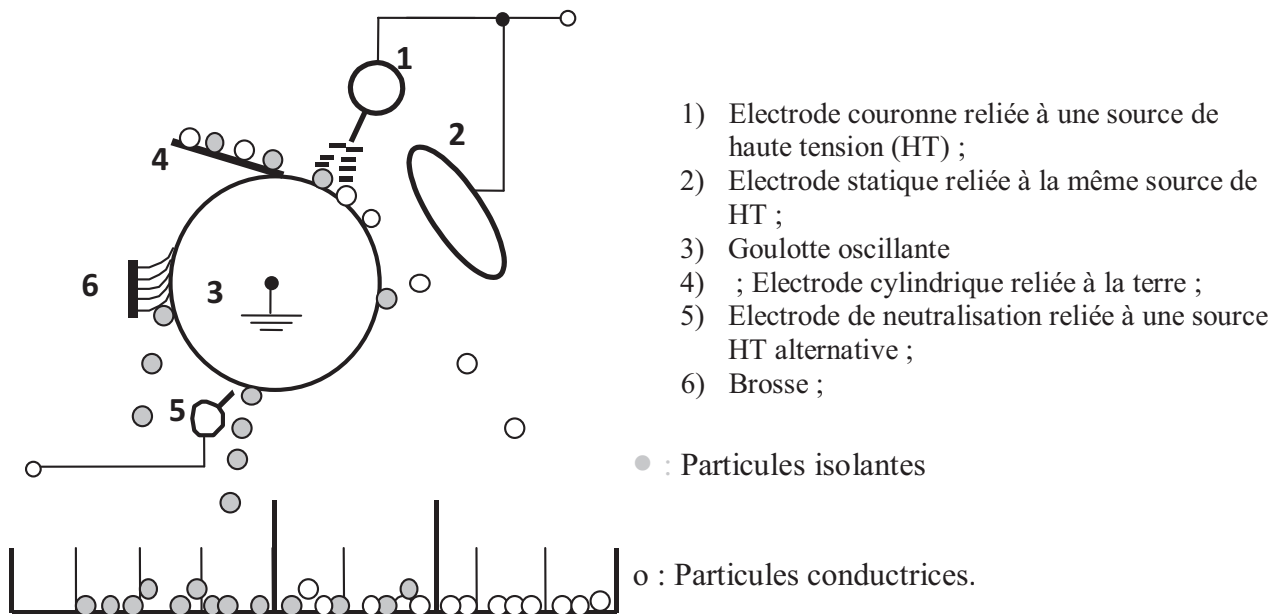


Figure I-8 :Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour

Les granules isolants adhèrent à la surface du tambour grâce à une force d'image électrique et finissent par tomber dans la partie gauche du collecteur, tandis que les granules conducteurs perdent rapidement leurs charges à travers le tambour relié à la terre, en arrivant dans la zone du champ électrostatique généré par l'électrode statique de forme elliptique (5), ils acquièrent par influence électrique une charge de signe opposée au potentiel HT [23]. Ils sont ensuite attirés par l'électrode elliptique et déposés dans la partie droite du collecteur (6).

I-3.2 Séparateurs tribo-électrostatique isolants-isolants :

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

I.3.2.1 Dispositifs de chargement triboélectrique :

Il existe actuellement plusieurs procédés d'acquisition de charge triboélectrique pour permettre aux granules d'acquérir la charge électrique. On citera quelques dispositifs réalisés au sein des laboratoires IRECOM et APELEC de l'Université Djillali Liabes à Sidi Bel Abbès (ALGERIE).

a) Chargement par ventilateur :

La rotation de l'hélice crée un courant d'air descendant donnant naissance à des turbulences aérodynamique multipliant les collisions des particules granulaires à l'intérieur du cylindre. Les particules granulaires isolantes sont placés dans le dispositif de chargement triboélectrique, puis le moteur à courant continu est mis en marche pendant une durée déterminée et à une vitesse désirée (figure I.9). Les particules isolantes se mettent en mouvement et deux types de collisions se produisent : particules contre les parois du cylindre et particules entre elles. Néanmoins ce dernier type reste négligeable par rapport au premier type de collision[8].

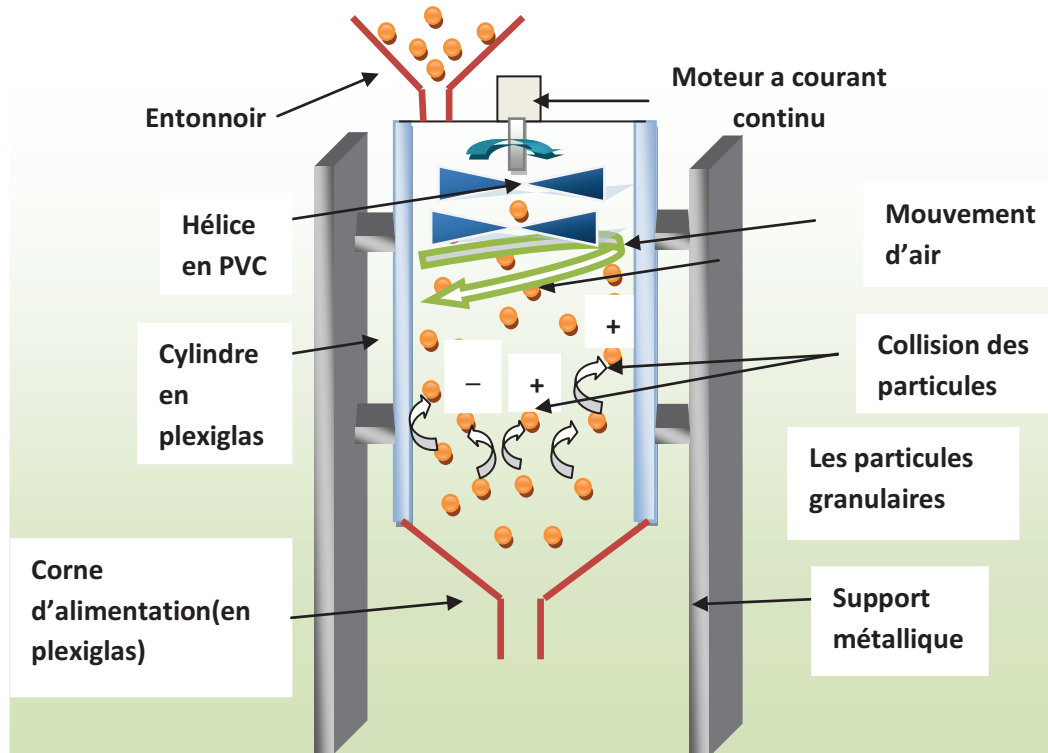


Figure I.9 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur

b) Chargement par cyclone :

Le dispositif est un cylindre isolant (figure I.10), y compris un ventilateur dont le rôle est de souffler les particules à charger à l'intérieur du cylindre, où elles subissent un frottement continu contre la paroi interne. La majorité de la charge acquise s'effectue lors du contact des particules avec cette paroi.

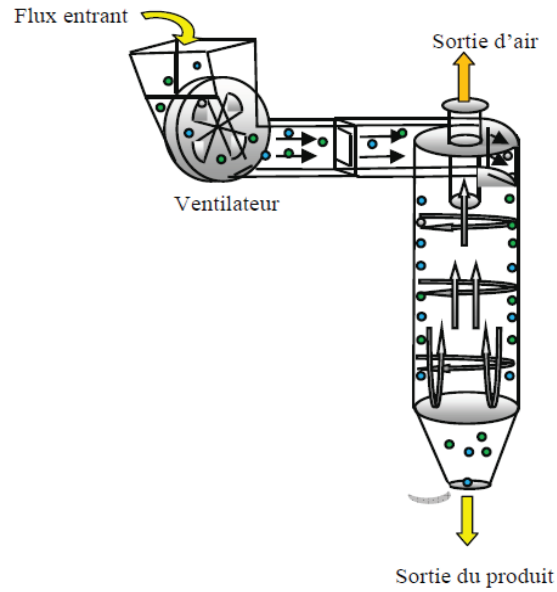


Figure I.10 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone[9]

c) Chargement statique :

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique isolante (figure I.11), y compris des parois inclinées et détachables. Les particules tombent en chute verticale et glissent dans ce dispositif par gravitation. Le chargement de ces particules s'effectue par frottement avec les parois[9].

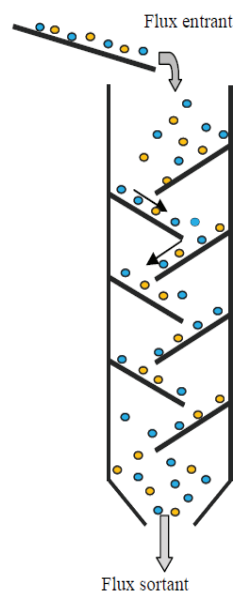


Figure I.11 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique

d) Chargement à lit fluidisé :

Le dispositif est un tube cylindrique isolant, le mélange de particule est déposé sur le support (un disperseur en tamis isolant), on souffle de l'air à l'aide d'une soufflante au bas du cylindre. Les particules sont fluidisées, elles acquièrent des charges électriques de signe opposé grâce aux collisions entre elles [11].

C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (figure I.12) [10]. On considère une couche de particules solides reposant sur une plaque poreuse horizontale à l'intérieur d'un cylindre vertical. On injecte un gaz à travers la plaque dans le sens ascendant :

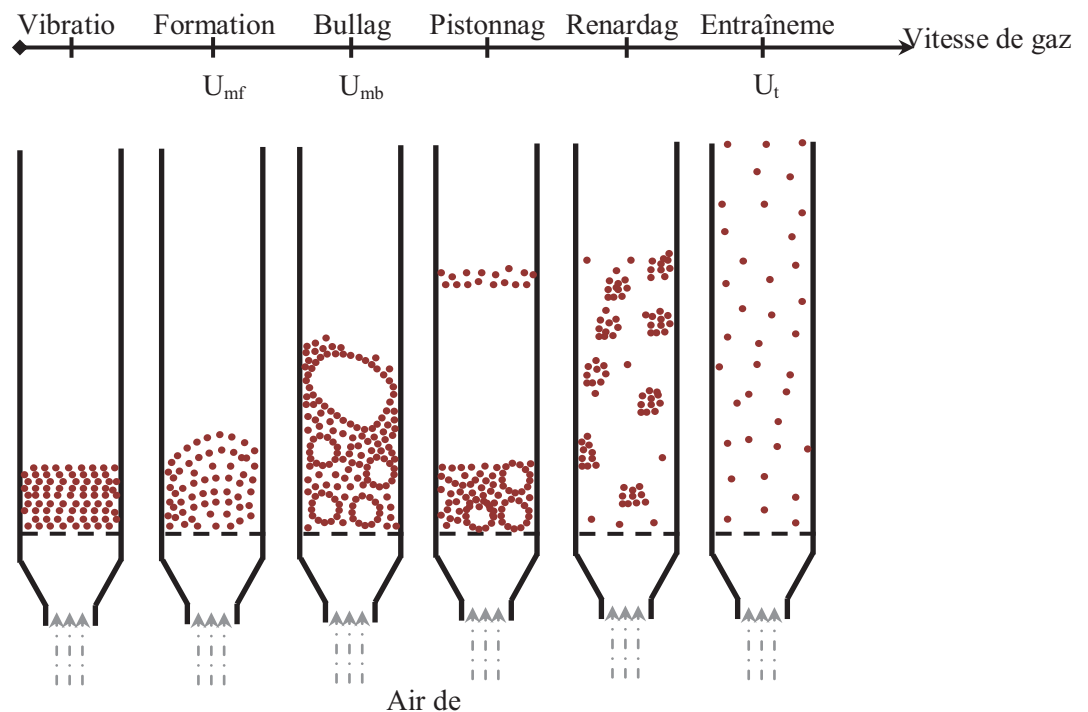


Figure I.12 : Les régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation

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

- Le bullage: à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage U_{mb} , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse de distribution de gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide à ébullition.
- Le pistonage: en excès au-delà de U_{mb} , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.
- Le renardage: les particules s'accrochent et créent des passages préférentiels pour le gaz.
- L'entraînement : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos U_t , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation : c'est le phénomène d'entraînement.

e) Chargement tribo-aéro-électrostatique:

C'est une combinaison de deux modes de chargement en cascade, le procédé est une chambre parallélépipédique isolante comprend deux parties (figure I.13) : la première pour le chargement aéro-triboélectrique (à lit fluidisé), après avoir mis les particules en agitation dans un lit fluidisé, elles sont dirigées vers la deuxième partie du dispositif destiné au chargement statique par des parois inclinées, dont le but est de pouvoir mieux contrôler la charge acquise, multipliant les paramètres de chargement[12].

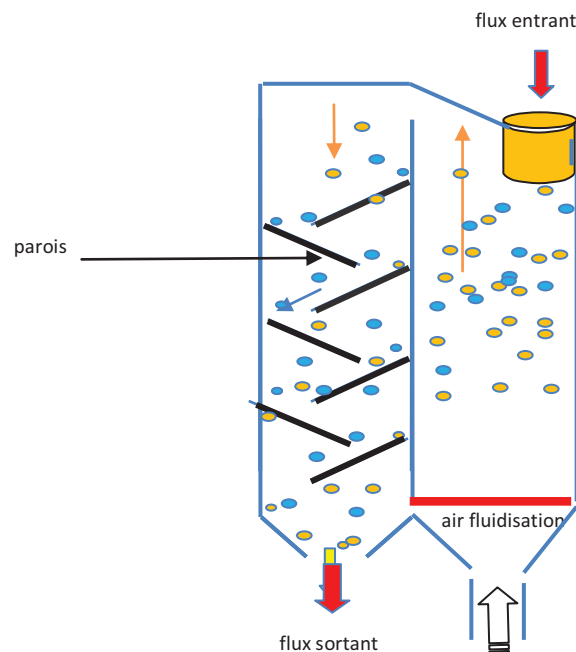


Figure I.13 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique

I.3.2.2 Séparateur tribo-électrostatique

Les séparateurs triboélectriques qui reposent sur le principe du tri électrostatique permettent un tri entièrement automatisé d'un grand nombre de matériaux dont les plastiques en particulier. Plusieurs dispositifs ont été réalisés en vue de la séparation électrostatique des matériaux granulaires plastiques. Toutes ces installations comportent une partie de chargement triboélectrique et une région de séparation dans un champ électrique intense.

a) Séparateur triboélectrique à tapis roulant :

Il est constitué de deux parties : la première partie est pour le chargement triboélectrique ou l'introduction du mélange granulaire s'effectue par un vibro-transporteur où les particules sont soumises à la pesanteur et entrent en collision avec les différentes parois entraînant leur chargement triboélectrique, c'est le chargeur statique. La seconde partie est formée d'un tapis roulant à bande isolante en néoprène, d'une électrode de forme elliptique reliée à une source d'alimentation haute tension continue (+) et un collecteur de particules [13].

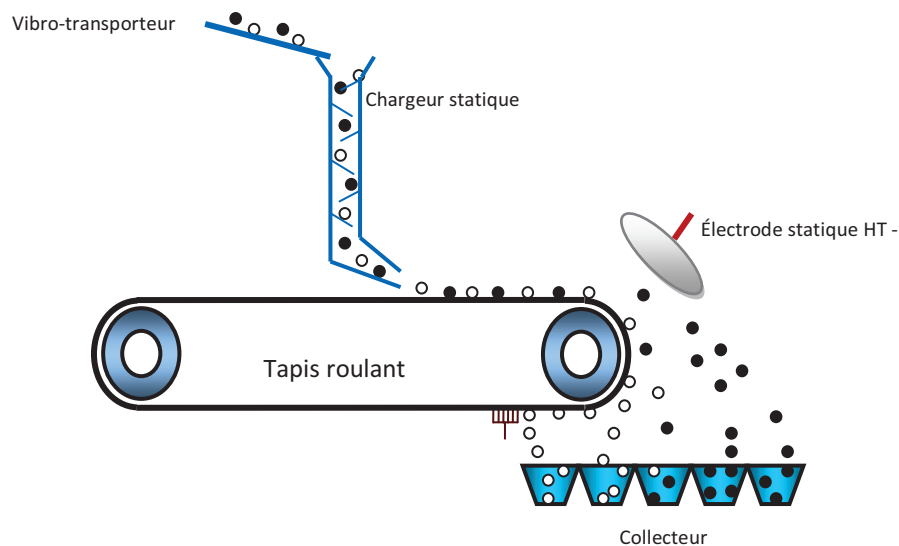
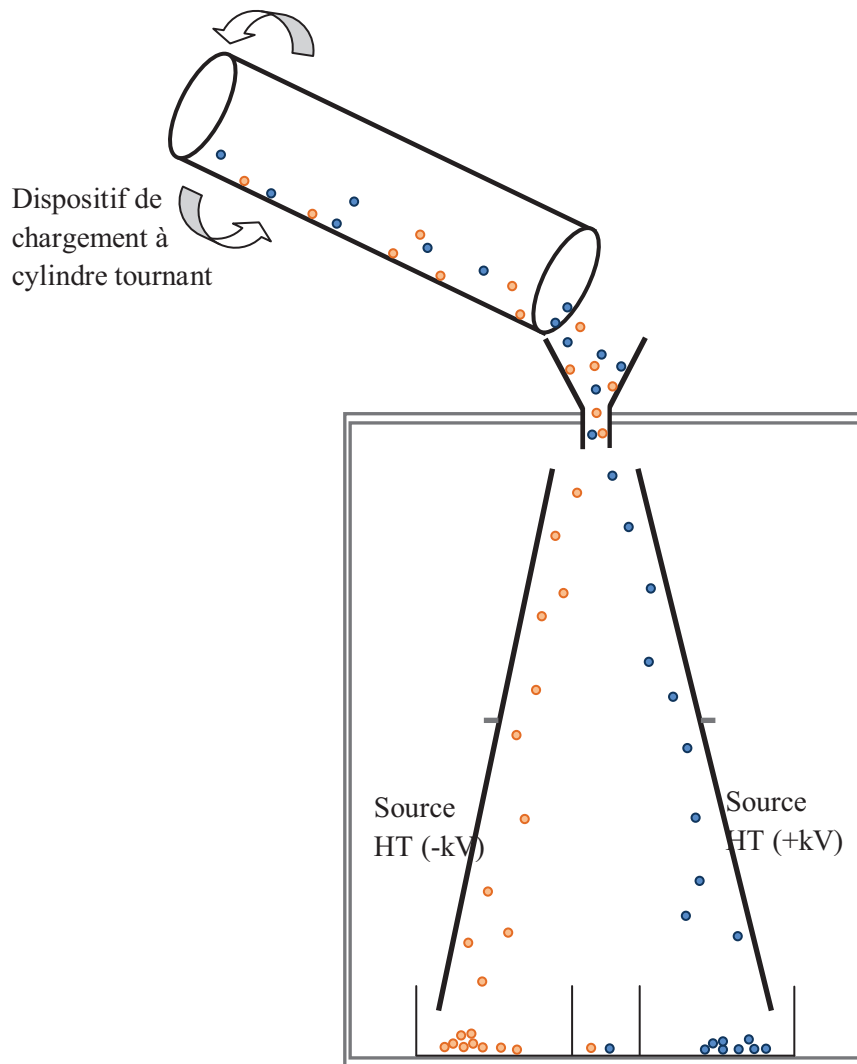


Figure 1.14: Séparateur à tapis roulant

L'électrode statique attire les particules d'une polarité et repousse les particules de polarité opposée grâce aux forces électriques d'attraction et de répulsion, permettant ainsi la séparation.

b) Séparateur à chute libre:

Le mélange granulaire est chargé par un des différents dispositifs de chargement triboélectrique, il tombe ensuite dans une zone inter électrodes où le champ électrique est intense situé dans une chambre isolante. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge acquise. La figure I.15 représente un séparateur à chute libre associé à un dispositif de chargement à cylindre tournant [14,15].



FigureI.15 : Représentation schématique d'un séparateur à chute libre à cylindre tournant

c) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses :

Les électrodes qui vont attirer la matière granulaire fluidisée sont deux bandes transporteuses du tapis roulant, elles sont à base d'une matière conductrice (figure 1.16) et s'appuient à des tambours isolants. Leur entrainement est assuré par des moteurs triphasés alternatifs, commandés par des variateurs de fréquence. Les particules chargées collent sur la surface des bandes transporteuses contrairement polarisées, pour être transporté vers la zone de récupération [16,17].

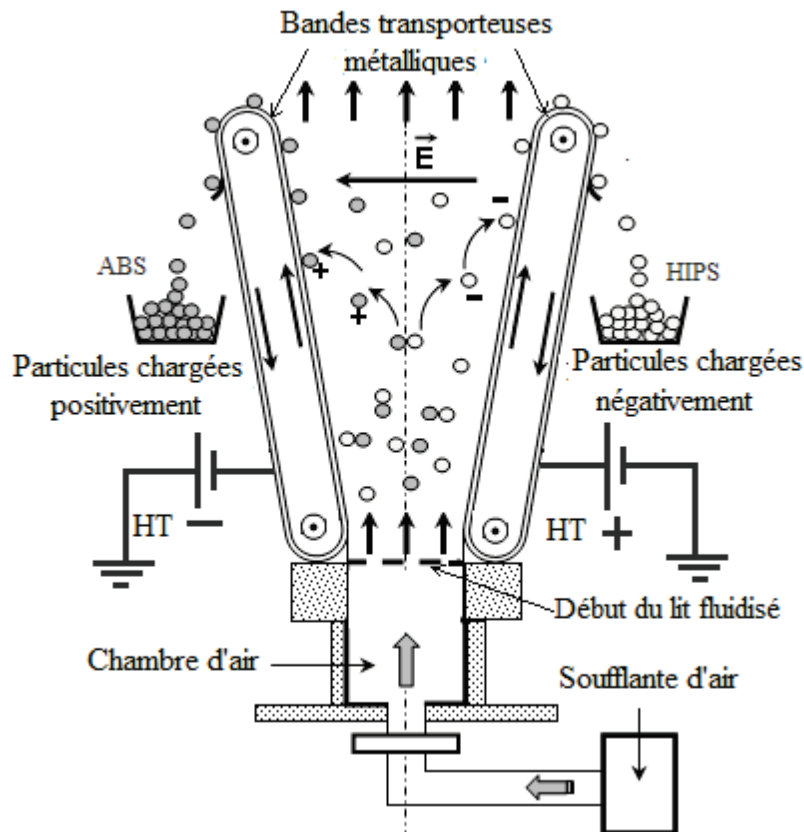


Figure I.16 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses

d) séparateur à électrodes cylindriques tournantes:

Ce dispositif a le même principe de fonctionnement de celui précédemment cité, la différence entre les deux procédés se manifeste par les électrodes utilisées. Cette installation utilise des tambours conducteurs reliés à des arbres entrainés par des moteurs (figure 1.17) dont le but est de diminuer la traversée des particules, et de réduire le coût du séparateur ainsi qu'augmenter sa robustesse[18,19].

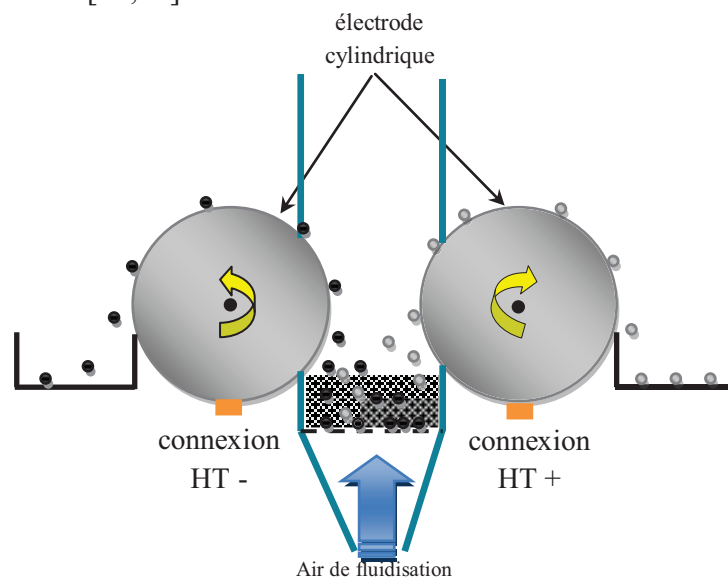


Figure I.17 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à cylindres tournant

e) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournant:

C'est une installation particulièrement adaptée à la séparation des particules de plastique fines. Deux disques métalliques sont montés sur un même arbre (figure 1.18), entraîné par un moteur électrique, afin de les tourner dans un mélange de particules fluidisé. Les deux disques qui sont alimentés par deux sources de haute tension de polarités opposées, soulèvent les particules chargées. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques[20].

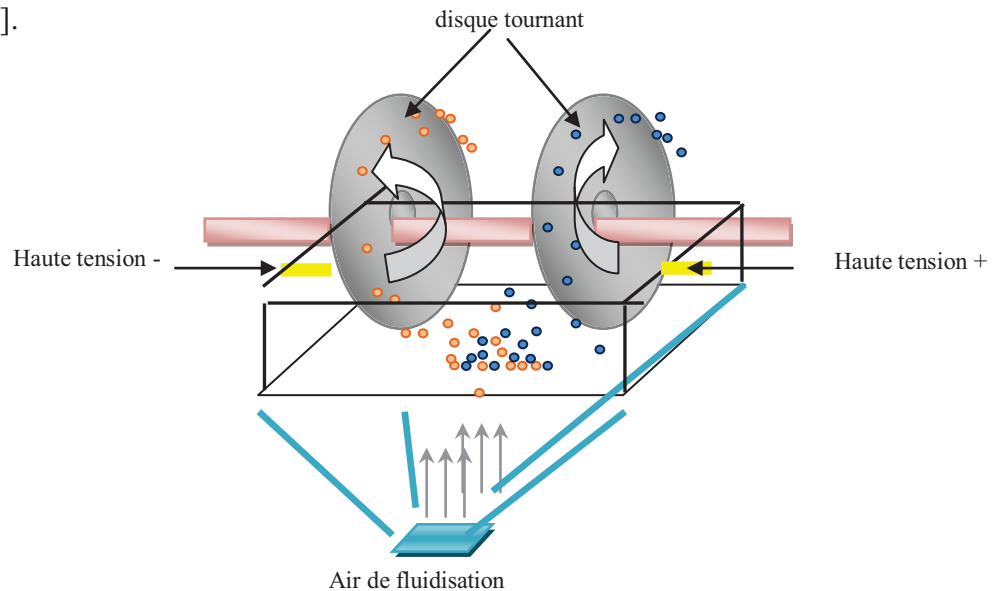


Figure I.18 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants

f) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales:

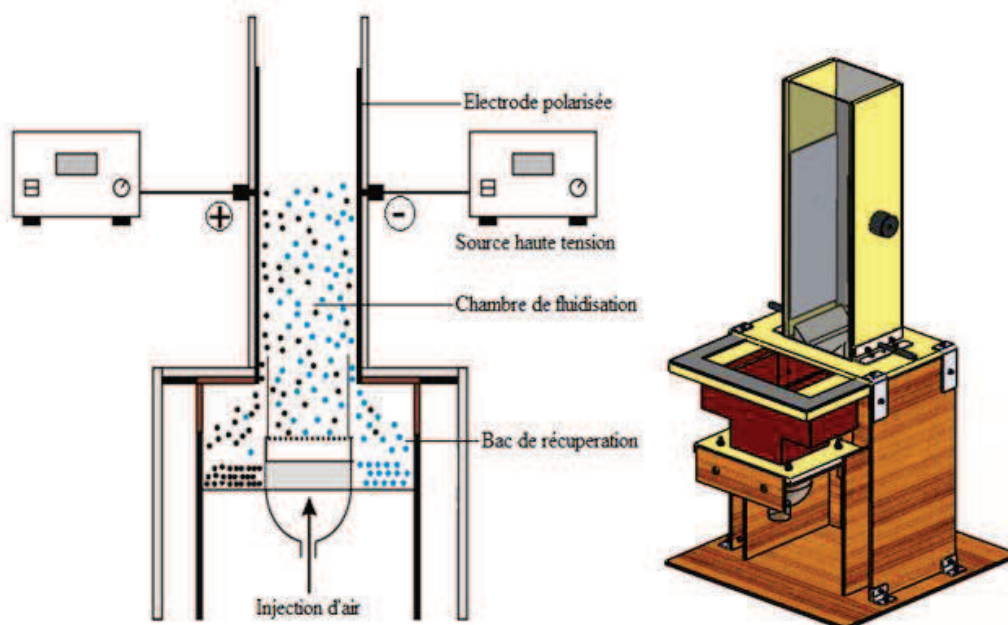


Figure I.19 Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales

Deux électrodes verticales collées à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique isolante (figure 1.19), attirent les particules de signe opposé et repoussent celles de même signe après chargement par lit fluidisé, pour les dévier vers les collecteurs [21].

I.4. Neutralisations des particules isolantes

La séparation électrostatique de mélanges granulaires représente un domaine important de l'électrostatique appliquée. Dans l'industrie du recyclage, le tri sélectif des différentes sortes de matières plastiques contenues dans DEEE est réalisé par les forces de champ électrique agissant sur les granules isolantes générés par les décharges corona ou par l'effet triboélectrique. Les matériaux isolants granulaires peuvent acquérir une grande quantité de charge qu'ils peuvent garder pour une durée beaucoup plus longue que nécessaire au bon déroulement d'un processus électrostatique. En effet, la majorité des applications (pour ne pas dire toutes les applications) ne durent que quelques minutes tandis qu'un isolant peut conserver une charge pendant des heures voire même des jours. Ils peuvent également générer des décharges électrostatiques qui pourraient endommager l'électronique des circuits, choquer l'opérateur humain, initier des incendies et explosions. Afin d'éviter ces dangereuses situations, l'élimination des charges électriques résiduelles sur la surface des matériaux isolants granulaires après leur séparation est une condition préalable pour le fonctionnement optimal du processus[22]. Il est donc nécessaire de contrôler la charge accumulée à la surface des matériaux isolants et la maintenir à des niveaux non dangereux ou simplement non gênants aux processus. Les charges de surface peuvent être réduites et éliminées par plusieurs procédés et techniques que nous exposons brièvement dans le paragraphe suivant.

1.4.1. Techniques de neutralisation des charges de surface

La façon la plus simple pour éliminer une charge à la surface d'un isolant est d'augmenter la conductivité de l'isolant. Quand c'est possible, la conductivité surfacique de l'isolant est augmentée par l'ajout d'une couche conductrice. Le matériau peut être couvert par un autre matériau pulvérisé afin de créer une voie de faible résistivité vers la masse. Un exemple est celui des vêtements spéciaux des ouvriers intervenant sur les lignes de fabrication des composants microélectroniques. Cette méthode est cependant inefficace et inexploitable lorsque le matériau isolant, susceptible d'être chargé, doit conserver ses caractéristiques ou lorsque le volume d'air ou la surface à contrôler sont assez grands, tel est le cas des usines à semi-conducteurs[24].

Une autre technique permet d'éliminer les charges statiques accumulées sur un isolant en utilisant l'ionisation de l'air. En effet, les charges accumulées sur l'isolant attirent les Ions de polarité opposée présents dans l'air et sont ainsi neutralisées.

On distingue deux grandes familles d'éliminateurs selon le mécanisme employé pour ioniser l'air :

- ❖ Les éliminateurs à induction et à haute tension utilisant l'effet couronne.
- ❖ Les éliminateurs radioactifs utilisant le rayonnement.

Nous nous intéressons dans ce qui suit qu'à l'ioniseur à décharge couronne qui est le plus utilisé vue sa simplicité et surtout sa sûreté de fonctionnement. Les ioniseurs utilisant la décharge couronne sont classés en deux types : passifs et actifs.

a) Ioniseur statique passif

L'ioniseur passif est une électrode de faible rayon de courbure, reliée à la masse et placée à proximité de la surface chargée. Lorsque cette dernière s'approche de l'électrode passive, des charges de signe contraire sont créées sur cette électrode par influence électrostatique. Plus la charge sur la surface à neutraliser est importante, ou plus la distance entre celle-ci et l'électrode est petite, la charge image sur l'électrode neutralisante devient importante et de ce fait l'air entourant l'électrode peut s'ioniser. Ainsi des ions sont créés qui, sous l'effet du champ électrique, sont attirés par la surface chargée où les charges de signe contraire seront neutralisées par recombinaison et ceux de même signe seront repoussés.

b) Ioniseurs statiques actifs

Les ioniseurs actifs utilisent une source de haute tension extérieure pour la création des charges. Dans cette catégorie on distingue deux types de neutralisateurs statiques : ceux qui utilisent le champ électrique pour entrainer le nuage ionique de l'électrode ionisante vers la surface cible, et ceux qui utilisent un flux de gaz (de l'air) pour entrainer les charges (fig.1.20)[24].

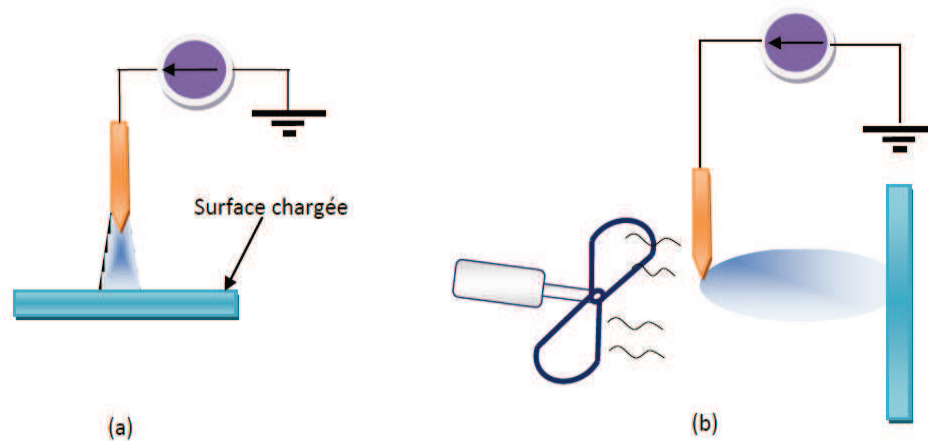


Figure 1.20 Types d'ioniseurs statiques actifs: (a) charges entraînées par le champ, (b) charges entraînées par un flux d'air

1.4.2. Neutralisation par décharge couronne

Les ioniseurs statiques utilisant la décharge couronne pour créer les ions neutralisants, qu'ils soient actifs ou passifs, avec ou sans flux d'air, sont les plus utilisés, principalement, à cause de leur simplicité, leur faible coût mais aussi la non émission de radiations[25].

La neutralisation par décharge couronne consiste à créer un nuage ionique bipolaire qui, sous l'effet du champ ou par un flux d'air, se propage vers la surface chargée où les charges se neutralisent sélectivement. Suite aux forces de coulomb, les charges de même signe se repoussent et les charges de signe contraire sont attirées et se neutralisent par recombinaison (figure. I.21).

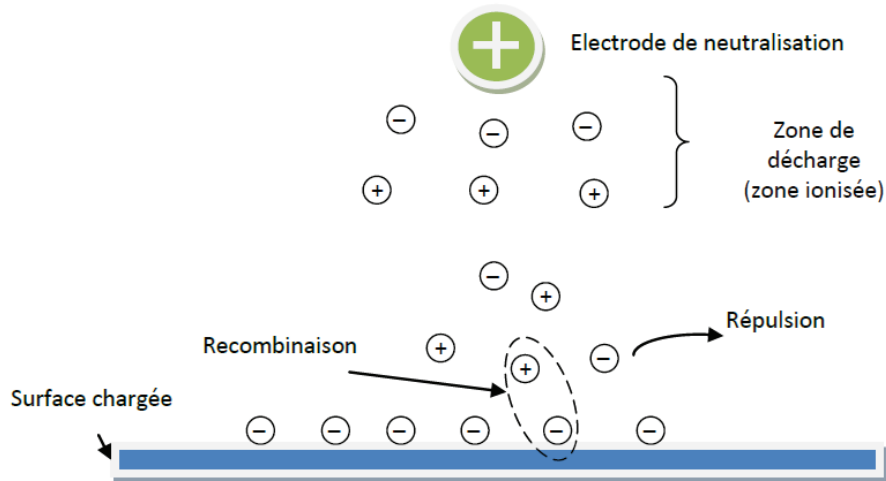


Figure I.21: *Principe de la neutralisation par décharge couronne*

Ce simple principe constitue la base du processus de neutralisation mais ne traduit pas réellement la complexité du phénomène de neutralisation. Cette complexité vient en premier lieu de la décharge elle-même, puis de l'interaction des charges aussi bien le long de la zone de dérive que sur la surface de l'isolant chargé. De ce fait, de multiples paramètres entrent en jeu et influent sur le processus de neutralisation. Il est bien établi que la décharge couronne, et la distribution de la densité de charges dans l'intervalle d'air, sont tributaires de la tension appliquée, de la fréquence, de la distance, de l'humidité et de la pression[26]. D'autre part, l'exposition d'une surface chargée à une décharge couronne peut effectivement la neutraliser mais elle peut aussi être rechargée ou faiblement neutralisée du fait, par exemple, de la durée d'exposition ou suite à l'amplitude inadéquate de la tension appliquée. La corrélation entre les paramètres, pour obtenir une meilleure neutralisation, et la connaissance de leurs effets constituent globalement l'objectif du chapitre 4 où on va optimiser un dispositif de neutralisation.

I.5. Conclusion

La demande croissante en matières premières secondaires, l'augmentation de la production de déchets... sont autant d'enjeux auxquels la planète doit aujourd'hui faire face. D'ici 2020, l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques) prévoit une production de déchets supérieure de 45 % à celle de 1995. Il est donc indispensable de limiter l'impact des déchets sur l'environnement, et de les revaloriser pour créer de nouvelles ressources et de l'énergie.

La récupération et le traitement de la grande diversité de matières plastiques contenues dans les déchets d'équipements électriques et électroniques en fin de vie est devenue une préoccupation majeure pour toutes les entreprises qui travaillent dans ce secteur. Cependant les procédés de séparation électrostatique reposant sur des dispositifs de chargement par corona ou par effet triboélectrique sont considérés parmi les procédés les plus efficaces pour la récupération des principaux polymères des DEEE.

Les particules isolantes risquent de se charger pendant la séparation et garder leur charge pendant une longue durée, Dans ce cas de figure, le risque pour la sécurité des individus est le problème principal, en effet, une étincelle peut déclencher des accidents majeurs. C'est pour ça qu'il faut trouver un moyen de les neutralisés.

CHAPITRE II

Etude de chargement des particules isolantes

CHAPITRE II

ETUDE DE CHARGEMENT DES PARTICULES ISOLANTES

La séparation électrostatique des particules granuleuses a pour objectif de séparer des particules en fonction de leur comportement dans un champ électrique intense; c'est pour cela que le chargement triboélectrique des matériaux isolants joue un rôle très important dans la séparation électrostatique[28]. Le résultat de tout processus de séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules. Dans le chapitre précédent, nous avons décrit les différents dispositifs de chargement triboélectrique fréquemment utilisés.

Le but de ce chapitre est de faire plusieurs séries d'expériences en utilisant le séparateur à lit fluidisé pour évaluer et quantifier la charge acquise par les granules isolantes et d'en tirer à la fin une série triboélectrique propre au laboratoire APELEC. Une deuxième série d'expérience de chargement a été faite en vue de séparer un mélange de trois particules.

Dans la dernière partie du chapitre une étude expérimentale de la séparation a été faite en utilisant le séparateur triboélectrique à tapis roulant pour différents mélanges granulaires tirer de la série triboélectrique en utilisant trois procédés de chargement triboélectrique (chargeur statique, lit fluidisé et ventilateur).

II.1.INSTALLATION EXPERIMENTALE

II.1.1 Présentation du dispositif

L'installation est composée de deux étages superposés, détachables, attachés à un même support vertical.

a) Etage supérieur : (un séparateur tribo-aéro-électrostatique)

C'est une enceinte parallélépipédique (hauteur : 500 mm ; largeur : 130 mm ; profondeur : 110 mm), ayant deux parois transparentes pour permettre l'observation du mouvement des granules. Les autres deux parois ont sur leur face interne des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces. 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. A l'extrémité supérieure, la chambre est munie d'un filtre qui empêche les granules de sortir à l'extérieur.

b) Etage inférieur:

L'autre partie détachable de l'installation est composée de deux cages de Faraday qui servent à collecter les matériaux à séparer et de mesurer leurs charges. Elles sont reliées à deux électromètres Keithley 6415.

L'air de fluidisation est fourni par une soufflante à débit variable. Le diffuseur d'air (une plaque perforée située à l'extrémité inférieure de l'étage supérieur de l'installation) assure l'uniformité de la fluidisation du lit de granules. Ceux-ci sont introduits dans l'enceinte de séparation par un entonnoir.

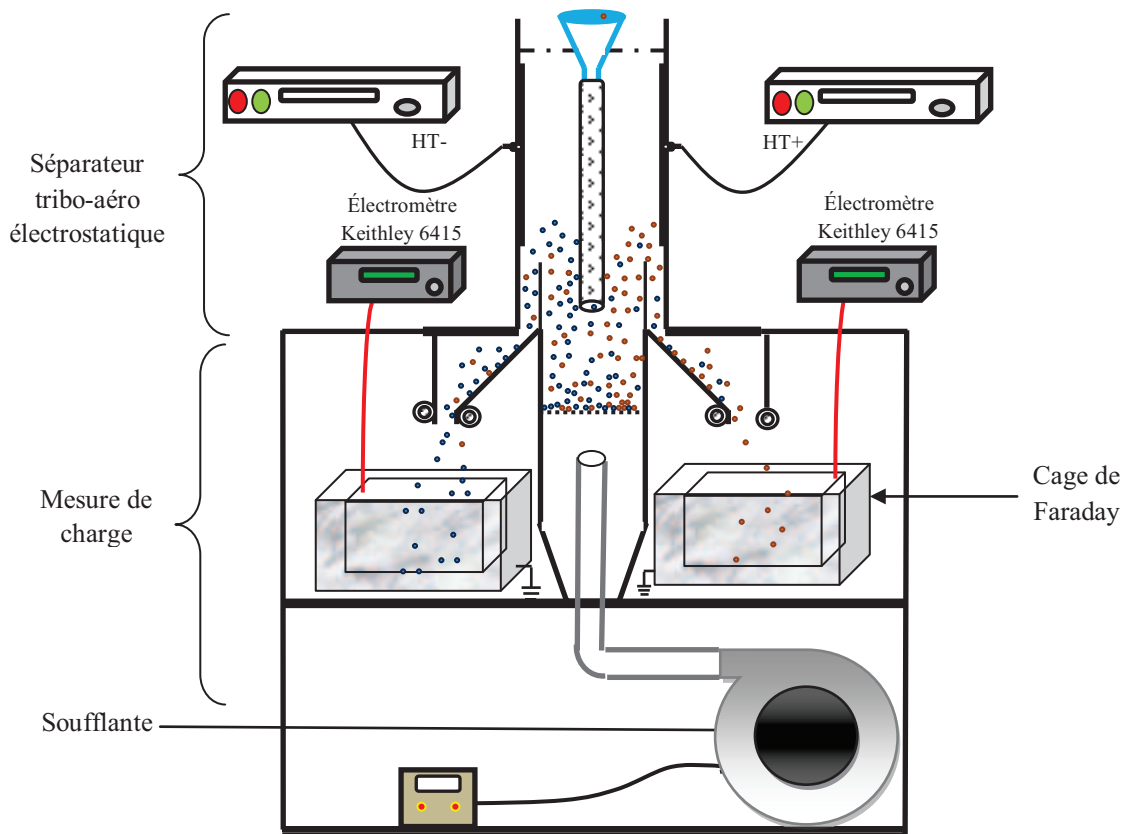


Figure II.1 : Représentation schématique de l'installation expérimentale pour la mesure de la charge.

Les granules sont chargées par l'effet triboélectrique dans le lit fluidisé créé à l'intérieur du dispositif. Le chargement s'effectue quasiment entre particule-particule. Des plaques en PMMA sont collées sur le dessus des parois latérales de la chambre supérieure du dispositif afin de concentrer l'air au milieu de l'enceinte. Les flux des particules sortant sont récupérés à l'étage inférieur en traversant deux chambres intermédiaires en PMMA, l'extrémité supérieure étant la sortie de l'étage supérieur et l'extrémité inférieure l'entrée de l'étage inférieur.

II.1.2. Matériaux utilisés

Durant les expériences on a utilisés six types de granules isolantes. Les matériaux qui font l'objet d'étude sont couramment utilisés dans la plasturgie des équipements électriques et électroniques en général. Il s'agit des particules en Acrylonitrile Butadiène Styrene (ABS), High Impact Polystyrene (HIPS), Polycarbonate (PC), Polyamide (PA), Chlorure de Polyvinyle (PVC) et le Polyéthylène Haute Densité (PEHD).

a) Acrylonitrile Butadiène Styrene « ABS »

C'est un thermoplastique couramment utilisé pour faire léger et rigide des produits moulés tels que la tuyauterie. Ses propriétés fondamentales étant la ténacité, la résistance aux chocs et la dureté superficielle, il est surtout employé dans la fabrication de meubles, éléments pour l'industrie automobile, les coques d'appareils électro-ménagers, jouets, ordinateurs, châssis de téléviseurs, radios et autres. Même si les plastiques ABS sont utilisés essentiellement à des fins mécaniques, ils ont aussi de bonnes propriétés d'isolations électriques qui sont assez constants sur une large plage de fréquences. Ces propriétés sont peu affectées par la température et l'humidité atmosphériques [28].



Figure II.2 : Echantillon des granules d'Acrylonitrile butadiène styrene (HIPS) utilisées

b) High Impact Polystyrène (HIPS)

Le HIPS est un des types du PS appelé le polystyrène « choc », il est résistant et capable de supporter des impacts plus forts que le polystyrène normal. Il est employé par l'industrie pour des produits rigides, légers et moulés (bacs à douche)...Le polystyrène PS est un plastique dur, cassant et transparent. C'est un produit industriel couramment utilisé pour de nombreux usages. On le reconnaît facilement à un blanchissement sur les zones de contraintes avant la rupture ou à sa fumée noire et à son odeur caractéristique lors de sa combustion[28].



Figure II.3 : Echantillon des granules de High impact polystyrène (HIPS) utilisées

c) Polycarbonate (PC)

C'est un matériau qui présente d'excellentes propriétés mécaniques et une bonne résistance thermique jusqu'à 120°C. Comme il est très transparent, on l'utilise pour le capotage de machines et pour la fabrication des casques de moto ou de boucliers de police. Il sert aussi à la fabrication de CD et de DVD, des vitrages des guichets à l'épreuve des balles et de phares, feux arrière et clignotants de voitures.

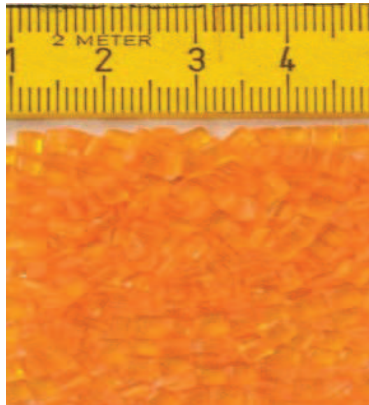


Figure II.4 : Echantillon des granules de polycarbonate (PC) utilisées

d) Polyamide (PA)

C'est la première matière plastique à avoir été découverte en 1938. Les polyamides sont des polymères thermoplastiques qui offrent un bon compromis entre des qualités mécaniques, thermiques, chimiques et électriques. Les polyamides sont utilisés pour réaliser des pièces moulées dans l'appareillage ménager et automobile, des tapis et des moquettes, de la robinetterie, de la serrurerie, des engrenages, des textiles (lingerie et voilages)... L'inconvénient principal de tous les polyamides est qu'ils sont hydrophiles ce qui limite leur usage pour certaines pièces mécaniques.

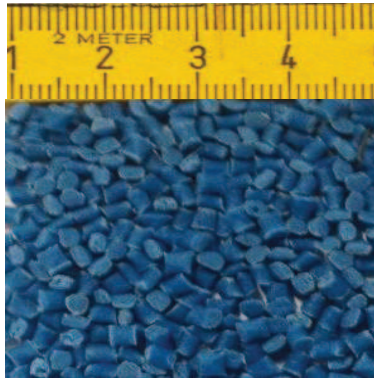


Figure II.5 : Echantillon des granules de polyamide (PA) utilisées

e) Chlorure de polyvinyle (PVC)

C'est un polymère thermoplastique polyvalent et très résistant dont la composition est ainsi répartie : 57 % de sel et 43 % de pétrole, Il peut être soit rigide soit souple selon les ingrédients qu'on lui incorpore. Le PVC rigide qui a un aspect lisse et dur est utilisé pour les tuyaux de canalisation. Le PVC souple qui recouvre certaines pièces comme les manches de pinces a un aspect brillant. C'est après le PE, le plastique le plus utilisé au monde. Il est largement employé dans l'industrie de l'ameublement et dans le bâtiment ou le génie civil, les carcasses de produits électriques, électroniques et informatiques et bien d'autre. Il est recyclable et peut se fabriquer dans de multiples finitions et couleurs.



Figure II.6 : Echantillon des granules de Chlorure de polyvinyle (PVC) utilisées

f) polyéthylène haute densité (PEHD) :

Le PEHD fait partie de la famille des polyéthylènes avec un très haut poids moléculaire. Il a une très bonne résistance aux chocs, d'excellentes caractéristiques de frottement et il ne dispose d'aucune reprise d'humidité. Il est largement utilisé dans l'industrie chimique, la construction mécanique, l'industrie alimentaire et les matériels pour l'industrie électrique.

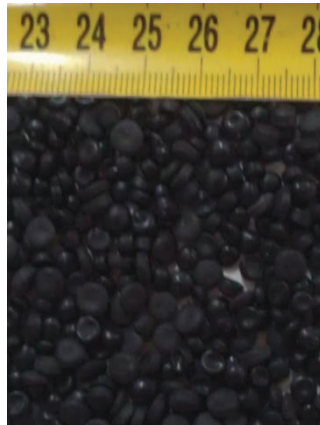


Figure II.7 : Echantillon des granules de Chlorure de polyvinyle (PEHD) utilisées

Le tableau II.1 représente les principales caractéristiques de matériaux utilisés dans les expériences [29].

Tableau.II.1 : Caractéristique principales des matériaux utilisés

	PEHD	ABS	HIPS	PC	PA	PVC
Densité [g/cm ³]	0.95	1.06	1.05	1.2	1.14	1.4
Couleur	Noir	Marron	Blanc	Orange	Bleu	Gris
Forme	Orbiculaire	Aléatoire	Aléatoire	cylindrique	Cylindrique	Aléatoire
Taille [mm]	Ø 2 x 2.5	Ø 2.5 x 4	Ø 2.5 x 4	Ø 3 x 3.6	Ø 2.5 x 3.4	Ø 2.5 x 3
Masse [mg]	20	25	25	20	20	30
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 % [%]	0	0.3	0.2	0.15	3	0.2
Rigidité diélectrique [kV/mm]	90	20	60	30	20	40

II.1.3. Matériels de mesure

La charge acquise par la voie triboélectrique suite aux collisions «particules-particules» ou bien «particules-parois» dépend de plusieurs facteurs tels que l'humidité, le temps de chargement, l'état surfacique des particules... [30,31]. On va indiquer la méthode de mesure de la charge électrique suivie, et on décrira l'appareillage correspondant.

a) Mesure de l'humidité relative

La mesure de la charge électrique est un processus influencé par les conditions ambiantes d'humidité et de température.... Il est primordial de débiter notre étude expérimentale par la mesure de l'humidité relative car les résultats obtenus dépendent énormément de ce paramètre. Lorsque l'air est sec, la charge est plus importante, par contre quand le taux d'humidité relative est élevé, certains matériaux peuvent l'absorber. Dans ce cas, la surface peut devenir semi-conductrice. La charge statique reste donc faible et peut même disparaître à cause de cet état de surface[32]. Alors, la justesse des résultats se rattache à un taux d'humidité adéquat, donc toute mesure faite dans des taux inconvenables doit être écartée[35]. Pour la mesure, on a utilisé un thermo hygromètre numérique (Amprobe TH-3) (figure.II.8)



Figure II.8 : Thermo hygromètre numérique Amprobe TH-3

b) Mesure de la charge

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

Dans notre installation, la mesure de la charge des granules récupérées après la séparation est directe. On a remplacé les deux collecteurs par des cages de Faraday de dimensions égales et de même forme (figure II.9) puis on a relié chacune d'elles à un électromètre. Cette méthode nous a permis d'obtenir des valeurs instantanées et précises.

La cage de Faraday se présente comme deux récipients métalliques l'un à l'intérieur de l'autre isolés électriquement entre eux. Le récipient extérieur, relié à la terre, fait office de blindage contre les parasites extérieurs[33].

Pour mesurer la charge électrique des granules chargées, il suffit de les introduire dans le récipient intérieur, en évitant tout contact prématuré, celui-ci étant relié au dispositif de

mesure. On mesure alors une charge globale, somme algébrique de toutes celles que portent les particules.

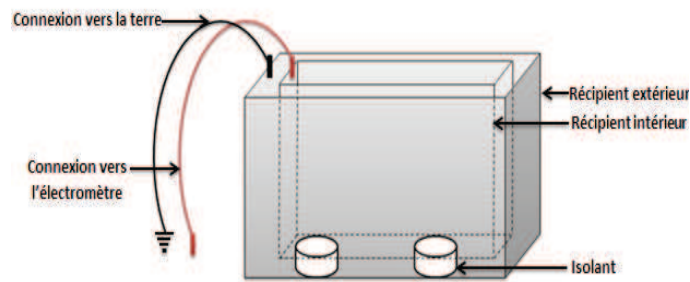


Figure. II.9 : La cage de Faraday

L'électromètre utilisé durant les expériences est un électromètre numérique portant la marque Keithley modèle 6514 (figure. II.10)



Figure II.10 : Electromètre numérique Keithley modèle 6514

c) Mesure de masse granulaire

Il est nécessaire de mesurer les masses granulaires avant et après chaque expérience. Pour cela on a utilisé une balance électronique modèle CAS MWP-600H[34] (figure II.11)



Figure II.11 : Balance numérique CAS MWP-600H

II.1.4 Déroulement des expériences

L'étude porte sur le comportement des mélanges binaires de plusieurs matériaux plastiques granulaires dans le lit fluidisé. La méthode de mesure directe (on line) nous a permis d'obtenir des résultats suffisamment reproductibles et précis. On prend les mesures de la charge acquise par les particules granulaires par fluidisation après séparation ainsi que la masse récupérer dans chaque cage.

a) Préparation du produit

- Les expériences de charge triboélectrique ont été effectuées sur des mélanges de matériaux plastiques granulés utilisés dans la fabrication industrielle. Les mélanges granulaires sont préparés en amont des expériences. Chaque mélange comprend deux matériaux suivant les matériaux cités auparavant. On obtient alors quinze combinaisons, chaque combinaison comprend trois échantillons identiques. Le nombre d'expériences s'élève donc à 45.
- Chaque échantillon pèse 100g (50g pour chaque produit).

b) Procédure expérimentale

Après avoir introduit le produit dans le dispositif de chargement dans le séparateur à l'aide d'un entonnoir, on le soumet à l'action de l'air fluidisé. La vitesse de l'air de fluidisation est modifiée via le variateur de fréquence assurant l'alimentation du moteur électrique qui entraîne la soufflante. Les particules sont fluidisées environ 50 secondes, intervalle déterminé après plusieurs essais. Le temps est suffisant pour que l'effet triboélectrique lié aux collisions particule-particule se manifeste. Après ce temps on augmente le débit d'air. Les granules chargées, placées dans un champ électrostatique de 20kV, seront attirées vers les électrodes par l'action des forces électriques. Elles tombent ensuite dans les cages de Faraday reliées aux électromètres qui déterminent leurs charges à chaque instant (figure. II.1). A la fin de la séparation, on aura la charge totale de chaque matériau. La quantité de matière récupérée est déterminée en utilisant la balance électronique.

II.2 RESULTATS ET ANALYSES

La méthode de mesure directe (on line) nous a permis d'obtenir des résultats suffisamment reproductibles et précis. Deux séries d'expériences illustrent son application : la première mesure la charge acquise par les particules granulaires par fluidisation seulement dans l'étage supérieur, tandis que la deuxième mesure la charge après l'insertion du dispositif de chargement statique dans l'étage inférieur.

II.2.1. Chargement sans chargeur statique La température ambiante et l'humidité relative ont eu les valeurs suivantes: $T = 18^{\circ}\text{C}$, $HR = 47\%$. Les résultats des expériences des différents mélanges granulaires sont indiqués dans le tableau II.2.

Tableau. II.2 : Charges massiques obtenues pour les différents mélanges.

	Masse 1 (g)	Charge1 (μC)	Masse2 (g)	Charge2 (μC)	Masse3 (g)	Charge3 (μC)	charge/mass (nC/g)
PVC	47,43	-0,21	55,11	-0,28	48,52	-0,27	-5.02
PEHD	45,84	0,17	47,37	0,17	50,00	0,19	3.69
PVC	52,84	-0,55	52,41	-0,57	48,12	-0,51	-10.60
PA	48,41	0,39	48,51	0,41	47,81	0,39	8.21
PVC	48,60	-0,41	49,80	-0,62	52,86	-0,57	-10.59
PC	54,12	0,38	55,19	0,54	51,38	0,49	8.79
PEHD	45,31	-0,15	46,19	-0,18	48,00	-0,17	-3.63
PA	52,70	0,18	51,10	0,21	47,76	0,20	3.88
PEHD	43,00	-0,08	45,22	-0,17	43,03	-0,09	-2.57
PC	52,77	0,19	55,13	0,29	57,21	0,20	4.09
PC	49,68	-0,20	49,70	-0,20	49,66	-0,18	-3.93
PA	47,80	0,21	48,80	0,23	49,92	0,24	4.63
HIPS	46.88	-0,15	50.43	-0,15	52.26	-0,15	-3.13
ABS	46.00	0,09	40.16	0,08	41.36	0,08	2.04
ABS	53.6	0,32	57.58	0,44	54.9	0,46	7.4
PVC	39.7	-0,21	36.2	-0,24	38.43	-0,26	-6.25
PEHD	41.1	-0,05	39.71	-0,05	53.31	-0,06	-1.32
ABS	57.21	0,07	56.4	0,09	43.5	0,06	1.52
ABS	39.63	-0,13	38.29	-0,16	41.28	-0,13	-3.62
PC	56.52	0,16	59.19	0,18	52.84	0,12	2.8
ABS	44.16	-0,52	46.61	-0,44	46.41	-0,53	-10.9
PA	53.6	0,39	50.78	0,35	51.00	0,37	7.2
HIPS	38.31	0,13	46.59	0,18	47.58	0,18	3.87
PVC	56.87	-0,28	49.87	-0,28	50.49	-0,28	-5.46
HIPS	59.7	-0,11	59.31	-0,11	58.7	-0,12	-2.03
PEHD	34.9	0,009	36.3	0,005	37.9	0,01	0.23
HIPS	43.2	-0,44	50.45	-0,35	46.29	-0,40	-8.63
PC	47.07	0,27	47.53	0,23	51.4	0,27	5.39
HIPS	42.87	-0,68	45.24	-0,78	36.82	-0,68	-17.26
PA	50.07	0,50	50.73	0,51	48.48	0,56	10.58

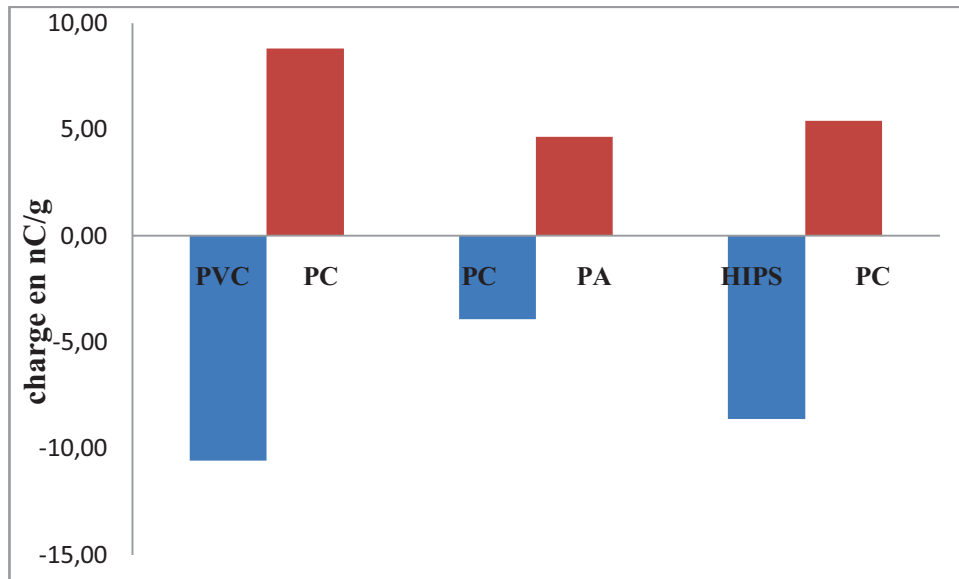


Figure.II.12 : Représentation graphique de l'influence du mélange sur la charge acquise par les granules de PC

Le signe de charge d'un matériau dépend de celui avec lequel il rentre en contact : Par exemple, les granules du PC prennent un signe positif lorsqu'ils sont mis sous fluidisation avec le produit PVC, et un signe négatif avec les granules de PA (figure II.12).

Après étude et analyse des résultats du tableau II.2 on peut classer ces produits sur une échelle indiquant leurs tendances relatives à se charger positivement ou négativement, d'où on arrive à extraire notre propre série triboélectrique (Figure.II.13). Elle se présente comme suit :

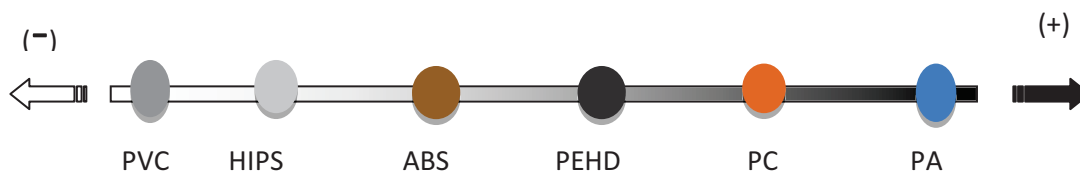


Figure. II.13 : La série triboélectrique extraite des résultats de chargement

Aussi, la valeur de la charge massique d'un même matériau varie-t-elle selon le matériau avec lequel il rentre en contact : La valeur de la charge massique du produit PVC lorsqu'il rentre en contact avec le produit PA est deux fois plus grande que celle prise lors du contact avec le produit HIPS.

II.2.2 Chargement avec chargeur statique

La deuxième série d'expériences, qui contient elle-même trois séries consiste à voir l'influence de la nature des parois sur la charge acquise par les particules en vue de séparer un mélange de trois particules. Pour atteindre cet objectif, on a remplacé les chambres simples par les chargeurs statiques et on a changé à chaque fois la nature de leurs parois en PMMA en les recouvrant avec l'acétate ou l'aluminium. La figure II.14 montre une représentation schématique du séparateur tribo-aéro-électrostatique ainsi qu'une photographie de l'installation.

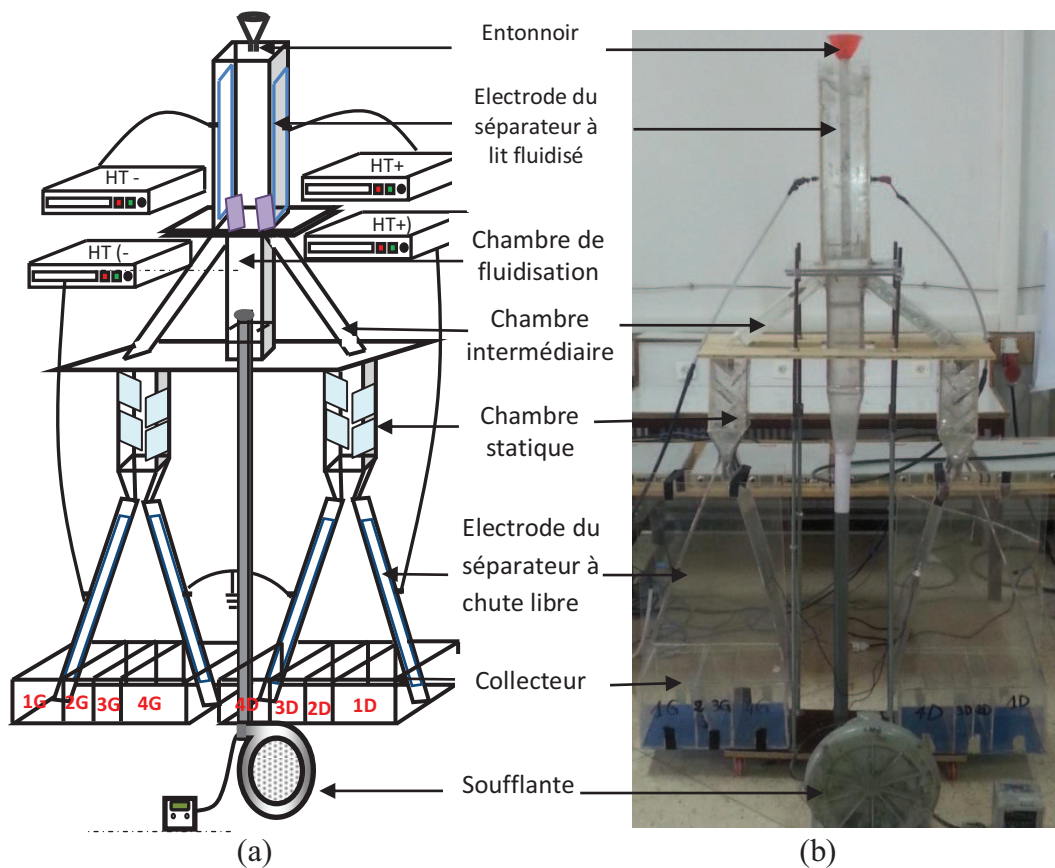


Figure II.14 (a).Présentation schématique du séparateur tribo-aéro électrostatique pour plusieurs matériaux isolants ; (b).Photo de l'installation expérimentale

Dans cette partie d'étude de chargement nous avons utilisé les matériaux (PVC/HIPS/ABS) en raison de leur disponibilité dans le laboratoire d'une part et de leur pourcentage élevé par rapport aux autres plastiques des DEEE d'autre part. Afin de faire la mesure on line nous avons remplacé le collecteur par des cages de Faraday figure II.15. Les expériences ont été effectués sur deux mélanges distincts: (PVC / HIPS) et (ABS / HIPS).

Quatre configurations de l'installation ont été utilisées:

- 1) sans chargeur statique.
- 2) avec parois en aluminium.
- 3) avec parois en acétate
- 4) avec parois en PMMA.

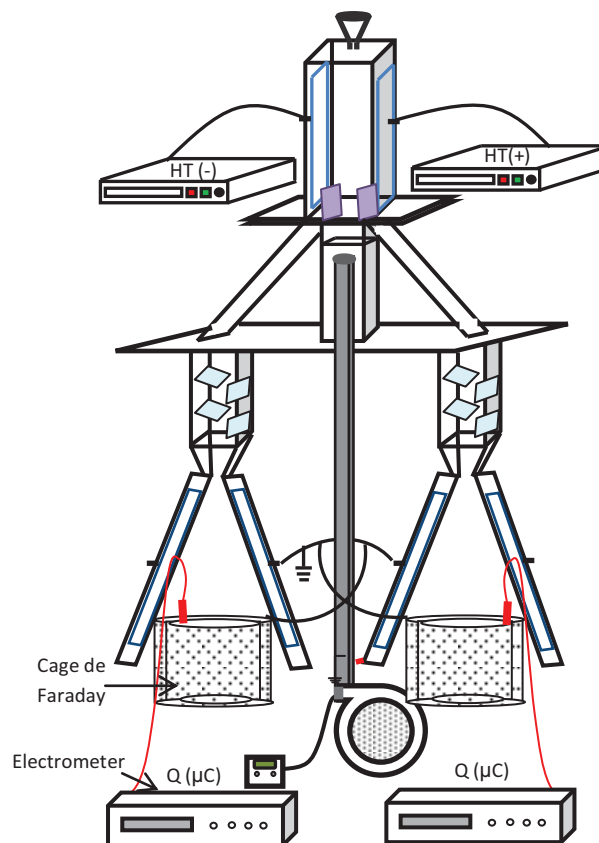
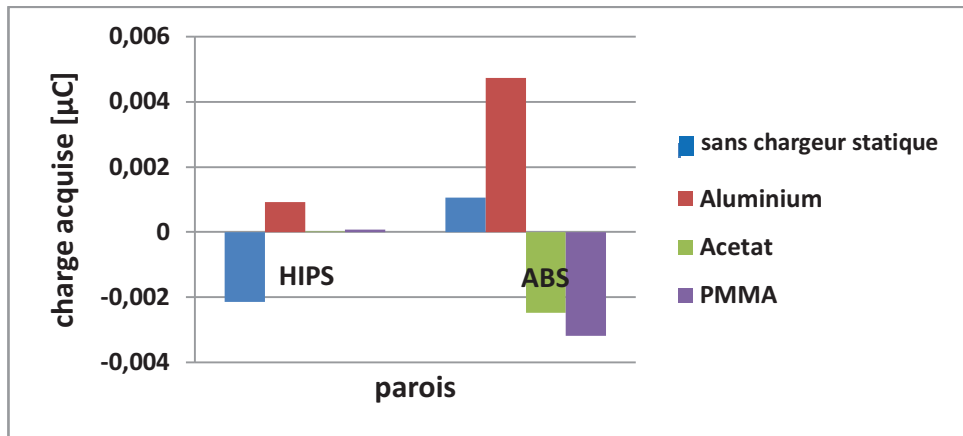
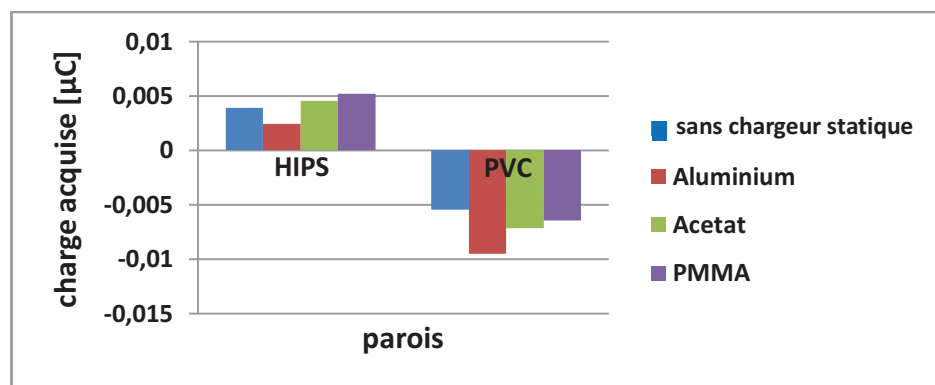


Figure II.15. Représentation schématique de l'installation expérimentale

Les résultats des expériences de chargement sont représentés par des histogrammes sur la figure II.16.



(a)



(b)

Figure II.16. Charge acquise ($\mu\text{C} / \text{g}$) pour les particules ABS,PVC,HIPS pour différents parois.

On déduit de la figure ci-dessus que l'utilisation des parois en Aluminium pour notre installation est la plus avantageuse. En effet pour les deux mélanges granulaires une différence de charge ΔQ maximale est obtenue avec les parois d'aluminium.

Les particules PVC acquièrent une charge négative importante en rentrant en collision avec les particules HIPS ou ABS. Ceci permet aux particules PVC de se retrouver dans les deux premiers compartiments situés directement sous l'électrode HT +.

Les particules HIPS prennent un signe positif lorsqu'elles rentrent en contact avec les particules PVC, et un signe négatif en rentrant en contact avec les particules ABS. Pour avoir une deuxième séparation à l'étage inférieur il faut que les particules HIPS (chargées négativement ou positivement) possèdent une charge différente de celle des particules PVC et ABS afin que leur comportement soit différent et qu'elles ne tombent pas dans les mêmes compartiments. Du côté de la HT positive l'utilisation des parois en Aluminium augmente la charge des particules PVC et diminue considérablement la charge de particules HIPS, ce qui

nous permet d'avoir à l'étage inférieur deux matériaux chargés négativement avec un écart important. Leur séparation est donc garantie.

Dans le coté alimenté en HT négative, l'utilisation de parois en l'Aluminium augmente la charge des deux particules sans les égaliser, l'écart entre leur charge est significatif pour avoir une bonne séparation(figure II.17).

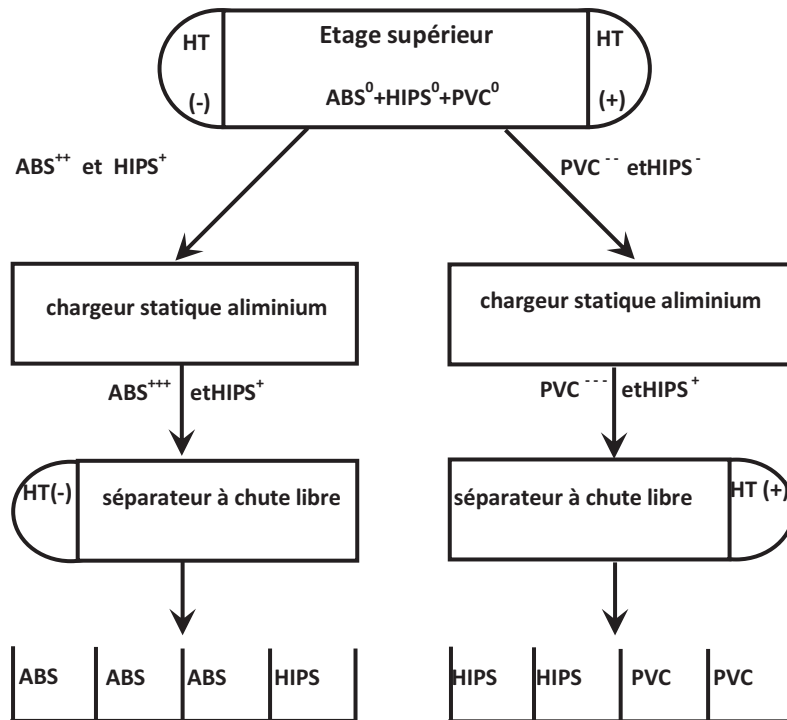


Figure II.17. Diagramme en vue d'une séparation de trois particules

(+++ / --- : haut niveau de charge positive/ négative; +/- faible niveau de charge positive / négative).

Dans le lit fluidisé du séparateur électrostatique supérieur, les granules de PVC et d'ABS sont respectivement chargés négativement et positivement. Les granules HIPS sont chargés positivement en cas de collision avec les granules de PVC et négativement en contact avec les granules d'ABS. Ce qui explique la présence des granules du HIPS dans les deux cotés avec des signes différents. Par la suite, les deux mélanges granulaires (ABS, HIPS) et (PVC, HIPS) passent à travers les chargeurs statiques avec les parois en aluminium qui sont interposés entre l'étage supérieure et inférieure.

Les granules d'ABS bien chargées sont fortement attirés par l'électrode négative du séparateur électrostatique inférieur gauche, tandis que les granules de HIPS sont légèrement déviés dans le champ électrique, cela est dû à sa charge beaucoup plus faible par rapport à celle de l'ABS. De même, les granules de PVC bien chargées sont attirés vers l'électrode

positive du séparateur électrostatique inférieure droite, tandis que les granules de HIPS légèrement positifs sont repoussés par celle-ci et tombent dans le côté gauche du collecteur.

II.3. Etude expérimentale de la séparation des mélanges plastiques :

Nous allons utiliser la série triboélectrique tirée des expériences de chargement pour choisir différents mélanges granulaires selon leur classement dans la série. Trois procédés d'acquisition de charge par effet triboélectrique ont été expérimentés pour faire une étude comparative à savoir le chargement statique, chargement par ventilateur et le chargement par un lit fluidisé.

II.3.1 Préparation des mélanges granulaires de plastique :

Une étude expérimentale a été effectuée en utilisant plusieurs types de mélanges de plastique, à savoir :

- le mélange PA/PC.
- le mélange PA/PVC
- le mélange ABS/HIPS
- le mélange HIPS /PA

II.3.2 Procédure expérimentale

L'étude expérimentale présentée dans cette partie permet de comparer l'efficacité de chaque procédé de chargement triboélectrique dans la séparation. Nous allons procéder aux tests de séparation des échantillons des mélanges granulaires préalablement chargé, avec le séparateur triboélectrique à tapis roulant dont le principe de fonctionnement est décrit auparavant dans le chapitre I. Il est particulièrement adapté à la séparation des particules de plastique. Nous avons utilisés un échantillon de mélange granulaire de masse totale égale à 40 g comprenant 50% de chaque produit, pour une valeur de la tension appliquée de 30kV. Notons que les valeurs des autres paramètres sont fixées et maintenues constantes pour toutes les expériences. Le collecteur est divisé en trois compartiments : un compartiment (A) destiné à collecter les particules de charge négative, un compartiment (B) destiné au produit mixte et un autre (C) destiné aux particules portant une charge positive. A la fin de chaque essai, on mesure la masse du produit trouvé dans chacune des trois parties du collecteur.

II.3.3 Résultats et discussion

Les résultats obtenus avec les trois dispositifs de triboélectrisation sont représentés par les tableaux II.3 jusqu'au tableau II.6 et les histogrammes des figures II.18 jusqu'au II.25, pour les différents mélanges utilisés. Les résultats obtenus est la valeur moyenne de deux expériences consécutifs.

➤ mélange PA/PVC :

Tableau II.3 Résultats de la séparation du mélange PA/PVC

	compartment A "produit PVC"				compartment B "produit mixte"	compartment C "produit PA"			
	Masse PA [g]	Masse PVC [g]	Pur [%]	Réc [%]	Masse [g]	Masse PA [g]	Masse PVC [g]	Pur [%]	Réc [%]
Statique	1.96	15.47	88.75	84.48	6.43	13.30	2.84	82.40	87.15
Lit fluidisé	0.43	19.19	97.08	98.46	0.17	19.91	0.3	98.51	97.88
Ventilo	1.1	19.07	94.54	97.34	3.43	15.885	0.52	96.82	93.52

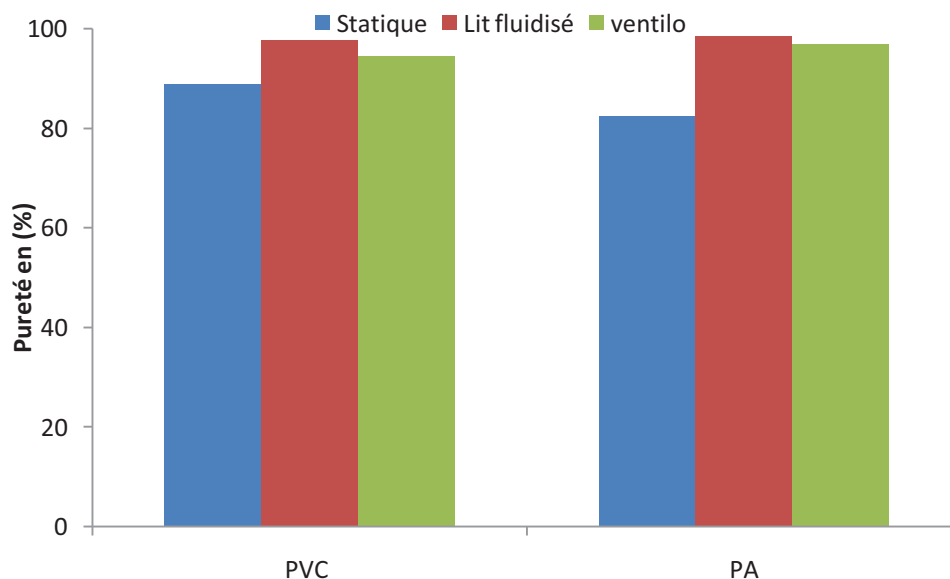


Figure II.18 Pureté en pourcentage obtenue après séparation d'un mélange PVC-PA avec les trois procédés

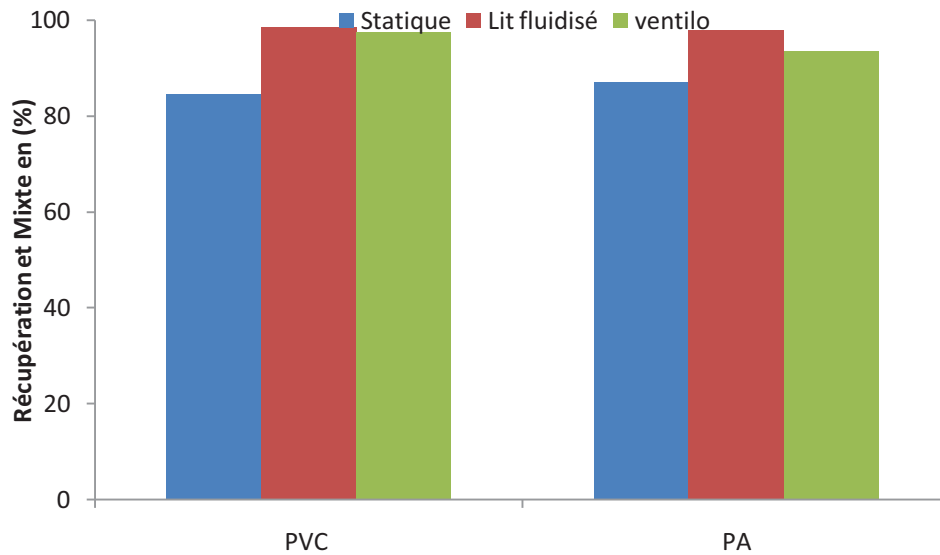


Figure II.19 Récupération en pourcentage obtenue après séparation d'un mélange PVC-PA avec les trois procédés

➤ **mélange PC/PA :**

Tableau II.4 Résultats de la séparation du mélange PA/PC

	compartiment A "produit PC"				compartiment B "produit mixte" Masse [g]	compartiment C "produit PA"			
	Masse PA [g]	Masse PC [g]	Pur [%]	Réc [%]		Masse PA [g]	Masse PC [g]	Pur [%]	Réc [%]
Statique	2.8	1.03	26.89	8.48	14.52	10.57	11.08	48.82	79.05
Lit fluidisé	1.3	18.72	93.50	95.41	0.59	18.49	0.9	95.35	93.43
Ventilo	1.87	1.0	47.619	10.98	11.7	11.65	13.78	45.81	86.16

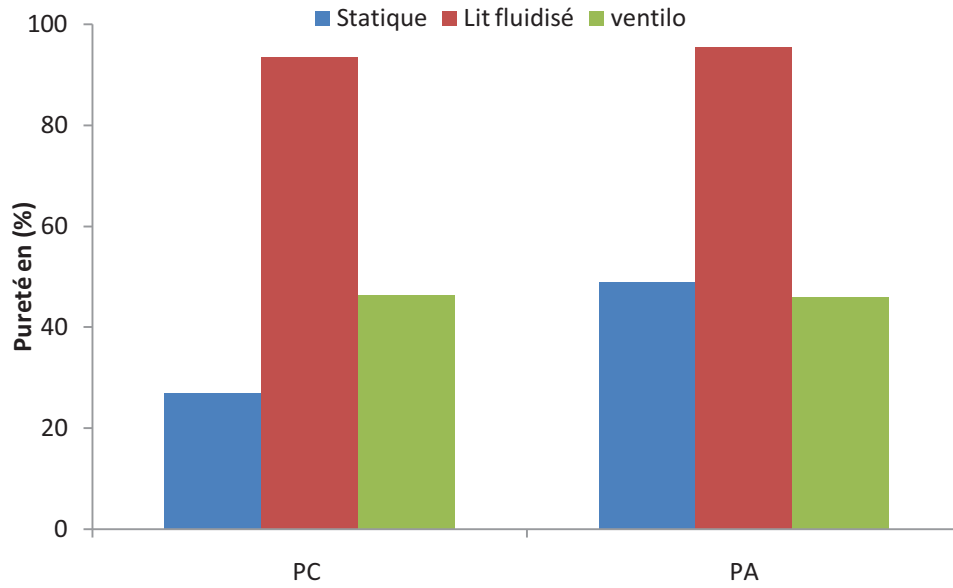


Figure II.20 Pureté en pourcentage obtenue après séparation d'un mélange PC-PA avec les trois procédés

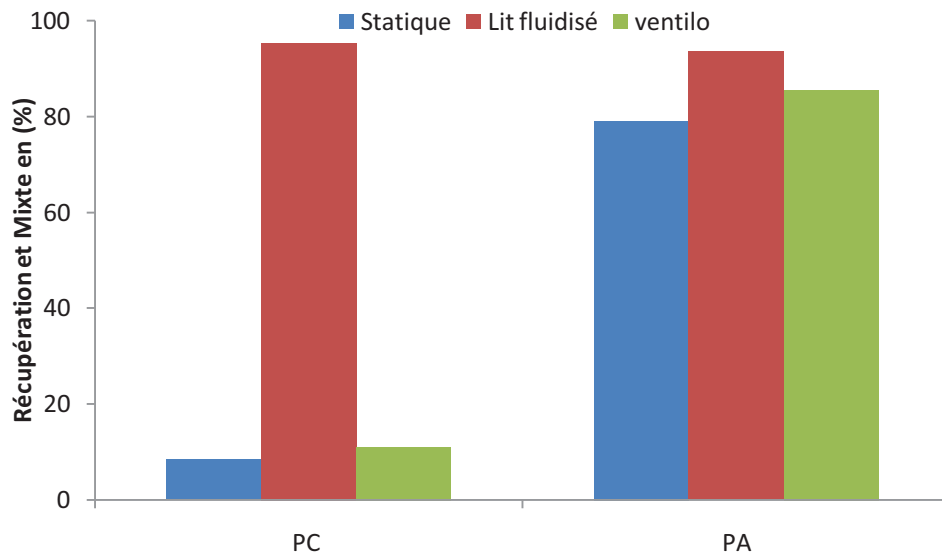


Figure II.21 Récupération en pourcentage obtenue après séparation d'un mélange PC-PA avec les trois procédés

➤ **mélange HIPS/PA :**

Tableau II.5 Résultats de la séparation du mélange HIPS/PA

	compartiment A "produit HIPS"				compartiment B "produit mixte" [g]	compartiment C "produit PA"			
	Masse PA [g]	Masse HIPS [g]	Pur [%]	Réc [%]		Masse PA [g]	Masse HIPS [g]	Pur [%]	Réc [%]
Statique	2.73	16.16	85.54	92.55	4.91	14.9	1.3	91.97	84.51
Lit fluidisé	1.14	18.36	94.15	96.83	0.21	19.71	0.6	97.04	94.53
Ventilo	1.94	18.05	90.29	95.64	1.02	18.17	0.82	95.68	98.45

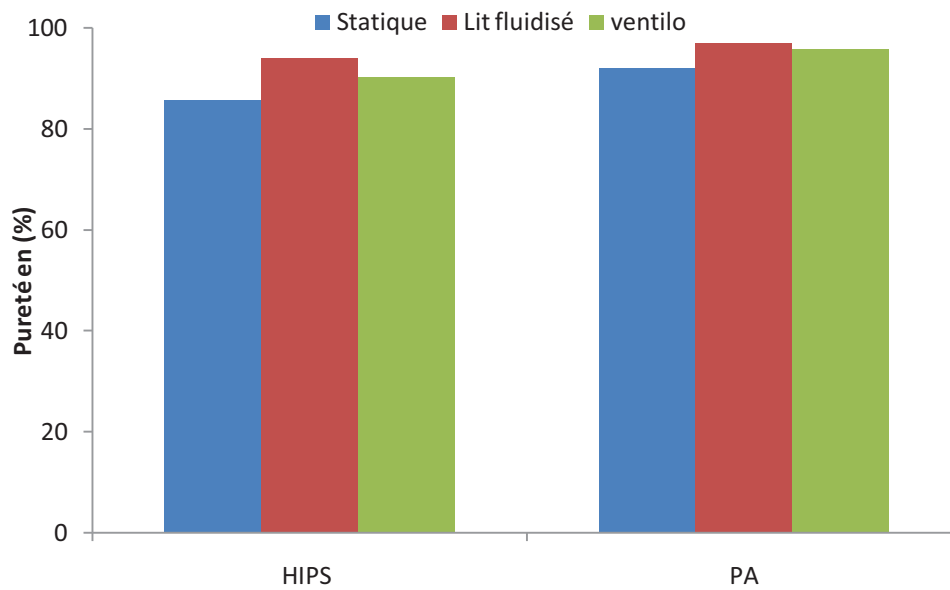


Figure II.22 Pureté en pourcentage obtenue après séparation d'un mélange HIPS-PA avec les trois procédés

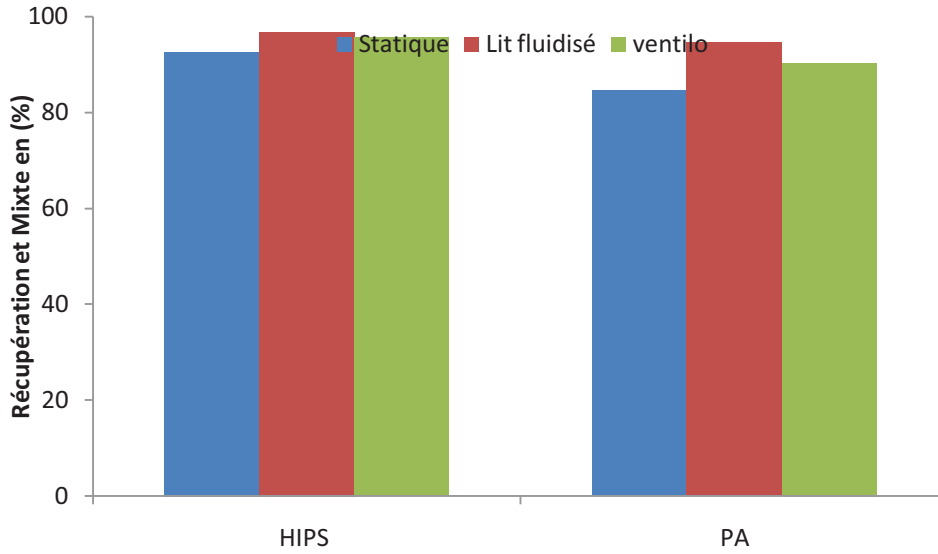


Figure II.23 Récupération en pourcentage obtenue après séparation d'un mélange HIPS-PA avec les trois procédés

➤ **mélange ABS/HIPS :**

Tableau II.6 Résultats de la séparation du mélange ABS/HIPS

	compartiment A "produit HIPS"				compartiment B "produit mixte" [g]	compartiment C "produit ABS"			
	Masse	Masse	Pur	Réc		Masse	Masse	Pur	Réc
	ABS	HIPS	[%]	[%]		ABS	HIPS	[%]	[%]
	[g]	[g]				[g]	[g]		
Statique	2.07	8.925	81.17	83.45	22.27	4.44	1.77	71.49	68.20
Lit fluidisé	1.3	19	93.59	90.04	7.6	10.81	2.1	83.73	89.26
Ventilo	3.04	18.38	85.80	82.23	10.2	5.67	3.97	58.81	65.09

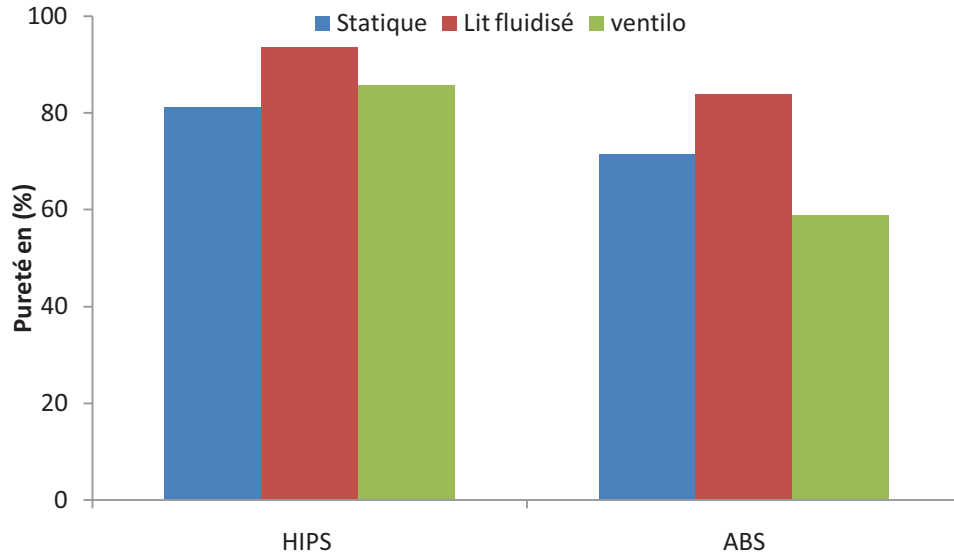


Figure II.24 Pureté en pourcentage obtenue après séparation d'un mélange HIPS-ABS avec les trois procédés

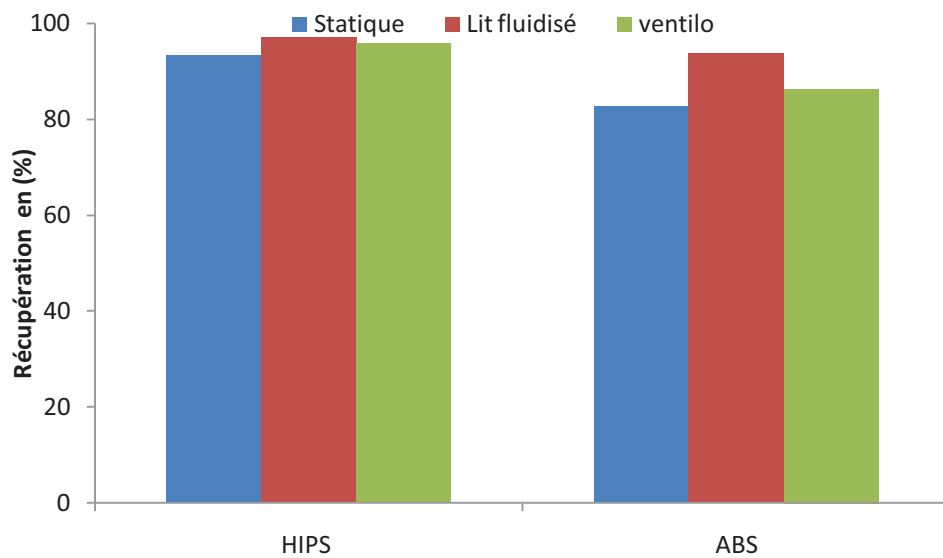


Figure II.25 Récupération en pourcentage obtenue après séparation d'un mélange HIPS-ABS avec les trois procédés

La pureté est calculée par le rapport entre la masse du premier produit dans leur compartiment sur la masse totale récupérée dans le même compartiment. Par exemple pour le mélange PC-PA la pureté est calculée comme le rapport entre la masse de PC (ou PA) dans le compartiment C sur la masse totale (PC + PA) récupérée dans le même compartiment.

La récupération est calculée par le rapport entre la masse du premier produit dans leur compartiment sur la masse totale récupérée dans les deux compartiments. La masse du produit mixte est exprimée en gramme.

Il en ressort de ces résultats que le type de chargement a une grande influence sur l'efficacité de la séparation. En effet lorsque un mélange qui comporte deux matériaux proche dans la série triboélectrique (PC-PA et ABS-HIPS) le dispositif à lit fluidisé adonné les meilleurs résultats de pureté et de récupération; cela est due au types de collisions dans ce type de chargement (particule-particule).

D'autre part, la séparation avec le chargeur statique ou par le ventilateur est efficace seulement pour les matériaux lorsque la paroi (PMMA) dans les dispositifs est située au milieu du classement des matériaux dans la série triboélectrique, ce qui leur permet d'acquérir des charges de signe opposé, ce qui rend la séparation meilleure contrairement aux matériaux situés du même côté de l'échelle triboélectrique par rapport à la PMMA et par conséquent ils acquièrent une charge électrique de même signe car la nature du contact dominant durant les collisions pendant le chargement c'est un contact particule paroi, ce qui donne une mauvaise séparation comme c'est le cas du mélange (PA-PC ,ABS-HIPS) .

II.4 CONCLUSION

La diversification des mélanges granulaires à recycler est un souci que l'on retrouve particulièrement au niveau des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). L'étude d'acquisition de charge nous a permis d'extraire une série triboélectrique propre à notre laboratoire. Elle a été aussi bénéfique pour le choix de la nature des parois constituant les chargeurs statique en vue de séparer un mélange de trois particules.

Le dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé est considéré comme le moyen le plus efficace pour faire acquérir des charges électriques de signe opposé aux différentes matières plastiques granulaires ce qui nous a permis de placer chaque matériaux dans la série. Il nous a donné une meilleure qualité de séparation électrostatique quel que soit l'écart dans la série triboélectrique du mélange granulaire à séparer. Néanmoins le problème de ce type de chargement est de trouver une solution pour l'introduire dans le séparateur à chute libre et à tapis roulant pour faire la séparation online, chose qui a été résolue avec le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages.

Une étude numérique de la trajectoire des particules isolantes est indispensable pour bien comprendre le phénomène physique avant de commencer les expériences de séparation, ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III

Simulation numérique de la trajectoire des particules isolantes

CHAPITRE III

SIMULATION NUMERIQUE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES ISOLANTES

Les particules projetées dans la zone de séparation électrostatique sous l'effet des forces aérodynamiques sont soumis à des champs de forces superposés (électrostatique, aérodynamiques et mécaniques) qui agissent en même temps sur les paramètres électriques, géométriques et mécaniques de la particule. L'intensité et la direction des forces appliquées sur les particules dans cette zone déterminent son comportement et la réussite ou l'échec de l'opération de séparation. L'objectif de ce chapitre est d'étudier et de simuler le comportement dynamique des particules dans les différentes étapes du séparateur tribo-aéro-électrostatique.

Pour simuler la trajectoire des particules nous avons élaboré plusieurs modèles numériques. Chaque modèle représente l'un des champs de force qui règne dans la zone de séparation. Généralement les modèles du champ électrostatique ou aérodynamique sont représentés par des équations aux dérivés partiels avec des conditions aux limites.

Dans notre étude la résolution de ces équations est faite à l'aide d'un logiciel spécialisé dans la résolution des équations au dérivé partiel par la méthode des éléments finis (COMSOL Multiphysics)

Les modèles élaborés par le logiciel COMSOL sont exploités en même temps par un scripte MATLAB qui représente une implémentation d'une méthode numérique connue sous le nom de la méthode d'Euler-Cromer. Cette méthode est utilisée dans la résolution de l'équation de mouvement d'une particule. Dans cette équation on exploite les modèles des champs de forces élaborés par COMSOL [36-38].

III.2 PRESENTATION DES LOGICIELS UTILISES

III.2 1. Logiciel COMSOL Multiphysics4.3

Le *COMSOL Multiphysics* est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses modèles physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles (EDP). Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques.

La méthode des éléments finis permet donc de résoudre de manière discrète une EDP dont on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction u , définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

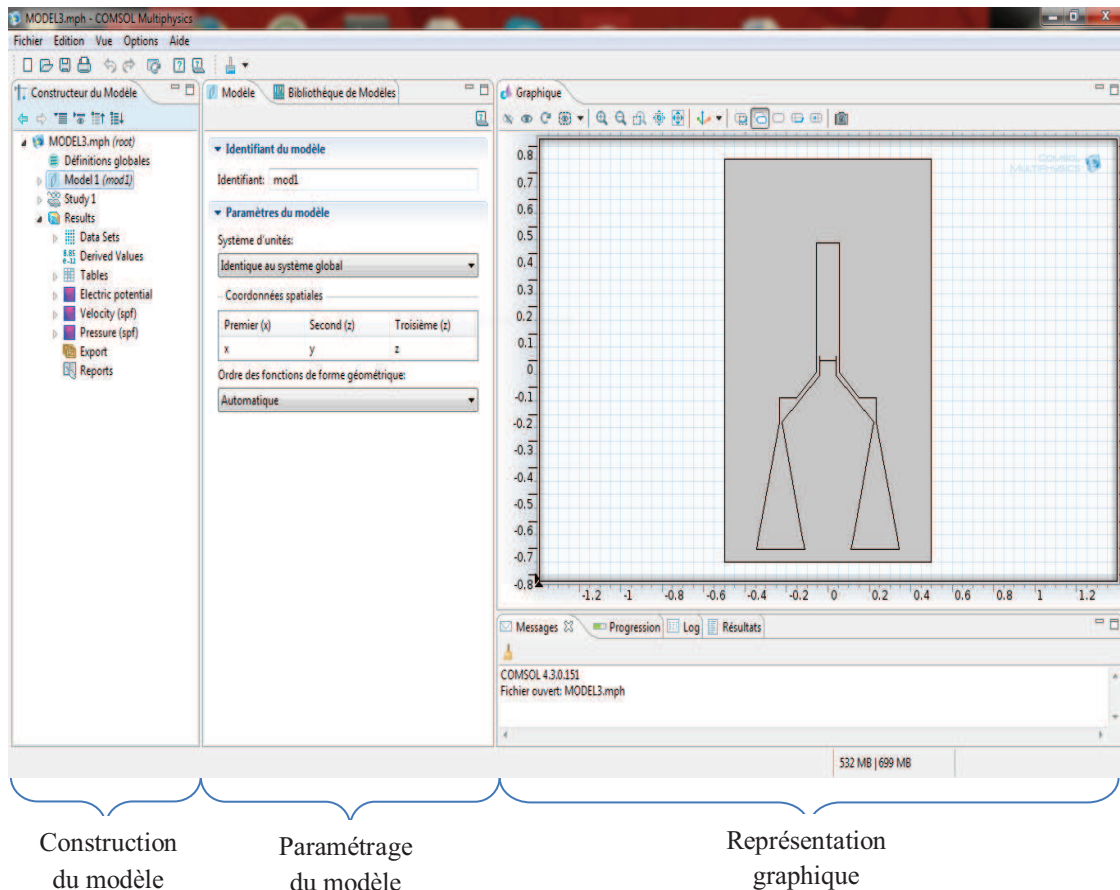


Figure.III.1: Interface graphique du logiciel COMSOL

III.2.2. Présentation de la géométrie du séparateur :

Le plan de décisions et de construction était comme suit :

a) Création du modèle de simulation et formulation mathématique du modèle

- Choix de la dimension d'espace: pour raison de simplification, la dimension a été prise en 2D axisymétrique.
- Choix du modèle physique approprié: on a sélectionné Electrostatique (electrostatic) et écoulement laminaire (Laminar Flow).
- Choix du type d'étude : l'étude a été faite en régime stationnaire parce que réellement la particule est soumise à une valeur de champ électrique bien définie toute au long du processus électrostatique (négliger le régime transitoire de la tension).

- le Comsol contient dans sa base de données des équations de champs électrique et de l'écoulement laminaire ce qui lui permet de faire le calcul en chaque zone du séparateur.
- b) Définition des paramètres globaux et création de la géométrie**
- Choix de l'unité : on a choisis le [m] comme unité de longueur.
 - Construction de la géométrie : on a choisi le solide pour le type d'objets Et on a accordé à chaque élément de la configuration sa taille ,sa position ainsi que son angle de rotation.
- c) Ajout des propriétés des matériaux composant l'installation**
- Choix des matériaux : Une bibliothèque de matériaux est à disposition dans COMSOL, le navigateur des matériaux nous a permis d'associer les propriétés des matériaux à chaque domaine. Le choix de matériaux était comme suit :
 - L'aluminium pour les 6 électrodes, deux pour le premier étage et quatre pour le deuxième étage (figure III.2).
 - L'air pour l'environnement, une seule entrée d'air et trois sorties (figure III.3).
 - Le PMMA pour le reste des entités (figure III.4).

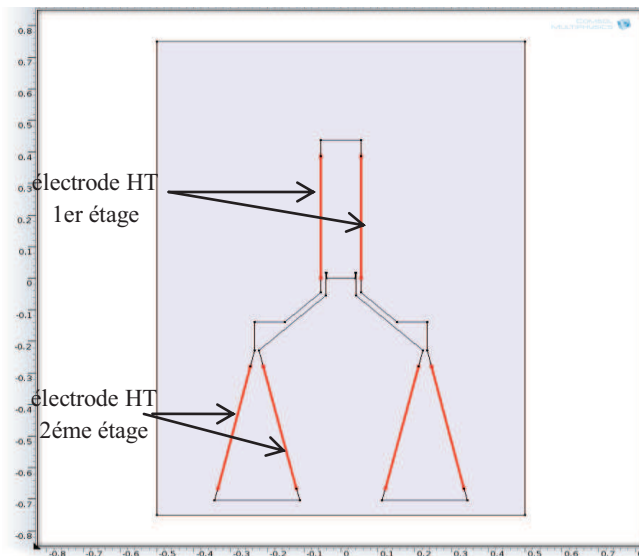


Figure III.2 emplacement des électrodes dans la géométrie faite sur le COMSOL

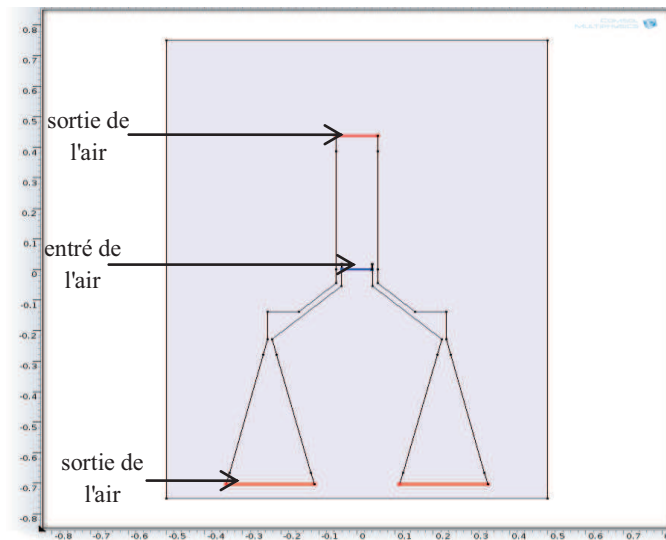


Figure III.3 entrées et sorties de l'air dans la géométrie

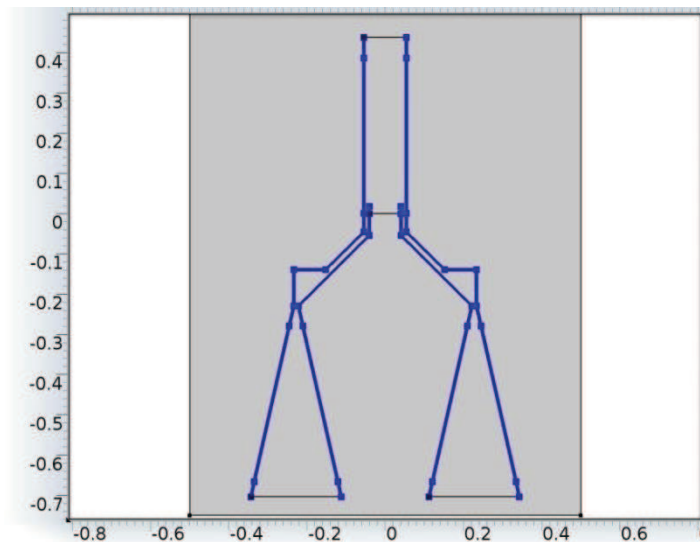


Figure III.4 construction de la géométrie du séparateur avec le PMMA

d) Ajout des conditions frontières

Paramétrage des modules physiques : on a imposé des conditions sur certaines frontières en introduisant les valeurs des hautes tensions appliquées aux six électrodes ($\pm 10\text{kV}$ dans le premier étage et $\pm 20\text{kV}$ pour le deuxième étage) et une vitesse de l'écoulement de l'air de 2m/s .

e) Maillage

Une fois la physique du problème posée, on effectue un maillage à la géométrie, l'élément de maillage choisi est le triangle libre (figure.III.5)

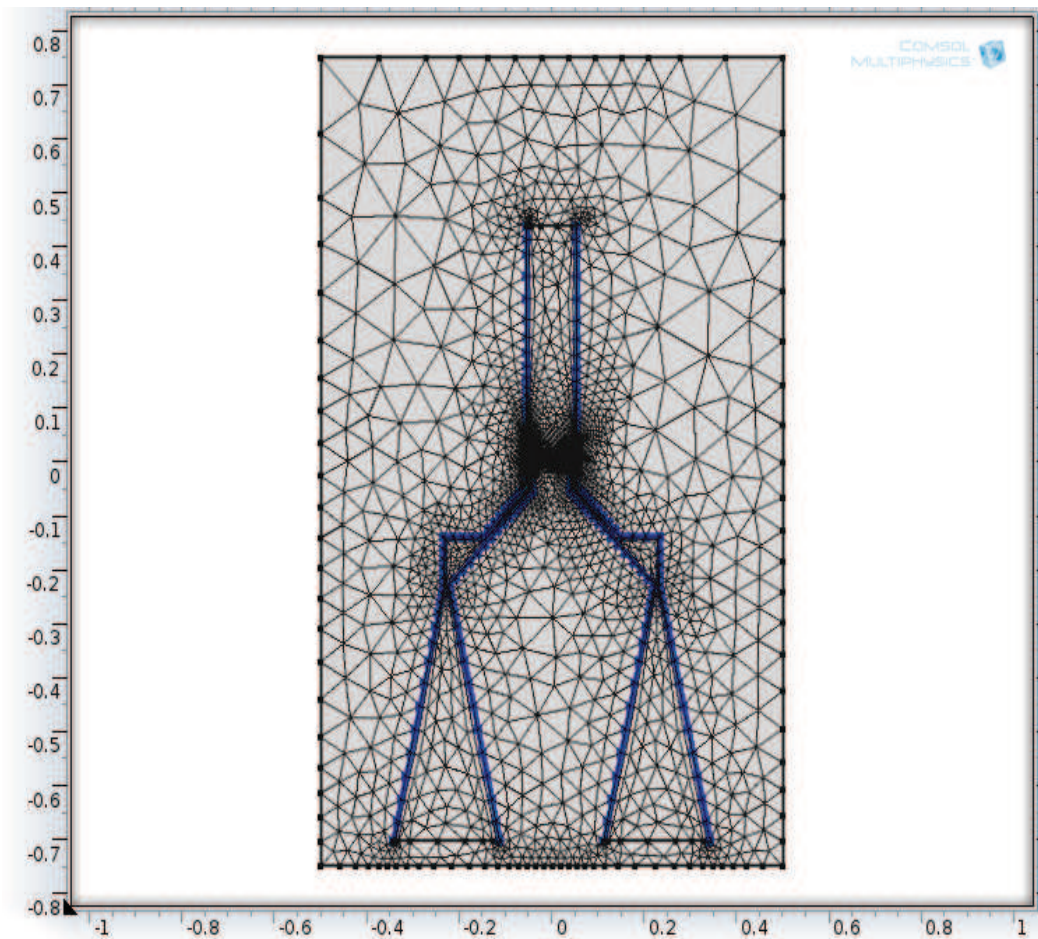


Figure.III.5: Résultat du maillage triangulaire de notre géométrie.

f) Simulation et traitement des résultats

Dans le but d'améliorer les performances de notre séparateur plusieurs simulations ont été faites sur différentes géométries pour augmenter le rendement du séparateur et éviter ainsi des perturbations dû à l'influence de la répartition du champ électrique et surtout l'écoulement de l'air qui influent sur la trajectoire des particules dans le séparateur.

Après le calcul basé sur la méthode des éléments finis, on obtient les résultats de la simulation. Le résultat de répartition du champ électrique pour une seule configuration est représenté dans la figure.III.6.

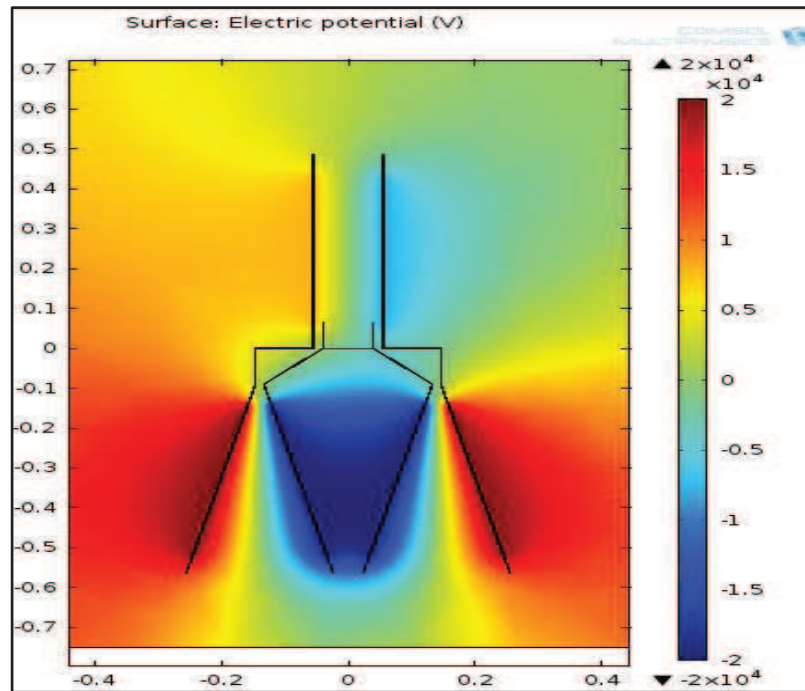


Figure.III.6: Résultat de calcul du champ électrique obtenu par COMSOL

Le résultat de l'écoulement de l'air dans le séparateur tribo-aéro électrostatique est représenté dans la figure.III.7, nous avons choisi les conditions suivantes:

- 1) La vitesse de l'air à la sortie du lit fluidisé est réglée à une valeur constante de 2 m / s.
- 2) La pression à la sortie de la zone de séparation est fixée à une valeur constante égale à la pression atmosphérique ambiante 1atm.
- 3) La vitesse au voisinage des parois est fixée à zéro.

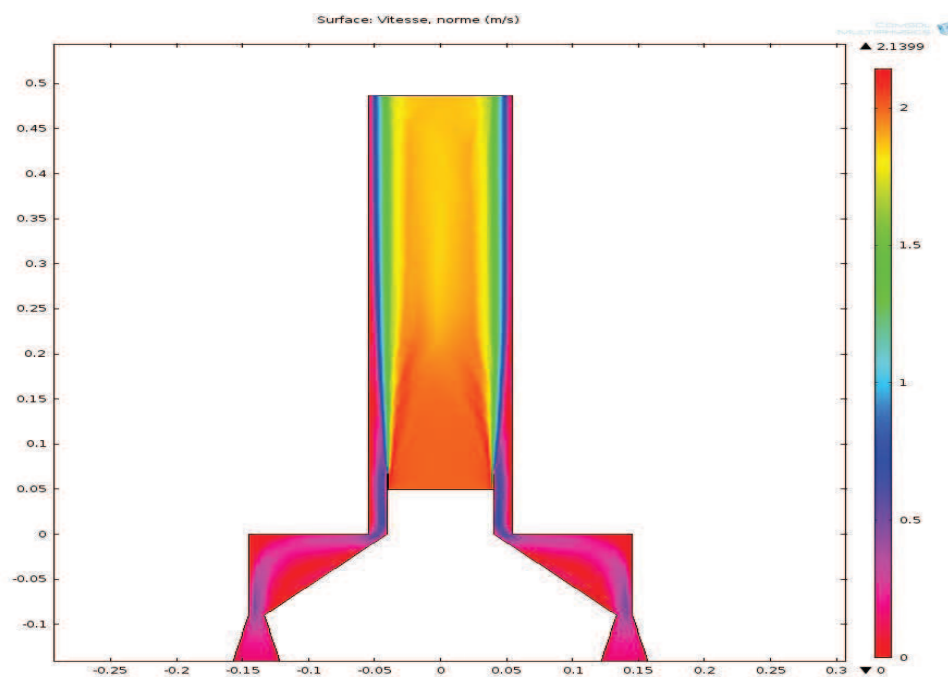


Figure III.7 : Vitesse de l'air dans la zone de séparation électrostatique

Sur cette figure on voit que la vitesse de l'écoulement de l'air dans la zone de séparation électrostatique est non-uniforme. La vitesse d'écoulement est maximale au centre de la colonne et il est presque nul au voisinage des parois. Les résultats représentés par ce modèle seront ensuite utilisés dans le programme de simulation pour calculer la force aérodynamique appliquée sur les particules dans la zone de séparation électrostatique. On remarque aussi qu'il y a présence d'une vitesse de l'air à sortie de l'étage supérieur. Le logiciel COMSOL permet aussi de mettre la répartition de l'air avec des flèches indiquant le sens de l'écoulement de l'air comme montré dans la figure III.8.

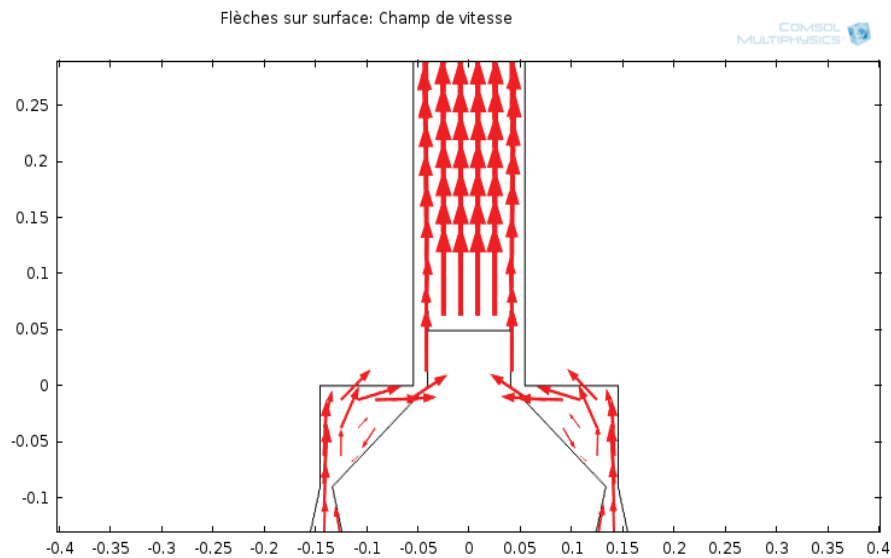


Figure III.8 : représentation de la vitesse de l'air avec des flèches avec le logiciel COMSOL

D'après la figure III.8 on remarque que le sens de l'écoulement de l'air suit le sens de la source d'air ce qui va freiner les particules à la sortie du premier étage, un problème souvent rencontré lors des expériences; c'est pour cela nous avons apporté une amélioration à notre séparateur dans la partie qui lie les deux étages pour diminuer la vitesse de l'air.

Cela explique la présence des deux chambres intermédiaire (voir figure II.15) ainsi que le chargeur statique qui a un double rôle: le chargement des particules et éliminer l'écoulement de l'air qui freine les particules à l'entrée du deuxième étage. Le résultat de simulation par COMSOL est représenté dans la figure III.9.

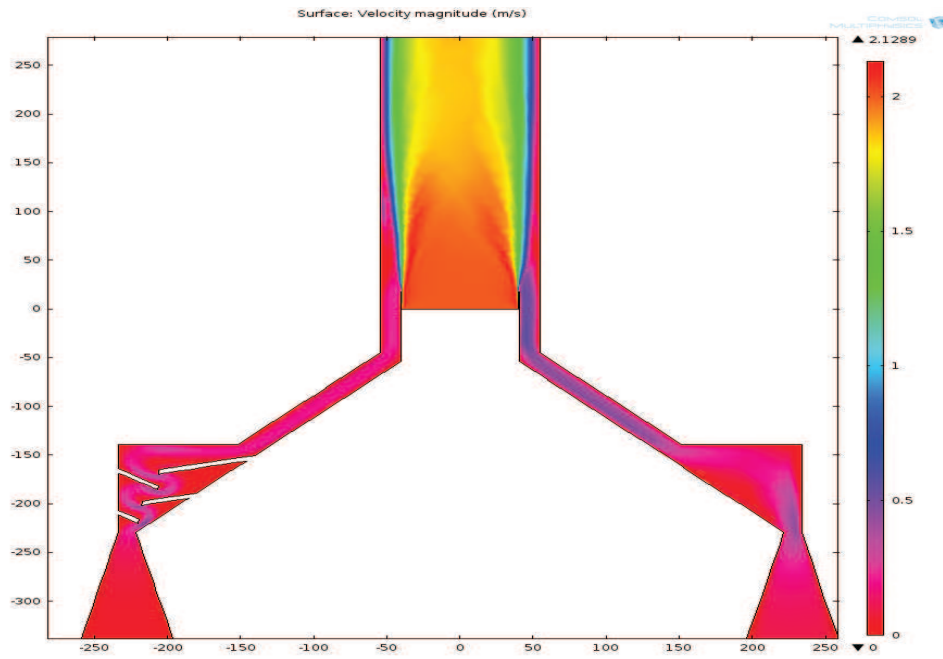


Figure III.9 répartition de l'air dans le séparateur tribo-aéro-électrostatique.

On remarque d'après la figure III.9 que la vitesse de l'air diminue considérablement par rapport à celle de la première configuration. On peut aussi la représenter avec des flèches comme le montre la figure III.10.

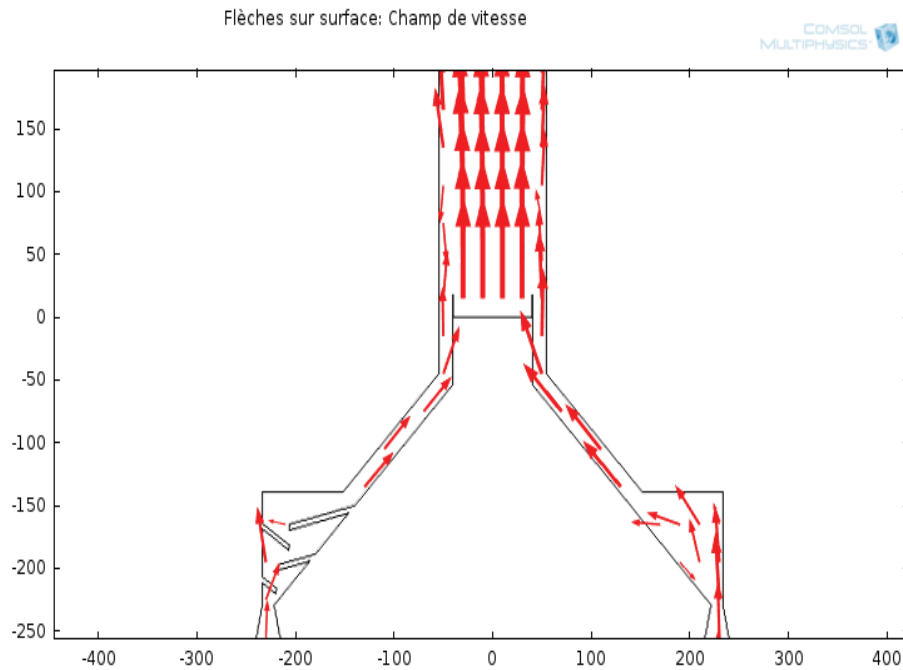


Figure III.10 : représentation de la vitesse de l'air du séparateur avec et sans le chargeur statique avec le logiciel COMSOL

III.2.3. Logiciel MATLAB

Le programme de simulation est écrit comme un script MATLAB dont la fonction générale est :

- Interpoler la valeur du champ électrostatique et la vitesse de l'air à partir des éléments finis basé sur un modèle développé par le logiciel COMSOL;
- Calcul de la trajectoire par la méthode Euler - Cromer.
- Enregistrer et représenter graphiquement les résultats obtenus

III.3 MODELE MATHEMATIQUE DES TRAJECTOIRES DES PARTICULES ISOLANTES DANS LE SEPARATEUR TRIBO -AERO ELECTROSTATIQUE

Les forces agissent sur les particules dans l'étage supérieur différent de celle de l'étage inférieur, ceci va influencer sur la trajectoire des particules dans chaque étage. Donc pour simuler la trajectoire des particules des équations de mouvements doivent être établies [39, 40].

III.3.1 Forces agissant sur la trajectoire des particules

Pour calculer la trajectoire des particules nous devons prendre en considération les forces agissant sur le comportement de la particule. La relation entre ces forces est exprimée par la seconde loi de Newton:

$$m \frac{dv_p}{dt} = F_g + F_{el} + F_f \quad (\text{III.1})$$

Avec m le poids de la particule (kg); V est le vecteur vitesse et $\sum F$ est la somme des forces exercées sur la particule (F_g la force gravitationnelle, F_{el} force du champ électrique, F_f la force du frottement).

Dans un séparateur tribo-aéro-électrostatique la particule est sollicitée par la force de gravitation; force électrostatique et la force de résistance de l'air.

a) La force gravitationnelle

L'intensité de la force gravitationnelle qui sollicite une particule de masse m peut être évaluée par:

$$F_g = m \cdot g \quad (\text{III.2})$$

Où $g = 9,81 \text{ m / s}^2$ représente l'accélération de la pesanteur.

b) Force électrostatique

La force électrostatique est évaluée par la loi de Coulomb expérimental:

$$F_{el}(x, y) = Q_p \cdot E(x, y) \quad (III.3)$$

Q_p charge électrique acquise par les particules dans la chambre de triboélectrification et $E(x, y)$ l'intensité du champ électrostatique dans la zone de séparation.

Dans l'équation (3), $E(x, y)$ représente le champ électrique généré par des électrodes installés en parallèle dans la zone de séparation et alimenté par une tension continue élevée [41]. Dans cette zone, la distribution de potentiel électrique peut être décrite par l'équation de Laplace:

$$\Delta U = 0 \quad (III.4)$$

La solution du problème des dérivées partielles, est décrit par l'équation (4), peut être déterminée pour certaines conditions limites, qui représente généralement la valeur de la tension appliquée aux électrodes[42]. Ce type de problèmes est résolu en utilisant le logiciel COMSOL. Ce logiciel utilise la méthode des éléments finis pour calculer une approximation du potentiel électrique en des points prédéfinis dans la phase de discrétisation.

Le potentiel électrique dans d'autres points de l'espace peut être calculée par des méthodes d'interpolation à deux dimensions. La valeur du champ est alors déterminée à partir de la distribution du potentiel par la relation:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot U \quad (III.5)$$

c) Force de frottement avec l'air

En théorie [43], la force aérodynamique appliquée à une particule de forme sphérique homogène peut être évaluée par la relation suivante:

$$F_f(x, y) = C_f \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot (v_r(x, y))^2 \quad (III.6)$$

Où S représente la surface perpendiculaire à l'écoulement de l'air; V_r vitesse relative de la particule; $\rho=1204$ [kg / m³] est la densité de l'air ambiant à 20 ° C; C_f est le coefficient de frottement.

La relation (6) peut être exprimé par:

$$F_f(x, y) = C^{st} \cdot (v_r(x, y))^2 \quad (\text{III.7})$$

Dans le cas de particule de forme irrégulière et en chute libre la constante peut être évaluée par:

$$C^{st} = \frac{mg}{v_t^2} \quad (\text{III.8})$$

Où v_t représente la vitesse maximale (terminal) de la particule.

En substituant l'équation (8) dans l'équation (7) la force de frottement peut s'écrire en fonction de la vitesse de chute terminale de la particule:

$$F_f(x, y) = mg \frac{(v_r(x, y))^2}{v_t^2} \quad (\text{III.9})$$

D'après l'équation (9), on constate que la force de frottement dépend de la vitesse de l'air dans la zone de séparation électrostatique.

La solution approchée de l'équation de mouvement est obtenu en substituant les équations (2), (3) et (9) dans (1):

$$a_x(x, y) = Q_m \cdot E_x(x, y) + \frac{g}{v_t^2} (v_x(x, y) - v_{air_x}(x, y))^2 \quad (\text{III.10})$$

$$a_y(x, y) = Q_m \cdot E_y(x, y) + \frac{g}{v_t^2} (v_y(x, y) - v_{air_y}(x, y))^2 + g$$

Où Q_m représente la charge massique de la particule.

Le système d'équations (10) est résolu en utilisant la méthode des différences finies connu comme étant l'algorithme d'Euler-Cromer [45,46]. Le schéma itératif de l'algorithme est décrit par l'équation (11):

$$v_{n+1} = v_n + a_n \cdot \Delta t \quad (\text{III.11})$$

$$p_{n+1} = p_n + v_{n+1} \cdot \Delta t$$

Où a_n , v_n et p_n représentent respectivement l'accélération, la vitesse et la position des vecteurs à l'instant $n \cdot \Delta t$. Au début de chaque exécution la valeur initiale de l'accélération est calculée par l'équation (10) en utilisant les valeurs du champ exporté et la charge qui est un paramètre modifiables. Cette valeur est substituée dans l'équation (11) pour évaluer la position et la

vitesse à l'instant Δt tel que L'utilisation d'un algorithme d'interpolation bidimensionnelle de la valeur du champ électrique et la vitesse de l'écoulement de l'air sont évaluées au niveau du point p_n à partir du modèle sur la base de l'éléments finis grâce au logiciel COMSOL. Ainsi l'accélération à l'instant Δt est calculée à partir de la valeur du champ électrique et la vitesse de l'écoulement d'air au niveau du point p_l . De même, la vitesse et la position à l'instant $2\Delta t$ peuvent être évaluées à partir de l'équation (11).

III.3.2. Influence du type de parois:

Après avoir déterminé toutes les forces agissantes sur la particule, on va définir un autre paramètre qui entre aussi en jeu[47]. Ce paramètre appelé « Coefficient de restitution », qui dépend de la nature des matériaux, apparaît lors de la séparation de deux solides A et B entrant en collision. Pour en rendre compte, on utilise une loi due à Newton disant que le rapport des vitesses relatives après et avant le choc est égal à E , donnée par la relation suivante :

$$E = -\frac{V_A' - V_B'}{V_A - V_B} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

V_A, V_B : vitesses avant le choc,

V_A', V_B' : vitesses après le choc.

Dans notre cas, les deux solides sont la particule et la paroi de l'électrode, cette dernière étant immobile, la relation devient :

$$E = -\frac{V_A'}{V_A} \quad (\text{III.13})$$

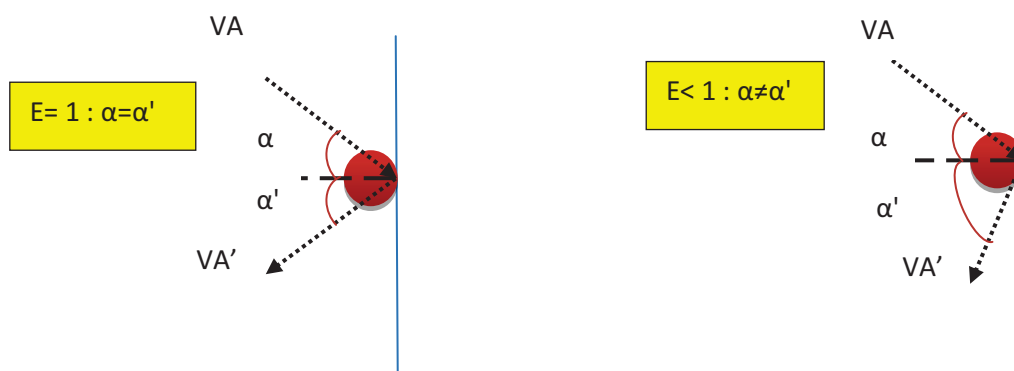


Figure.III.11 : schéma explicatif sur l'influence de coefficient de restitution

III.4. SIMULATION NUMERIQUE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES ISOLANTES

La simulation numérique va nous permettre de représenter les phénomènes physiques agissant sur la trajectoire des particules dans notre séparation dont la description repose sur le modèle mathématique précédemment établi. Vu que notre configuration est symétrique, on va se contenter de simuler les trajectoires sur un seul côté.

III.4.1 Simulation numérique de la trajectoire des particules isolantes dans l'étage supérieur

La première partie consiste à simuler la trajectoire des particules en étudiant les variations des paramètres influant sur la particule dans l'étage supérieur. Ces paramètres sont :

- La vitesse initiale de la particule,
- La différence de potentiel appliquée entre les électrodes de l'étage supérieur,
- La charge massique des particules.

Les valeurs constantes prises pour cette simulation sont :

- L'accélération de la pesanteur $g = 9.81 \text{ m/s}^2$,
- Le coefficient de restitution = 0,4,
- vitesse de l'air 2 m/s

a) Influence de la vitesse initiale

La figure III.12 montre l'influence de la vitesse initiale sur la trajectoire d'une particule isolante de charge massique $= 1 * 10^{-10} \text{ C/g}$ avec une tension appliquée aux électrodes de 18 kV ($\pm 9 \text{ kV}$) et une masse $m_p = 3 * 10^{-5} \text{ kg}$.

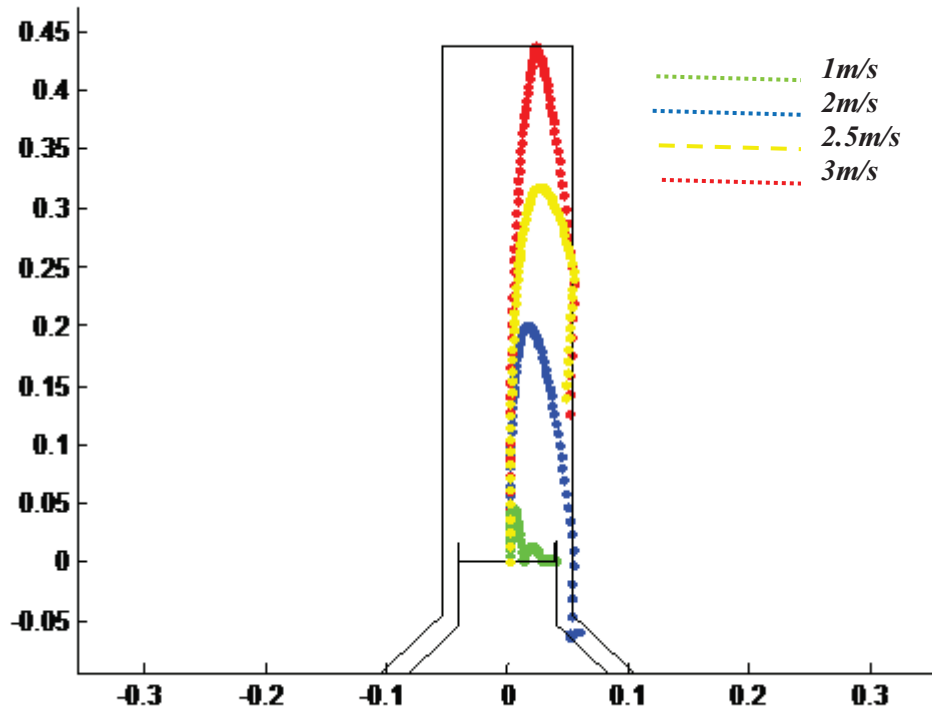


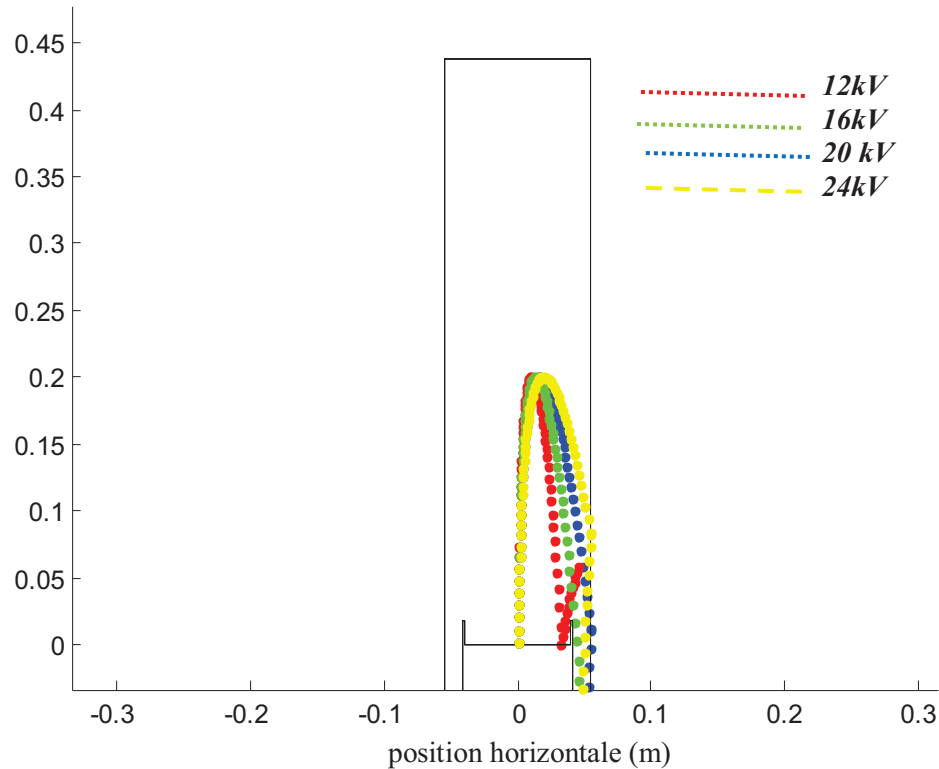
Figure III.12 trajectoire des particules en fonction de la vitesse initiale

La figure.III.11 montre qu'une vitesse de 1m/sec ne soulève pas assez les particules à une hauteur nécessaire pour faire sortir la particule de la chambre de chargement mais paraît idéale pour la création d'une bonne turbulence dans la chambre de chargement.

La vitesse adéquate pour faire sortir les particules de la chambre de chargement et les diriger vers le deuxième étage est entre 2m/sec et 2,5 m/sec; au-delà de cet intervalle par exemple la vitesse de 3 m/s ; les particules pourront être éjectées en dehors de notre configuration.

b) Influence des tensions appliquées

La figure.III.13 montre l'influence des tensions appliquées dans l'étage supérieur sur la trajectoire d'une particule isolante ayant une charge massique $=1*10^{-10}$ C/g et une vitesse initiale $= 2$ m/s et une masse de $m_p = 3*10^{-5}$ kg.



FigureIII.13 : Trajectoire de la particule isolante en fonction de la tension

On déduit de la figureIII.13 que la tension de 12 kV (± 6 kV) n'est pas assez suffisante pour attirer la particule. Les tensions variant entre 16 kV (± 8 kV), 20 kV (± 10 kV) et 24kV (± 12 kV) ont donné des résultats meilleures par rapport à la première. Au-delà de ces tensions la particule risque d'être attirée en provoquant un choc avec électrode. Ce choc dû au champ électrique intense risque d'inverser le sens de la trajectoire de la particule et la ramener à la chambre de chargement.

c) Influence de la charge massique

La figure III.14 montre l'influence de la charge massique sur la trajectoire d'une particule isolante ayant une vitesse initiale = 2 m/s avec une tension appliquée aux électrodes de 18 kV (± 9 kV) et une masse $m_p = 3 \cdot 10^{-5}$ kg.

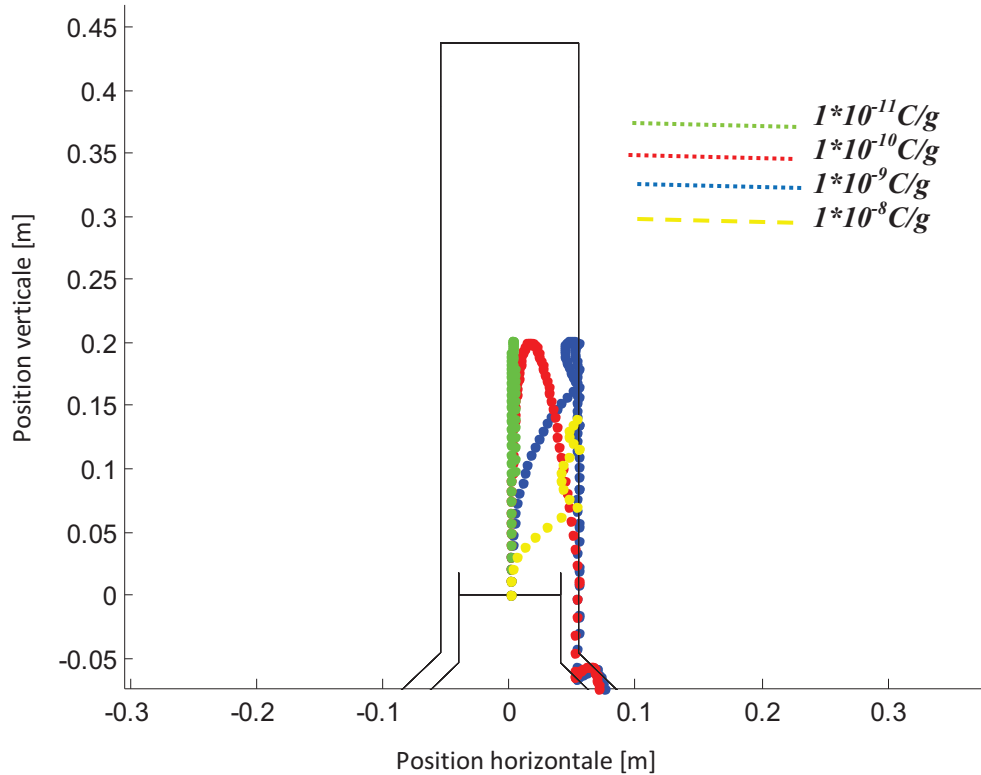


Figure.III.14: Trajectoire de la particule isolante en fonction de la charge massique

De la figure III.14, il apparaît qu'une particule portant une charge massique de $1 \cdot 10^{-11}$ c/g ne peut pas être attirée par l'électrode de signe opposé car sa force électrique F_e est négligeable devant les autres forces. Les particules ayant une charge massique variant entre $1 \cdot 10^{-10}$ c/g et $1 \cdot 10^{-9}$ c/g ont les meilleures trajectoires. La force électrique d'attraction à laquelle est soumise la particule ayant une charge massique plus grande (10^{-8} c/g) l'empêche de chuter à l'étage inférieur facilement; ainsi le collage de la particule sur l'électrode est très possible.

d) influence de la masse

La figure III.15 montre l'influence de la masse sur la trajectoire d'une particule isolante ayant une vitesse initiale = 2 m/s avec une tension appliquée aux électrodes de 18 kV (± 9 kV) et avec une charge de $1 \cdot 10^{-10}$ c/g.

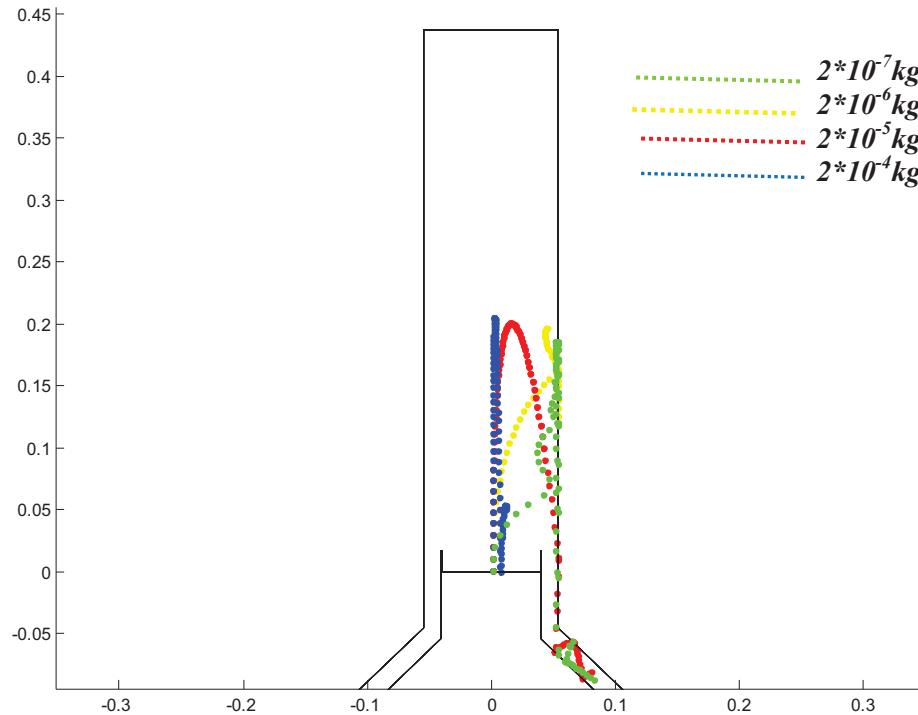


Figure.III.15: Trajectoire de la particule isolante en fonction de la charge massique

De la figure III.15, il apparaît qu'une particule de masse $2 \cdot 10^{-4}$ kg ne peut pas être attirée vers l'électrode, cela est dû à la force électrique qui devient dans ce cas inférieure par rapport à la force gravitationnelle. La particule ayant une masse de $2 \cdot 10^{-5}$ kg a une meilleure trajectoire, cela montre que notre séparateur est parfaitement adapté à la séparation de ce type de granule qui ont cette masse (voir tableau II.1).

III.4.2 Simulation numérique de la trajectoire des particules isolantes à l'étage inférieur

La seconde partie consiste à simuler la trajectoire des particules en étudiant les variations des paramètres influençant sur la particule dans l'étage inférieur. Ces paramètres sont :

- la symétrie dans l'alimentation des électrodes.
- les différences de potentiel appliquées entre les électrodes de l'étage inférieur.

- le coefficient de restitution.
- la charge à l'entrée du séparateur à chute libre.
- Les données constantes prises durant cette simulation sont :
 - l'accélération de la pesanteur $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.
 - la masse de la particule $m_p = 2.5 * 10^{-5} \text{ kg}$.
 - la vitesse de l'air 2m/s.

a) Influence de la symétrie à l'étage inférieur

La figure.III.16 montre les résultats de la distribution du potentiel donnés par COMSOL concernant une alimentation symétrique et dissymétrique.

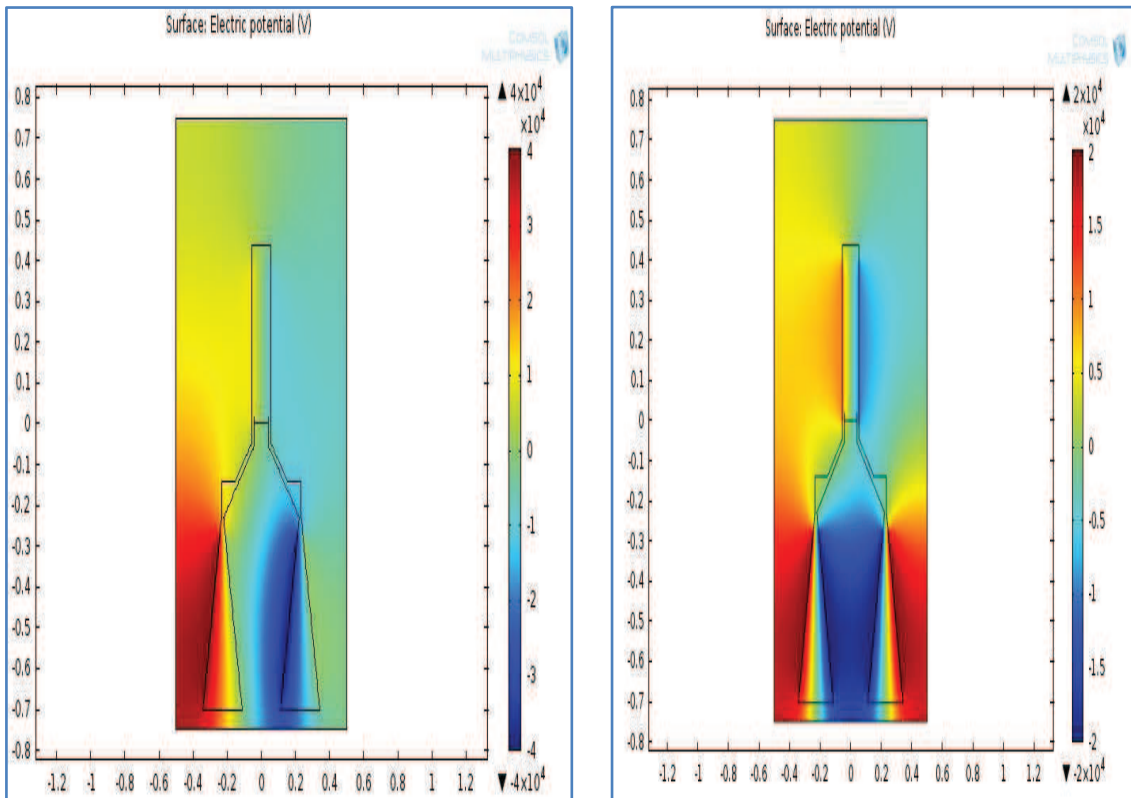


Figure.III.16 : Distribution du potentiel électrique résultant d'une alimentation symétrique et dissymétrique dans l'étage inférieur

La figure III.16 montre l'influence de la symétrie des électrodes de l'étage inférieur sur la trajectoire de deux particules isolantes ayant une vitesse initiale de 2 m/s; et une charge massique de $1 * 10^{-10} \text{ C/g}$ et une autre de charge $-5 * 10^{-10} \text{ C/g}$ avec une tension appliqué de 40 kV ou $\pm 20 \text{ kV}$.

Les trajectoires de deux particules ayant deux charges différentes dans les deux configurations de la figure.III.16 sont représentées ci-dessous

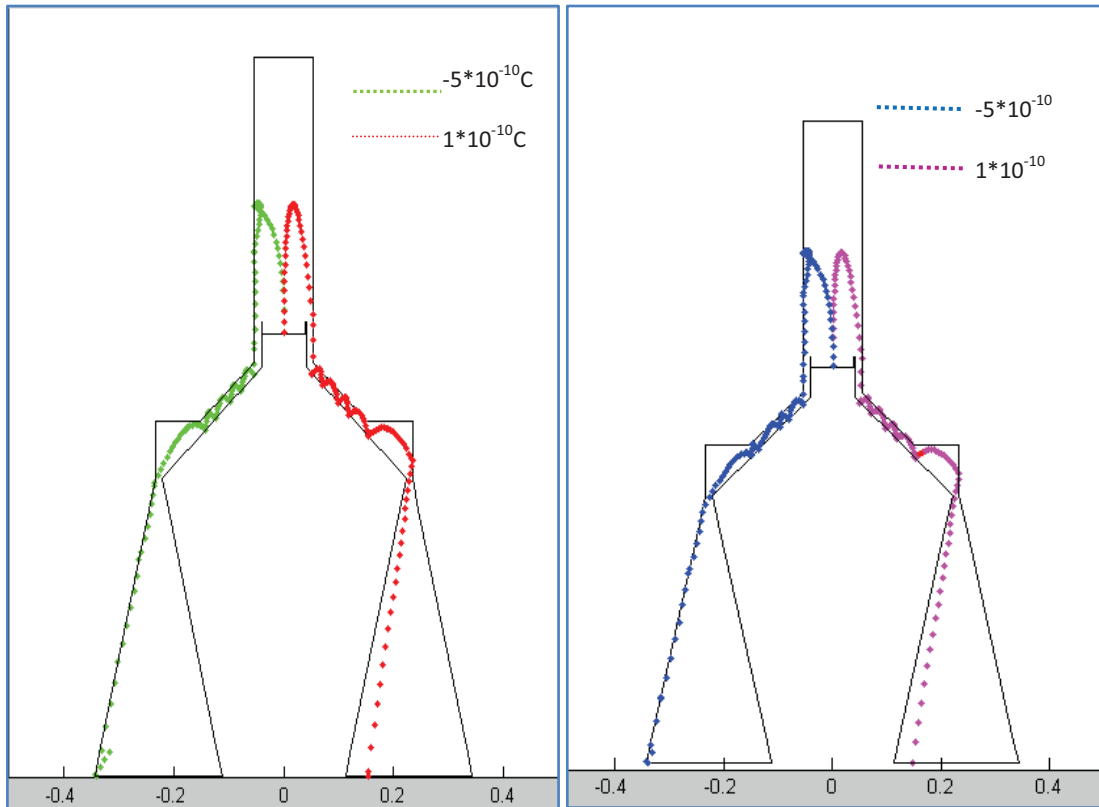


Figure.III.17 Trajectoires des particules isolantes dans les champs électriques générés par les l'alimentation symétrique et dissymétrique

On constate de la figure.III.17 que le type d'alimentation n'a pas d'influence sur la trajectoire des particules, ceci revient à l'égalité du champ électrique dans l'alimentation symétrique et dissymétrique.

b) Influence de la tension dans l'étage inférieur

La figure.III.18 montre l'influence de la tension appliquée aux électrodes dans l'étage inférieur sur la trajectoire d'une particule isolante ayant une charge massique de $-1*10^{-10}$ C/g avec un coefficient de restitution de 0.4.

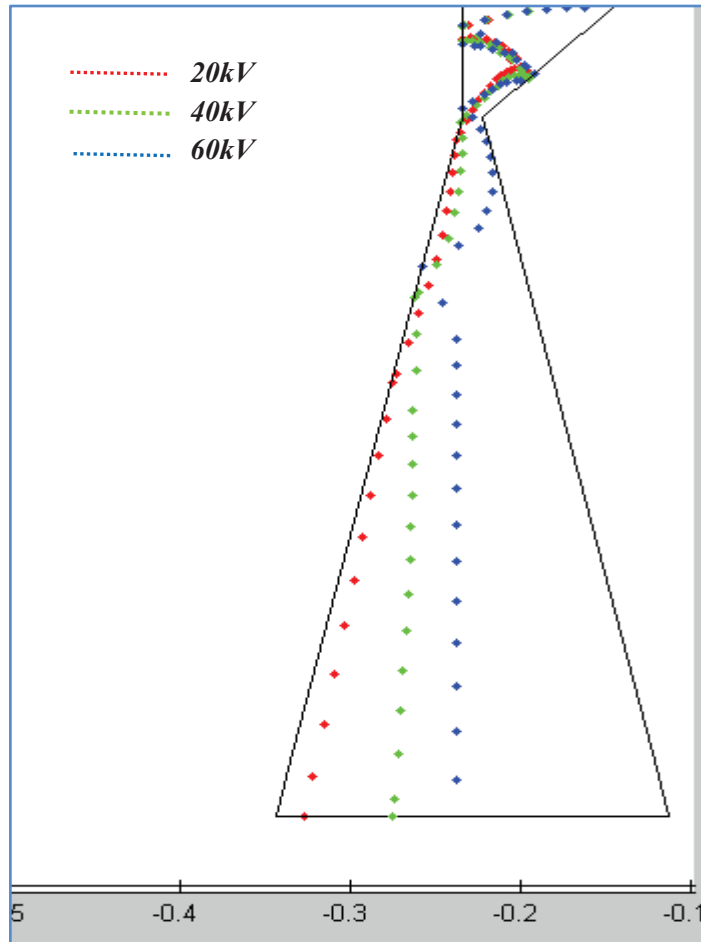


Figure III.18 : Trajectoire d'une particule isolante en fonction de la tension

On déduit de la figure.III.18 que les trajectoires sont meilleures pour une tension variant entre 20kV et 40 kV, et qu'une tension de 60 kV conduit les particules à entrer en impact avec l'électrode. Le choc provenant de cet impact va renverser la trajectoire de la particule, ce qui agit négativement sur le rendement du séparateur.

c) Influence de la charge massique

La figure.III.19 montre l'influence de la charge massique sur la trajectoire d'une particule isolante à l'étage inférieur.

Les données d'entrées maintenues constantes sont :

- une tension de 35 kV appliquée aux électrodes,
- un coefficient de restitution égale à 0.4.

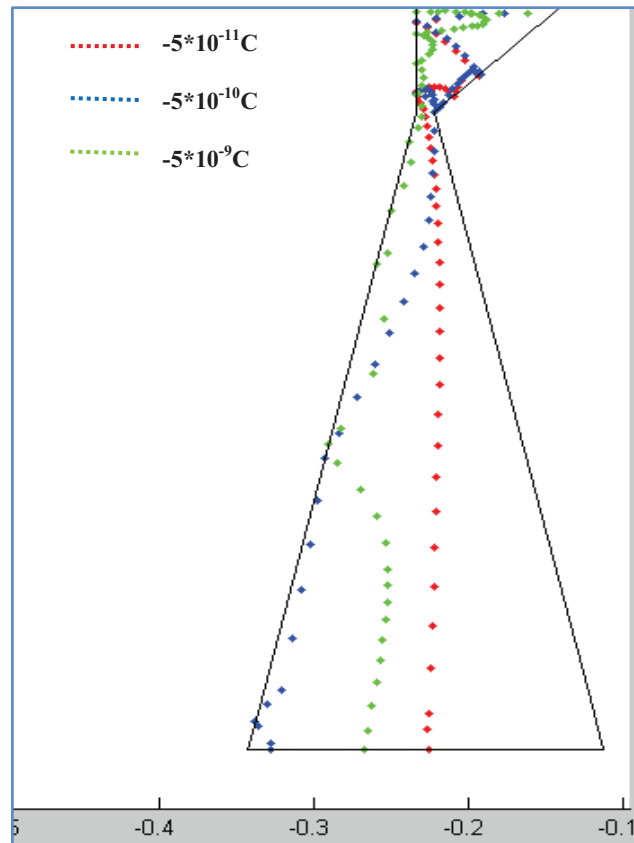


Figure.III.19: Trajectoire d'une particule isolante en fonction de la charge massique

L'interprétation de la figure III.19 est la même que celle de la figure III.18 car la charge massique de la particule est directement proportionnelle à la force d'attraction électrique $F_e = q.E$. On remarque qu'une charge massique comprise entre $-5 \cdot 10^{-10} \text{ C/g}$ et $5 \cdot 10^{-9}$, donne les meilleures trajectoires. En diminuant cette charge, la particule ne peut être attirée vers l'électrode (faible charge) et tombe en chute libre.

En augmentant la tension ou bien la charge, la force d'attraction électrique augmente. Et par conséquent la particule s'éjecte avec un grand angle par rapport à l'électrode et vice versa

d) Influence du coefficient de restitution

La figure.III.20 montre l'influence du coefficient de restitution sur la trajectoire d'une particule isolante de charge massique de $-5 \cdot 10^{-10} \text{ C/g}$ et une tension de 35kV.

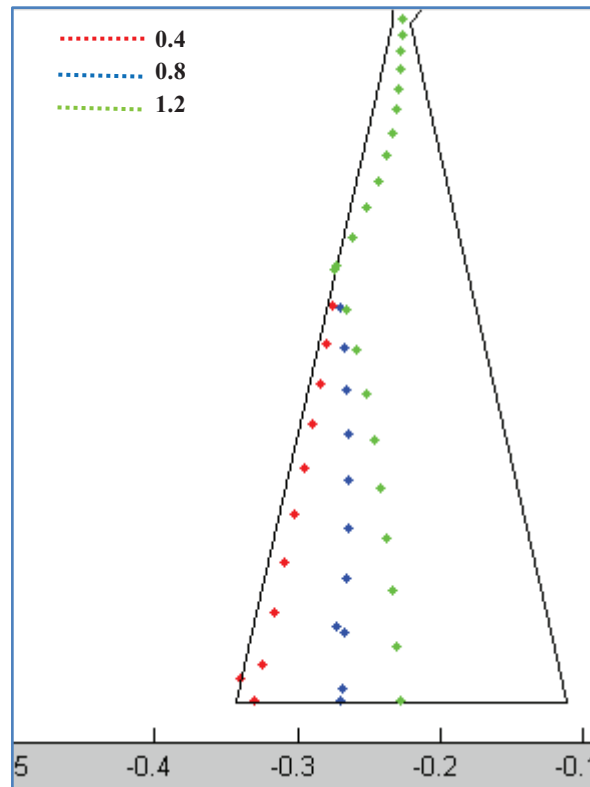


Figure III.20 : L'influence du coefficient de restitution sur la trajectoire d'une particule

De la figure.III.20 on remarque qu'un grand coefficient de restitution influence négativement sur la trajectoire de la particule, on le diminuant, son influence devient faible.

III.5 SIMULATION NUMERIQUE DE LA TRAJECTOIRE DE TROIS PARTICULES

La figure III.21 montre la trajectoire des trois particules PVC, HIPS et ABS; les valeurs de leurs charges massiques dans le premier étage et celles avec les parois d'Aluminium sont tirées des résultats d'études de chargement dans le chapitre II (tableau II.2 et figure II.17).

Les données d'entrées maintenues constantes sont :

- une tension de 40kV appliquée à l'électrode gauche,
- la tension de -40 kV appliquée à l'électrode droite,
- un coefficient de restitution de 0.4.

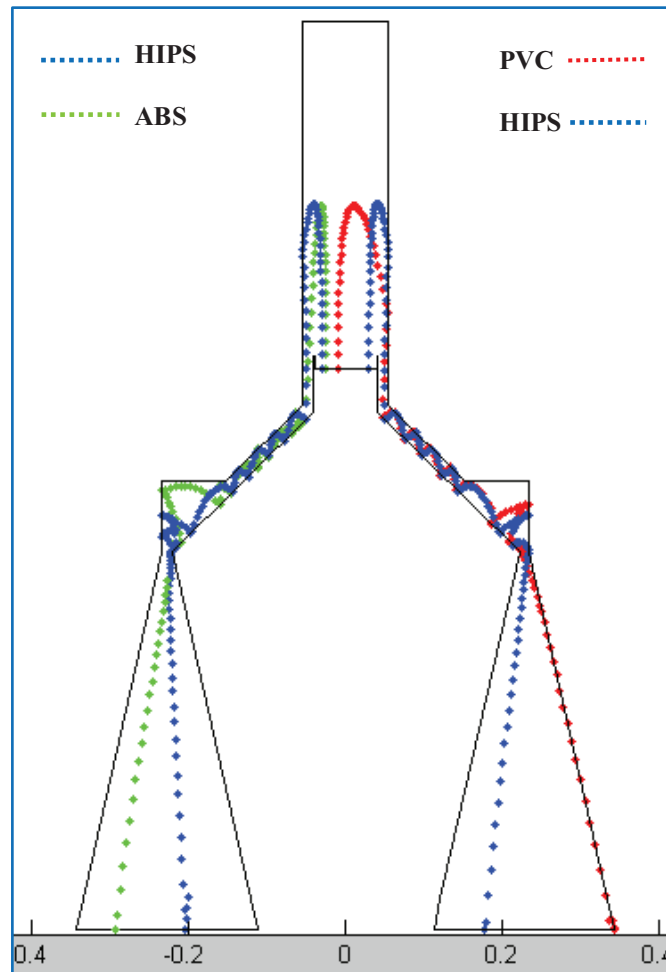


Figure.III.21: simulation de la trajectoire de trois particules dans le séparateur tribo-aéro-électrostatique.

La figure ci-dessus montre que les particules chargées différemment prennent des positions distinctes à la surface des collecteurs : elles ne tombent pas sur le même compartiment. Ceci implique la possibilité de leur séparation.

III.6 CONCLUSION

Dans cette simulation, on a utilisé les modèles numériques du champ électrostatique et la vitesse du flux d'air. Les deux modèles sont développés en utilisant un logiciel spécialisé dans la résolution d'équations aux dérivées partielles à l'aide de méthode des éléments finis. La simulation numérique nous a servi d'étudier le fonctionnement et les propriétés de notre système ainsi qu'à en prédire son évolution.

D'après les résultats de simulations qu'on a obtenues on peut conclure :

- Une charge très importante des particules, un champ électrique intense ou les deux simultanés ne sont pas forcément nécessaires pour l'obtention d'une bonne séparation électrostatique.
- L'utilisation d'alimentations symétrique ou dissymétrique aboutit à un même résultat. Néanmoins, deux sources HT sont économisées si l'alimentation dissymétrique est utilisée.
- Il est préférable d'utiliser des électrodes conçus avec un matériau à faible coefficient de restitution.

L'étude de l'influence de plusieurs variables sur le rendement de notre séparateur a montré que notre dispositif est un processus multifactoriel difficilement contrôlable. Pour cela, on va utiliser dans le chapitre qui suit la méthodologie de plans d'expériences pour l'optimiser.

CHAPITRE IV

Séparation d'un mélange de trois particules

CHAPITRE IV

SEPARATION D'UN MELANGE DE TROIS PARTICULES

La séparation triboélectrique, est une méthode couramment utilisée dans l'industrie de récupération des plastiques. Néanmoins, plusieurs facteurs de réglage électrique et mécanique rend ce processus assez complexe pour trouver le point de fonctionnement optimal afin d'améliorer le rendement de la machine. Le rendement de notre séparateur tribo-aero-électrostatique à deux étages va dépendre de nombreux paramètres tels que : la haute tension appliquée, le temps de chargement dans la chambre fluidisation, la masse du produit,...etc. C'est la raison pour laquelle, une modélisation du séparateur avec la méthode des plans d'expériences sera abordée dans ce chapitre, ceci permet d'optimiser son fonctionnement sur un mélange granulaire comportant 3 particules.

Afin de réaliser ce but, une stratégie basée sur les quatre étapes a été suivie :

- Choix des facteurs qui peuvent influencer sur le processus de la séparation,
- Identification de l'intervalle de variation des différents facteurs,
- Détermination du point de fonctionnement optimal,
- Vérification du point de fonctionnement optimal.

La deuxième partie de ce chapitre sera consacré à la séparation de trois particules en utilisant le chargement par ventilateur associé au séparateur à tapis roulant.

IV.1 Méthodologie des plans d'expériences

De manière générale, la méthode des plans d'expériences cherchera à déterminer et à établir les liens existant entre 2 types de variables :les réponses et les facteurs. Plus précisément, elle vise aussi bien à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux .Pour cela, la solution proposée consiste dans tous les cas à établir un modèle, exprimant la réponse en fonction des facteurs. Pour bâtir ce modèle, il faut appréhender ces variations. Celles-ci sont déduites des résultats de séries d'expériences, c'est-à-dire de plusieurs configurations pour lesquelles les valeurs des facteurs sont différentes. Il s'agit ici de la notion de plan d'expériences (PE), correspondant à la réalisation d'une série de N expériences, qui sont toutes : déterminées; obligatoirement réalisables ; indépendantes entre elles. La réalisation d'un plan revient à déterminer la valeur de la fonction réponse pour ces N configurations. C'est une méthode qui permet la modélisation ainsi que l'optimisation d'un processus. Le procédé d'un système peut être défini, exprimant les n variables de sortie y_i , $i = 1, \dots, n$, comme fonctions des variables d'entrée u_i , $i = 1, \dots, m$, qui peuvent être contrôlées(figure IV.1).

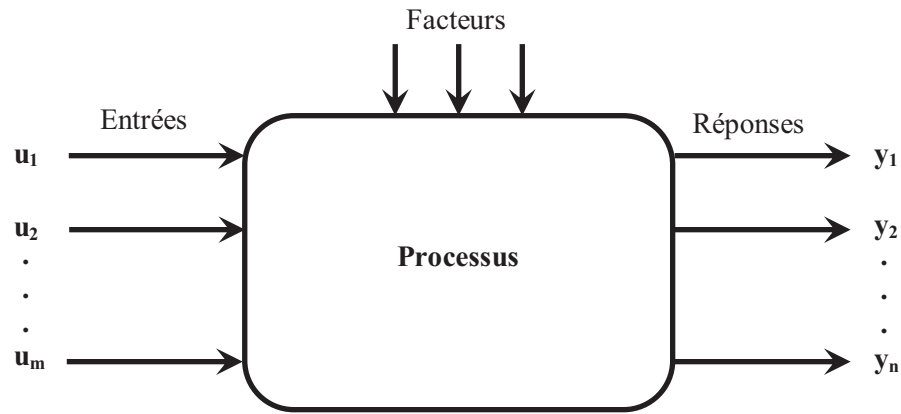


Figure 4.1 : Représentation schématique d'un processus

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

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,i} x_i^2, i, j = 1, 2, \dots, m \quad (4.1)$$

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

Les plans d'expériences permettent d'exprimer la réponse par un modèle polynomial de second degré.

IV.2 MODELISATION DES PARAMETRES PAR LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

Les expériences ont été réalisées sur un mélange granulaire isolant de PVC, ABS et HIPS. les autres caractéristiques variables du système ont été maintenues constantes : la vitesse de l'air de fluidisation débitée par la soufflante $V = 2\text{m/s}$, l'humidité relative de l'air $HR = 45 \pm 1\%$, la température ambiante $T = 23 \pm 1^\circ\text{C}$, la masse du produit granulaire $m = 50\text{g (PVC)} + 50\text{g (ABS)} + 50\text{g (HIPS)} = 150\text{g}$, l'angle d'inclinaison des électrodes mobiles de l'étage inférieur $\alpha = 32^\circ$, la haute tension appliquée aux électrodes de l'étage supérieur égale à $U = U_1 - U_2 = 9 - (-9) = 18\text{ kV}$.

Après avoir séparé le produit granulaire, la masse des granules récupérés dans chacun des quatre compartiments des deux collecteurs a été mesurée en utilisant une balance électronique avec une résolution de 0,01g.

Les intervalles d'étude des différents facteurs ont été choisis suivant les réponses obtenues à partir des travaux précédents et les résultats numériques du chapitre 3. Nous avons

fixé une certaine consigne valable pour toutes les réponses des trois facteurs étudiés (tension positive, tension négative, temps de chargement).

IV.2.1 Intervalle d'étude de la tension positive

D'après les résultats numériques, on a choisi l'intervalle d'étude de la haute tension positive comme suit : $35 \text{ kV} \leq U_G \leq 50 \text{ kV}$.

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

$$U_c = (U_{\max} + U_{\min})/2 \quad (\text{IV-1})$$

D'où : $U_c = 42.5 \text{ kV}$.

IV.2.2 Intervalle d'étude de la tension négative

On a choisi l'intervalle d'étude de la haute tension négative comme suit : $-50 \text{ kV} \leq U_D \leq -35 \text{ kV}$

La valeur centrale de l'intervalle de la tension est donnée par :

$$U_c = (U_{\max} + U_{\min})/2 \quad (\text{IV-2})$$

D'où : $U_c = -42.5 \text{ kV}$.

IV.2.3 Intervalle d'étude du temps de chargement des particules

On a choisi l'intervalle d'étude du temps comme suit : $20 \text{ s} \leq t \leq 60 \text{ s}$.

La valeur centrale de l'intervalle du temps est donnée par :

$$t_c = (t_{\max} + t_{\min})/2 \quad (\text{IV-3})$$

D'où $t_c = 40 \text{ s}$

IV.3 APPLICATION DE LA METHODE DU PLAN D'EXPERIENCE COMPOSITE

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

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

Un plan composite centré est défini par :

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

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

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

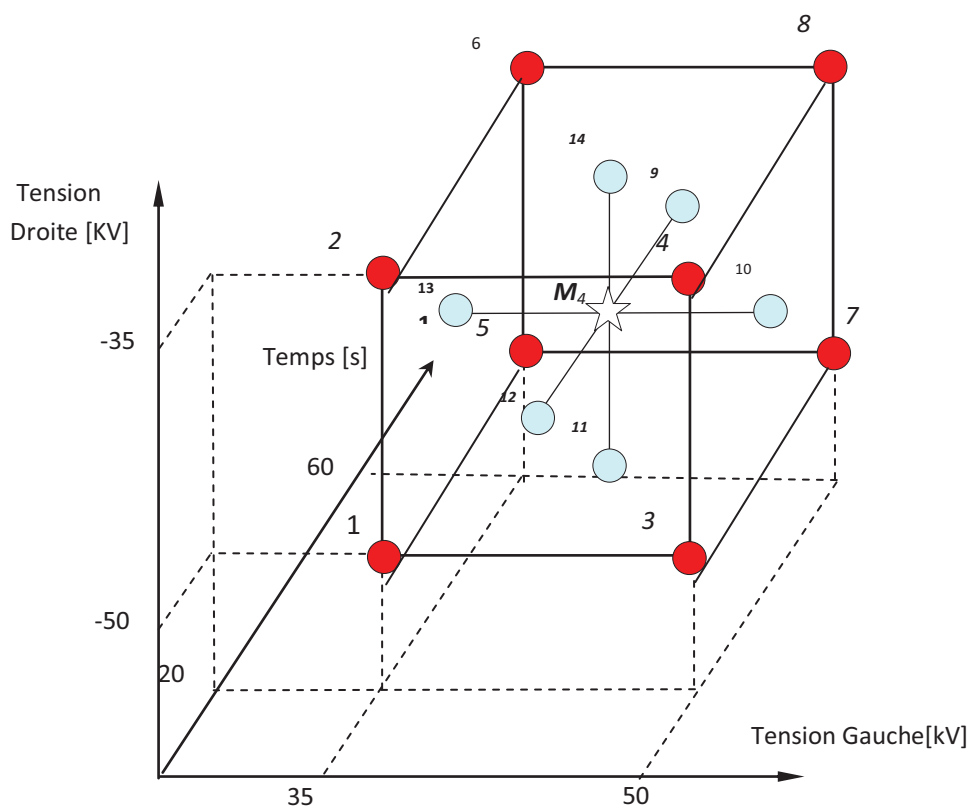


Figure.IV.2 : Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite

Les résultats des dix-sept expériences réalisées selon le plan factoriel composite recommandé par la méthodologie de plan d'expérience sont présentés dans les tableaux IV.1 et IV.2

Tableau. IV.1 : Masses des granules de PVC, ABS, HIPS collectés dans les huit compartiments en [g]

U _G [kV]	U _D [kV]	T [s]	Compartiments Droit				Compartiments gauche			
			1D	2D	3D	4D	1G	2G	3G	4G
35	-50	20	37.1	8.2	6.9	17.9	22.1	19	21.4	17.3
50	-50	20	41	8.5	7.9	10.9	31.7	11.3	30.4	8.6
35	-35	20	33.1	11.8	5.2	16.6	18.2	24.8	31.1	9.1
50	-35	20	28.8	13.7	9.3	13.9	44.85	14	19.5	6.2
35	-50	60	36	9.5	3.7	20.8	28	24.6	15	12.3
50	-50	60	34.2	12.6	6	13.2	27.7	15.9	29.7	10.3
35	-35	60	16.5	25.9	10.5	15	14.9	26.3	26.5	13.5
50	-35	60	16.2	17.9	19.2	16.1	34.9	14.9	23.3	7.5
35	-42.5	40	26.8	14.9	6.5	17.2	16	17.8	29	23.3
50	-42.5	40	33.2	12	6.9	9.5	23.4	14.8	39.8	11.3
42.5	-50	40	23.3	16.4	12.3	11.3	26	21.7	30.4	7.3
42.5	-35	40	15.4	16	20	16.8	33.6	15.8	25.2	7
42.5	-42.5	20	21.2	18.7	11.4	13.3	24.4	14.1	37.3	9.5
42.5	-42.5	60	22	12.3	10	22	22.6	18.8	28.9	14.5
42.5	-42.5	40	25	15.3	7.4	11.5	23.1	22.7	30.3	14.7
42.5	-42.5	40	27.1	13.6	5.7	7.4	22.9	18.2	33	22
42.5	-42.5	40	30.3	14	7.4	9.4	21	20.4	27.3	22.2

Pour chaque expérience, la masse des matériaux granulaires collectés dans chaque compartiment a été analysée avec un tri manuel, les résultats sont donnés dans les tableaux IV.2 et IV.3.

Tableau.IV.2 : Masses des granules collectés dans les quatre compartiments droits en [g]

VG [kV]	VD [kV]	t [s]	1D			2D			3D			4D		
			PVC	HIPS	ABS	PVC	HIPS	ABS	PVC	HIPS	ABS	PVC	HIPS	ABS
35	-50	20	0.3	1.4	35.4	0.3	1.1	6.8	0.3	3.3	3.3	5.3	10.3	2.3
50	-50	20	0	1.1	39.9	0	2.7	5.8	0	5.4	2.5	0.3	8.7	1.9
35	-35	20	0	0.9	32.2	0	2.6	9.2	0	2.2	3	0.8	12.7	3.1
50	-35	20	0	0.6	28.2	0	0.9	12.8	0	4	5.3	1.4	10	2.5
35	-50	60	0	0	36	0	1.20	8.3	0	0.7	3	4.1	14.6	2.1
50	-50	60	0	2.8	31.4	0	1.2	11.4	0	2.4	3.6	1.5	9.5	2.2
35	-35	60	0	2.7	13.8	0	2.8	23.1	0.6	2.1	7.8	1.8	8.4	4.8
50	-35	60	0.2	1	15	0.3	1.7	15.9	0.9	5.4	12.9	1.6	9.2	5.3
35	-42.5	40	0	1.6	25.2	0	0.8	14.1	0	0.4	6.1	1.2	11.9	4.1
50	-42.5	40	0	3.1	30.1	0	1.2	10.8	0	2.5	4.4	1.1	6.4	2
42.5	-50	40	0	1.8	21.5	0	1.7	14.7	0.5	2.3	9.5	1.3	6.7	3.3
42.5	-35	40	0	1.5	13.9	0	1.8	14.2	0.9	5	14.1	1.2	8.7	6.9
42.5	-42.5	20	0	2	19.2	0	1.8	16.9	0.5	2	8.9	1.1	8.2	4
42.5	-42.5	60	0	1.7	20.3	0	1.4	10.9	0	3	7	0	16.2	5.8
42.5	-42.5	40	0	1	24	0	1	14.3	0	6.4	1	0	7.8	3.7
42.5	-42.5	40	0	0	27.1	0	1.2	12.4	0	4.2	1.5	0	4.7	2.7
42.5	-42.5	40	0	0.5	29.8	0	1	13	0	4.1	3.3	0	7.2	2.2

Tableau.IV.3 : Masses des granules collectés dans les quatre compartiments gauche en [g]

VG [kV]	VD [kV]	t [s]	1G			2G			3G			4G		
			PVC	HIPS	ABS	PVC	HIPS	ABS	PVC	HIPS	ABS	PVC	HIPS	ABS
35	-50	20	22	0.1	0	13.2	5.8	0	6.4	15	0	2.2	13	2.1
50	-50	20	27.6	4.1	0	7.2	4.1	0	12.4	18	0	2.5	5.9	0.2
35	-35	20	15.5	2.7	0	17	7.8	0	13.5	17.6	0	3.2	3.1	2.8
50	-35	20	39.7	5.1	0	7.1	6.9	0	0.5	19	0	1.3	3.5	1.4
35	-50	60	24.1	3.9	0	17.1	7.5	0	3	12	0	1.8	10.1	0.4
50	-50	60	23.9	3.8	0	10.4	5.5	0	10	19.7	0	4.2	5	1.1
35	-35	60	12.3	2.6	0	22.1	4.2	0	10.6	15.9	0	2.1	11.1	0.3
50	-35	60	32.1	2.8	0	10.9	3.7	0.3	1.8	21.5	0	2.2	4.7	0.6
35	-42.5	40	14.8	0.9	0.3	14.1	3.3	0.4	15.1	13.9	0	4.8	17.1	1.4
50	-42.5	40	20.1	3.3	0	12.8	2	0	11.1	28.7	0	4.9	4	2.4
42.5	-50	40	22.9	3.1	0	14.2	7.5	0	8.4	22	0	2.6	3.9	0.8
42.5	-35	40	30.2	3.4	0	10.1	5.7	0	5.7	19.5	0	1.9	4.4	0.7
42.5	-42.5	20	21.8	2.6	0	11.9	2.2	0	11.3	26	0	3.5	5.1	0.9
42.5	-42.5	60	19.8	2.8	0	14.4	4.4	0	11.1	17.8	0	5.7	7.6	1.2
42.5	-42.5	40	21.1	2	0	15.1	7.1	0.5	10.4	19.9	0	3.4	10.3	1
42.5	-42.5	40	20	2.9	0	14.3	3.9	0	11.4	21.6	0	4.3	14	3.7
42.5	-42.5	40	19	2	0	17.2	3.2	0	9.5	17.8	0	4.3	15	2.9

L'analyse des résultats de séparation nous a permis de classer les produits collectés dans chaque collecteur en trois classes :

- Produit PVC récupéré dans les compartiments 1G et 2G.
- Produit ABS récupéré dans les compartiments 1D et 2D.
- Produit HIPS récupéré dans les compartiments 3D, 4D, 3G et 4G.

La pureté et la récupération des trois produits collectés dans ces compartiments ont été calculées comme dans l'exemple ci-dessous (pour PVC):

$$P_{PVC} = \frac{\text{Masse de PVC dans les compartiments 1G et 2G}}{\text{Masse des produits dans les compartiments 1G et 2G}} \quad (\text{IV-4})$$

$$R_{PVC} = \frac{\text{Masse de PVC dans les compartiments 1G et 2G}}{\text{Masse totale de PVC dans les huit compartiments}} \quad (\text{IV-5})$$

Le tableau IV.4 montre la pureté et la récupération des produits PVC, ABS et HIPS collectés dans les huit compartiments

Tableau. IV.4 : Récupération et pureté des produits PVC, ABS et HIPS collectés dans les huit compartiments

U _G [kV]	U _D [kV]	T [s]	Récup R _{PVC} [%]	Pureté P _{PVC} [%]	Récup R _{ABS} [%]	Pureté P _{ABS} [%]	Récup R _{HIPS} [%]	Pureté P _{HIPS} [%]
35	-50	20	70.40	85.64	91.00	87.16	76.60	67.67
50	-50	20	69.60	80.93	96.40	83.97	65.20	65.33
35	-35	20	65.00	75.58	88.80	88.62	66.80	58.80
50	-35	20	93.70	79.61	92.60	89.38	65.00	82.07
35	-50	60	82.40	78.33	94.60	96.14	73.40	76.30
50	-50	60	68.60	74.67	92.80	87.88	68.40	64.29
35	-35	60	68.80	83.50	89.40	84.50	70.80	64.36
50	-35	60	86.00	86.35	85.60	80.18	70.80	75.48
35	-42.5	40	57.80	85.50	90.80	94.19	85.80	61.73
50	-42.5	40	65.80	86.13	90.60	88.95	79.20	64.52
42.5	-50	40	74.20	80.78	91.40	87.88	65.20	66.53
42.5	-35	40	80.60	81.58	86.40	82.10	65.20	66.53
42.5	-42.5	20	67.40	87.53	90.00	87.72	78.60	65.39
42.5	-42.5	60	68.40	86.61	88.00	86.23	83.20	67.61
42.5	-42.5	40	72.40	87.04	89.10	87.39	81.00	67.26
42.5	-42.5	40	68.60	86.46	88.60	88.36	80.60	64.58
42.5	-42.5	40	67.40	87.44	89.20	89.17	80.00	65.91

IV.3.1 Représentation matricielle

La représentation matricielle d'un plan composite centré à quatre facteurs et trois mesures au centre est donnée par le tableau IV.4. Cette matrice définit les niveaux de chacun des paramètres à chaque expérience. Chaque colonne de cette matrice est associée à un facteur.

IV.3.2 Calcul des coefficients

A partir de cette matrice d'expériences, il est possible de définir la matrice X permettant de calculer les coefficients du modèle IV-5. Cette matrice est une extension de la matrice d'expérience. Elle regroupe dans chaque colonne les niveaux de chacun des coefficients de l'équation du modèle pour chaque essai.

Ces nouvelles colonnes sont calculées par multiplication des colonnes de la matrice d'expérience.

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j \right) \quad (\text{IV-5})$$

Il est commode d'écrire ce système sous forme matricielle sans tenir compte des erreurs expérimentales :

$$Y = X \cdot \hat{a} \quad (\text{IV-6})$$

avec : $\hat{a} = (X^t X)^{-1} X^t Y$

Tableau.IV.4 : Matrice d'expérience et résultats expérimentaux d'un plan composite centré

N° Essais		U_G [kV]	U_D [kV]	t [s]	Récup R_{PVC} [%]	Pureté P_{PVC} [%]	Récup R_{ABS} [%]	Pureté P_{ABS} [%]	Récup R_{HIPS} [%]	Pureté P_{HIPS} [%]
Plan factoriel «2 ³ »	1	-1	-1	-1	70.40	85.64	91.18	87.16	76.60	67.67
	2	1	-1	-1	69.60	80.93	95.83	83.97	65.20	65.33
	3	-1	1	-1	65.00	75.58	88.27	88.62	67.34	58.80
	4	1	1	-1	93.61	79.61	92.23	89.38	65.00	82.07
	5	-1	-1	1	82.24	78.33	94.98	96.14	73.40	76.30
	6	1	-1	1	68.60	78.67	93.36	87.88	68.54	64.29
	7	-1	1	1	69.49	83.50	89.76	84.50	71.08	64.36
	8	1	1	1	86.00	86.35	87.60	82.18	70.80	75.48
Points en étoiles « 2x3 »	9	-1	0	0	57.80	85.50	87.98	94.19	85.97	61.73
	10	1	0	0	65.80	86.13	91.15	86.95	76.37	64.52
	11	0	-1	0	74.35	77.78	91.77	87.88	66.53	66.53
	12	0	1	0	80.60	81.58	84.74	82.10	65.20	66.53
	13	0	0	-1	67.27	87.53	90.18	87.72	78.76	65.39
	14	0	0	1	67.06	82.61	84.51	86.23	75.77	63.61
Points au Centre	15	0	0	0	72.40	79.04	88.31	82.39	68.47	67.26
	16	0	0	0	68.60	83.45	86.50	88.36	76.76	64.58
	17	0	0	0	72.40	87.44	90.04	89.17	78.74	67.91

	U_G [kV]	U_D [kV]	t [s]
Niveau -1	35	-50	20
Niveau 0	42.5	-42.5	40
Niveau 1	50	-35	60

Les éléments du vecteur \hat{a} vont être estimés en utilisant la méthode du moindre carré. Les résultats de calcul sont récapitulés dans le Tableau .IV.5.

Tableau.IV.5 : Coefficients des modèles quadratiques des réponses.

Coefficients		Modèles					
		Récup R_{PVC} [%]	Pureté P_{PVC} [%]	Récup R_{ABS} [%]	Pureté P_{ABS} [%]	Récup R_{HIPS} [%]	Pureté P_{HIPS} [%]
Constante	a_0	67.80	86.87	88.80	88.24	80.06	64.80
V_G	a_1	3.93	-0.09	0.34	-2.03	-2.48	2.28
V_D	a_2	2.89	0.63	-2.34	-1.83	-1.02	0.71
T	a_3	0.81	0.01	-0.84	-0.19	1.44	0.88
V_G^2	a_{11}	-4.75	-0.98	2.02	3.38	2.79	-0.83
V_D^2	a_{22}	10.85	-5.62	0.22	-3.19	-14.51	2.57
t^2	a_{33}	1.35	0.28	0.32	-1.21	1.19	2.54
$V_G V_D$	a_{12}	7.56	1.91	-0.45	0.99	1.83	6.09
$V_G t$	a_{13}	-3.06	-0.02	-1.85	-1.27	1.03	-2.73
$V_D t$	a_{23}	-1.86	3.53	-0.80	-3.28	1.23	-1.08

IV.3.3 Analyse statistique des modèles

L'analyse statistique, dont la mise en œuvre est parfois redoutée par les expérimentateurs, apporte des éléments d'aide à la décision. L'analyse statistique devient donc une étape importante, les tests statistiques portent naturellement sur les résultats obtenus. :

a) Réalisation du test de signification des effets

On appelle « effets » les coefficients des facteurs et ceux des interactions dans l'écriture du modèle général sur l'équation (IV-7). Les calculs statistiques qui permettent de savoir si les effets sont significatifs, de calculer les intervalles de confiance ou de valider la linéarité du modèle font intervenir d'une part les résidus e_i , c'est-à-dire la différence entre la valeur expérimentale et la valeur prédite par le modèle, et d'autre part estimer sans biais de la variance commune des résidus. Cet estimateur est donné par :

$$S^2 = \frac{1}{n-p} \sum e_i^2 \quad (\text{IV-7})$$

Où : n est le nombre d'expériences réalisées et p le nombre de coefficients du modèle.

Dans ces conditions, on peut montrer que tous les effets ont la même variance donnée par :

$$S_i^2 = \frac{S^2}{n} \quad (\text{IV-8})$$

Cela apporte une grande simplification au niveau des calculs.

Le test utilisé est le test « t » de *Student*. Un effet sera dit significatif (c'est-à-dire que la variable ou l'interaction qui lui est associée a une influence sur la réponse), s'il est, pour un risque donné, significativement différent de 0. On testera donc l'hypothèse:

$$H_0 = \ll a_i = 0 \gg \quad (\text{IV-9})$$

Contre l'hypothèse:

$$H_1 = \ll a_i \neq 0 \gg \quad (\text{IV-10})$$

Pour cela, on calcule

$$t_i = \frac{|a_i|}{s_i} \quad (\text{IV-11})$$

On utilise alors une table dite de *Student* (voir l'annexe 1) à $v = n-p$ degrés de liberté (n est le nombre d'expériences réalisées et le nombre d'effets y compris la constante). On choisit un risque de première espèce α (le plus souvent 1% ou 5%) et on lit dans cette table la valeur $t_{crit}(\alpha, v)$, en utilisant la partie relative à un test bilatéral.

La règle du test est alors la suivante :

- Si $t_i > t_{crit}(\alpha, \nu)$: on rejette H_0 au risque toléré.
- Si $t_i < t_{crit}(\alpha, \nu)$ on accepte H_0 au risque toléré.

Si l'hypothèse H_0 est acceptée, cela veut dire que l'effet en question n'est pas, au risque α significativement différent de 0 et donc que la variable qui lui est associée n'a pas d'influence sur la réponse.

La table de *Student* (voir l'annexe) donne pour $\nu=7$, $F(crit)=2.365$, pour un risque de 5%.

Les résultats du test pour les six modèles sont récapitulés dans les tableaux suivant :

Tableau.IV.6 : Analyse de chaque effet du modèle pour les réponses des produits PVC

Réponses	Variable	Effet	t_i	Résultats
Récupération du produit PVC [%]	Constante	67.80	128.96 > 2.365	Significatif
	V_G	3.93	7.148 > 2.365	Significatif
	V_D	2.89	5.50 > 2.365	Significatif
	T	0.81	1.54 < 2.365	Non Significatif
	V_G^2	-4.75	9.04 > 2.365	Significatif
	V_D^2	10.85	20.64 > 2.365	Significatif
	t^2	1.35	2.57 > 2.365	Significatif
	$V_G V_D$	7.56	14.38 > 2.365	Significatif
	$V_G t$	-3.06	5.83 > 2.365	Significatif
	$V_D t$	-1.86	3.54 > 2.365	Significatif

Réponses	Variable	Effet	t_i	Résultats
Pureté du produit PVC [%]	Constante	86.87	627.50 > 2.365	Significatif
	V_G	-0.09	0.63 < 2.365	Non Significatif
	V_D	0.63	4.52 > 2.365	Significatif
	T	0.01	0.11 < 2.365	Non Significatif
	V_G^2	-0.98	7.07 > 2.365	Significatif
	V_D^2	-5.62	40.56 > 2.365	Significatif
	t^2	0.28	2.00 < 2.365	Non Significatif
	$V_G V_D$	1.91	13.77 > 2.365	Significatif
	$V_G t$	-0.02	0.11 < 2.365	Non Significatif
	$V_D t$	3.53	25.49 > 2.365	Significatif

Tableau.IV.7 : Analyse de chaque effet du modèle pour les réponses des produits ABS

Réponses	Variable	Effet	t_i	Résultats
Récupération du produit ABS [%]	Constante	88.80	958.95 > 2.365	Significatif
	V_G	0.34	3.67 > 2.365	Significatif
	V_D	-2.34	25.27 > 2.365	Significatif
	T	-0.84	9.07 > 2.365	Significatif
	V_G^2	2.02	21.84 > 2.365	Significatif
	V_D^2	0.22	2.22 < 2.365	Non Significatif
	t^2	0.32	3.48 > 2.365	Significatif
	$V_G V_D$	-0.45	4.86 > 2.365	Significatif
	$V_G t$	-1.85	19.98 > 2.365	Significatif
	$V_D t$	-0.80	8.64 > 2.365	Significatif

réponses	Variable	Effet	t_i	Résultats
Pureté du produit ABS [%]	Constante	88.24	389.62 > 2.365	Significatif
	V_G	-2.03	8.95 > 2.365	Significatif
	V_D	-1.83	8.06 > 2.365	Significatif
	T	-0.19	0.86 < 2.365	Non Significatif
	V_G^2	3.38	14.94 > 2.365	Significatif
	V_D^2	-3.19	14.10 > 2.365	Significatif
	t^2	-1.21	5.35 > 2.365	Significatif
	$V_G V_D$	0.99	4.35 > 2.365	Significatif
	$V_G t$	-1.27	5.60 > 2.365	Significatif
	$V_D t$	-3.28	14.47 > 2.365	Significatif

Tableau.IV.8 :Analyse de chaque effet du modèle pour les réponses des produits HIPS

Réponses	Variable	Effet	t_i	Résultats
Récupération du produit HIPS [%]	Constante	80.06	266.23 > 2.365	Significatif
	V_G	-2.48	8.25 > 2.365	Significatif
	V_D	-1.02	3.39 > 2.365	Significatif
	T	1.44	4.79 > 2.365	Significatif
	V_G^2	2.79	9.28 > 2.365	Significatif
	V_D^2	-14.51	48.25 > 2.365	Significatif
	t^2	1.19	3.96 > 2.365	Significatif
	$V_G V_D$	1.83	6.07 > 2.365	Significatif
	$V_G t$	1.03	3.41 > 2.365	Significatif
	$V_D t$	1.23	4.07 > 2.365	Significatif

réponses	Variable	Effet	t_i	Résultats
Pureté du produit HIPS [%]	Constante	64.80	176.46 > 2.365	Significatif
	V_G	2.28	6.22 > 2.365	Significatif
	V_D	0.71	1.94 < 2.365	Non Significatif
	T	0.88	2.35 < 2.365	Non Significatif
	V_G^2	-0.83	2.27 < 2.365	Non Significatif
	V_D^2	2.57	7.01 > 2.365	Significatif
	t^2	2.54	6.92 > 2.365	Significatif
	$V_G V_D$	6.09	16.59 > 2.365	Significatif
	$V_G t$	-2.73	7.43 > 2.365	Significatif
	$V_D t$	-1.08	2.93 > 2.365	Significatif

b) Analyse des variances des modèles

L'analyse de la variance consiste à comparer à l'aide d'un test F la somme des carrés des écarts due uniquement à la régression (donc au modèle), avec la somme des carrés des résidus[54].

On précise ces notions en introduisant un vocabulaire spécifique à l'analyse de variance. On notera par la suite Y_i les réponses observées lors de la réalisation des expériences et Y_i^{est} est la réponse estimée à l'aide du modèle linéaire. On notera, de même, Y_{moy} la moyenne des réponses. On définit alors trois types de "variations".

Variation due à la liaison linéaire :

$$SCEL = \sum (Y_i^{\text{est}} - Y_{\text{moy}})^2 \quad (\text{IV-12})$$

SCEL se lit : "somme des carrés des écarts dues à la liaison".

Variation résiduelle:

$$SCER = \sum (Y_i - Y_i^{\text{est}})^2 \quad (\text{IV-13})$$

SCER se lit : "somme des carrés des écarts des résidus".

Variation totale

$$STCE = SCEL + SCER \quad (\text{IV-14})$$

STCE se lit : " somme totale des carrés des écarts".

On définit un "carré moyen" comme étant le quotient d'une somme de carrés par son degré de liberté.

SCEL aura (p - 1) degrés de liberté (p est le nombre de coefficients estimé à partir du modèle).

SCER aura (n - p) degrés de libertés (n est le nombre d'expériences réalisées).

SCET aura (n - 1) degrés de liberté.

En outre, on note CML le carré moyen associé à SCEL, et CMR le carré moyen associé à SCER. Le tableau de l'analyse de variance se présente alors de la façon suivante :

Tableau.IV.9 : Tableau de l'analyse de régression

Variation due à	Somme des carrés	DDL	Carré moyen	F
Liaison	<i>SCEL</i>	<i>P-1</i>	$\frac{SCEL}{p-1} = CML$	$F_{obs} = \frac{CML}{s^2}$
Résidus	<i>SCER</i>	<i>n-p</i>	$\frac{SCER}{n-p} = s^2$	
Totale	<i>SCET</i>	<i>n-1</i>		

Le test *F* permet alors de comparer pour un risque fixé à l'avance le F_{obs} que l'on a calculé dans le tableau précédent avec un *F* (critique) lu dans la table de *Fisher-Snedecor* (voir l'annexe 2) avec (*p-1*) et (*n - p*) degrés de liberté. Le test est le suivant :

- Hypothèse H_0 : " les deux carrés moyens sont de même grandeur" et donc la régression n'est passignificative.
- Hypothèse H_1 : " le carré moyen dû à la régression est significativement plus grand que le carré moyen dû aux résidus" donc la régression est globalement significative.

La règle du test est alors pour un risque α choisi:

- Si F_{obs} est inférieur au F (critique), on accepte l'hypothèse H_0 .
- Si F_{obs} est supérieur au F (critique), on accepte l'hypothèse H_1 avec la confiance $1 - \alpha$.

Pour l'analyse de la variance des modèles on trouve :

Tableau.IV.10 : Analyse de variance pour les deux réponses

réponses	Variation due à	Somme des carrés	DDL	Carré moyen	F_{obs}
RPVC [%]	Liaison	1206.59	$\nu_1=9$	134.07	$F_{obs} = \frac{CML}{s^2} = 28.53$
	Résidus	32.89	$\nu_2=7$	4.70	
	Totale	1239.48	16	77.47	
PPVC [%]	Liaison	282.30	$\nu_1=9$	31.37	$F_{obs} = \frac{CML}{s^2} = 96.27$
	Résidus	2.28	$\nu_2=7$	0.33	
	Totale	284.58	16	17.79	
RABS [%]	Liaison	119.54	$\nu_1=9$	13.28	$F_{obs} = \frac{CML}{s^2} = 91.11$
	Résidus	1.02	$\nu_2=7$	0.15	
	Totale	120.56	16	7.53	
PABS [%]	Liaison	229.70	$\nu_1=9$	25.52	$F_{obs} = \frac{CML}{s^2} = 29.27$
	Résidus	6.10	$\nu_2=7$	0.87	
	Totale	235.80	16	14.74	
RHIPS [%]	Liaison	813.71	$\nu_1=9$	90.41	$F_{obs} = \frac{CML}{s^2} = 58.81$
	Résidus	10.76	$\nu_2=7$	1.54	
	Totale	824.48	16	51.53	
PHIPS [%]	Liaison	496.96	$\nu_1=9$	55.22	$F_{obs} = \frac{CML}{s^2} = 24.09$
	Résidus	16.05	$\nu_2=7$	2.29	
	Totale	513.01	16	32.06	

La table de Fisher- Snédecor (voir l'annexe) donne pour $\nu_1=9$ et $\nu_2=7$, $F(crit) = 3.68$, pour risque de 5%.

On a dans les six réponses : $F_{obs} > (F_{crit} = 3.67)$ donc on accepte l'hypothèse H_1 de quadratique du modèle.

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

✓ **Pour la Récupération et la pureté du produit PVC**

$$R_{PVC} = 67.8 + 3.93V_G + 2.89V_D + 7.56V_GV_D - 3.06V_Gt - 1.86V_Dt - 4.75V_G^2 + 10.85V_D^2 \quad (IV-15)$$

$$P_{PVC} = 86.87 + 0.62V_D + 1.9V_GV_D + 3.52V_D \times t - 0.97V_G^2 - 5.61V_D^2 \quad (IV-16)$$

✓ **Pour la Récupération et la pureté du produit ABS**

$$R_{ABS} = 88.8 + 0.33V_G - 2.34V_D - 0.84t - 0.45V_GV_D - 1.85V_Gt - 0.79V_Dt + 2.02V_G^2 \quad (IV-17)$$

$$P_{ABS} = 88.24 - 2.03V_G - 1.83V_D + 0.99V_GV_D - 1.27V_Gt - 3.38V_Dt + 3.19V_G^2 - 3.19V_D^2 - 1.27t^2 \quad (IV-18)$$

✓ **Pour la Récupération et la pureté du produit HIPS**

$$R_{HIPS} = 80.4 - 2.88V_G - 1.72V_D + 1.84t + 1.82V_GV_D + 1.02V_Gt + 1.22V_Dt + 2.2V_G^2 - 13.6V_D^2 \quad (IV-19)$$

$$P_{HIPS} = 64.72 + 2.38V_G + 0.87t + 6.09V_G \times V_D - 2.72V_G \times t - 1.07V_D t + 2.44V_D^2 + 2.41t^2 \quad (IV-20)$$

IV.3.4. Qualité descriptive du modèle

Le tableau de l'analyse de régression permet d'établir immédiatement le coefficient de détermination à partir de la relation suivante :

Ce coefficient traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, les coefficients de détermination appartiennent à l'intervalle suivant :

$$R^2 = \frac{SCEL}{STCE} = 1 - \frac{SCER}{STCE} \quad (IV-21)$$

$$Q^2 = 1 - \frac{PRESS}{STCE} \quad (IV-22)$$

Ces coefficients traduisent la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, le coefficient de détermination appartient à l'intervalle suivant :

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad (IV-23)$$

$$-\infty \leq Q^2 \leq 1 \quad (IV-25)$$

Les coefficients trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.11 : Résultats des coefficients Q^2 et R^2

	Rec PVC %	Pu PVC %	Rec HIPS %	Pu HIPS %	Rec ABS %	Pu ABS %
Q^2	91,8	91,3	88,8	91,3	94,6	89,4
R^2	97,3	99,2	97,4	96,2	99,2	97,4

On constate que tous ces facteurs sont proches de 100%.

IV.5 INFLUENCE DES FACTEURS CHOISIS SUR LES REPONSES

A partir des modèles mathématiques obtenus, on peut déterminer à l'aide du logiciel MODDE 5.0 l'influence de chaque facteur sur chacune des réponses en traçant la variation des réponses en fonction de ces facteurs choisis. Si on veut par exemple déterminer l'influence d'un facteur (x_i) sur la masse du produit mixte, on représente sa variation pour les trois niveaux du facteur choisi[52].

En procédant de la même manière, on peut démontrer facilement que les facteurs les plus influents sur les réponses sont respectivement les tensions appliquées et le temps de chargement (Figure. IV.9), (Figure. IV.10), (Figure. IV.11).

a) Produit PVC

En analysant la figure IV .9, on constate que :

- ✓ Les taux de récupération et de pureté croissent avec l'augmentation de la tension gauche positive appliquée ; l'augmentation de la récupération est plus sensible que celle de la pureté.
- ✓ En augmentant la tension négative droite, le taux de récupération devient inversement proportionnel à celui de la pureté : en augmentant la tension négative droite, la récupération diminue jusqu'à la valeur centrale de l'intervalle puis augmente, alors que la pureté augmente jusqu'à atteindre la valeur centrale de l'intervalle puis elle diminue. Leurs variations sont insignifiantes.
- ✓ Le temps de chargement n'influe pas sur le taux de récupération, alors qu'il influe sensiblement sur le taux de pureté.

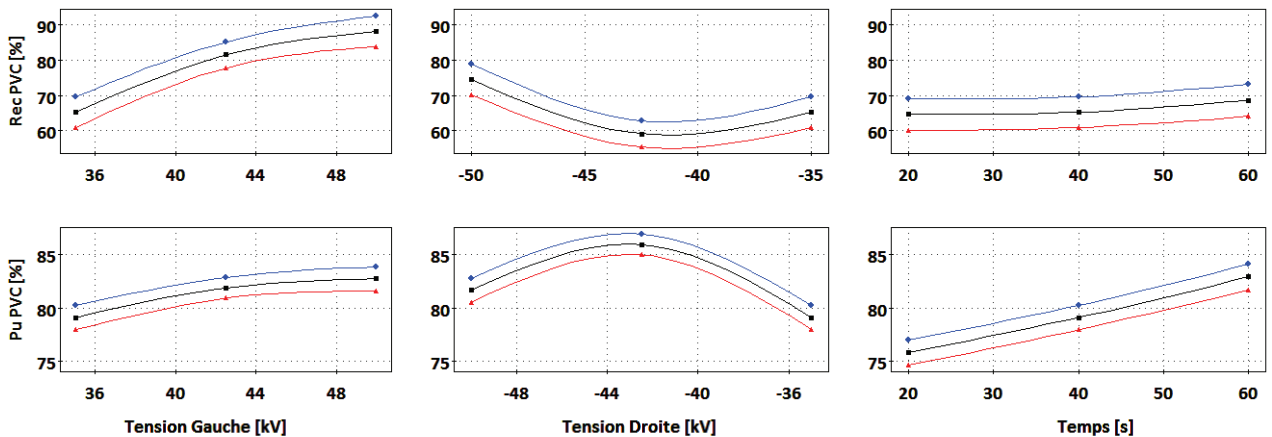


Figure.IV.9. Effets de chaque facteur sur la réponse pour le produit PVC

b) Produit ABS

En analysant la figure IV.10, on constate que :

- ✓ En augmentant la tension droite négative, le taux de récupération diminue sensiblement, alors que le taux de pureté augmente et reste constant jusqu'à la valeur centrale de l'intervalle puis diminue sensiblement.
- ✓ En augmentant la tension positive droite, les taux de récupération et de pureté sont proportionnels: En augmentant la tension négative droite, la récupération et la pureté diminuent jusqu'à la valeur centrale de l'intervalle puis augmentent. Leurs variations sont insignifiantes.
- ✓ Le temps de chargement n'influe pas sur le taux de récupération et sur celui de pureté

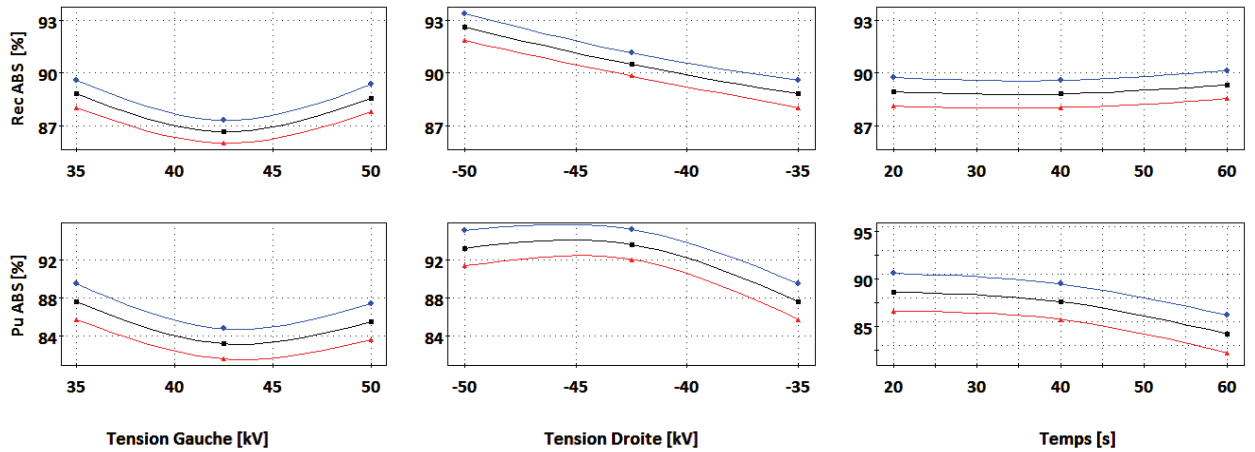


Figure.IV.10 : Effets de chaque facteur sur la réponse pour le produit ABS

c) produit HIPS

En analysant la figure IV-11, on constate que :

- ✓ La tension gauche positive appliquée n'influe pas sur le taux de récupération; alors que le taux de pureté augmente considérablement avec cette même tension.
- ✓ En augmentant la tension négative droite, les taux de récupération et de pureté sont inversement proportionnels : Le taux de récupération augmente alors que celui de la pureté diminue jusqu'à atteindre la valeur centrale de l'intervalle ; au-delà de cette valeur les deux taux deviennent proportionnels : ils diminuent sensiblement. Le temps de chargement n'influe pas sur le taux de récupération, alors qu'il influe sensiblement sur le taux de pureté.

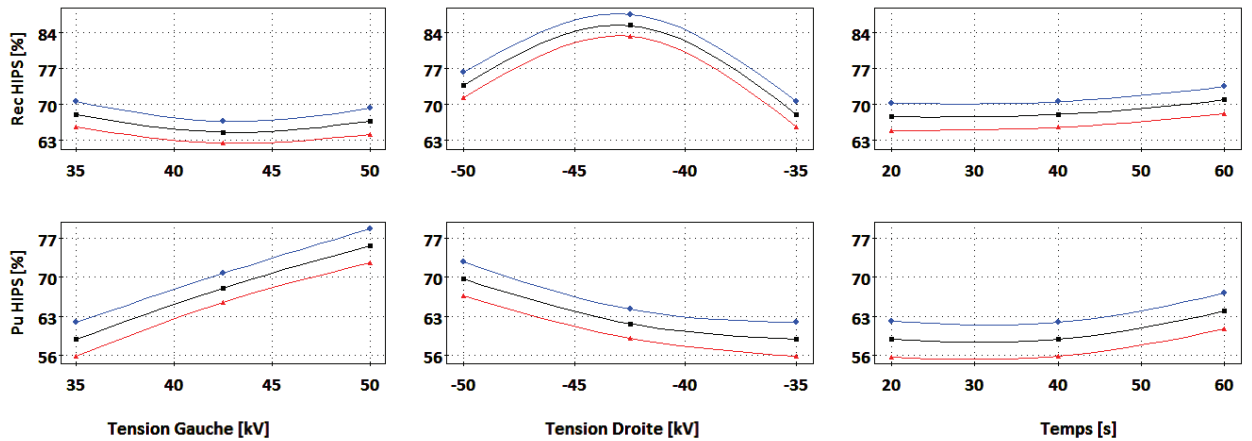


Figure.IV.11 : Effets de chaque facteur sur la réponse pour le produit HIPS

IV.6. DETERMINATION DU POINT DE FONCTIONNEMENT OPTIMAL

On utilise la fonction de réponse, (le logiciel MODDE 5.0 (*MODELing and DEsign*) qui est un programme exécutable sous Windows (réalisé par *Umetrics AB, Suède*) pour la création et l'évaluation statistique des plans d'expériences [48]. Il propose des réponses prédites en fonction des paramètres : tensions appliquées et temps de chargement (figure.IV.12).

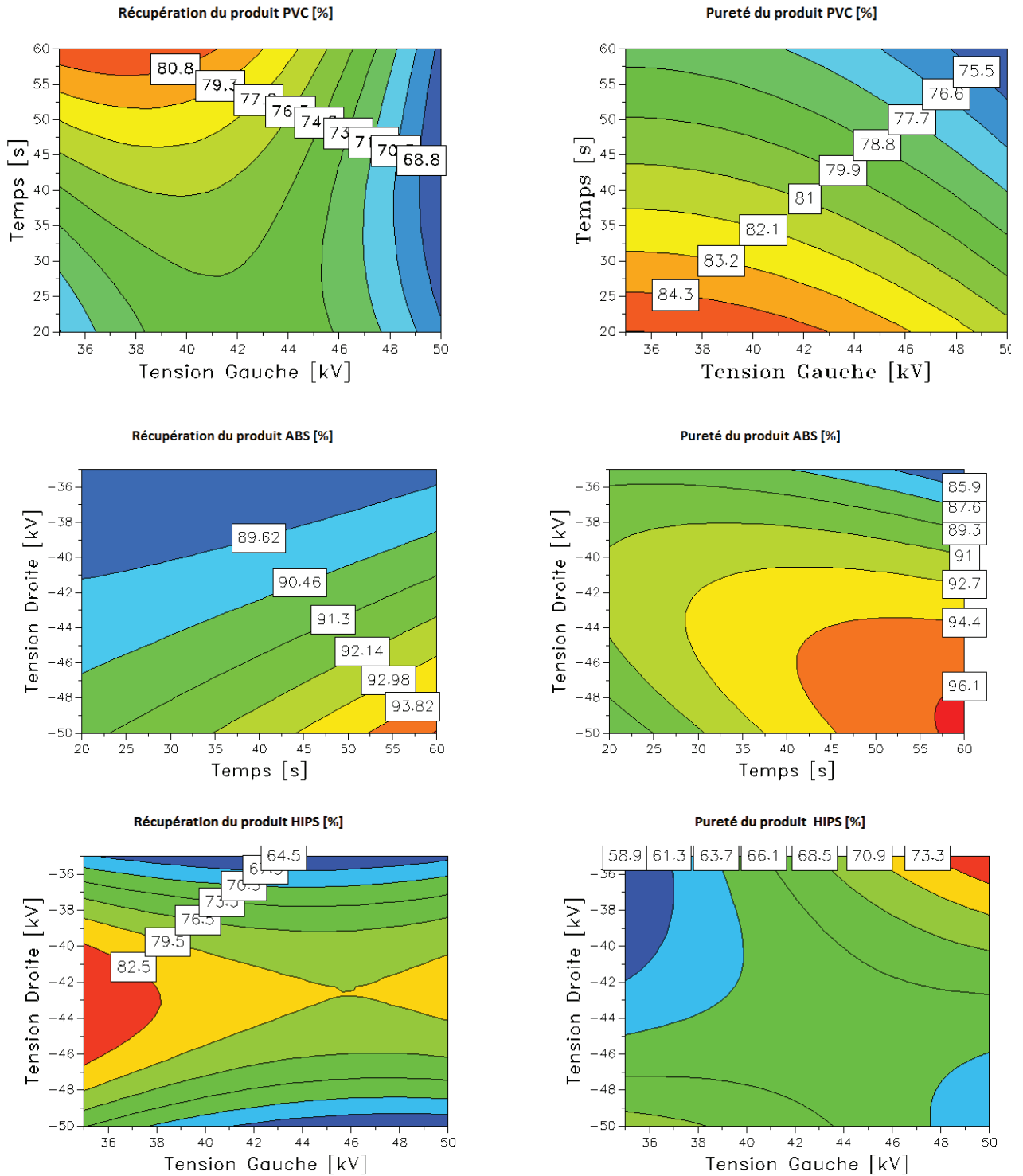


Figure.IV.12. Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0 en fonction des paramètres (tensions, temps de chargement)

Selon le logiciel MODDE 5.0, la meilleure séparation électrostatique correspond aux valeurs optimales suivantes (figure.IV.13):

- ✓ Une tension appliquée gauche de 35 kV
- ✓ Une tension appliquée droite de -46.85 kV
- ✓ Le temps de chargement de 60s.

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max	
1	tension Gauche	Free		35	50	1	Rec PVC	Maximiz	1	92.0161	95.4789
2	tension Droite	Free		-50	-35	2	PU PVC	Maximiz	1	86.5266	87.8024
3	Temps	Free		20	60	3	REC ABS	Maximiz	1	95.841	96.937
						4	PUABS	Maximiz	1	95.5653	97.2446
						5	RECHIPS	Maximiz	1	83.4414	85.5012
						6	PUHIPS	Maximiz	1	82.5864	84.2917

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
tension Gauche	tension Droite	Temps	Rec PVC	PU PVC	REC ABS	PUABS	RECHIPS	PUHIPS	iter	log(D)
35	-50	60	81.7275	78.4242	94.729	96.405	74.0516	76.8565	3594	1.3153
35.0016	-46.8509	60	71.7862	83.0938	93.4507	95.9651	82.9956	72.4386	5002	1.3044
50	-47.9391	20.0235	67.3536	83.8495	95.7335	86.4038	71.7734	66.2686	2637	1.6605
50	-35.0498	59.9785	85.3184	86.5588	85.4529	79.6896	71.7237	75.163	5001	1.7019
35.5534	-42.2551	59.6975	64.8033	86.4808	91.3064	92.6096	86.3282	67.5934	5003	1.5429
35	-50	60	81.7275	78.4242	94.729	96.405	74.0516	76.8565	3594	1.3153
35	-43.09	59.9998	64.9236	86.076	92.0294	93.9695	86.9777	68.352	2745	1.5027
36.2499	-42.7278	59.9998	66.1085	86.4866	91.031	92.1046	85.8712	68.1765	5004	1.5244

Figure.IV.13 : Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0

Les résultats expérimentaux obtenus en utilisant les valeurs données par le logiciel sont comme suit :

Tableau.IV.12 : comparaison des résultats du logiciel et expérimentaux

	Tension gauche	Tension droite	Temps	Rec PVC %	Pu PVC %	Rec ABS%	Pu ABS%	Rec HIPS%	Pu HIPS%
Résultats du logiciel	35	-46.85	60	71.78	83.09	93.48	95.96	82.99	72.43
Résultats expérimentaux	35	47	60	74.1	81.33	79.63	75.47	92.49	75.47

IV.7.Séparation de trois particules avec le séparateur à tapis roulant

Les particules sont chargées dans un dispositif triboélectrique (par deux hélices) en suite mis sur le tapis roulant qui va les transporter jusqu'a l'électrode haute tension positive; les particules chargées de signe opposer (-) à celle de l'électrode HT+ appliqué sont attirés et ceux de même signe seront repoussés.

Voici une représentation schématique du dipostif de séparation triboélectrique à tapis roulant et son fonctionnement :

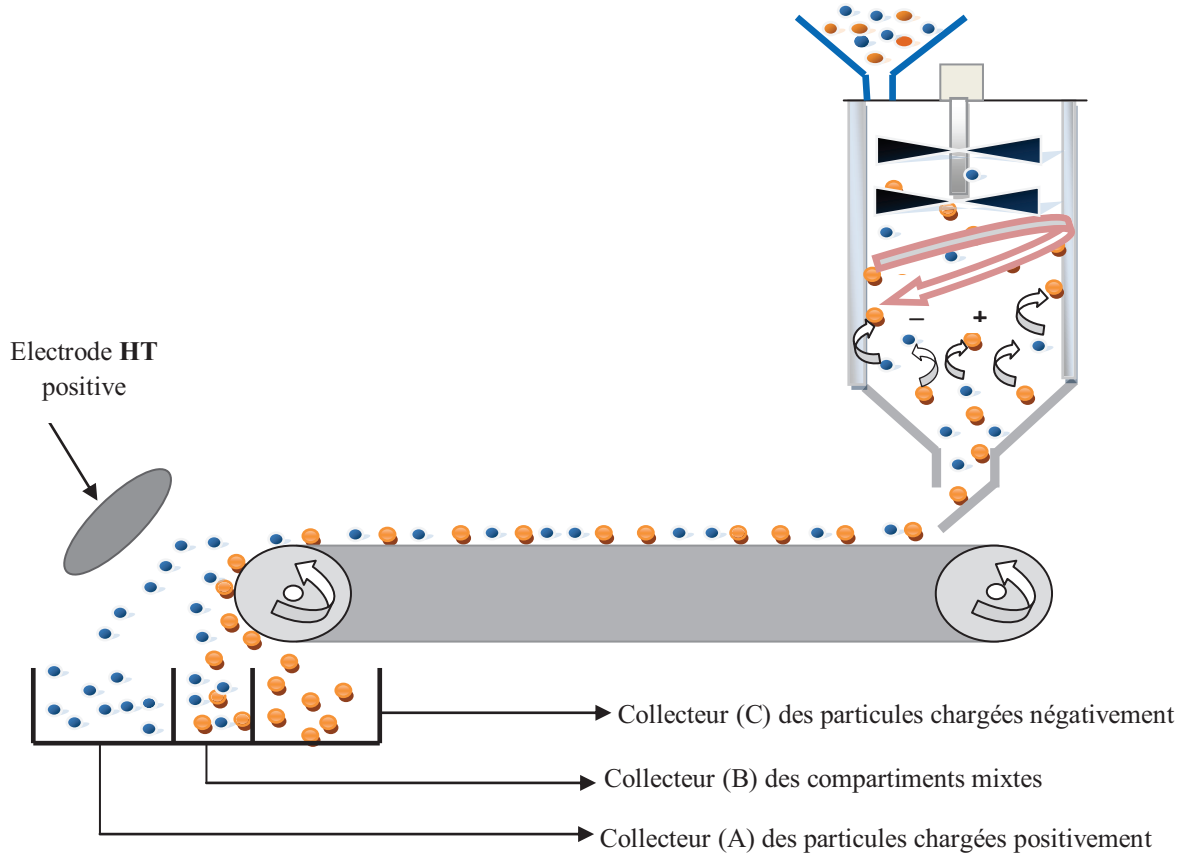


Figure IV.13 : Représentation schématique du séparateur électrostatique à tapis roulant.

Le collecteur est divisé en trois compartiments : un compartiment (A) destiné à collecter les particules de charge négative, un compartiment (B) destiné au produit mixte et un autre (C) destiné aux particules portant une charge positive. A la fin de chaque expérience on mesure la masse du produit trouvé dans chacune des trois parties de collecteur.

IV.7.1 Déroulement des expériences

a) Mélange de 2 particules

Dans un premier temps on va procéder aux tests de séparation des échantillons des mélanges granulaires comportent deux particules (PVC-PC, PEHD-PVC, PEHD-PC) avec le séparateur à tapis roulant. On mesure après le processus de séparation la charge acquise par les particules et la masse récupérer dans chaque collecteur. On garde les mêmes conditions pour toutes les expériences :

- Masse du mélange granulaire 40g (50%-50%).
- Tension appliqué à l'électrode couronne 30 kV.
- Vitesse du ventilateur 2000tr/mn .
- Humidité égale à 49% et la température $T=26^{\circ}$.

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux IV.13, IV.14, IV.15.

• Mélange PEHD-PC

Le tableau IV.13 Résultats de séparation pour le mélange (PEHD/PC)

	Charge (nC)	Masse (g)	Charge massique (nC/g)	Récupération en (%)
PEHD	-28,175	15,01	-1,87	75,05
PC	94,24	19,645	4,79	98,22

• Mélange PVC-PEHD

Le tableau IV.14 Résultats de séparation pour le mélange (PVC/PEHD)

	Charge (nC)	Masse (g)	Charge massique (nC/g)	Récupération (%)
PVC	-89,47	18,92	-4,72	94,62
PEHD	-50,36	19,66	-2,56	98,32

• mélange PVC/PC

Le tableau IV.15 Résultats de séparation pour le mélange (PVC/PC)

	Charge (nC)	Masse (g)	Charge massique (nC/g)	Récupération en %
PC	90,09	18,99	4,74	94,95
PVC	-101,09	19,84	-5,09	99,2

La récupération est calculée par le rapport entre la masse de chaque produit récupéré sur 20g (masse utilisé).

D'après les résultats obtenus on remarque que le signe de la charge acquise par les produits (PC, PEHD, PVC) ne change pas quel que soit la nature du mélange granulaire introduit ; cela est due au contact particule- paroi dans le chargeur à ventilateur. L'ordre de grandeur de cette charge différent d'une particule par rapport à l'autre. Il est de l'ordre de :

- 5nC/g pour le PC
- -2nC/g pour le PEHD.
- -5nC/g pour le PVC

La faible charge acquise par les granules de PEHD par rapport à celle du PVC fait qu'il tombe dans la zone mixte (B) du collecteur car la tension appliqué (30kV) n'est pas suffisante pour qu'il soit attirer vers le bac 1 ; c'est pour sa que malgré les granules de PVC –PEHD se sont chargées avec le même signe mais il y eu comme même une très bonne séparation. Les granules de PC vont être repoussé par l'électrode de HT car le signe de sa charge acquise est positive et vont tomber sur la partie gauche du collecteur (C).

b) Séparation de 3 particules

On prend les mêmes particules PC, PEHD, PVC de masse 60g (20g de chaque de chaque produit) et on garde les mêmes conditions d'expérience (figure IV.14).



Figure IV.14 : photographie de 3 particules (PVC/PEHD/PC)

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.16.

Tableau.IV.16 Résultats de séparation pour le mélange (PVC/PC/PEHD)

	Charge (nC)	Masse (g)	Charge Massique (nC/g)	Récupération en %	Pureté (%)
PEHD	-31,175	16,2	-1,92	81,19	77,37
PC	94,24	17,67	5,33	88,35	92,18
PVC	-91,42	18,69	-4,89	93,45	87,64

A noter que les granules se sont répartis dans le collecteur comme suit:

- les granules de PEHD dans le collecteur B.
- les granules de PVC dans le collecteur A.
- les granules de PC dans le collecteur C.

D'après le tableau IV.16 on remarque que les granules de PVC et PEHD ont acquis une charge de signe négative avec des degrés différents et que le PC prend une charge positive. Cela est dû au type de collision dans le chargeur à ventilateur avec la parois en PMMA. On peut représenter cela dans une série triboélectrique qui explique la tendance de chaque particule avec la parois en PMMA.



Figure IV.15 : série triboélectrique obtenue avec la paroi PMMA

L'électrode HT+ attire les particules de PVC qui ont une grande charge négative vers le compartiment (A) avec une force électrique plus grande par rapport à celle qui attire les granules du PEHD ($Q_{PVC} > Q_{PEHD}$), ce qui explique la répartition des granules dans le collecteur.

-Les granules de PC sont repoussées par l'électrode (dû au signe de leur charge) et reste collé sur la bande transporteuse ce qui explique leur position dans le collecteur.

IV.8.CONCLUSION

La diversification des matériaux à recycler stimule la recherche et le développement de nouvelles techniques de séparation électrostatique. Les deux installations ont prouvé leurs efficacités dans la séparation des mélanges contenant trois produits différents, malgré que le séparateur tribo-aéro-électrostatique reste en avance par rapport au séparateur à tapis roulant qui reste une installation coûteuse.

Les résultats obtenus confirment que les paramètres étudiés (les tensions appliquées, le temps de chargement) ont une influence considérable sur l'efficacité de la séparation.

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

Les résultats obtenus avec le séparateur à tapis roulant sont très prometteuse et qui peuvent être exploités dans le futur en portant des améliorations à l'installation.

CHAPITRE V

Neutralisation des matériaux granulaires isolants

CHAPITRE V

NEUTRALISATION DES MATERIAUX GRANULAIRES ISOLANTS

Les matériaux granulaires isolants peuvent acquérir une grande quantité de charge qu'ils peuvent garder pour une durée beaucoup plus longue que nécessaire au bon déroulement d'un processus séparation électrostatique, en effet un isolant peut conserver une charge pendant des heures voire même des jours.

L'élimination de ces charges statiques des produits obtenus par la séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants est un problème parfois délicat à résoudre.

On a vu dans les chapitres précédents que le principe de base de tout dispositif de séparation électrostatique des mélanges de matériaux isolants granulaire est de charger par effet triboélectrique et de les soumettre ensuite à l'action d'un champ électrique intense. La charge acquise par les granules séparées s'accompagne des nuisances électrostatiques dont la prise en compte est indispensable dès la phase de conception d'un nouveau procédé.

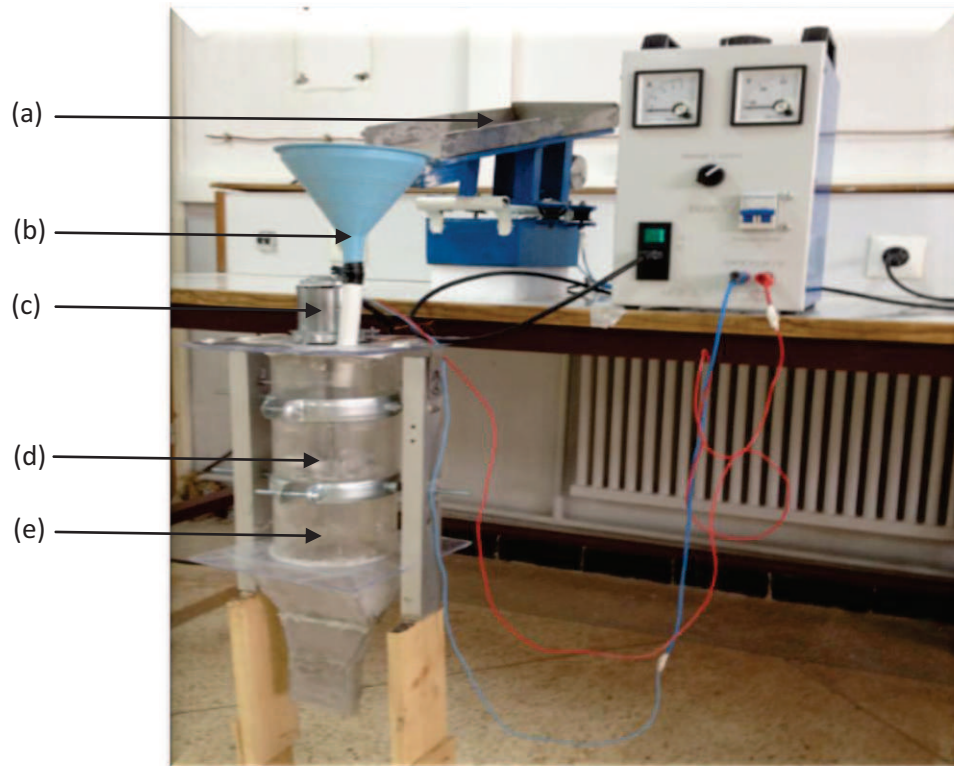
L'objectif de ce chapitre est modéliser et optimiser une solution d'élimination de la charge statique résiduelle des produits granulaires isolants obtenus après séparation électrostatique. La charge électrique acquise est assurée par un chargeur triboélectrique à ventilateur, La neutralisation s'effectue sur les particules transporter à l'aide d'une bande transporteuse et déposé dans une cage de Faraday.

V.1 Procédure expérimentale

a) Matériaux utilisés

Pour l'étude de la neutralisation nous avons utilisés les différents particules présentes dans le laboratoire qui constitue la majorité des produits plastiques provenant des DEEE (ABS,HIPS,PVC,PC,PA). Chaque échantillon ayant une masse de 10 gramme. Durant toutes les expériences la température et l'humidité enregistrées sont respectivement entre 20°C à 25°C et 30% à 45%.

Le dispositif de chargement triboélectrique utilisé dans nos expériences a été réalisé au sein du laboratoire APELEC de l'université de Sidi Bel Abbés dont le principe de fonctionnement est décrit dans le chapitre I.



FigureV.1 : Photographie du dispositif de chargement Triboélectrique

- a) Vibro-transporteur.
- b) L'entonnoir.
- c) Moteur à courant continu.
- d) Deux hélices (ventilateur).
- e) Le cylindre.

Le chargeur triboélectrique à ventilateur a été utilisé parce qu'il permet aux différentes particules d'acquérir une charge très importante par rapport aux autres. Des essais préliminaires ont été faits pour évaluer la quantité de charge acquise par les particules. Les résultats de chargement sont montrés dans la figure V.2 avec une vitesse de rotation de hélice du chargeur à ventilateur 2000tr/mn et une masse de 10g.

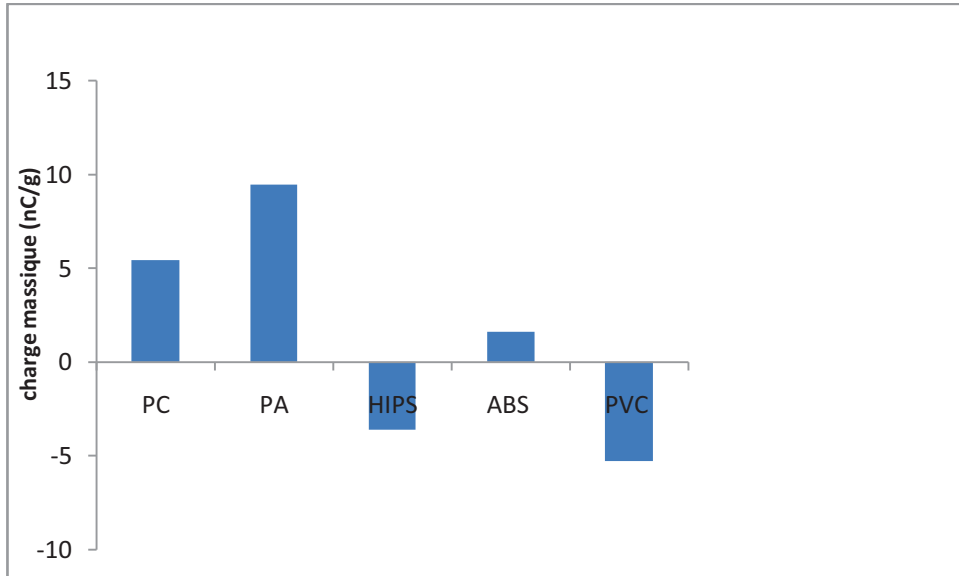


Figure V.2 Taux de chargement des différents granules avec le ventilateur

Les figures V.3 et V.4 illustrent le montage expérimental utilisé dans cette étude.

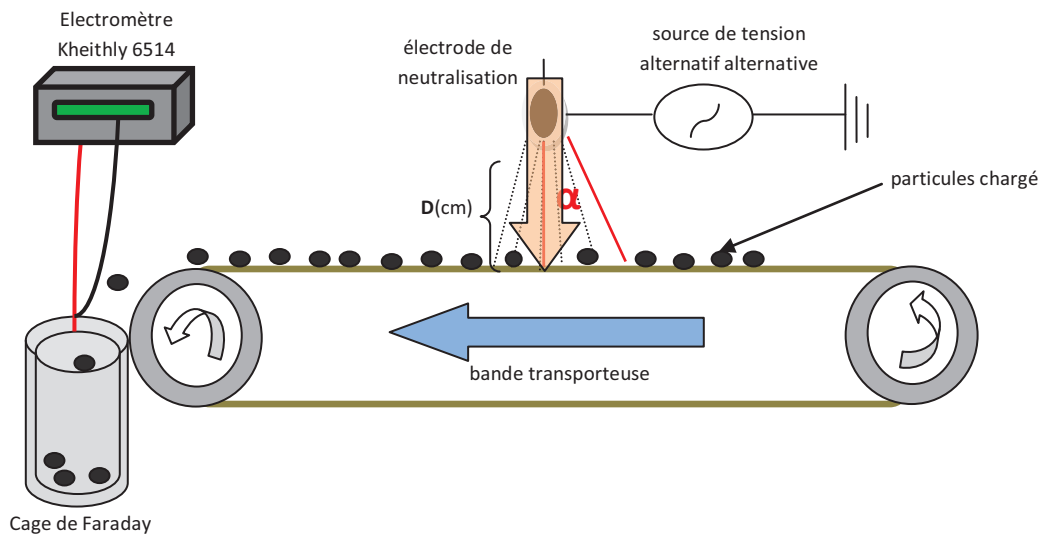


Figure V.3 Schéma du montage expérimental pour l'étude de la neutralisation des granules isolantes par décharge couronne alternative.

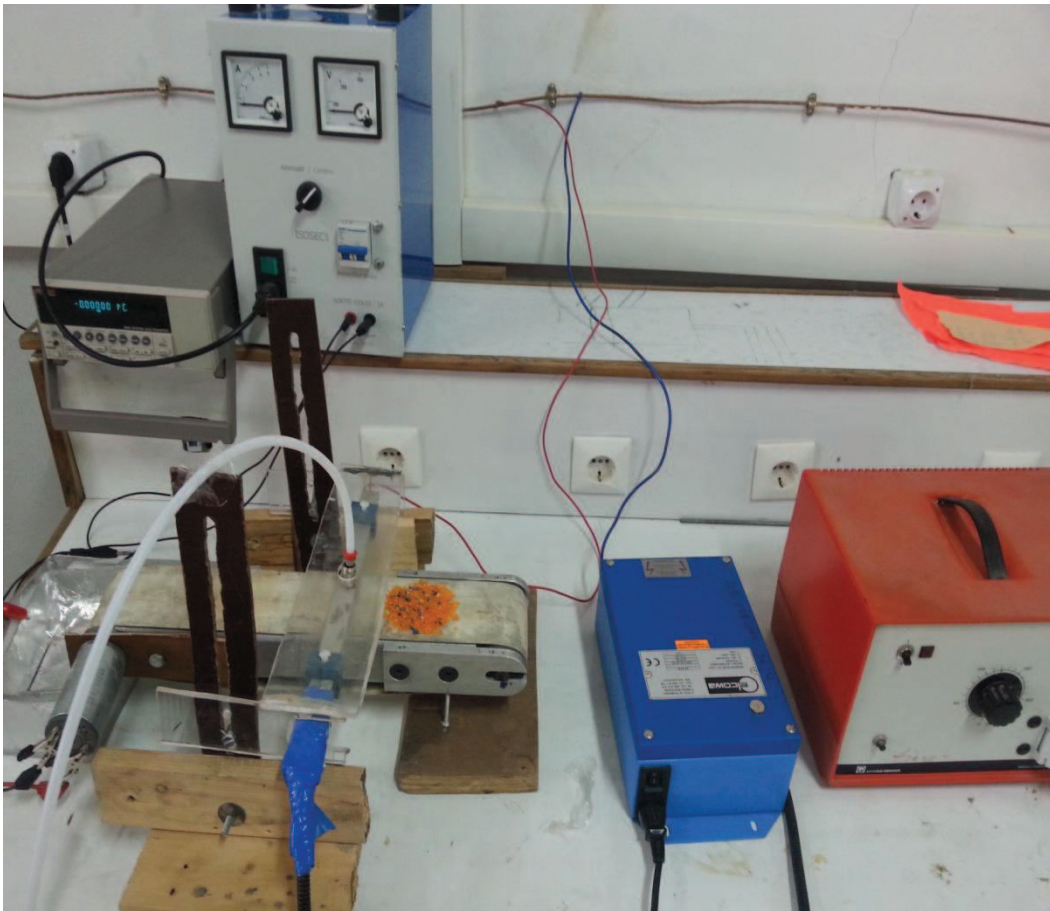


Figure V.4 Photographie du dispositif expérimentale

Le principe de fonctionnement de l'électrode de neutralisation reliée à une source de haute tension alternative est basé sur le principe de l'effet couronne. Chaque pointe reliée à la haute tension génère un champ électrique chargé d'ions positifs et d'ions négatifs (électrons).

Quand le matériau à traiter se trouve sous l'influence de ce champ électrique, un transfert d'électrons (ions négatifs) se produit jusqu'à la neutralisation des charges à la surface du matériau.

L'utilisation de l'air comprimé, dans le cas des électrodes soufflantes, permet de véhiculer le champ ionique, émis par les pointes, sur une plus grande distance augmentant ainsi la portée efficace de ces électrodes.

b) déroulement des expériences

Les expériences ont été faites sur les particules PC, PA, HIPS, ABS, PVC. L'échantillon pesé est introduit dans le chargeur à ventilateur. A la sortie du chargeur les granules tombent directement sur une cage de Faraday reliée à un électromètre, on prend alors la quantité de charge acquise Q_{avant} .

Ces mêmes granules chargés seront déposés sur le tapis roulant et passe à travers une zone de décharge couronne générée par une électrode haute tension alternatif. Les granules continuent leurs chemins jusqu'à arrivés à l'extrémité ou ils sont déposés sur une deuxième cage de Faraday reliée à un électromètre. On prend alors la deuxième mesure qui est le taux de chargement après neutralisation $Q_{\text{après}}$.

On quantifie alors le taux de neutralisation de la charge neutralisée en calculant le rapport de la charge juste avant et après la neutralisation avec la formule:

$$N_r(\%) = (1 - Q_{\text{après}}/Q_{\text{avant}}) * 100 \quad (\text{V.1})$$

Le taux de neutralisation obtenue est la valeur moyenne d'au minimum deux à trois mesures consécutifs.

Dans cette étude l'objectif était de connaitre l'influence de la tension, l'angle d'inclinaison, hauteur de l'électrode neutralisante et l'influence de l'air sur efficacité de la neutralisation mais aussi les conditions à remplir pour aboutir à une meilleure neutralisation possible en fonction de ces paramètres. Les quatre facteurs considérés doivent avoir une limite minimale et une limite maximale (niveau +1 et -1). Il était alors nécessaire d'effectuer des expériences servant comme guide au choix de ces niveaux limites notamment pour la tension et la hauteur. Un plan d'expériences de type composite a été utilisé à cette fin dont on donne les détails et les résultats plus loin.

V.2 Essais préliminaires

Des essais préliminaires ont été nécessaires pour établir les conditions de chargement par ventilateur. Le but est de charger les granules à un niveau maximale de charge acquise.

Le réglage de la valeur de chaque paramètre influe de façon significative sur le rendement de la neutralisation, et vu l'interdépendance de tous ces éléments entre eux, il est nécessaire de trouver le réglage optimal afin d'assurer une efficacité maximale pour éliminer toutes les charges résiduelles. L'étude expérimentale permet d'analyser l'influence de chaque paramètre afin d'aboutir à un réglage optimum du processus de neutralisation avec tapis

roulant. Les valeurs et dimensions de certains autres paramètres sont fixées et maintenues constantes pour toutes les expériences, à savoir :

- La vitesse du tapis roulant 30tr/mn (temps de séjour des particules sous électrode de neutralisation).
- La vitesse de rotation de l'hélice du chargeur à ventilateur 2000tr/mn.
- La masse égale à 10g.
- La fréquence de la tension est de 50 Hz

A noter que l'électrode de neutralisation dispose d'un point pour injecter l'air ce qui permet d'ajouter un autre paramètre qui va s'avérer très influent sur le taux de neutralisation. Les expériences se feront d'une part sans injecter l'air et d'autre part avec une injection de l'air. On utilise un compresseur réglé à une position de 1 m/s pour les expériences avec air.

V.2.1 Influence de l'angle d'inclinaison

Nous avons étudié l'influence de l'angle d'inclinaison de électrode de neutralisation en la faisant varier de 0^0 à 45^0 degré g avec un pas de 15 degré pour :

- La valeur de Tension appliquée est 6 kV.
- La hauteur de électrode 2 cm.
- Deux séries d'expériences ont été faite, une avec air et d'autre sans air.

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux V-1 et V-2 .

Tableaux V-1 influence de angle d'inclinaison "sans air"

Produit angle	PC	HIPS	ABS	PVC	PA
0	86,52	80,55	77,33	85,51	88,79
15	95,37	77,95	75,97	88,04	91,65
30	88,88	71,87	74,11	87,91	91,88
45	87,33	70,53	73,28	86,05	90,67

Tableaux V-2 influence de angle d'inclinaison "avec air"

Angle \ Produit	PC	HIPS	ABS	PVC	PA
0	98,87	75,76	73,91	88,45	97,27
15	95,77	80,87	93,37	90,4	99,75
30	92,35	75,62	78	84,72	95,05
45	90,66	75,24	76,95	82,5	92,08

Les résultats des tableaux V-1 et V-2 sont représentés dans les figures V.4 et V.5.

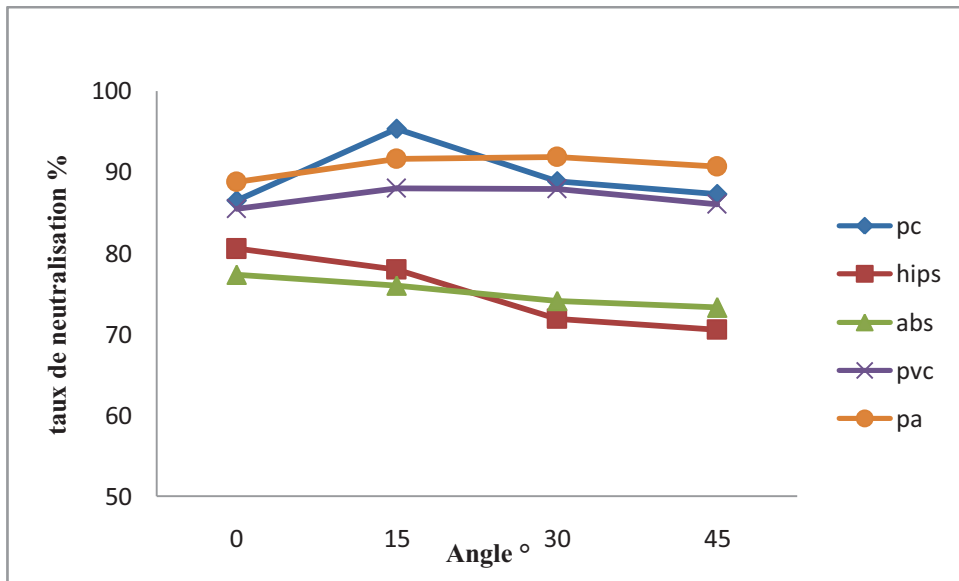


Figure V.4 Taux de neutralisation en fonction de l'angle d'inclinaison "sans air".

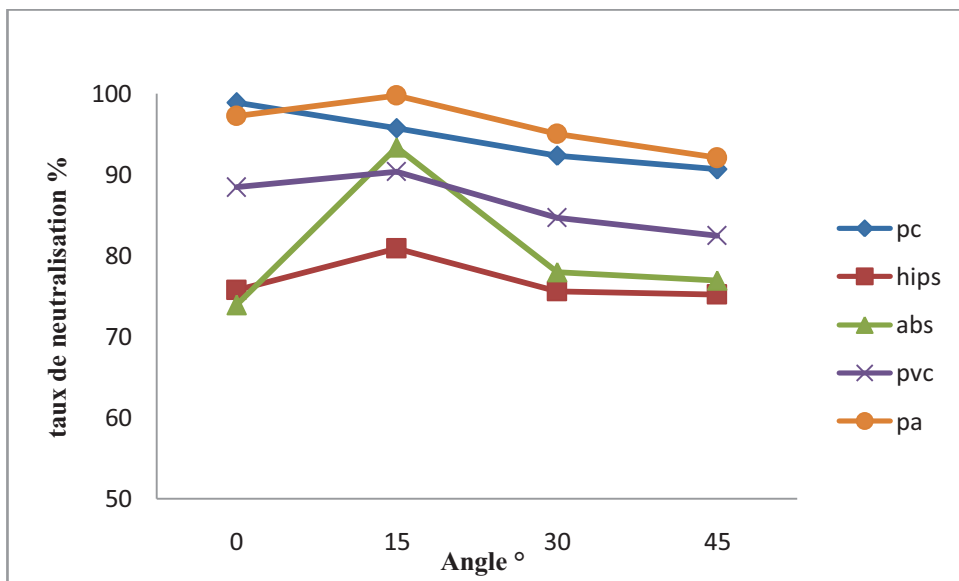


Figure V.5 Taux de neutralisation en fonction de l'angle d'inclinaison "avec air".

Les figures 4.V et 4.6 représentent le taux de neutralisation en % des particules isolantes pour différents angle d'inclinaison de électrode alternative. Nous remarquons d'après ces figures que la neutralisation atteint son niveau maximale entre un angle de 0 jusqu'a 30 au delà de cette angle le taux de neutralisation commence diminuer car les pointes de l'électrode n'agit que sur une partie de surface de la couche. A noter que les résultats obtenue avec l'injection de l'air est plus intéressante que celle avec une neutralisation sans air pour toutes les particules utilisés dans les expériences.

V.2.2 Influence de la tension appliqué

Nous avons étudié l'influence de tension de électrode de neutralisation en la faisant varier de 0 à 7 kV avec un pas de 1 kV pour :

- L'angle d'inclinaison de l'électrode est de 15 degré.
- La hauteur de électrode 2cm.
- Deux séries d'expériences ont été faite, une avec air et une autre sans air.

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux V-3 et V-4 .

Tableaux V-3 influence de la tension "sans air "

produit tension	PC	HIPS	ABS	PVC	PA
2	49,58	13,71	37,12	41,82	73,93
3	51,55	18,88	41,92	46,96	75,34
4	86,52	80,55	73,78	85,51	88,79
5	88,33	82,54	78,36	88,14	88,23
	85,37	81,05	94,72	90,78	86,20
7	106,9	100,02	102,69	101,36	100,32

Tableaux V-4 influence de la tension " avec air "

Produit Tension	PC	HIPS	ABS	PVC	PA
2	54,65	3,44	5,45	36,42	72,72
3	68,42	7,69	10	40,84	73,63
4	98,87	75,76	73,91	88,45	97,27
5	99,14	76,8	71,66	87,33	96,09
6	97,5	84	85,71	90,16	94,44
7	108,65	103,64	101,36	101,25	104,61

Les résultats des tableaux V-3 et V-4 sont représenté dans les figures V.6 et V.7

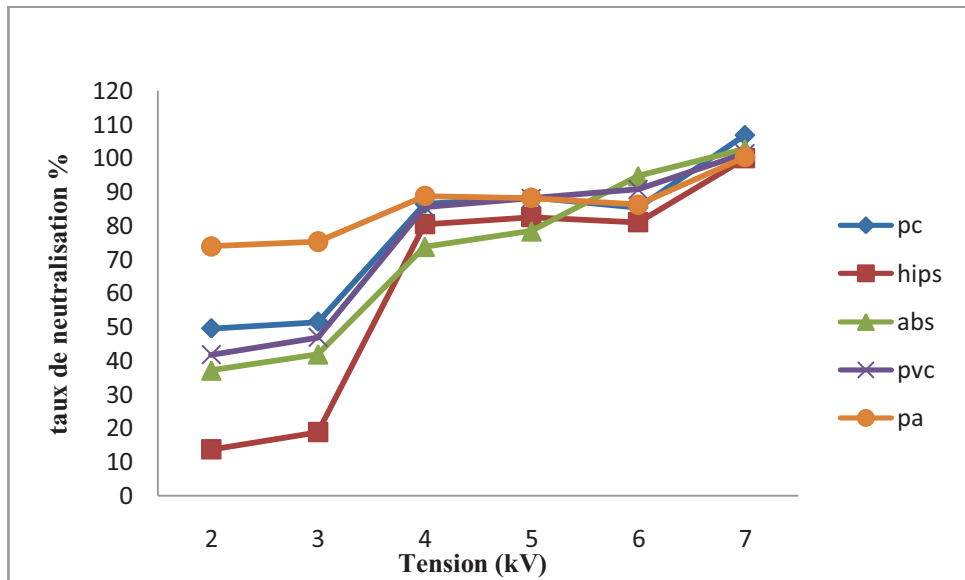


Figure V.6 Taux de neutralisation en fonction de la tension appliqué" sans air".

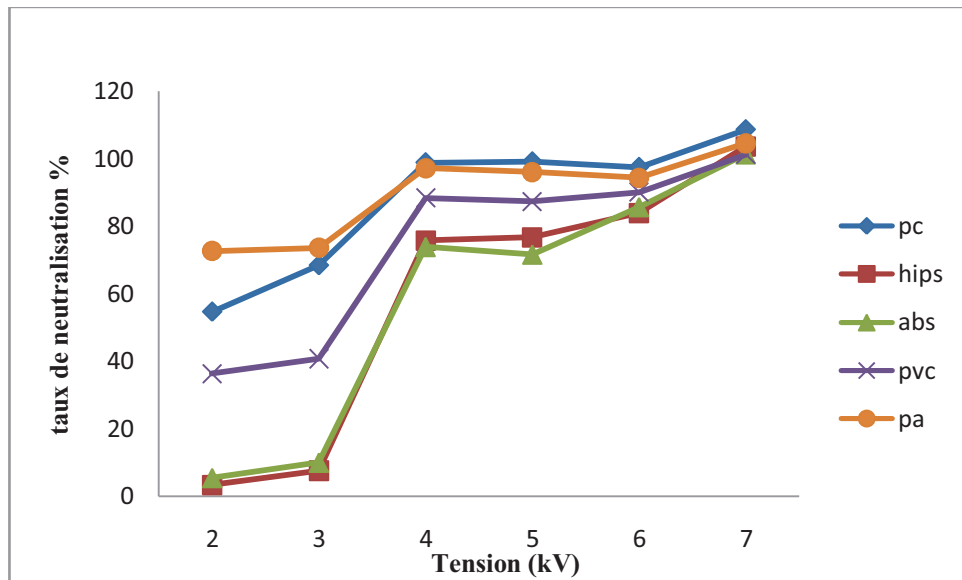


Figure V.7 Taux de neutralisation en fonction de la tension appliqué "avec air".

La figure V.6 et V.7 montre les variations du taux de neutralisation (valeurs moyennes d'au minimum trois mesures) en fonction de la tension. On note que le taux de neutralisation atteint un niveau maximale entre des valeurs de la tension $4 < V_n < 6$ kV; en effet la tension aux faibles valeurs de V_n , les charges créés par la décharge couronne sont insuffisantes à la neutralisation du matériau. Au delà de 6kV le taux de neutralisation dépasse la valeur maximale de neutralisation (100%) et risque de se chargé les granules à nouveau car il y a une création d'important charges créés par la décharge couronne . Pour des raisons de sécurité de l'installation et du phénomène de chargement , la tension neutralisante maximale a été fixée à 6 kV.

V.2.3 Influence de la hauteur de l'électrode

Nous avons étudié l'influence de la hauteur de électrode de neutralisation en la faisant varier de 1 à 4 cm degré g avec un pas de 1 cm pour :

- L'angle d'inclinaison de électrode 15 degré.
- La tension appliqué 5kV.
- Deux séries d'expériences ont été faite, une avec air et une autre sans air.

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux V-5 et V-6 .

Tableaux V-5 influence de la distance " sans air "

Produit Distance	PC	HIPS	ABS	PVC	PA
1	81,01	93,66	89,76	93,87	94,91
2	85,96	94	93,54	94,70	91,84
3	76,92	90,16	84,72	93,38	90,02
4	69,48	78,35	75,32	91,36	78,16

Tableaux V-6 influence de la distance " avec air "

Produit Distance	PC	HIPS	ABS	PVC	PA
1	86,43	98,78	91,57	94,05	89,57
2	71,92	95,79	81,86	86,56	92,5
3	77,53	96,50	85,67	88,88	93,57
4	62,36	81,26	78,48	75,39	80,96

Les résultats des tableaux V-5 et V-6 sont représenté dans les figures V.8 et V.9

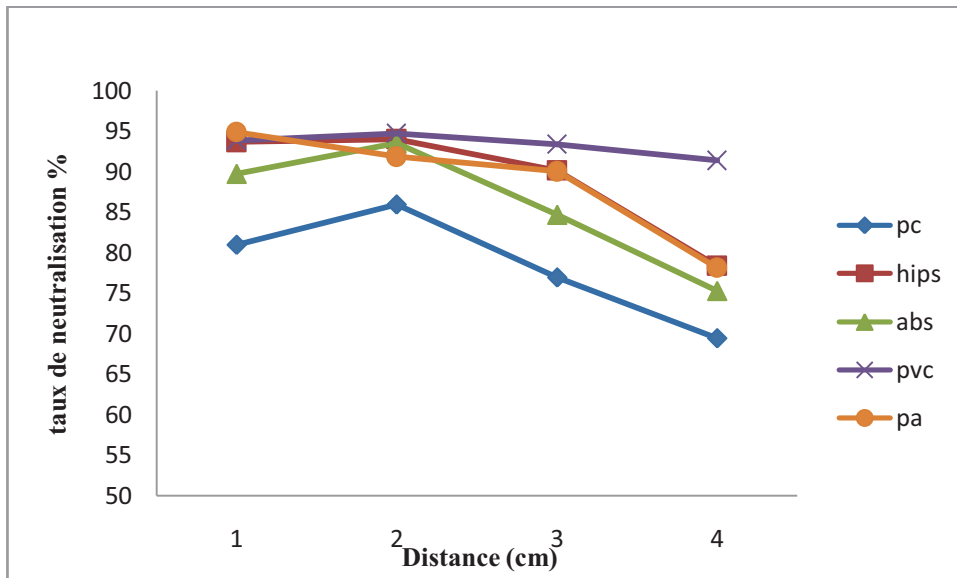


Figure V.8 Taux de neutralisation en fonction de la hauteur de électrode HT "sans air".

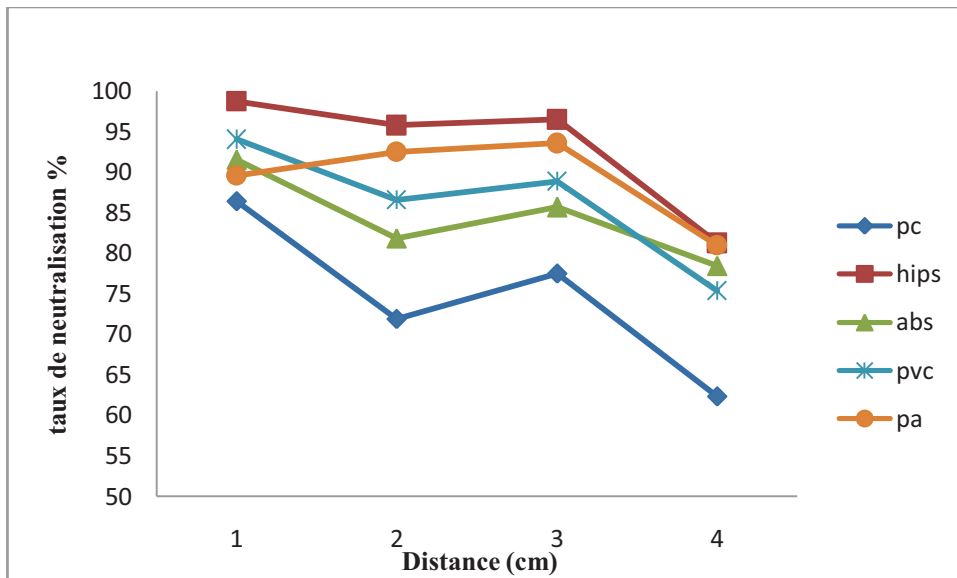


Figure V.9 Taux de neutralisation en fonction de la hauteur de électrode HT "avec air".

D'après ces figures le taux de neutralisation ne varie pas beaucoup et reste pratiquement le même pour des hauteurs variant de 1cm jusqu'a 3cm, les charges sont efficacement éliminées pour de petites distance pour lesquelles le champ électrique est le plus intense. Dans ce cas l'influence de l'insertion de l'air devient très importante. Le taux de neutralisation commence a diminuer à partir d'une hauteur de 4cm ce qui est une chose normale vue la distance séparant l'électrode haute tension alternatif de la couche de surface des particules à neutraliser. Pour le plan d'expérience, les valeurs limites de la position ont été fixées à $d_{\min} = 1\text{cm}$ et $d_{\max} = 4\text{cm}$.

V.3.Modélisation par plan d'expérience composite

Les expériences réalisées dans cette partie de la neutralisation avaient pour objectif de mettre en évidence l'influence des quatre facteurs (tension neutralisante, hauteur de l'électrode couronne, angle d'inclinaison et l'influence de l'air) sur l'efficacité de la neutralisation de tous les particules plastique cités auparavant .Pour cela il fallait modéliser le système pour ensuite essayer de maximiser la sortie qui est le taux de neutralisation.

Le domaine de variation de la tension neutralisante ($V_{\min} = 4\text{kV}$, $V_{\max} = 6\text{k V}$) et la hauteur de l'électrode ($d_{\min} = 1\text{ cm}$ et $d_{\max} = 4\text{ cm}$) ont été fixés en se basant sur les résultats des mesures préliminaires déjà présentés. La valeur maximale de l'angle d'inclinaison de électrode neutralisante est de 30^0 et la valeur minimale, elle est de 0^0 . Quant à la valeur du débit d'air elle a été choisi suivant la limite maximale égale 2 m/s régler sur la soufflante et une autre position 1 m/s ; sans oublier le débit 0 qui est l'expérience ou la vitesse de l'air est égale à 0.

Le plan d'expérience composite réalisé comporte 4 expériences au centre, 8 expériences sur les axes du domaine en plus des 16 expériences du plan factoriel complet, ce qui donne un total de 28 expériences. Chaque expérience est répétée trois fois où les valeurs moyennes des taux de neutralisation en (%) issues sont regroupées dans le tableau V.7 pour chaque produit . Les conditions ambiantes sont $T=24\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $\text{RH}=43\text{ \%}$.

Tableau V.7 : Résultats du plan d'expérience composite

Tension (kV)	Débit d'air (m/s)	Angle (°)	Distance (cm)	PC	HIPS	ABS	PVC	PA
4	0	0	1	86,17	67,25	73,33	81,71	78,92
6	0	0	1	89,31	75,22	70,27	86,86	80,86
4	2	0	1	94,72	87,73	99,18	94,26	97,55
6	2	0	1	92,86	93,55	97,99	94,62	95,93
4	0	30	1	87,76	66,25	71,15	86,84	88,27
6	0	30	1	92,68	76,67	74,23	89,57	89
4	2	30	1	98,49	80,47	93,45	95,9	96,55
6	2	30	1	99,3	82,14	91,78	95,79	97,33
4	0	0	3	90,11	60,53	54,44	81,82	84,62
6	0	0	3	95,38	72,56	66,67	88,15	89,42
4	2	0	3	94,05	84,73	79,39	88,11	97,63
6	2	0	3	95,72	88,93	80,23	91,75	96,83
4	0	30	3	88,59	63,26	59,43	79,92	84,77
6	0	30	3	95	80	74,74	87,89	90,2
4	2	30	3	95,47	76,94	68,89	84,12	89,04
6	2	30	3	99,12	87,76	81,41	90,44	93,16
4	1	15	2	95,46	74,1	85,28	86,3	91,37
6	1	15	2	97,24	87,22	87,15	91,79	92,38
5	0	15	2	88,76	69,67	64,68	84,59	86,57
5	2	15	2	95,03	89,55	88,12	90,71	97,65
5	1	0	2	96,11	84,8	79,29	94,82	91,41
5	1	30	2	98,71	78,4	82,73	95,71	93,9
5	1	15	1	90,11	85,28	80,83	86,71	90,83
5	1	15	3	91,57	80,89	72,46	84,47	88,44
5	1	15	2	94	84,21	76,96	89,55	91,22
5	1	15	2	95,23	84,5	81,55	88,57	91,73
5	1	15	2	94,84	84,17	83,91	90	92,82

Les résultats des mesures ont été traités avec le logiciel des plans d'expériences MODDE 5. Avec les données présentées dans le tableau V.7, le modèle brut obtenu est :

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

Un effet sera significatif au risque de 5% avec $v=n-p=27-15=12$ $t_{crit}(0.05 ; 12)=2.179$ (voie l'annexe), si son test statistique « t_i » est supérieur à 2.179. On obtient le tableau 5. pour la neutralisation de PC.

Tableau V.8 Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation du PC

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation de PC	Constante	94,49		
	U	1,43	15,38	Significatif
	D	2,83	30,41	Significatif
	An	1,14	12,33	Significatif
	di	0,75	8,11	Significatif
	U*U	1,95	20,98	Significatif
	D*D	-2,5	26,83	Significatif
	An*An	3,01	32,36	Significatif
	di*di	-3,55	38,16	Significatif
	U*D	-0,96	10,37	Significatif
	U*An	0,47	5,07	Significatif
	U*di	0,62	6,70	Significatif
	D*An	0,74	8,03	Significatif
	D*di	-0,88	9,50	Significatif
An*di	-0,76	8,21	Significatif	

Et pour l'analyse de la variance de neutralisation du PC on trouve :

Tableau V.9 Analyse de la variance pour la neutralisation du PC

Réponses	Variation due à	somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
pureté de PVC	Liaison	339,49	14	24,25	103,49
	Résidus	2,81	12	0,23	
	Totale	342,30	26	13,16	

En faisant le même calcul pour les autres réponses (neutralisation du HIPS,ABS,PVC et PA), on trouve les tableaux suivant :

Tableau V.10 Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation du HIPS

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation de HIPS	Constante	83,17		
	U	4,59	11,32	Significatif
	D	7,79	19,20	Significatif
	An	-1,30	3,20	Significatif
	di	-1,05	2,59	Significatif
	U*U	-1,95	4,80	Significatif
	D*D	-3,00	7,39	Significatif
	An*An	-1,01	2,49	Significatif
	di*di	0,47	1,16	Non significatif
	U*D	-1,54	3,79	Significatif
	U*An	0,60	1,48	Non significatif
	U*di	1,11	2,75	Significatif
	D*An	-2,39	5,88	Significatif
	D*di	0,21	0,54	Non significatif
An*di	1,21	2,98	Significatif	

Tableau V.11 Analyse de la variance pour la neutralisation du HIPS

Réponses	Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
Neutralisation du HIPS	Liaison	1854,63	14	132,47	29,74
	Résidus	53,45	12	4,45	
	Totale	1908,08	26	73,38	

Tableau V.12 Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation de ABS

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation de ABS	Constante	80,91		
	U	2,21	4,19	Significatif
	D	9,52	17,99	Significatif
	An	-0,16	0,31	Non significatif
	di	-6,36	12,02	Significatif
	U*U	5,24	9,90	Significatif
	D*D	-4,57	8,63	Significatif
	An*An	0,03	0,06	Non significatif
	di*di	-4,32	8,17	Significatif
	U*D	-1,06	2,01	Non significatif
	U*An	1,27	2,41	Significatif
	U*di	2,73	5,16	Significatif
	D*An	-2,25	4,26	Significatif
	D*di	-2,42	4,57	Significatif
	An*di	0,86	1,64	Non significatif

Tableau V.13 Analyse de la variance pour la neutralisation de ABS

Réponses	Variation due à	somme des Carrés	DLL	Carré Moyen	F(obs)
Neutralisation de ABS	Liaison	2990,22	14	213,58	28,22
	Résidus	90,81	12	7,56	
	Totale	3081,03	26	118,50	

Tableau V.14 Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation du PVC

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation de PVC	Constante	89,53		
	U	2,10	12,82	Significatif
	D	3,24	19,76	Significatif
	An	0,22	1,38	Non significatif
	di	-1,97	12,05	Significatif
	U*U	-0,57	3,48	Significatif
	D*D	-1,96	11,98	Significatif
	An*An	5,64	34,43	Significatif
	di*di	-4,02	24,54	Significatif
	U*D	-0,74	4,56	Significatif
	U*An	0,08	0,54	Non significatif
	U*di	1,00	6,14	Significatif
	D*An	-0,51	3,11	Significatif
	D*di	-1,18	7,21	Significatif
	An*di	-1,13	6,89	Significatif

Tableau V.15 Analyse de la variance pour la Neutralisation de PVC

Réponses	Variation due à	somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
Neutralisation de PVC	Liaison	520,59	14	37,18	51,17
	Résidus	8,72	12	0,72	
	Totale	529,31	26	20,35	

Tableau V.16 Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation du PA

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation de PA	Constante	91,89		
	U	0,91	4,47	Significatif
	D	4,94	24,30	Significatif
	An	0,50	2,47	Significatif
	di	-0,06	0,30	Non significatif
	U*U	-0,01	0,05	Non significatif
	D*D	0,22	1,09	Non significatif
	An*An	0,76	3,77	Significatif
	di*di	-2,25	11,06	Significatif
	U*D	-0,65	3,20	Significatif
	U*An	0,42	2,07	Non significatif
	U*di	0,73	3,59	Significatif
	D*An	-1,89	9,30	Significatif
	D*di	-1,41	6,95	Significatif
An*di	-1,82	8,97	Significatif	

Tableau V.17 Analyse de la variance pour la Neutralisation de PA

Réponses	Variation due à	somme des Carrés	DLL	Carré Moyen	F(obs)
Neutralisation de PA	Liaison	638,83	14	45,63	40,18
	Résidus	13,14	12	1,11	
	Totale	652,25	26	25,08	

La table de *Fisher-Snédecor* (voir l'annexe) donne pour $v_1=14$ et $v_2=12$, $F(\text{crit})=2.63$, pour un risque de 5%.

On a dans les quatre réponses : $F_{\text{obs}} > (F_{\text{crit}}=2.63)$, donc on accepte l'hypothèse H_1 de linéarité du modèle.

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

1-Pour la neutralisation du PC :

$$\text{TN}_{\text{PC}}=94.49+ 1.43U + 2.83D + 1.14\text{An} +0.75 \text{Di}+ 1.95U*U -2.5D*D +3.01\text{An}*An - 3.55\text{Di}*Di -0.96U*D+ 0.47U*\text{An} +0.62U*Di +0.74D*\text{An} -0.88D*Di -0.76\text{An}*Di$$

Avec :

$$R^2=99.18\%$$

$$Q^2=97.09\%$$

2-Pour la neutralisation du HIPS:

$$\text{TN}_{\text{HIPS}}=83.17+ 4.59U + 7.79D - 1.30\text{An} -1.05\text{Di} -1.95U*U -3D*D -1.01\text{An}*An -1.54U*D+ 0.6U*\text{An} +1.11U*Di -2.39D*\text{An} +1.21\text{An}*Di$$

Avec :

$$R^2=97.20\%$$

$$Q^2=93.87\%$$

3-Pour la neutralisation du ABS :

$$\text{TN}_{\text{ABS}}=80.91+ 2.21U + 9.52D -6.36 \text{Di}+ 5.24U*U -4.57D*D-4.32\text{Di}*Di + 1.27U*\text{An} +2.73U*Di -2.25D*\text{An} -2.42D*Di$$

Avec :

$$R^2=97.05\%$$

$$Q^2=90.34\%$$

4-Pour la neutralisation du PVC :

$$\text{TN}_{\text{PVC}}=89.53+ 2.1U + 3.24D -1.97\text{Di} -0.57U*U -1.96D*D +5.64\text{An}*An -4.02\text{Di}*Di - 0.74U*D +1U*Di -0.51D*\text{An} -1.18D*Di -1.13\text{An}*Di$$

Avec :

$$R^2=98.35\%$$

$$Q^2=96.02\%$$

5-Pour la neutralisation du PA :

$$TN_{PA} = 91.89 + 0.91U + 4.94D + 0.5An + 0.76An*An - 2.25Di*Di - 0.65U*D + 0.73U*Di - 1.89D*An - 1.41D*Di - 1.82An*Di$$

Avec :

$$R^2 = 97.84\%$$

$$Q^2 = 95.35\%$$

V.3.1 Influence des facteurs choisis sur les réponses

A partir des modèles mathématiques obtenus, on peut déterminer l'influence de chaque facteur sur chacune des réponses, en traçant la variation des réponses en fonction de ces facteurs choisis.

➤ produit PC

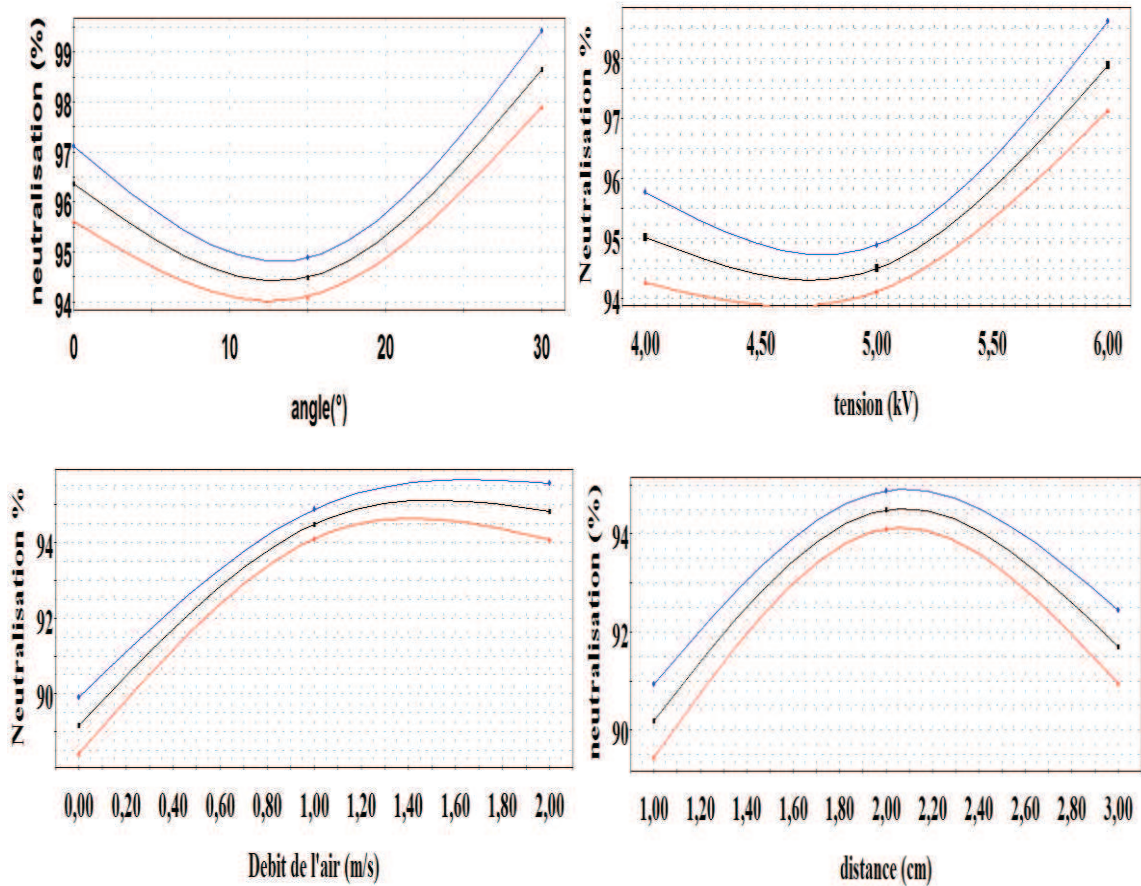


Figure V.10 Effet de chaque facteur sur les réponses du PC

➤ produit HIPS

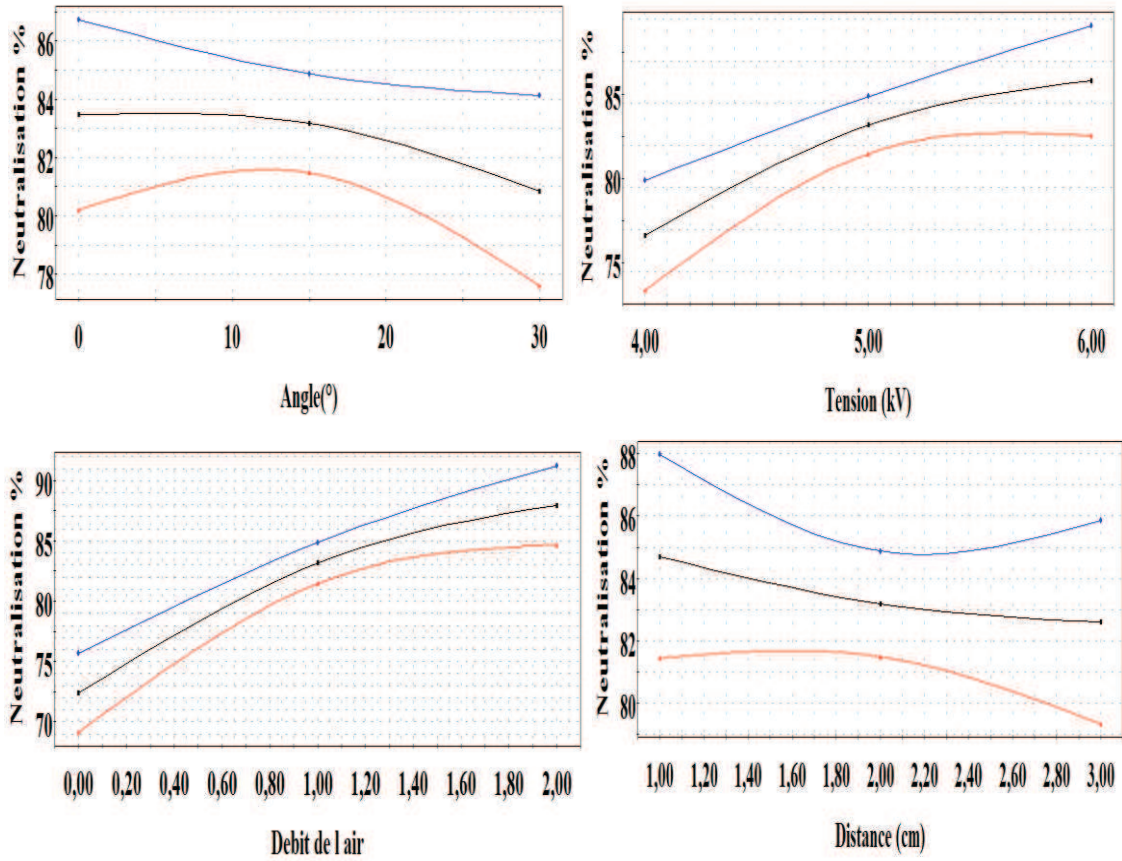
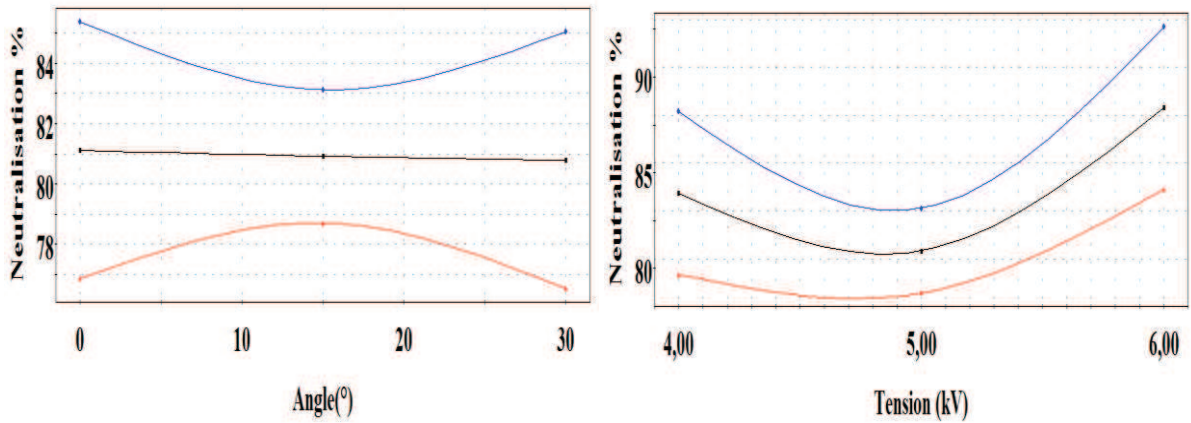


Figure V.11 Effet de chaque facteur sur les réponses du HIPS

➤ produit ABS



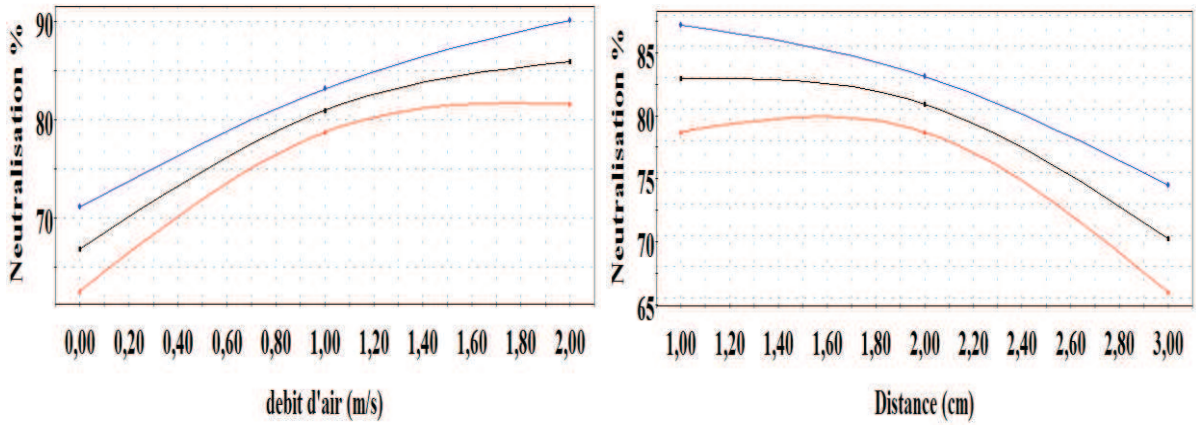


Figure V.12 Effet de chaque facteur sur les réponses de ABS

➤ produit PVC

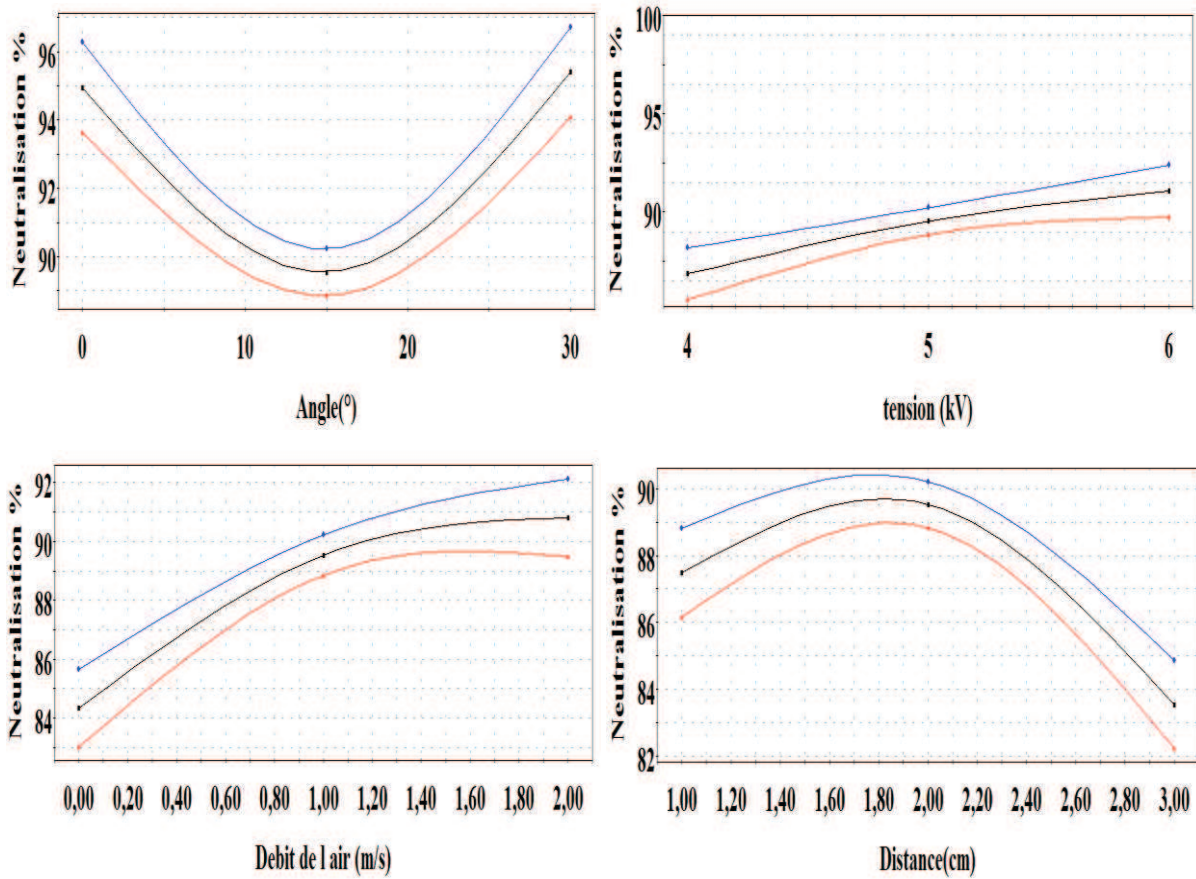


Figure V.13 Effet de chaque facteur sur les réponses du PVC

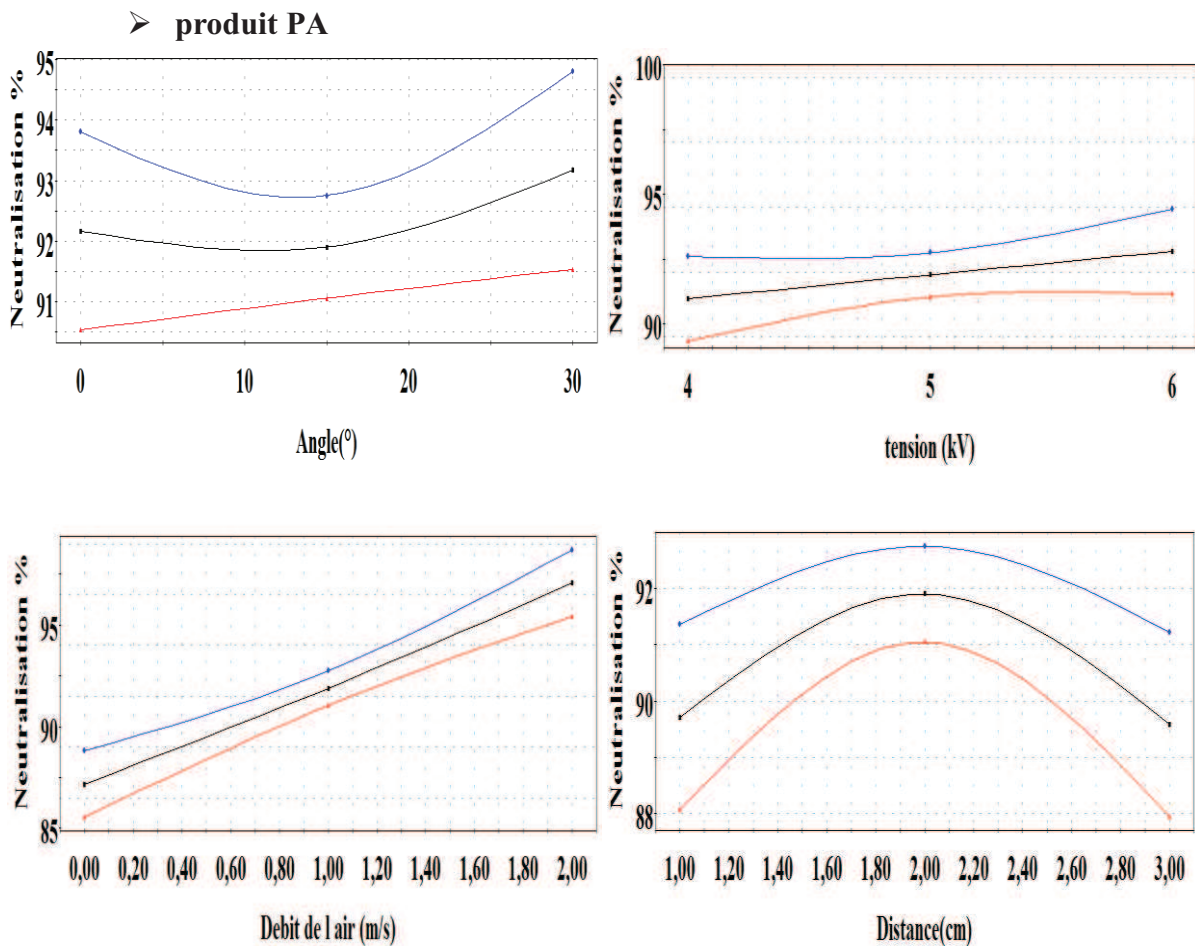


Figure V.14 Effet de chaque facteur sur les réponses du PA

En examinant les différents résultats obtenus, on constate que :

- L'effet de l'injection de l'air sur la charge est plus significatif, en effet la charge résiduelle sur les granules se réduit considérablement en injectant l'air par rapport aux expériences où il n'y a pas d'air.
- La tension de neutralisation reste un facteur très important (à ne pas dépasser la valeur limite pour ne pas tomber dans le risque de chargement des granules). La valeur de cette tension dépend de la distance entre l'électrode avec la couche de granules et l'angle d'inclinaison de cette dernière.
- Il s'est avéré d'après ces résultats que l'emploi d'une électrode alternative qui n'est pas couteuse donne des résultats satisfaisants qui nous permettent d'éviter l'usage d'une tension continue.
- L'effet de la fréquence sur la neutralisation des granules isolants sera négligeable car la fréquence utilisée (50 Hz) a donné des résultats prometteurs qui nous ont permis d'éliminer les charges résiduelles avec un taux de neutralisation supérieur à 90%.

V.3.2 Détermination du point de fonctionnement optimale

En utilisant les fonctions de réponses le logiciel MODDE 5.0 (MODELing and DESIGN) qui est un programme exécutable sous Windows (réalisé par Umetrics AB, Umea, Suède) pour la création et l'évolution statistique des plan d'expériences. On se contente d'afficher les figures des réponses prédites (V.15) en fonction seulement de deux paramètres les plus influant sur le taux de neutralisation à partir des modèles mathématiques obtenues. Par exemple pour le PC en analysant le modèle obtenu on remarque que le débit d'air et la tension de neutralisation ont la plus grande influence.

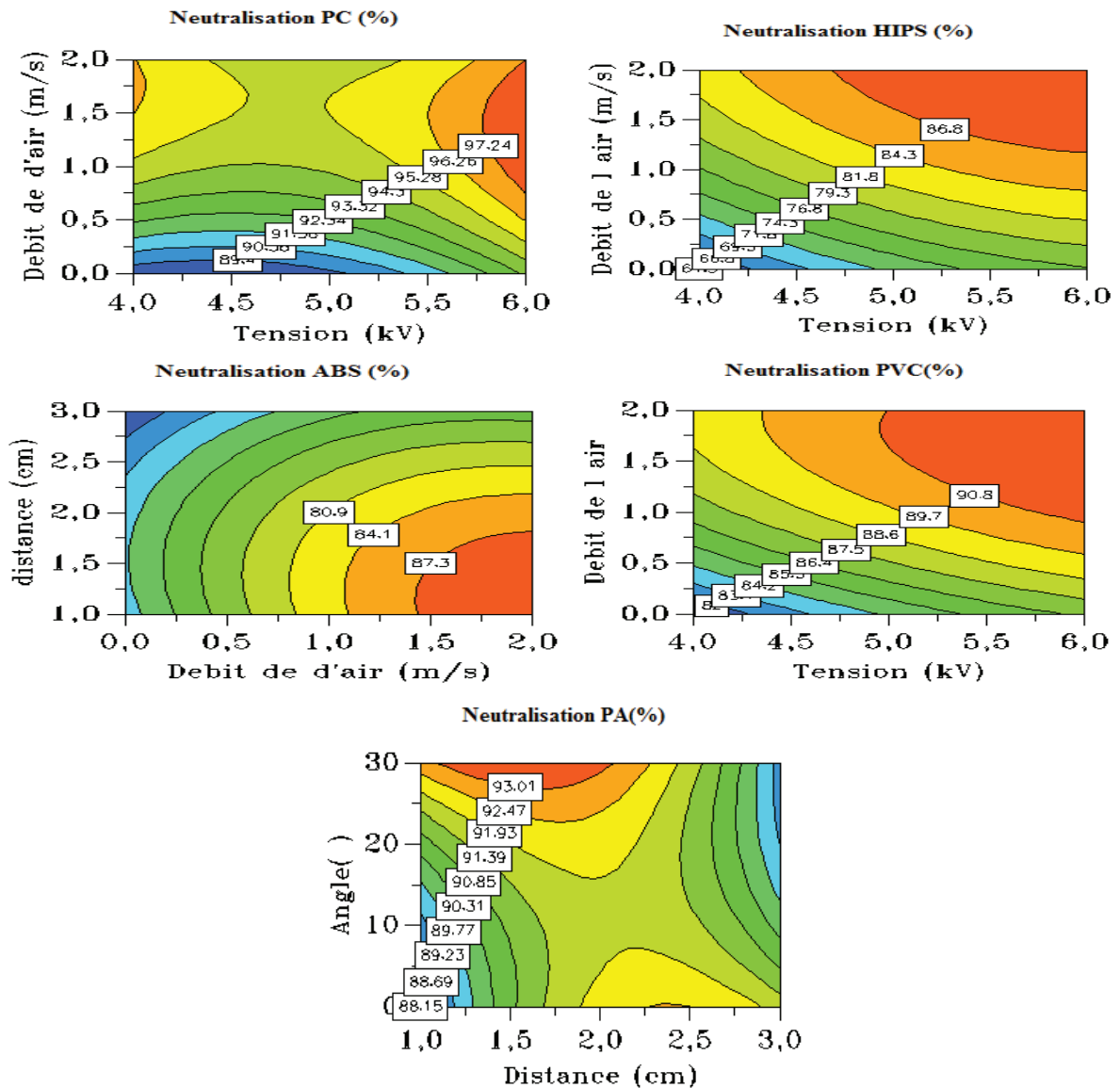


Figure V.15 : Iso-contours de la neutralisation [%]prédits par le logiciel MODDE 5.0, pour les différents matériaux .

Selon le logiciel MODDE 5.0, le meilleur taux de neutralisation pour les différents matériaux correspond aux valeurs optimales suivantes (figure.V.15):

- ✓ Une tension alternative appliquée de 4.7 kV
- ✓ Un débit d'air de vitesse 2 m/s.
- ✓ Un angle d'inclinaison de l'électrode de 16° .
- ✓ Une distance de 1.7 cm.

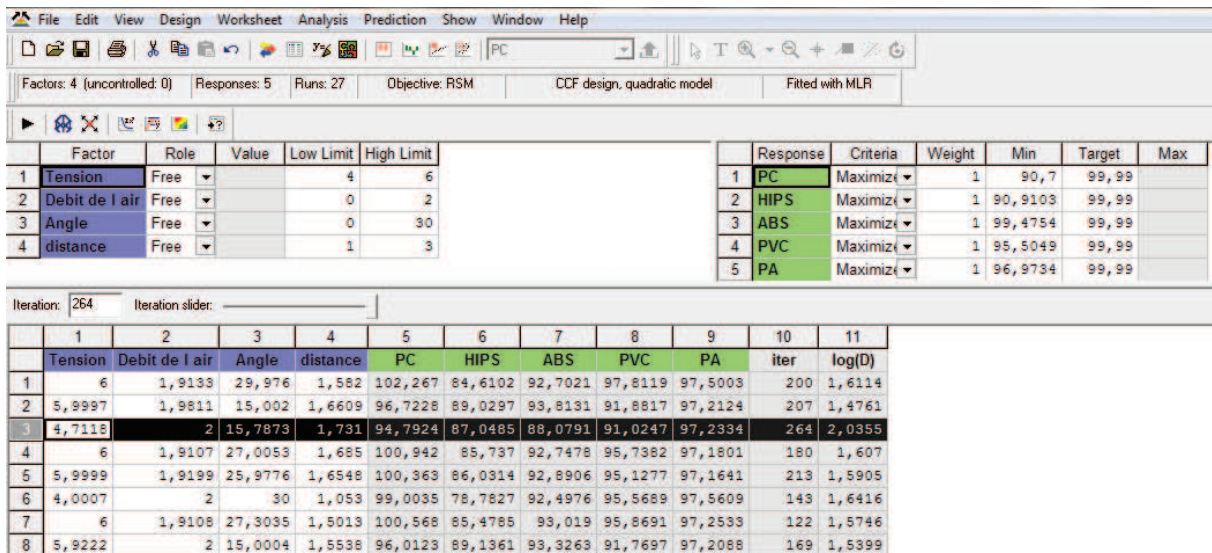


Figure V.15 : valeurs optimales des différents paramètres (V_n , D , α , d_i) données par le logiciel MODDE.

Une expérience réalisée avec les valeurs optimales obtenues, donne les résultats suivants: $N_{PC} = 95,27\%$, $N_{HIPS} = 86,98\%$, $N_{ABS} = 87,63\%$, $N_{PVC} = 92,31\%$ et $N_{PA} = 98,2\%$, ce qui est très proche de la prédiction faite par MODDE 5.0.

V.4. CONCLUSION

Ce travail sur la neutralisation et élimination de la charge par décharge couronne alternative a montré la complexité du phénomène. De nombreux paramètres influent sur le processus de neutralisation parmi lesquels nous avons considéré particulièrement la tension, la distance, l'angle d'inclinaison. Ces résultats nous permettent d'obtenir un taux de neutralisation élevé à 50 Hz sans jouer sur la fréquence, chose qui évite l'emploi d'équipement particulier et notamment coûteux.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans une perspective de développement durable, les DEEE doivent être réduits à la source par les fabricants, la durée de vie des matériels doit être augmentée au maximum et le recyclage du matériel en fin de vie être systématique. Pour atteindre les objectifs de recyclage cela nécessite aujourd'hui de combiner une pluralité de procédés, en particulier pour les matières plastiques collectés qui doivent d'abord être triés avant d'être recyclés. La pureté du matériau obtenu est primordiale pour que le recyclage soit rentable. De ce fait, des procédés de tri efficaces qui garantissent en permanence une excellente qualité des plastiques recyclés doivent être mis au point.

Dans cette thèse, il a été procédé à :

- l'étude de l'effet des parois du séparateur tribo-aéro-électrostatique sur la charge triboélectrique des matériaux plastiques,
- l'Amélioration de l'installation pilote de séparation tribo-aéro-électrostatique, pour la prise de décision sur le type de parois du chargeur statique de l'étage inférieur,
- l'évaluation des facteurs influant sur la trajectoire des matériaux granulaires dans notre installation en prenant en considération de nouveaux paramètres tel que le coefficient de restitution des matériaux,
- L'étude expérimentale de la séparation tribo-aéro-électrostatique de trois matériaux isolants.
- L'étude expérimentale de neutralisation des particules isolantes en vue d'éliminer les charges résiduelles qui représente un danger pour la sécurité.

Tout au long de notre travail et eu égard des résultats obtenus lors des procédures expérimentales effectuées après la modélisation sur le séparateur électrostatique tribo-aéro-électrostatique, il a été démontré que ce dernier est efficace pour la séparation d'un mélange contenant trois isolants granulaires. Cette propriété répond au problème majeur de l'industrie des DEEE ou encore du plastique qui est la diversité des polymères dans les déchets.

Le dispositif expérimental a donné des résultats très probants pouvant être exploités à l'avenir et envisager l'utilisation de ce type de machine à l'échelle industrielle dans différents domaines de l'industrie de recyclage : DEEE, déchets industriels banals (DIB), Véhicules hors d'usage (VHU) ...

Etant constitué de pièces disponibles et bon marché, notre séparateur se distingue des autres par son coût d'exploitation relativement faible par rapport au séparateur à tapis roulant. Ce dernier a donné des résultats très prometteur qui peuvent être exploiter dans un futur proche.

Nous avons réussi d'obtenir un taux de neutralisation supérieur à 90% à 50Hz avec un dispositif de neutralisation en utilisant une décharge couronne alternative.

Pour conclure, et devant ces multiples avantages, il est certain que notre installation à un avenir promoteur dans un futur proche et ce dans les différents domaines et arriver ainsi, au premier lieu, à satisfaire au mieux les attentes des industriels désirant des performances intéressantes du processus de recyclage avec un coût financier bas et participer à la préservation de notre environnement, condition inévitable de notre progrès.

Des perspectives intéressantes sont envisageables dont :

- Amélioration en continu des performances des séparateurs électrostatiques pour préserver les ressources naturelles en puisant au maximum dans les produits en fin de cycle de vie,
- Réduction de l'énergie lors des processus de séparation et de recyclage pour préserver au maximum la nature et en faire bon usage.
- Trouver un moyen pour éliminer les charges résiduelles en continu après séparation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] www.emag.suez-environnement.com/gestion-deee.
- [2] www.planetoscope.com/production-de-dechets.html.
- [3] Iuga A, Calin L, Neamtu V, Mihalcioiu A, Dascalescu L, “Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device“ *J. Electrostat*, vol. 63, p. 937-942, 2005
- [4]"Le recyclage des plastiques" milieu-éducations-nature et société (MENS) 2001.
- [5] www.plasticeurope.fr.
- [6] www.dechets.picardie.fr.
- [7] www.clikeco.com/le-recyclage-du-plastique.html.
- [8] Miloudi M, Medles K, Tilmatine A, Brahami M, Dascalescu L, “Modeling and Optimization of a Peopeller-type Tribocharger for Granular Materials” *J.Electrostat*, vol 69, p 631-637.
- [9] Benabboun A, Tilmatine A, Medles K, Miloudi M, Dascalescu L, “étude expérimentale des procédés d’acquisition de charge triboélectrique pour séparateurs électrostatiques de particules de déchets en plastique” *Conférence Francophone sur l’Eco-conception en Génie Electrique (Confrege 2012)*, Montréal, 28-30 Mai 2012, Canada.
- [10] S, Samuila A, Dragan C, Dascalescu L, “Behaviour of charges insulating particles in contact with a rotating roll electrode”. In: *Journal of Electrostatics*, 189- 192,69, 2009.
- [11] Aksa W, Miloudi M, Medles K, Tilmatine A et Dascalescu L, “Réalisation et optimisation d’un dispositif de chargement tribo-électrique par air comprimé pour les particules isolantes”, *Ajot Algerian journal of technologie*, 8^{ème} conférence nationale sur la haute tension CNHT, P 288-292, 2011.
- [12] **Rezoug M**, Ouiddir R, Aksa W, Medles K, Bilici M, Dascalescu L, “Tribo-aero-electrostatic separator for ternary mixtures of granular plastics”, IEEE/IAS Issue Date: MARCH/APRIL.2015Volume: 51 Issue: 2On page(s): 1-7
- [13] **Rezoug M**, Miloudi M, Medles K, Ouiddir R, Tilmatine A, « 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 technologie*, 9^{ème} conférence nationale sur la haute tension, P 337-341, CNHT 2013

- [14] Matsushita Y, Mori N and Sometani T, "Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary drum blades", *Electrical Engineering in Japan*, 127 33–40, 1999.
- [15] Bendimerad S, Tilmatine A, Ziane M, Dascalescu L, "Plastic wastes recovery using freefall triboelectric separator", *Int. J. Environ. Studies*, vol. 66, p. 529 – 538. 2009.
- [16] Miloudi M, Medles K, Tilmatine A, Bendaoud A, Dascalescu L "Optimization of Belt-Type Electrostatic Separation of Triboaerodynamically Charged Granular Plastic Mixtures", Industry Applications, *IEEE Transactions on*, Volume: 49 , Issue: 4 , Publication, , Page(s): 1781 – 1786, 2013
- [17] Miloudi M, Medles K, Bendaoud A, Tilmatine A, Dascalescu L, "Improvement of the Industrial Pilot of a Tribo-aero- electrostatic Separator for Binary Mixtures of Granular Insulating Materials", *IEEE/IAS annual meeting*, October 6-10, 2013 Orlando, FL USA
- [18] Boukhoulda M.F, Miloudi M, Medles K, **Rezoug M**, Tilmatine A, Dascalescu L "Experimental Modeling of a New Tribo-electrostatic Separation Process for Mixed Granular Polymers", Industry Applications, *IEEE Transactions on*, Volume: 50, Issue: 4 Publication Year: 2013 , Page(s): 1971 – 1976
- [19] Boukhoulda M. F, Medles K, Miloudi M, Tilmatine A, Bendaoud A, Dascalescu L, "Effect of Ambient Humidity on the Outcome of electrostatic Separation Process for Mixed Granular Polymers", *IEEE/IAS annual meeting*, October 6-10, 2013 Orlando, FL USA.
- [20] Benabboun A, Brahmi Y, Tilmatine A, Bendaoud A, Miloudi M, Dascalescu L, "Experimental Investigation of a New Tribo-electrostatic Separation Process For Mixed Fine Granular Plastics", *IEEE/IAS annual meeting*, October 6-10, 2013 Orlando, FL USA.
- [21] Bilici M, Dascalescu L, Dragan C, Fati O, Iuga A, Samuila A, "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices", *IEEE Trans, DEI*, vol 18, p.1476-1483, 2011.
- [22] Dragan C, Fati O, Radu M, Calin L, Samuila A, Dascalescu L. "Tribocharging of mixed granular plastics in a fluidized bed device", *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol 47, P 1922-1928, 2011.
- [23] A. Tilmatine, K. Medles, S.-E. Bendimerad, F. Boukhoulda and L. Dascalescu, "Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 1, pp. 228-232, 2009.
- [24] B. Yahiaoui, B Tabti, M. Megherbi, A. Antoniu, M.C. Ploeanu, and L. Dascalescu, AC corona neutralization of positively and negatively charged polypropylene non-woven fabrics. *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul.*, vol. 20, pp. 1516-1522, 2013

- [25] A. Antoniu, B. Tabti, M. Plopeanu and L. Dascalescu, "Accelerated discharge of corona-charged non woven fabrics," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 3, pp. 1188-1193, 2010.
- [26] M. Kachi, L. Dascalescu, L. Herous, M. Nemamcha, "Experimental study of charge neutralization at the surface of granular layers of insulating materials," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol 49, Issue: 2, pp. 691-698, 2013.
- [27] Blajan M, Belega R, Iuga A, Dascalescu L, "Triboelectrification of Granular Plastic Wastes in Vibrated Zigzag-Shaped Square Pipes in View of Electrostatic Separation", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Volume: 46 , Issue: 4 Publication Year, Page(s): 1558 – 1563, 2010
- [28] www.metaux-detail.com
- [29] www.emac.es.
- [30] Klinzing G.E, Marcus R. F, Rizk, Leung L.S, "Pneumatic Conveying of Solids" (2nd edition), Chapman and Hall, London, 1997.
- [31] Artana G, Touchard G, Morin M.F, "Contribution to the analysis of the flow electrification process of powders in pneumatic conveyers". In: *Journal of Electrostatics*, vol. 40-41, pp. 277-282, 1997.
- [32] Khashayar S, Guigon P, "Caractérisation et analyse des poudres: Propriétés physiques des solides divisés", *Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés* ISSN 1762-8725, 2009, vol. JC1, noJ2251, 16 (29 ref) Paris, France 2008.
- [33] www.keithley.com
- [34] www.amprobe.com
- [35] www.ipelican.com
- [36] Younes M, Tilmatine A, Medles K, Rahli M, Samuila A, Dascalescu L, "Numerical Modelling of Conductive Particle Trajectories in Roll-type Electrostatic Separators", *IEEE/IAS*, Sept_ ISSN 0093-9994, Octob 2007.
- [37] www.comsol.com
- [38] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, and A. Samuila, "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 18 , pp. 1476 –1483, 2011.
- [39] L.Dascalescu "Mouvements des particules conductrices dans un séparateur à haute tension pour matériaux granulaires", *J. Electrostatics*, Vol. 32, pp. 305-316, 1994
- [40] G.S.P. Castle, "Contact charging between insulators," *J. Electrostat.*, vol. 40&41, pp. 13-18, 1997.

- [41] XU ZhenMing, LI Jia, LU HongZhou & WU Jiang, Dynamics of conductive and nonconductive particles under high-voltage electrostatic coupling fields”, *Sci China Ser E-Tech Sci*, Vol.52, pp.2359-2366, 2009.
- [42] J.E. Lawver ; J.L. Wright, “The Design and Calibration of a Faraday Pail for Measuring Charge Density of Mineral Grains”, *Trans AIME*, vol 241, pp. 445-449. 1968.
- [43] E. J. Shaughnessy, I. M. Katz, J. P. Schaffer, *Introduction to fluid mechanics*, New York, NY, USA : Oxford University Press, 2005.
- [44] R.K. Kundu, I. M. Cohen, *Fluid mechanics*, San Diego, California, USA: Academic press, 2002.
- [45]H. Gould, J. Tobochnik, W. Christian, *An introduction to computer simulation methods*, San Francisco, USA: Addison Wesley, 2007.
- [46] J. Kiusalaas , *numerical methods in engineering with MATLAB*, New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2005
- [47] FANCHON. J. L, "Guide des mécaniques sciences et technologie industrielle", Edition Nathan, 1998.
- [48] Umetrics AB, MODDE 5.0. User Guide and Tutorial, Umetrics, Umea, Sweden, 1999.
- [49]**M..Rezoug**, Ouiddir .R, Tilmatine.A, A.Benabboun, Miloudi.M, Medles.K"optimisation d'un séparateur à bandes transporteuse des mélanges granulaire isolant-isolant"5th fourth international conference on electrotechnics ICEL 2013, Decembre 03-04
- [50]A.Benabboun,**M.Rezoug**, Y.Brahami,Tilmatine.A,M.Zelmat,Miloudi.M,A.Bendaoued"etu de comparative des dispositifs d'acquisition de charge triboélectrique pour les séparateurs de particules plastique"5th fourth international conference on electrotechnics ICEL 2013, Decembre 03-04.
- [51] Aksa W, Medles K, **Rezoug M**, Boukhoulda M. F, Bilici M, Dascalescu L, “Two stage electrostatic separator for the recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment” *Journal of Electrostatics*, vol 71, p 681-688, 2013.
- [52] ERIKSSON L, JOHANSSON E, KETTANEH-WOLD N, WIKSTÖM C, WOLD S, “Design of Experiments. Principles and Applications”. Umeaa, Sweden, Umetrics, 2000
- [53]Tinsson. W, “Plan d’expérience: constructions et analyses statistiques”, Edition Springer-Verlag Berlin, 2010.

ANNEXE 1

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

V	α												
	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,70	31,82	63,65	636,61
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,941
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,859
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,298	3,499	5,405
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,106	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,335	5,041
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,848	1,046	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,126	0,254	0,386	0,526	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,960	2,358	2,617	3,373
∞	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

ANNEXE 2

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

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

Le recyclage des matériaux plastiques provenant d'équipements électriques et électroniques 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. Pour atteindre cet objectif il est nécessaire de rechercher et de développer de nouvelles technologies de séparation physique. Néanmoins, la technologie actuelle ne prend en charge que la séparation de deux matériaux, alors que le principal obstacle qui se pose à l'industrie de transformation de plastiques contenus dans les DEEE lors de leur récupération et de leur recyclage reste leur diversité. Pour remédier à ce problème, nous avons contribué dans cette thèse à l'étude de chargement des particules pour l'optimisation d'un nouveau séparateur électrostatique pour trois matériaux de nature différente. Les matières plastiques auront tendance à se charger en électricité statique par frottement lors de ces manipulations qui se font souvent à des vitesses élevées (séparation, transport sur tapis,...). Les particules isolantes risquent de se charger pendant les phases de séparation dans les sacs de récupération, Dans ce cas de figure, le risque pour la sécurité des individus est le problème principal, en effet, une étincelle peut déclencher des accidents majeurs. L'objectif de ce travail est aussi de trouver une solution pour la neutralisation des charges électriques dans les particules isolantes.

The recycling of plastics from electrical and electronic equipment at the end of the life cycle is a priority of research worldwide. The separation of mixtures of such plastic materials is the key to success of recycling. To achieve this goal, it is necessary to find and develop new physical separation technologies. However, current technology supports the separation of two materials, while the main obstacle that faces the plastics processing industry contained in WEEE during their recovery and recycling remains their diversity. To remedy this problem, we have contributed in this thesis to study particle device to optimize a new electrostatic separator for three materials of different nature. Particles of plastics tend to become charged with static electricity by friction during these manipulations that are often at high speeds (separation, transport belt, ...). The insulating particles may be responsible for more accident. The objective of this work is also or likewise to find a solution for the neutralization of electric charges in the insulating particles.

إن إعادة تدوير البلاستيك من المعدات الكهربائية والإلكترونية في نهاية دورة الحياة هو أحد المجالات ذات الأولوية للبحث في جميع أنحاء العالم. ويعتبر الفصل بين مكونات مختلفة لخليط من المواد البلاستيكية مفتاح النجاح إعادة التدوير. غير أن تحقيق هذا الهدف لا بد له من إبداع و تطوير تقنيات فصل حديثة لأن التكنولوجيا الحالية لا تسمح إلا بالفصل بين مادتين، في حين أن العقبة الرئيسية التي تواجهنا خلال الفصل و إعادة التدوير تبقى تنوع مواد الخليط المراد معالجته. ولإسهام في حل هذه الإشكالات، تطرقنا من خلال هذه الأطروحة إلى دراسة الشحن الكهربائي لتحسين الفصل بين ثلاث مواد ذات طبيعة مختلفة. تتسم المواد البلاستيكية بقابليتها للشحن بالكهرباء الساكنة عن طريق الاحتكاك خلال عمليات الفصل التي تجرى غالبا بسرعة عالية. والمشكلة الرئيسية المطروحة في هذا الصدد هي أن الجزيئات العازلة المشحونة خلال عمليات التدوير قد تشكل خطرا على سلامة الأفراد، إذ يمكن لشحنة أن تؤدي في الواقع إلى نشوب حوادث كبيرة. وعليه فإن هذا العمل يهدف أيضا لإيجاد حل لهذه المشكلة يتمثل في تحييد الشحنات الكهربائية في الجزيئات العازلة، عن طريق إبطال مفعولها.