



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologie**

Filière : **Génie Mécanique**

Spécialité : **Maintenance Industrielle**

Thème

**Séparation électrostatique des matériaux plastiques
en utilisant un séparateur à plan incliné**

Présenté par :

BABZIZ Mouad & BOUHADJA Brahim

Devant le jury :

BAATOUCH Mona

UKMO

Président

KHETTABI Rym

UKMO

Examineur

ROUAGDIA Karim

UKMO

Encadreur

Année universitaire 2019/2020

Dédicaces

*Nous dédions ce modeste travail et nos profondes gratitudees à:
Nos mères, sources de tendresse et d'amours pour leurs soutiens tout le
long de notre vie scolaire.*

*Nos pères, qui nous ont toujours soutenus et qui ont fait tout possible
pour nous aider.*

Nos frères et nos sœurs, que nous aimons beaucoup.

Notre grande famille.

A nos très chers amis.

Tout qu'on collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Que dieu leur accorde santé et prospérité.

Remerciements

Nous tenons particulièrement à remercier Allah le tout puissant, ce mémoire n'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction.

Nous adressons nos remerciements à notre encadreur Monsieur Dr ROUAGDIA Karim, pour son aide consistante, ses conseils judicieux, et pour ses remarques objectifs.

Nous remercions aussi les membres de jury qui nous ont fait honneur d'accepter le jugement de notre travail, Dr BAATOUCHE M et Dr KHETTABI R.

et enseignants, administratif, et le personnel de la département de mécanique université KASDI Merbah.

Nous tenons à remercier nos familles de nous avoir soutenus.

Enfin, nous tenons à remercier toute personne qui nous a aidées de près ou de loin durant notre travail et en particulier tous nos collègues de la promotion MAINTENANCE INDUSTRIEL.

Merci beaucoup à tous.

ملخص

تعد عملية الفصل الكهروستاتيكي من أكثر العمليات رواجاً في عملية إعادة تدوير البلاستيك وهذه العملية تكون دائماً في حاجة لمزيد من التطوير والتحسين. يتمثل عمل هذه الرسالة في إجراء دراسة تجريبية باستخدام فاصل مستوي مائل على خليط حبيبي من PA / PC لتحديد الظروف المثلى للعملية. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها كفاءة وأهمية فاصل المستوى المائل ودوره في تحسين استرجاع المنتجات المنفصلة. بحيث يتم الحصول على أفضل نتائج الاسترداد والنقاء في ظل توليفة من الجهد العالي المرتفع مع زاوية ميل منخفضة.

Résumé

Le processus de séparation électrostatique est l'un des processus les plus populaires dans le recyclage du plastique, et ce processus a toujours besoin d'être développé et amélioré. Le travail de ce mémoire consiste à réaliser une étude expérimentale en utilisant un séparateur à plan incliné sur un mélange granulaire de PA/PC pour déterminer les conditions optimales du processus. Les résultats obtenus montrent l'efficacité et l'importance du séparateur à plan incliné et son rôle à l'amélioration de la récupération des produits séparés. Tel que les meilleurs résultats de récupération et de pureté sont obtenus sous une combinaison d'une haute tension élevée avec un angle d'inclinaison réduit.

Abstract

The electrostatic separation process is one of the most popular processes in the plastic recycling process, and this process still needs to be developed and improved. The work of this dissertation consists in carrying out an experimental study using an inclined plane separator on a granular mixture of PA / PC to determine the optimal conditions of the process. The results obtained show the efficiency and importance of the inclined plane separator and its role in improving the recovery of separated products. Such as, the best recovery and purity results are obtained under a combination of highest values of the applied high voltage with a reduced tilt angle

SOMMAIRE

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

Chapitre I : Etat de l'art

I.1. Les matières plastiques	3
I.2. Différentes classes de polymères	3
I. 2.1. Classification selon l'origine	3
I.3. Applications des polymères.....	4
I.4. Caractéristiques des polymères.....	6
I.4.1. Elasticité.....	6
I.4.1.1. Comportement élastique.....	6
I.4.1.2. Comportement plastique.....	7
I.5. Généralités sur les bio polymères.....	7
I.5.1. Bioplastiques provenant de ressources renouvelables.....	7
I.5.2. Bioplastiques issus de ressources fossiles.....	7
I.6. Les matériaux composites à matrice polymère.....	8
I.7. - Les matrices polymères.....	9
I.8. Les origines des déchets plastiques.....	9
I.9. Catégorie des déchets.....	10
I.9.1. Les déchets inertes.....	10
I.9.2. Déchets dangereux.....	11
I.9.3. Les déchets non dangereux.....	11

I.9.3. 1 Déchets biodégradables.....	12
I.9.3. 2 Déchets recyclables « déchets industriels banals (DIB) »	12
I.10. Recyclage.....	13
I.10.1. Définition du recyclage.....	13
I.10.2. Principe de recyclage.....	13
I.10.3. La chaîne de recyclage.....	14
I.11. Electrification des polymères isolants.....	14
I.11.1. Charge par effet triboélectrique.....	15
I.11.2. Charge par rouleau électrostatique.....	15
I.11.3. Charge par induction.....	16
I.11.4. Charge par décharge couronne.....	16
I.11.4.1. Décharge couronne positive.....	17
I.11.4.2. Décharge couronne négative.....	18
I.11.4.3. Décharge couronne alternative.....	18
I.12. Théorie des bandes d'énergie.....	19
I.12.1. Cas des matériaux isolants parfaits.....	19
I.12.2. Défauts et impuretés.....	20
I.12.3. Modèle de la surface.....	22
I.12.4. Contact métal-isolant.....	22
I.12.5. Le travail de sortie.....	23
I.13 Conclusion.....	25

Chapitre II : Techniques du chargement triboélectrique

II.1. Effet tribo-électrique.....	26
II.1.1. Description.....	26
II.1.2. Série triboélectrique.....	26
II.2. Dispositifs de charge	27

II.2.1. Dispositif de charge par ventilateur.....	27
II.2.2. Dispositif de charge par cyclone	30
II.2.3. Dispositif de charge de type statlique.....	30
II.2.4. Dispositif de charge par vibrations.....	31
II.2.5. Dispositif de charge à lit fluidisé.....	32
II.2.6. Dispositif de charge à tambour tournant.....	33
II 3.Conclusion.....	34

Chapitre III: Etude expérimentale d'un séparateur à plan incliné

III.1. Introduction	35
III.2. Séparateur triboélectrique à plan incliné	35
III.2.1. Description	35
III.2.2. Installation de chargement triboélectrique à lit fluidisé	36
III.2.3. Procédure expé3rimentale	36
III.2.4. Procédure de déroulement des expériences	37
III.2.5. La mesure de la masse granulaire.....	38
III.3. Résultats expérimentaux	39
III.3.1. Influence de la haute tension.....	39
III.3.1.1. Taux de récupération.....	39
III.3.1.2.Taux de pureté.....	41
III.3.2. Influence de l'angle d'inclinaison.....	43
III.3.2.1. Taux de récupération.....	43
III.3.2.2. Taux de pureté	43
III.4.Conclusion.....	45
Conclusion générale.....	46
Références bibliographiques.....	47

Liste des figures

Figure I. 1 : Classification des bioplastiques basés sur leurs gammes de production.....	19
Figure I. 2 : déchets inertes	22
Figure I. 3 : déchets dangereux.....	23
Figure I.4: Photos de déchets biodégradables.....	24
Figure I.5 : Photos de déchets recyclables.....	26
Figure I.6 : L'échange de la charge électrique entre deux surfaces par effet triboélectrique.....	27
Figure I.7: Principe d'un dispositif de charge par rouleau électrostatique.....	29
Figure I.8 : Description de la décharge couronne positive.....	29
Figure I.9: Description de la décharge couronne négative.....	31
Figure I.10 : Représentation schématique de la variation de la densité d'états possibles, dans le Cas d'un isolant cristallin parfait. E F est le niveau de Fermi.....	33
Figure I.11 : (a) : Représentation schématique de la densité d'états possible dans un isolant Cristallin contenant un certain nombre de défauts ponctuels. (b) : représentation des bandes de Hubbard dans un schéma de bandes.....	33
Figure I.12 : Modèle énergétique de la surface d'un isolant.....	34
Figure I.13 : Modèle énergétique du contact métal-isolant.....	35
Figure I.14 : Travail de sortie.....	38

Figure II.1: Transferts de charges électriques dus au frottement de deux corps ; l'un S'électrise positivement et l'autre négativement.....	39
Figure II.2: Série triboélectrique expérimentale pour différents matériaux plastiques utilisés dans la fabrication des équipements informatiques et électriques selon différents auteurs.....	41
Figure II.3: Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur.....	42
Figure II.4: Dispositif de charge tribo-électrique à hélice ; (a) : Chargeur ; (b) : Hélice	42
Figure II.5: Dispositif de charge tribo-électrique à plusieurs hélices et à fonctionnement continu.....	42
Figure II.6: dispositif de chargement par cyclone.....	43
Figure II.7: Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique	44
Figure II.8: Dispositif à vibrations ; 1 : tubes de charge ; 2 : sortie des particules chargées ; 3 : glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ; R : rayon ; X, Y, Z : Direction du mouvement ; Le tube : longueur du tube.....	45
Figure II.9: Représentation schématique d'un dispositif de chargement a lit fluidiser.....	46
Figure II.10: Représentation schématique d'un dispositif de chargement.....	47
Figure III.1: Schéma de l'installation expérimentale de séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants.....	50
Figure III.2: Alimentation haute tension continu ; (a) polarité positive, (b) polarité négative.....	50
Figure III.3: Installation de chargement triboélectrique à lit fluidisé.....	51

Figure III.4: Représentation schématique de l'installation expérimentale pour l'étude du processus de la séparation électrique à plan incliné.....	52
Figure III.5 : Photographie du mélange granulaires de PA (bleu) et de PC (orange).....	52
Figure III.6 : balance électronique.....	54
Figure III.7: Taux de la récupération du PA et PC après la séparation du mélange granulaire en fonction de la haute tension appliquée pour un angle d'inclinaison $\theta=25^\circ$	54
Figure III.8 : Taux de la récupération du PA et PC après la séparation du mélange granulaire en fonction de la haute tension appliquée pour un angle d'inclinaison $\theta=90^\circ$	55
Figure III.9 : Taux de la pureté du PA et PC obtenus après la séparation du mélange granulaire en fonction de la haute tension appliquée pour un angle d'inclinaison $\theta=25^\circ$	56.
Figure III.10 : Taux de la pureté du PA et PC obtenus après la séparation du mélange granulaire en fonction de la haute tension appliquée pour un angle d'inclinaison $\theta=90^\circ$	56
Figure III.11 : Taux de la récupération du PA et PC après la séparation du mélange granulaire en fonction d'angle d'inclinaison avec une haute tension fixe $V=10Kv$	57
Figure III. 12 : Taux de la pureté du PA et PC après la séparation du mélange granulaire en fonction de l'angle d'inclinaison avec une haute tension fixe $V=10kV$	58

Liste des tableaux.

Tableau I.1 : Les domaines d'application des polymères.....	15
--	----

Nomenclature

- PE : polyéthylène
- PVC : polychlorure de vinyle
- PS : polystyrène
- PET : polyéthylène téréphtalate
- PLA : poly acide lactique
- PHA : *Poly* (hydroxyalcanoate)
- PHB : Polyhydroxybutyrate
- PCL : Polycaprolactone
- PBAT: Poly (butylene adipate-co-terephthalate)
- PTFE : poly tétra fluor éthylène
- PP : Le polypropylène
- PMMA : poly méthacrylate de méthyle
- AL: l'acide linoléique
- PA : polyamide
- PC : polycarbonate

Introduction générale

L'apparition des matières plastiques au début du 20^{ème} siècle résultent des progrès de la pétrochimie et suscitent un engouement particulièrement important pendant la seconde guerre mondiale, période durant laquelle l'industrie devait faire face à la demande croissante en matières premières. Dès lors, les propriétés diverses, la facilité de mise en œuvre et les coûts avantageux que présentent ces matériaux encouragent leur application dans tous les domaines de production industrielle afin de satisfaire les besoins croissants des consommateurs. Le choc pétrolier survenant dans les années soixante-dix marque le début des polymères de grande consommation. Toutefois, cette exploitation massive n'est pas dépourvue de conséquences. En effet, le principal inconvénient des matériaux polymères réside dans le fait qu'ils ne sont pas biodégradables et pose ainsi le problème de la gestion de leurs déchets industriels ou de consommation qui s'accumulent de manière inquiétante. Ce n'est que depuis une vingtaine d'années seulement que le traitement des déchets de matières plastiques devient une préoccupation première dans la préservation de l'environnement. La valorisation des matières plastiques fait alors l'objet de toutes les attentions, notamment dans le monde scientifique où de nombreuses études se sont penchées sur ce phénomène mondial. Aujourd'hui, les industries de plasturgie disposent de plusieurs moyens de recyclage des polymères. En dehors de l'incinération ou de la mise en décharge, la valorisation des déchets plastiques repose sur deux voies distinctes : le recyclage mécanique et le recyclage chimique.

Le recyclage mécanique aussi appelé valorisation " matière " consiste à récupérer les polymères issus d'une première utilisation et suite à un ensemble d'opérations mécaniques, à les rendre appropriés pour une seconde application souvent différente de la première. Ce type de recyclage requiert donc une bonne connaissance préalable du comportement mécanique des matériaux considérés.

Le but de cette étude fait partie de la dernière phase de la procédure de recyclage du plastique, et cette technique peut être réalisée pour séparer les particules de plastique en utilisant le séparateur à plan incliné.

Ce travail est réparti en trois chapitres présentés comme suit:

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé de manière bibliographique quelques notions sur les polymères, leurs structures et quelques domaines d'application, les différentes catégories des déchets en plastiques, ainsi les différents concepts du mécanisme de chargement électrique des polymères isolants.

Le deuxième chapitre est consacré essentiellement à la description des différentes installations de chargement triboélectrique dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières.

Le troisième chapitre est focalisé sur les résultats expérimentaux obtenus sur l'influence de la haute tension appliquée et l'angle d'inclinaison sur la séparation du mélange granulaire PA/PC en utilisant le séparateur à plan incliné.

I.1. Les matières plastiques

Le plastique est l'une des innovations les plus importantes du 20ème siècle, c'est un matériau omniprésent, en raison de ses avantages liés à son coût, sa légèreté et la facilité de son utilisation. Sa force et sa longue durée de vie sont les facteurs qui font qu'une croissance substantielle de la consommation de plastique est observée partout dans le monde ces dernières années [2].

Les premiers plastiques sont d'origine naturelle, au sens où ils sont issus de matières premières non fossiles (comme le pétrole) et subissent peu de transformations. Le premier plastique qui fut manipulé par l'homme est le latex : il servait à faire des balles et des figurines 1600 avant notre ère en Amérique du sud. Les égyptiens employaient des colles à base de gélatine d'os, de caséine de lait, d'albumine d'œuf. Plusieurs siècles av. J-C., les hommes utilisaient les propriétés plastiques de la corne, des écailles de tortue, de l'ambre, des caoutchoucs, chauffés et moulés pour fabriquer de nombreux objets. Cependant, à partir de la fin du XIXe siècle débute la mise au point de nouvelles matières : les plastiques semi-synthétiques faits de polymères naturels modifiés chimiquement par des produits chimiques.

I.2. Différentes classes de polymères

I. 2.1. Classification selon l'origine

a) *Les polymères naturels*

Sont issus des règnes végétaux ou animaux. Leur importance est considérable mais ils ne seront que succinctement décrits dans la première partie de cet ouvrage [3]. Par exemple : cellulose, caoutchouc, protéine, laine [4].

b) *Les polymères synthétiques*

Totalement issus du génie de l'homme, sont obtenus par polymérisation de molécules monomères. Leur variété est extrême et ce sont eux qui seront le plus souvent considérés dans la suite de cet ouvrage [3]. Comme : polyéthylène (PE), polychlorure de vinyle (PVC), polystyrène (PS), polyéthylène téréphtalate (PET) [4].

c) *Les polymères artificiels*

Obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés ; les esters cellulosiques (nitrocellulose, acétate de cellulose...) ont toujours connu une certaine importance économique [3].

I.3. Applications des polymères

Les polymères sont utilisés pour un nombre extraordinaire d'applications à tous les échelons de la vie [5].

Tableau I.1 : Les domaines d'application des polymères [6,5]

Domaines	Exemples d'applications
Automobile	Mousse de pare choc, finition intérieure, sièges, cache du moteur, garde boue, pneu, poignée de porte, volant, cadrans, réservoir, ...
Avion	Sièges, bacs de rangements, roue d'atterrissage, poignées, aménagement du sol, tuyaux de ventilation, gilet de sauvetage, ...
Eolienne	Pâles en composite, isolants, gaine des câbles
Chaine de montage	Tapis roulant, guides, tuyaux, pièces isolantes, écrans, manettes
Le secteur de la construction	Les portes, conduites d'eau et l'assainissement, peinture des murs des plan chaires et des plafonds, revêtement du sol.
Industrie de l'emballage	Bouteilles, pots de yaourt, boites aux lettres, problème thermique, gainage films vidéo
Médecine et santé	Poches de sang, gants, lentilles, verres de lunettes, les organes artificiels, Seringues, industrie dentaire, prothèses, outils de chirurgie

Articles ménagers	Tupperware, poubelles, seaux, vaisselle.
Matériel électrique et électronique et les communications	Tension d'isolement, isolation, laveuses, ordinateurs et les caméras, Radio et télévision, téléphone.
Industrie au Tom mobile	Système vitre claire, Tapie, carrosserie, optiques, planches de bord, habillage intérieur, Façades de téléviseurs, gainage de câbles.
Industrie textile	Vêtement, fibres textiles naturelles et synthétiques, sacs, skai, similicuir, non tissés
Sports-loisirs	Certaines parties des bâtiments, des avions et des bateaux, DVD, bandes magnétiques, Files de pêche et les cordons utilisés, piscines, coques de bateaux.
Industrie chimique	Tuyauterie, cuves, revêtements

Le domaine alimentaire	Procédés de fabrication d'aliments, emballages (bouteilles, pots de yaourt, briques de lait, boîtes à œufs) ou industriel (flacons de détergent, sachets et sacs, casiers) ...
Le matériel de maison	Meuble, vaisselle, accessoires... ; Utilisés en industrie pour maintenir le matériel d'une violente collision.

I.4. Caractéristiques des polymères

Le développement de l'utilisation des matières plastiques dans tous les secteurs d'activités s'explique par le fait que les polymères sont, par leur caractéristique, en parfaite adéquation avec les applications envisagées ; chaque polymère ayant des propriétés qui lui sont propres [7].

Les polymères ont remplacé d'autres matériaux par leur :

- Elasticité.
- Légèreté.
- Mise en forme

I.4.1. Elasticité :

I.4.1.1. Comportement élastique :

Il correspond à de petits déplacements réversibles des atomes autour de leur position d'équilibre dans le réseau cristallin. Sous l'action d'une force, les atomes s'écartent. Une réaction due aux forces de liaison tendant à les rapprocher provoque la réaction.

Pour les polymères non étirés et non renforcés, les caractéristiques d'élasticité sont indépendantes de la direction et le comportement élastique est linéaire.

Ce n'est pas le cas pour certains polymères pour lesquels le module d'Young varie avec l'amplitude de la déformation du fait de l'orientation des chaînes macromoléculaires, ce comportement correspond à des lois d'élasticité non linéaire.

I.4.1.2. Comportement plastique :

Lorsque la limite d'élasticité est dépassée, les atomes du réseau cristallin ont changé de place sous l'action d'un effort de cisaillement.

La prise en compte des défauts du cristal, notamment des dislocations, est indispensable pour comprendre le comportement plastique.

Lorsqu'une déformation plastique est provoquée, on constate que la résistance à la déformation augmente car les dislocations interagissent entre elles et de nouvelles dislocations prennent naissance, venant augmenter les interactions, cette augmentation de la résistance à la déformation plastique est appelé l'écrouissage.

Si on relâche l'effort qui a provoqué la plasticité, on constate un retour élastique: le domaine élastique s'étend jusqu'à la contrainte qui était appliquée précédemment, ce qui se traduit par une augmentation de la limite élastique.

Ce phénomène est limité par l'apparition de microcavités qui provoquent une diminution de la section résistante et conduisent à la rupture ductile.

I.5. Généralités sur les biopolymères

Un polymère biodégradable, comme tout polymère, est formé par un ensemble de macromolécules, constituées par l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition appelés monomères (motifs) [8,9]. Il existe plusieurs familles de polymères biodégradables qui peuvent être classées selon divers critères. D'une manière générale, les polymères biodégradables peuvent être classés selon deux principales familles : les polymères biodégradables d'origine fossile et les biopolymères biodégradables issus de ressources renouvelables [10].

I.5.1. Bioplastiques provenant de ressources renouvelables

Ces bioplastiques sont synthétisés naturellement à partir de sources végétales (plantes) et grâce aux animaux, ou entièrement synthétisés à partir de ressources renouvelables. Cette classe comprend l'amidon, la cellulose, les protéines, la lignine, le poly acide lactique (PLA), PHA, PHB [12].

I.5.2. Bioplastiques issus de ressources fossiles

Ces polymères sont synthétisés à partir des ressources pétrolières, mais ont la particularité d'être biodégradables à la fin de leur fonctionnalité. Parmi ces polymères, on peut citer la

Polycaprolactone (PCL), PBAT [12].

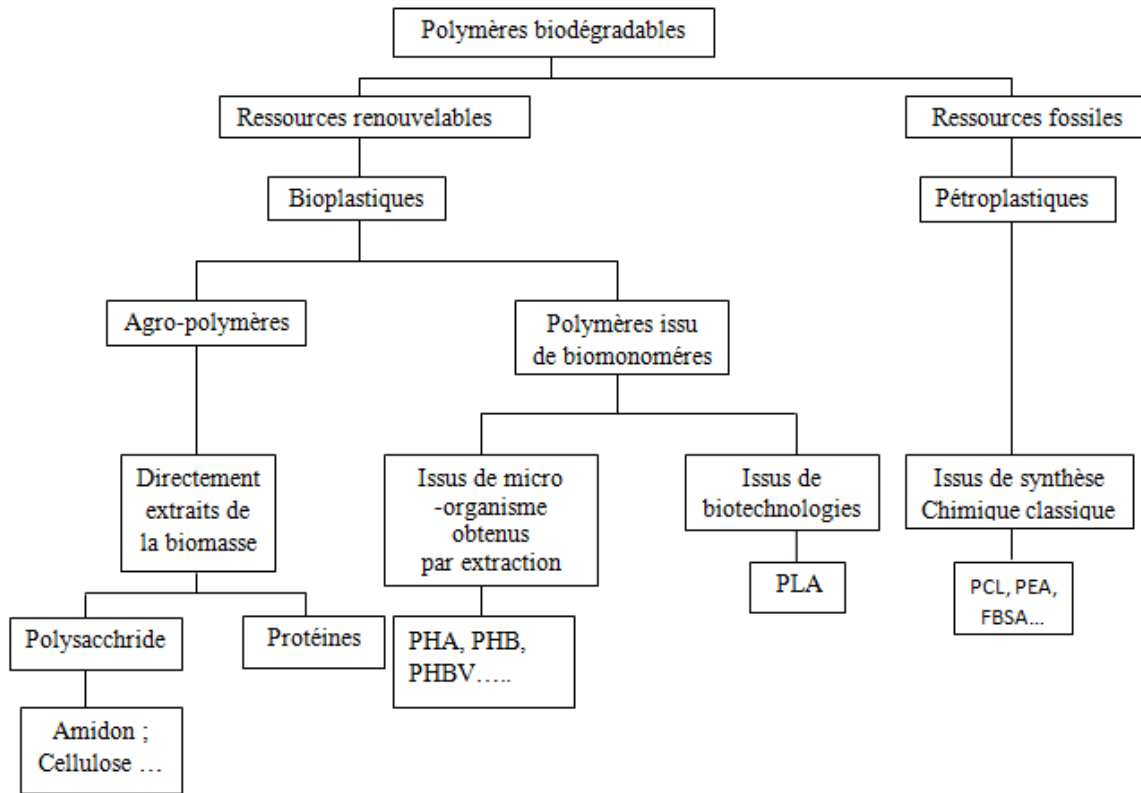


Figure I-1 : Classification des bioplastiques basés sur leurs gammes de production [12].

I.6. Les matériaux composites à matrice polymère

D'une manière générale, les propriétés d'un polymère seul sont insuffisantes pour conférer à l'objet que l'on veut fabriquer toutes les propriétés souhaitées en termes de rigidité, résistance mécanique, légèreté ou autre propriété physico-chimique, électrique, optique.

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice. La matrice assure la cohésion et l'orientation de la charge. Elle permet également de transmettre à la charge les sollicitations aux-

quelles est soumis le composite. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et souvent anisotropes. La nature de la matrice et de la charge, la forme et la proportion de charge, la qualité de l'interface et le procédé de production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite. La matrice et le renfort peuvent être métalliques, céramiques ou plastiques, ce qui permet d'envisager une multitude de combinaisons. Nous ne présenterons pas ici une revue exhaustive sur les matériaux composites mais nous nous concentrerons sur ceux dont la matrice est constituée d'un polymère [11].

I.7. Les matrices polymères

Le rôle de la matrice polymère est de recevoir les renforts, répartir les contraintes, apporter la tenue de la structure et donner la forme désirée au composite. On peut utiliser des polymères thermoplastiques ou des polymères thermodurcissables.

Les thermoplastiques se présentent sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme et les refroidir pour les fixer. Cette opération est réversible. Les matrices thermoplastiques ont de faibles propriétés mécaniques ; un renforcement par l'incorporation de charge leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Les matrices les plus courantes sont le poly (chlorure de vinyle) qui est utilisé dans la fabrication des tuyauteries, le poly (acétate de vinyle) que l'on trouve dans les colles et adhésifs, le polyéthylène dont on se sert pour fabriquer les jouets, les bouteilles de shampoing ou les sacs de supermarchés, le polypropylène pour les boites alimentaires ou les revêtements de sols, le polystyrène qui intervient dans la composition des contenants alimentaires, de la vaisselle jetable, des jouets ou des vitres.

Les thermodurcissables durcissent de façon définitive lors de leur synthèse. La transformation est donc irréversible. Ce sont les matrices les plus utilisées dans la production de matériaux composites. On trouve les résines polyester qui, associées à des fibres de verre ont une bonne tenue à la température et aux agents chimiques, les résines époxy qui possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques et chimiques, et les résines phénoliques qui résistent bien au feu [11].

I.8. Les origines des déchets plastiques

Les déchets plastiques ont de différentes origines :

- Les déchets de l'industrie du plastique (ils sont généralement issus de production et de transformation).

- Les plastiques contenus dans les ordures ménagères (bouteilles, gobelets, films).
- Les déchets de démolition des bâtiments.
- Les emballages industriels et commerciaux.
- Les résidus de broyage automobiles.
- Les plastiques agricoles (film, paillages...).
- Les plastiques issus des déchets d'équipements électriques et électroniques. [13]

I.9. Catégorie des déchets

Les déchets sont regroupés en trois grandes catégories :

- Les déchets inertes.
- Les déchets dangereux.
- Les déchets non dangereux.

I.9.1. Les déchets inertes

Les déchets inertes sont les déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou nuire à la santé humaine.



Figure I. 2 : déchets inertes

I.9.2. Déchets dangereux

Les déchets dangereux sont les déchets issus de l'activité industrielle contiennent, en quantité variable, des éléments toxiques ou dangereux qui présentent des risques pour la santé humaine et l'environnement et qui de ce fait, nécessitent un traitement particulier, adapté à leur dangerosité. Un déchet dangereux présente une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : explosif, comburant, inflammable, irritant, nocif, toxique, cancérigène, infectieux, corrosif, mutagène [14]



Figure I. 3 : déchets dangereux

I.9.3. 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 :

I.9.3.1. Déchets biodégradables

Les bio déchets 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 bio déchets (Figure. I.4) [15].



Figure I.4: Photos de déchets biodégradables [15]

I.9.3.1. 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 [15].



Figure I.5 : Photos de déchets recyclables.

I.10. Recyclage

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets (déchet industriel ou ordures ménagères) qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui composaient un produit similaire arrivé en fin de vie, ou des résidus de fabrication [16]

I.10.1. Définition du recyclage

C'est la transformation d'un produit pour en faire une nouvelle utilisation. Recycler permet d'avoir à nouveau de la matière première. Ainsi, on peut fabriquer de nouveaux produits ou créer de l'énergie, sans puiser dans les ressources naturelles (arbres, minerais, pétrole).

I.10.2. Principe de recyclage

La stratégie des « Trois R » constitue le modèle de gestion des déchets et des produits en fin de vie sur lequel repose son action [17] :

- Réduire la quantité de produits qui arrivent en fin de vie.
- Réutiliser des produits ou certaines de leurs parties qui deviendraient autrement des déchets
- Recycler les matières premières.

I.10.3. La chaîne de recyclage

Étape 1 : Collecte de déchets Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Dans les pays développés, les ordures ménagères sont généralement incinérées ou enfouies en centres d'enfouissement pour déchets non dangereux. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence.

La collecte sélective, dite aussi « séparative » et souvent appelée à tort « tri sélectif » est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui jette le déchet le trie lui-même. À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations mécanisées permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Un tri manuel, par des opérateurs devant un tapis roulant, complète souvent ces opérations automatiques. Avant ce stade, le verre brisé est systématiquement écarté pour éviter les risques de blessure.

Étape 2 : Transformation Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

Étape 3 : Commercialisation et consommation Une fois transformées, les matières premières issues du recyclage sont utilisées pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. En fin de vie, ces produits seront probablement jetés, et certains d'entre eux pourront être à nouveau récupérés et recyclés [16].

I.11. Electrification des polymères isolants

Dans le domaine électrique, le champ d'application des isolants organiques solides (les polymères) est étendu : lignes de transport d'énergie, câbles de télécommunication, condensateurs, alternateurs, moteurs électriques, systèmes électroniques et composants de puissance terrestres et embarqués sur satellites... L'utilisation de ces matériaux dans l'isolation électrique présente plusieurs avantages tels que : d'excellentes propriétés électriques (résistivité, rigidité, permittivité), une bonne tenue mécanique et tribologique et une stabilité dimensionnelle. Ajoutons à cette liste, la mise en œuvre facile, le faible poids et pour certains la possibilité de recyclage

I.11.1. Charge par effet triboélectrique

Le chargement par effet triboélectrique, ou par frottement, est un phénomène caractérisé par le transfert de charges entre deux corps électriquement neutres suite à leur séparation après un contact intime (Figure I.6). Ce transfert de charges entraîne le chargement d'un matériau positivement et l'autre négativement. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation et de nouveaux contacts auront pour effet de produire de nouveaux transferts de charges. Ce phénomène est influencé par plusieurs facteurs internes et externes dont l'influence aura une conséquence directe sur l'efficacité du transfert de charge [18].

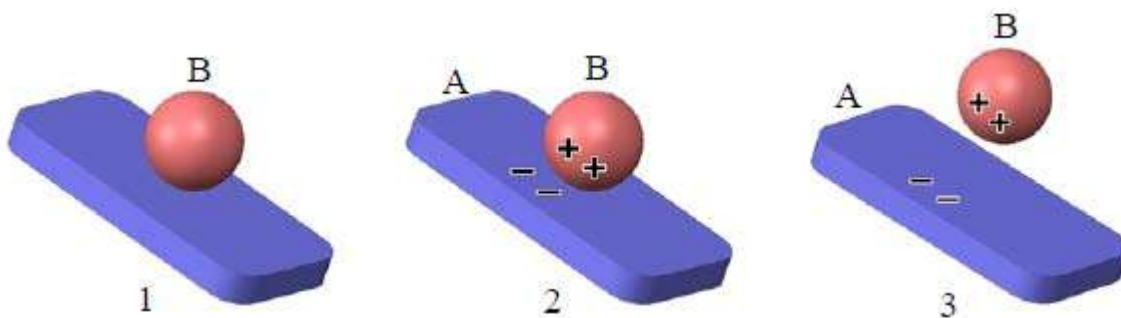


Figure I.6 : L'échange de la charge électrique entre deux surfaces par effet triboélectrique:
1. Surface « A » et la particule « B » sont neutres; 2. La surface A et la particule « B » sont en contact; 3. Après la séparation, la surface « A » a la tendance de se charger négativement, et la particule « B » positivement

I.11.2. Charge par rouleau électrostatique

Le contact entre deux matériaux est, en fait, suffisant pour produire un phénomène d'électrisation. Un diélectrique peut être aussi chargé avec un rouleau électrostatique en contact avec la surface libre de l'échantillon et dont le potentiel de charge est aussi contrôlé par la source haute tension [19].

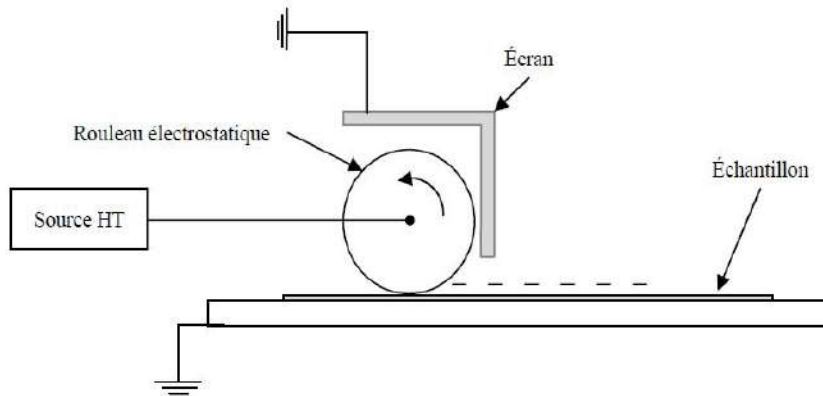


Figure I.7 : Principe d'un dispositif de charge par rouleau électrostatique.

Le transfert de charge au contact entre le rouleau et la surface du diélectrique est très probablement de type électronique. La charge séparée résulte des différences dans la structure électronique des deux corps en contact. Elle est influencée tout d'abord par la nature des matériaux et par les traitements subis par leurs surfaces. La distribution de charge de surface déposée étant homogène à l'échelle macroscopique et ces rouleaux sont utilisés pour charger les feuilles de papier dans les imprimantes laser.

I.11.3. Charge par induction

Le phénomène d'influence correspond à l'apparition de charges électrostatiques sur un corps conducteur dû à la proximité d'un corps déjà chargé, sans qu'il y ait contact entre les deux. En effet la présence du corps chargé induit un champ électrique à l'intérieur du corps influencé produisant ainsi des forces qui vont s'exercer sur les porteurs de charges libres, ayant pour conséquence une redistribution de ceux-ci. La charge ainsi induite sera de signe opposé à la charge du corps influençant. En fait, en présence d'un champ électrique le matériau se polarise, une charge surfacique sera induite, dite de polarisation

I.11.4. Charge par décharge couronne

La création des charges sur la surface des isolants polymères peut être réalisée par plusieurs procédés : décharge couronne, triboélectricité, piézoélectricité ou par faisceaux d'électrons. Dans la

plupart des applications électrostatiques actuelles, le chargement est réalisé soit par décharge couronne soit par triboélectricité, en raison de leur simplicité, sûreté et faible coût. La décharge couronne est une décharge autoentretenue non destructive qui peut apparaître lorsqu'une différence de potentiel suffisamment élevée est appliquée entre des électrodes asymétriques, tels que fil – plan ou pointe – plan. La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique inhomogène dans l'espace inter-électrodes. Au voisinage de l'électrode pointue, le champ peut être suffisamment élevé pour provoquer l'ionisation de l'air et les charges qui en résultent sont entraînées vers l'électrode à faible champ où se situe la surface à charger. L'intervalle d'aire entre électrodes comporte deux zones : une zone ionisée et une zone de dérive [20].

I.11.4.1. Décharge couronne positive

La décharge couronne positive se produit quand l'électrode pointue est portée à un potentiel positif et la plaque reliée à la terre (Figure I.8). Dans ce cas, des électrons sont produits par photoionisation autour de la pointe où le champ est intense et sont accélérés vers l'anode (l'électrode de petit rayon de courbure). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieur au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque).

Il existe différents régimes pour la décharge couronne. En augmentant la tension, la décharge couronne positive devient une décharge lumineuse continue, cette décharge se transforme en claquage si la tension est très élevée. Lorsque le champ électrique est augmenté, une fine couche d'air ionisé entre les deux électrodes peut être observée. Ce régime s'appelle la décharge de type « streamer »

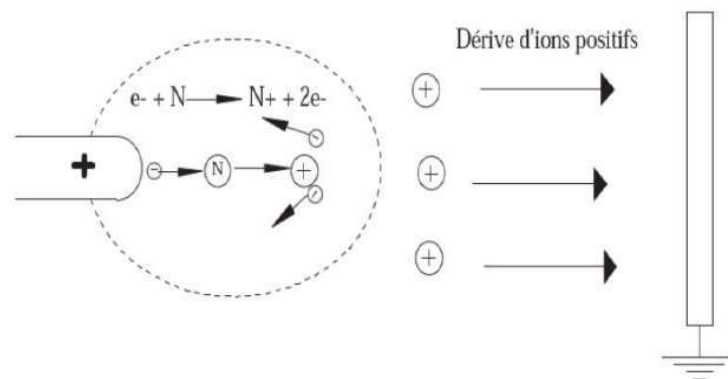


Figure I.8 : Description de la décharge couronne positive.

I.11.4.2. Décharge couronne négative

La décharge couronne négative se produit quand l'électrode pointue est portée à un potentiel négatif. Quelle que soit la polarité, il y a toujours création d'électrons. Dans ce cas, les ions positifs créés (dans la zone d'ionisation autour de la pointe) reviennent rapidement à la cathode (Figure I.9). Tandis que, les ions négatifs sont repoussés par l'électrode sous tension vers la zone où le champ est plus faible (zone de dérive) et peuvent migrer vers la plaque reliée à la masse. En augmentant la tension, la décharge couronne négative atteint le régime d'impulsions de *Triche* à une fréquence qui dépend du courant moyen [21]. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques.

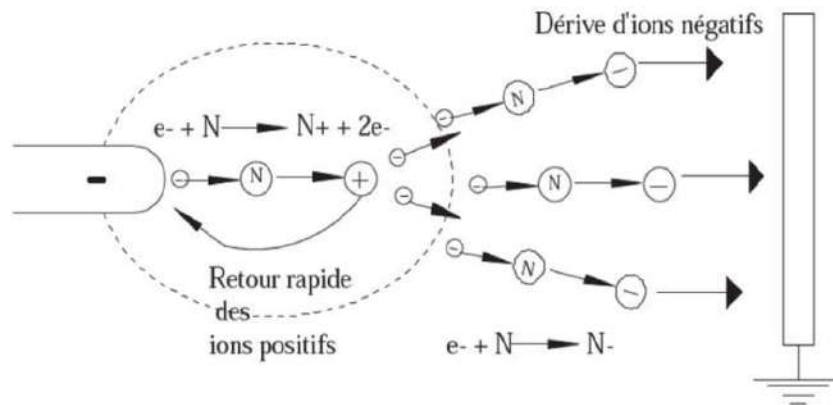


Figure I.9 : Description de la décharge couronne négative.

I.11.4.3. Décharge couronne alternative

En plus des décharges en régime continu, on peut également créer une décharge en régime alternatif en appliquant une tension sinusoïdale à la pointe. Dans ce cas, les processus de la décharge soumise à une excitation alternative sont identiques à ceux décrits pour une excitation continue, dans la mesure où l'intervalle de temps entre les inversions de polarité est suffisamment long pour que toutes les charges résiduelles de l'alternance précédente soient écoulées. Ceci implique l'existence d'une fréquence f et d'une distance inter-électrodes d limites reliées par l'expression suivante :

$$d_{max} = \frac{\mu E}{\pi F} = f_{max} = \frac{\mu E}{\pi F}$$

Avec μ la mobilité des ions et E l'amplitude du champ électrique.

Si l'excitation est supérieure à cette fréquence m_{ax} , la charge d'espace va osciller et augmenter à chaque période entre les électrodes. Par contre, si la fréquence est inférieure à f_{max} la décharge couronne alternative se comporte comme en continu. Cet effet cumulatif aura pour conséquence des passages à l'arc pour des potentiels plus faibles qu'en continu.

I.12. Théorie des bandes d'énergie

I.12.1. Cas des matériaux isolants parfaits

La structure de bande d'énergie d'un isolant résulte de la combinaison de la nature ondulatoire de l'électron et de la périodicité du réseau cristallin. Les électrons du cristal (intrinsèque ou injectés) ne peuvent occuper qu'un certain nombre d'états d'énergie permis qui se répartissent en bandes séparées par des intervalles d'énergies interdits, communément désignés par le mot anglais « gap ». [22].

Comme l'illustre la figure I 10, le matériau isolant présente deux particularités la bande suivante (bande de conduction) est vide et séparée de la bande de valence par un gap, E_g de l'ordre de quelques eV ($E_g > 5$ eV).

La seule possibilité offerte à un électron pour changer d'état sous l'application (par exemple) d'un champ électrique est de transiter vers la bande vide suivante (bande de conduction). Cependant, étant donnée l'importante valeur de E_g , l'énergie fournie par le champ électrique reste insuffisante pour produire une telle transition et l'application d'un champ électrique (modéré) ne s'accompagne pas d'une circulation de charges.

Par contre si un électron excédentaire est injecté dans ce cristal parfait mis à la masse, il sera rapidement évacué et aucune localisation (ou piégeage) de charge n'est possible. Ceci constitue la définition « académique » d'un isolant.

En pratique cependant la situation est beaucoup plus complexe, car d'une part la présence de défauts et d'impuretés dans l'isolant est un fait inévitable et d'autre part le plus grand nombre des isolants qui nous entourent sont souvent des milieux polycristallins ou amorphes (ils ne présentent pas de structure cristalline parfaite). Ces « imperfections » jouent un rôle important dans le comportement des isolants soumis à une injection de charges en général et une irradiation électronique en particulier. Nous allons donc rappeler leur rôle dans le transport et la localisation de charges.

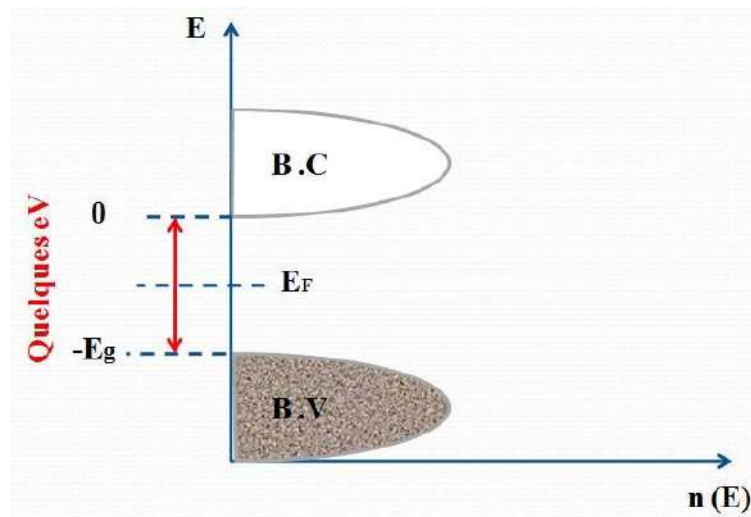


Figure I.10 : Représentation schématique de la variation de la densité d'états possibles, dans le cas d'un isolant cristallin parfait. E_F est le niveau de Fermi.

I.12.2. Défauts et impuretés

Les défauts peuvent être aussi bien des défauts ponctuels (lacune, impureté en substitution, atome en position interstitielle, défauts de Schottky et Fränkel, etc.) que des défauts linéaires et bidimensionnels (dislocations et joints de grains) ou bien encore des défauts d'empilement inhérents à la structure du matériau. La présence de ces défauts se traduit par la modification de la structure de bande de l'isolant. Les impuretés, les lacunes, etc., sont capables (si les perturbations qu'elles génèrent sont assez importantes) de créer des niveaux localisés dans la bande interdite. Selon la configuration du défaut, le niveau créé est susceptible de localiser (pendant un temps plus ou moins long) un ou plusieurs électrons pour les restituer, sous l'action d'une excitation, à la bande de conduction (niveau donneur) ou bien de localiser un ou plusieurs trous pour les céder par la suite à la bande de valence (niveau accepteur).

Un isolant contient en général plusieurs types de défauts ponctuels répartis aléatoirement dans l'espace. Par conséquent, l'ensemble des niveaux créés forme une ou plusieurs bandes d'énergie dans la bande interdite (figure I.11 (a)). La largeur de cette bande ou de ces bandes est d'autant plus importante que la densité des défauts ponctuels est grande. Plus la concentration en défauts est importante plus cette bande est large. À très forte concentration de défauts, cette bande peut atteindre la bande de conduction.

La description de la bande d'impuretés ne considère souvent qu'un seul électron, or les états de cette bande peuvent généralement contenir plusieurs électrons. Tout électron introduit dans le solide subit une interaction avec l'électron qui occupe le même site, il apparaît donc une énergie de répulsion U appelée énergie de Hubbard (Figure I.11 (b)).

Cette interaction induit la séparation en deux bandes distinctes de la bande d'impureté appelées bandes Hubbard, distantes de l'énergie U . La bande inférieure contient les électrons de valence de l'atome d'impureté. La bande supérieure contient les électrons qui forment un site chargé négativement.

La mobilité des électrons dépend fortement de la température et de la concentration des défauts. Plus cette concentration est importante et plus la distance entre défauts est faible et plus la mobilité des électrons par sauts successifs est accrue. Notons-en plus que le changement d'état (et donc la mobilité) d'un électron localisé dans ces bandes ne peut se faire sans le concours d'une énergie fournie par les phonons. La mobilité dans les bandes d'impuretés est donc activée par la température.

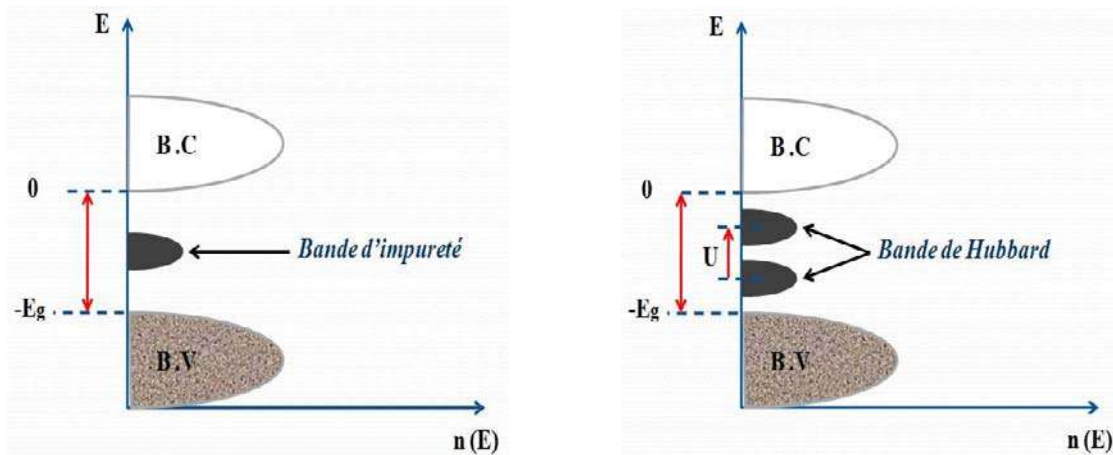


Figure I.11 : (a) : Représentation schématique de la densité d'états possible dans un isolant cristallin contenant un certain nombre de défauts ponctuels. (b) : représentation des bandes de Hubbard dans un schéma de bandes.

I.12.3. Modèle de la surface

Le modèle le plus simple de l'isolant qui découle de la théorie de bandes dans l'isolant est un modèle avec une couche de surface où la densité de pièges est différente de celle du volume. Les impuretés, les bouts de chaînes, l'oxydation de la surface provoquent l'existence de pièges de surface [23]. On peut représenter une structure de bandes pour le volume qui serait prolongée par une couche de surface avec des pièges localisés (figure I.12).

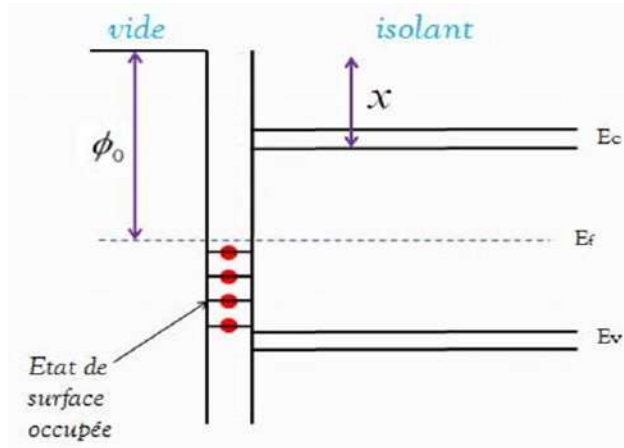


Figure I.12 : Modèle énergétique de la surface d'un isolant

I.12.4. Contact métal-isolant

Dans le cas où l'isolant était parfait, on admet que la bande interdite est « propre » c'est-à-dire sans états de surface ni piégés à l'interface métal-isolant et il n'est soumis ni à un champ ou une activation extérieure, dans ce cas, il ne peut y avoir de chargement appréciable par transfert d'électrons depuis ou vers l'isolant pour égaliser les niveaux de Fermi. En effet, l'énergie thermique est insuffisante pour passer des électrons du niveau de valence au niveau de conduction.

Cependant, en pratique, on relève l'existence d'une densité d'états localisés dus aux impuretés et défauts dans tous les isolants. Un processus type saut donne une certaine mobilité au porteur entre ces sites de pièges. Un contact métal-isolant répété conduit à une accumulation de charges sur la surface de l'isolant. En l'absence de la conduction en surface, la charge ainsi déposée reste stable en surface et ne peut pas s'injecter en volume.

Le contact métal-isolant implique un transfert de charges entre les deux matériaux constituant le contact du fait de la différence entre les deux niveaux de Fermi respectifs. Dans le cas où les niveaux de Fermi ne coïncideraient pas, il se produit que les pièges de surface de l'isolant se remplissent ou se vident de façon à retrouver l'équilibre des niveaux de Fermi et donc la neutralité globale du matériau (figure I.13).

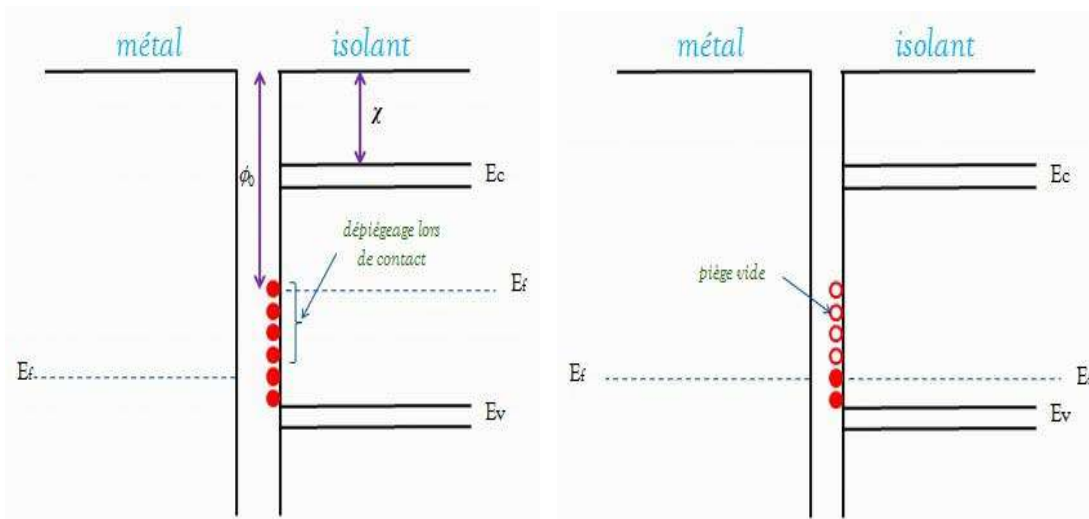


Figure I.13 : Modèle énergétique du contact métal-isolant.

Où :

χ : est l'affinité électronique de l'isolant.

ϕ_0 : est le travail de sortie des pièges.

La hauteur de la barrière de potentiel dépend de la nature du contact, dans le cas du contact avec un isolant, la hauteur de la barrière est diminuée par l'affinité électronique de l'isolant χ .

I.12.5. Le travail de sortie

Un métal contient des électrons libres qui peuvent se mouvoir, mais qui ne peuvent pas spontanément quitter le métal à cause de la barrière de potentiel à l'interface métal-vide (figure I.14). Cependant, du fait de leur mouvement, ces électrons acquièrent une certaine énergie cinétique occupant ainsi des niveaux d'énergie différents. Le niveau d'énergie le plus élevé occupé par un

électron est appelé niveau de Fermi. Le travail de sortie ϕ d'un métal est la différence $\chi - \xi$ qui correspond donc à l'énergie nécessaire à un électron pour quitter le métal [24].

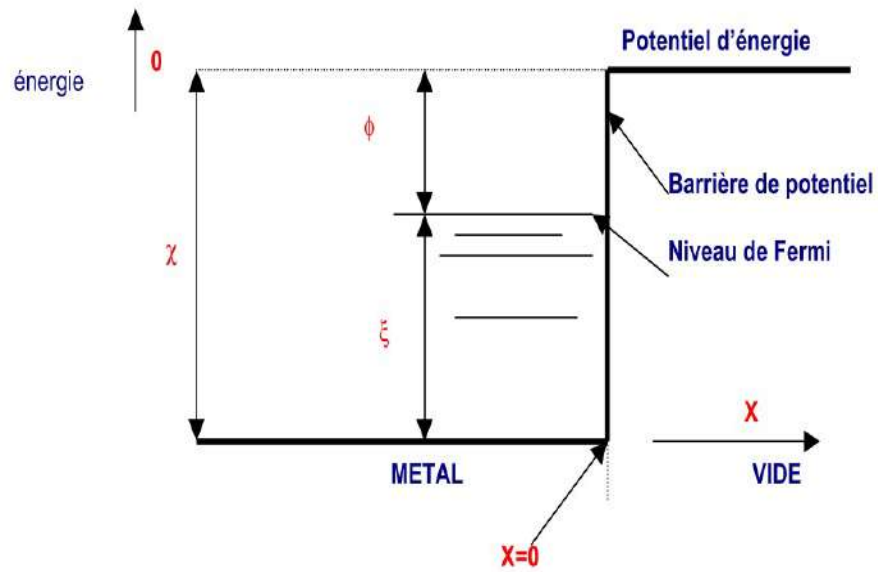


Figure I.14 : Travail de sortie ϕ d'un métal.

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique relative aux quelques notions sur les polymères, leurs structures et quelques domaines d'application, ainsi les différentes catégories des déchets en plastiques ou ils constituent non seulement un grand potentiel économique mais aussi un énorme danger écologique.

Nous avons aussi présenté les différents concepts du mécanisme de chargement électrique des polymères isolants et la théorie des bandes d'énergie qui décrit le contact entre les différents matériaux.

II.1. Effet tribo-électrique

II.1.1. Description

La triboélectricité – du grec « *tribein* » qui signifie frotter – désigne le phénomène électrostatique par lequel un transfert de charges électriques est créé lorsque deux matériaux de nature différente sont mis en contact. Quand deux matériaux électriquement neutres se frottent l'un à l'autre, des charges électriques sont transférées au niveau surfacique de l'un vers l'autre, dans un même sens, il en résulte l'obtention de deux matériaux différemment chargés. La charge statique ainsi acquise se produit dans un système où généralement la conductivité du matériau est faible, elle persiste donc même après rupture du contact, et de nouveaux contacts auront pour effet de produire d'autres transferts [25-26], ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés (Figure II.1). C'est le mécanisme physique le plus utilisé pour charger des matériaux granulaires ou micronisées plastiques en vue de leur séparation dans un champ électrique intense [27-28].

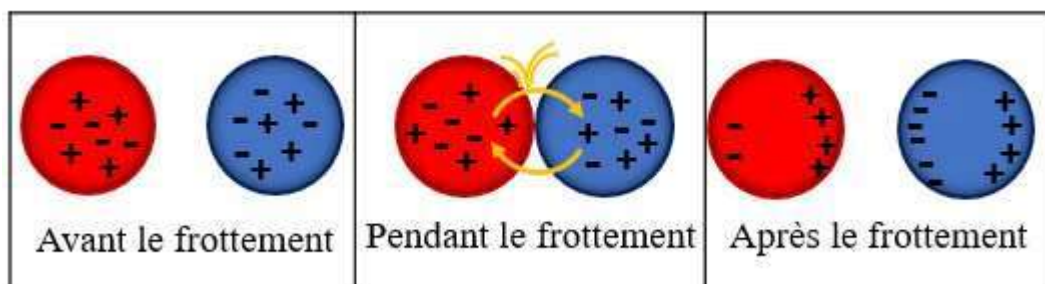


Figure II.1: Transferts de charges électriques dus au frottement de deux corps ; l'un s'électrise positivement et l'autre négativement.

II.1.2. Série triboélectrique

Lors du frottement de deux corps l'un contre l'autre, l'un des deux vont se charger positivement et l'autre négativement, cette variation de signe de charge est liée à la nature de chaque matière.

On définit des séries triboélectriques, un classement des corps selon leur tendance à se charger positivement ou négativement, c'est-à-dire des listes ordonnées de matériaux : la position relative définit le signe des charges, et la « distance » au sein de la liste donne une idée de l'importance de l'échange, donc la série triboélectrique indique quelle matière sera négative (excès d'électrons) ou positive (déficit d'électron) après une électrisation par frottement. [30] Les séries triboélectriques varient d'un auteur à l'autre et il est tout à fait certain que l'état de surface des corps frottés est très important [29].

On trouve en bas quelques séries triboélectriques expérimentales pour différents matériaux plastiques, selon différents auteurs : a [31], b [32], c [33], d [34]. (Figure II.2).

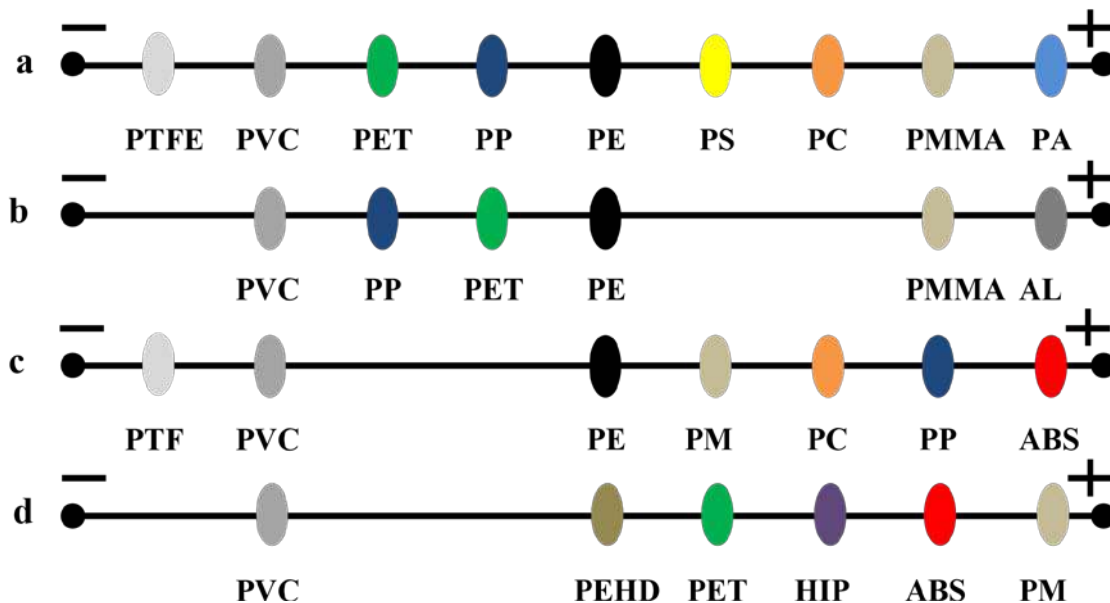


Figure II.2: Série triboélectrique expérimentale pour différents matériaux plastiques utilisés dans la fabrication des équipements informatiques et électriques selon différents auteurs

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

II.2. Dispositifs de charge

Multiples travaux ont été publiés sur les procédés de chargement triboélectrique, qui utilisent essentiellement : des ventilateurs, des tubes rotatifs, des lits fluidisés (créés par des soufflantes ou des compresseurs), des micro-cyclones, ou des chargeurs statiques [35, 36, 37].

II.2.1. Dispositif de charge par ventilateur

Les principaux éléments de cette installation sont (Figure II.3) : le tube cylindrique isolant en PVC, le moteur à courant continu qui entraîne l'hélice isolante et le support métallique. Le

dispositif utilise l'air ascendant qui donne naissance à des turbulences dans le tube contenant le mélange de particules, provoquant ainsi leur tribo-électrification lorsque celles-ci entrent en collisions entre-elles ou avec les parois du tube [38].

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

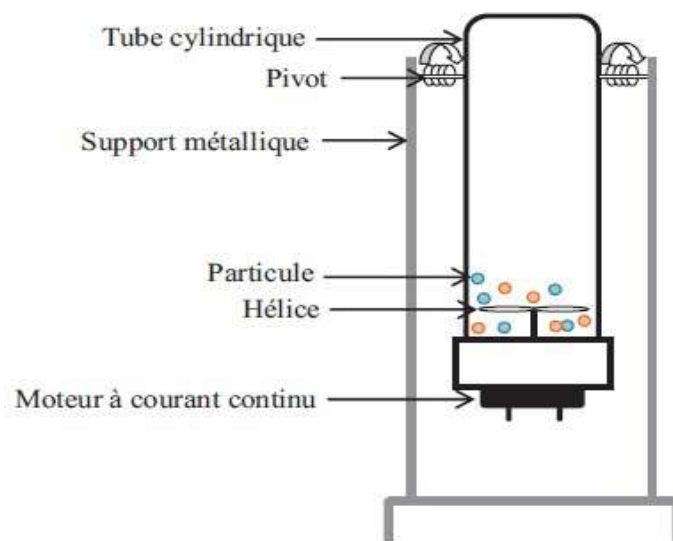


Figure II.3: Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur [38].

La figure II.4 représente un dispositif similaire équipé d'une hélice d'un diamètre de 50 mm tournant dans un tube cylindrique en polyméthacrylate de méthyle (PMMA) d'un diamètre de 60 mm. Le mélange de particules déposé dans le tube acquiert une charge triboélectrique lors de la mise en marche de l'hélice [39]. Ce dispositif peut être adapté à un fonctionnement continu (figure II.5) en introduisant les granules par sa partie supérieure, et en les récupérant chargés par sa partie inférieure.

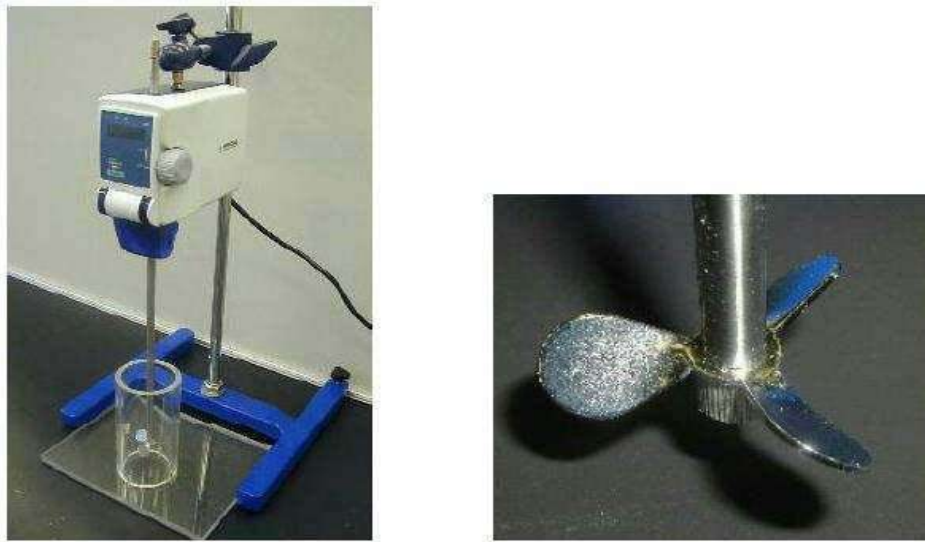


Figure II.4: Dispositif de charge tribo-électrique à hélice ; (a) : Chargeur ; (b) : Hélice.

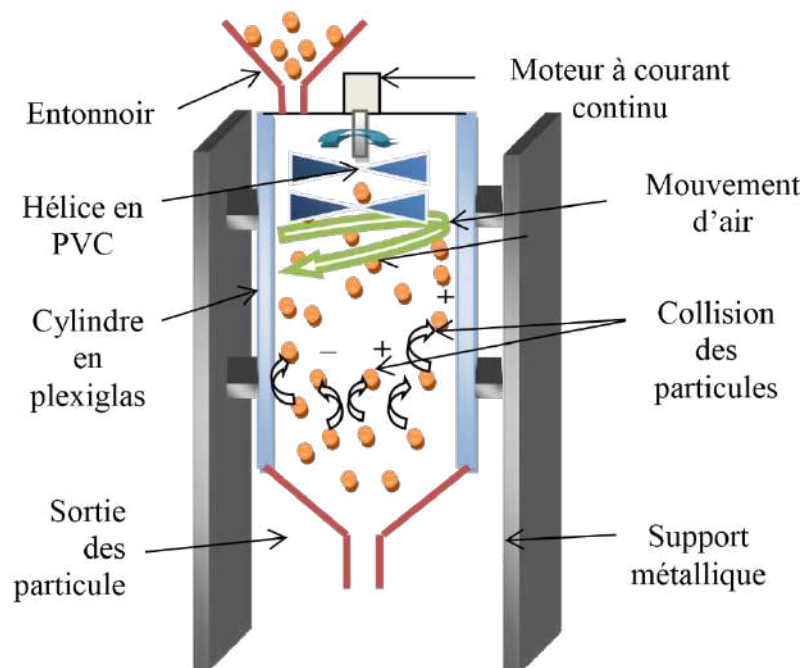


Figure II.5: Dispositif de charge tribo-électrique à plusieurs hélices et à fonctionnement continu

II.2.2. Dispositif de charge par cyclone

Le dispositif de charge par cyclone schématiquement dans la (Figure II.6), il est disposé en position verticale et tourné vers le sol. Il est constitué d'une partie cylindrique et un bas conique.

En utilisant un convoyeur vibratoire, le mélange granulaire à charger sera placé en amont directement à l'intérieur de la turbine dont la vitesse de rotation peut être modifiée. Le tribocyclone, la collision entre les particules et aussi le frottement continu entre les particules et la paroi, est suffisant pour charger les granules pour qu'à la fin du dispositif ils acquièrent une charge électrique suffisante sans besoin de prolonger leur séjour à l'intérieur du cylindre.

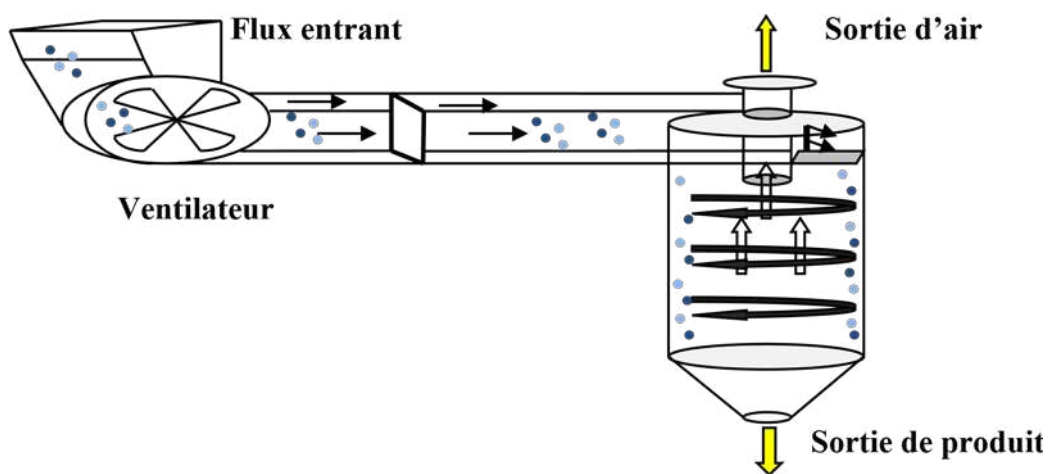


Figure II.6: dispositif de chargement par cyclone

II.2.3. Dispositif de charge de type statique

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique en matière isolante ou métallique (Figure II.7), à l'intérieur de laquelle sont disposées plusieurs plaques inclinées. Les particules glissent le long de ces plaques par gravitation et se chargent par frottement avec celles-ci (effet tribo-électrique) [39, 40].

La simplicité de la construction est remarquable. L'autre atout de ce dispositif : la possibilité de le doter de plusieurs sets de plaques, de matériaux différents, interchangeables.

Ainsi, le dispositif peut être équipé des plaques assurant une charge positive pour un constituant du mélange à séparer et négative pour l'autre. La cinématique des particules à l'intérieur du dispositif favorise aussi les collisions entre particules.

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

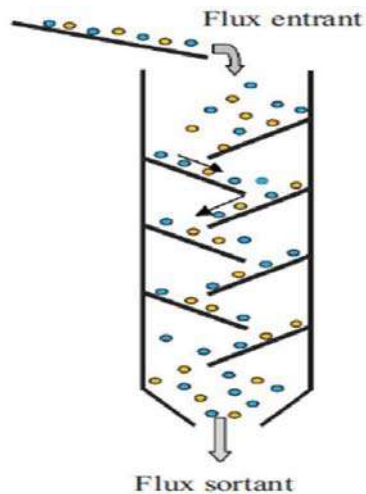


Figure II.7: Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [39, 40].

II.2.4. Dispositif de charge par vibrations

Une autre solution pour charger les particules est obtenue par le dispositif à vibrations. Une installation de ce type a été développée par Blajan et al [35] (Figure II.8). Le matériau à charger glisse dans des canaux en zigzag mis en mouvement vibratoire [41, 42] selon les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique et un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif.

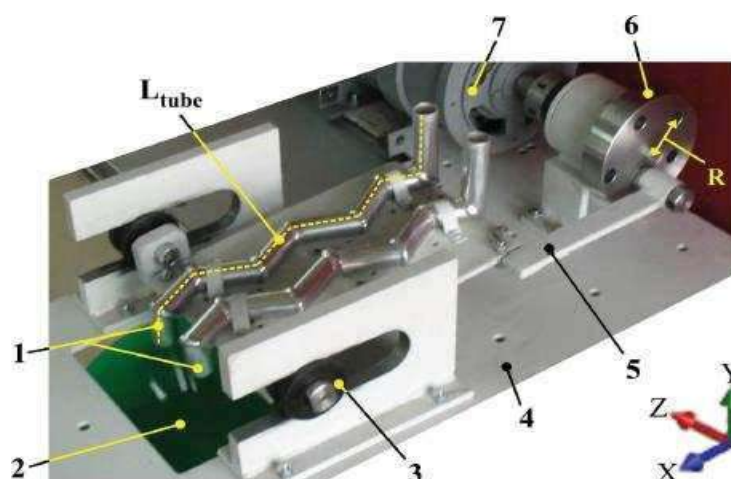


Figure II.8: Dispositif à vibrations ; 1 : tubes de charge ; 2 : sortie des particules chargées ; 3 : glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ; R : rayon ; X, Y, Z : direction du mouvement ; L_{tube} : longueur du tube [41, 42].

II.2.5. Dispositif de charge à lit fluidisé

Le dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé (Figure II.9), est constitué d'un tube cylindrique en position verticale, dont la matière granulaire est déposée dans une chambre de chargement tribo-électrique, et déposée sur un écran : c'est le distributeur aérien.

Le jet aérien est produit par une soufflante avec un débit variable et contrôlable, l'air est dispersé quasi-uniformément partout dans la coupe transversale de la chambre de triboélectrification. Dans l'état de lit fluidisé produit par l'air montant, les granules sont dispersés dans le volume de chambre de chargement, cela va multiplier des collisions des particules entre elles, et contre la paroi. Les particules restent dans l'état fluidisé pendant un temps précis, qui est considéré être assez suffisant pour la tribo-électrification. Par suite les granules chargés coulent par une porte de production sur un plan incliné c'est le mécanisme de conduite vers la mesure de charge ou la séparation électrostatique. [43, 44]

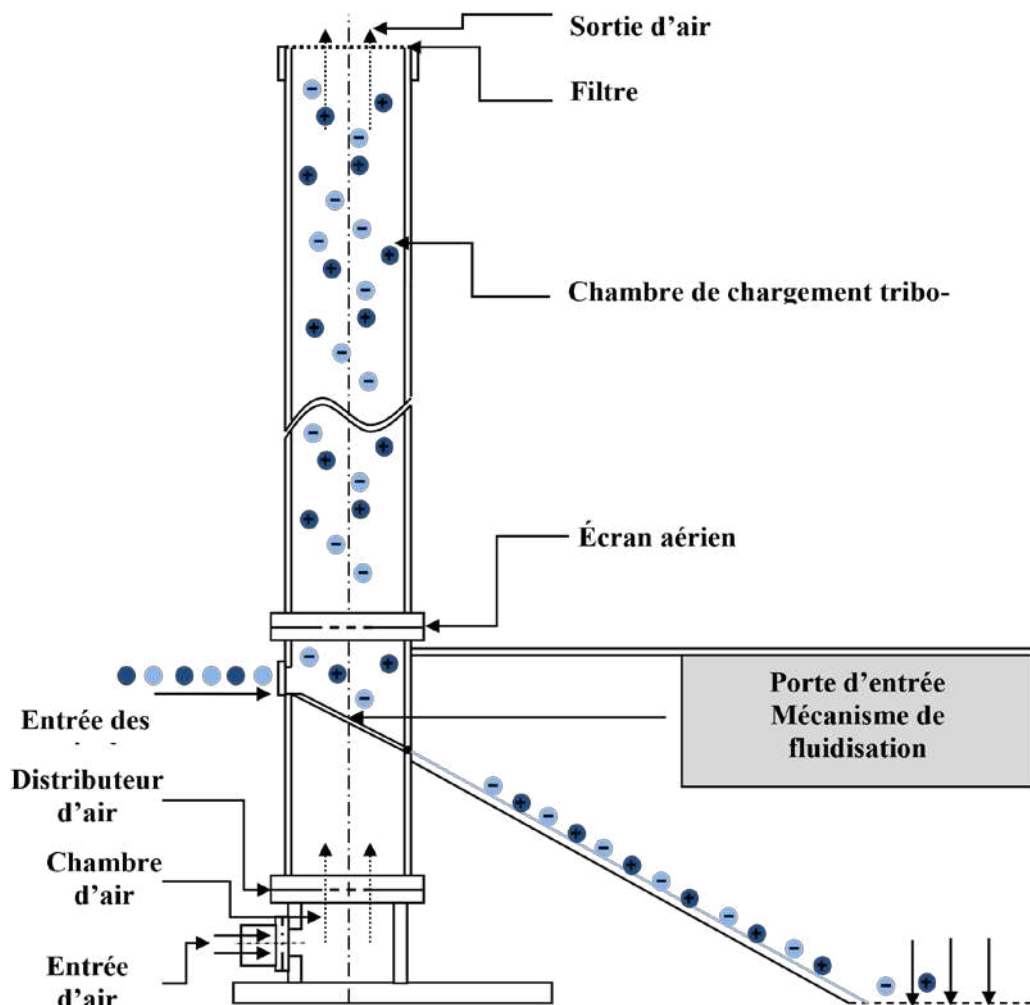


Figure II.9: Représentation schématique d'un dispositif de chargement à lit fluidisé

II.2.6. Dispositif de charge à tambour tournant

Le dispositif de charge à cylindre rotatif (Figure II.10). Est composé d'un cylindre en matière isolante généralement, et tourne à une vitesse bien définie, entraîné par un moteur électrique. Les matériaux granulaires sont mis en mouvement à l'intérieur du cylindre, qui tourne autour d'un axe horizontal ou légèrement incliné, cette rotation pourra fournir non seulement une plus grande probabilité de collisions particule-particule, mais aussi une plus grande surface de contact pour les collisions particule-paroi. Les granules acquièrent des charges électriques de signes opposés [45, 46].

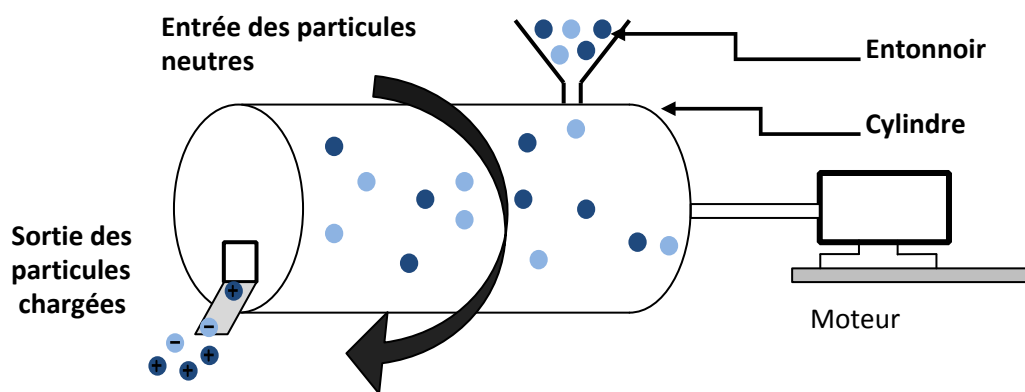


Figure II.10: Représentation schématique d'un dispositif de chargement par tambour tournant

Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté différents dispositifs de chargement triboélectrique dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières.

Nous avons constaté que la génération des charges par effet triboélectrique est un phénomène très complexe et peut être réalisée à travers une variété de dispositifs et peut influencer par plusieurs facteurs.

III.1. Introduction

La séparation électrostatique des matériaux isolants contenus dans un mélange granulaire est une technique de plus en plus utilisée dans l'industrie du recyclage des déchets, les technologies de traitement des matériaux sont largement utilisées pour le tri sélectif des matériaux solides par des forces électriques qui agissent sur les particules chargés ou polarisées [47].

III.2. Séparateur triboélectrique à plan incliné

III.2.1. Description

Le séparateur à plan incliné des mélanges granulaires en plastiques est constitué principalement des éléments suivants :

Une enceinte parallélépipédique ayant la forme U est placée sur un support en bois combiné par deux barres mobiles permettent de faire varier manuellement l'angle d'inclinaison de l'enceinte du 25 à 90° par rapport à l'horizontale (figure III.1). A l'intérieur de l'enceinte (la paroi inférieure) se déplace le mélange granulaire, tandis que les deux parois latérales constituent les électrodes. Ces électrodes en plaque d'aluminium sont alimentées par deux alimentations haute tension DC réglables de polarités opposées, pour générer un champ électrique intense (figure III.2).

Le mélange granulaire chargé peut glisser facilement sur la paroi inférieure en raison de la surface lisse du plan, et il se sépare sous l'action combinée de forces électriques. Les deux produits séparés sont collectés dans le compartiment approprié du collecteur qui est placé à l'extrémité inférieure du séparateur.

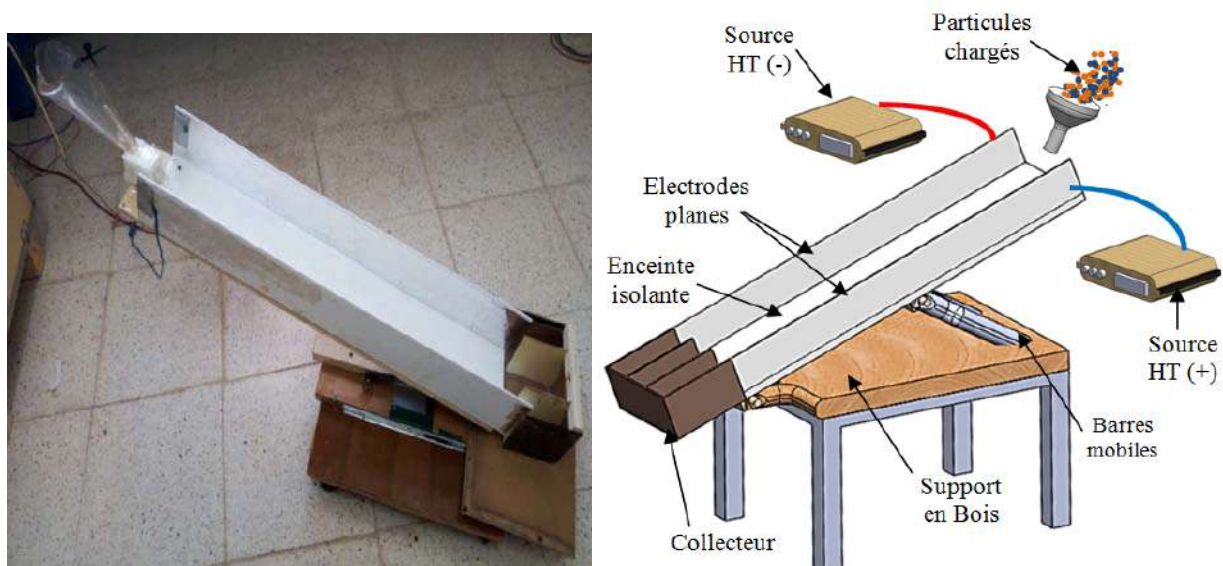


Figure III.1: Schéma de l'installation expérimentale de séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants



Figure III.2: Alimentation haute tension continu ; (a) polarité positive, (b) polarité négative

III.2.2. Installation de chargement triboélectrique à lit fluidisé

La figure III.3, représente l'installation de chargement triboélectrique à lit fluidisé. Le dispositif utilise la force aérodynamique fourni par une soufflante à vitesse variable pour le chargement des particules en plastique. Les particules acquièrent des charges électriques de signe opposé grâce aux contacts entre elle à l'intérieur d'un tube cylindrique.



Figure III.3: Installation de chargement triboélectrique à lit fluidisé

III.2.3. Procédure expérimentale

La séparation électrique à plan incliné (figure III.4) comporte essentiellement deux phases : le chargement triboélectrique (I) et la séparation électrostatique (II).

- I. Le chargement triboélectrique de mélange granulaire en plastique se fait grâce à un dispositif de chargement à lit fluidisé, ensuite les particules chargées glissent dans un plan incliné isolant et subissent à un fort champ électrique produit entre deux électrodes.
- II. La procédure de séparation électrostatique se produit par l'effet d'un champ électrique intense, où les particules chargées sont attirées par l'électrode de polarité opposée et tombent sous l'action de la force de la pesanteur vers le compartiment approprié dans le collecteur.

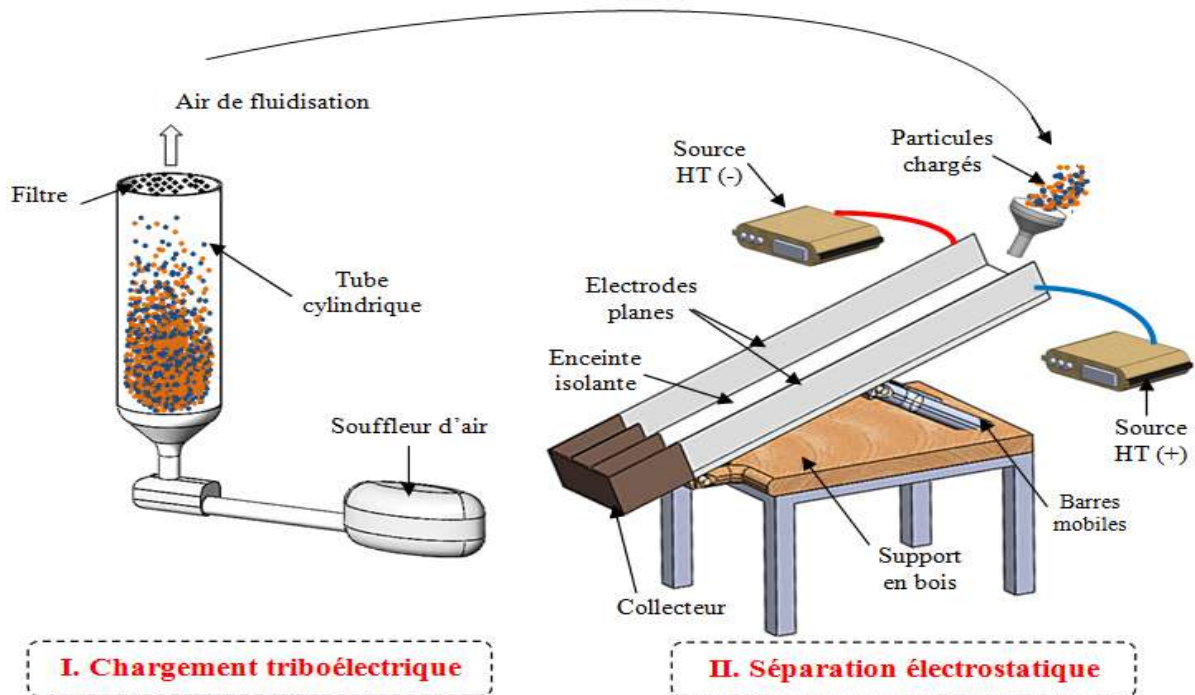


Figure III.4: Représentation schématique de l'installation expérimentale pour l'étude du processus de la séparation électrique à plan incliné

III.2.4. Procédure de déroulement des expériences

Les expériences ont été réalisées sur un mélange de 100g des granules en plastique, 50g de polyamide (PA) et 50g polycarbonate (PC), les granules ont une taille millimétrique variée de 2.5 jusqu'au 3.5 mm (figure III.5).



Figure III.5 : Photographie du mélange granulaire de PA (bleu) et de PC (orange).

Après la procédure du chargement triboélectrique des granules PA/PC par le dispositif de chargement à lit fluidisé. Les particules de PC seront chargées négativement et se déposent dans le compartiment approprié (situé près de l'électrode positive). Les particules de PA seront chargées positivement et se déposent dans un autre compartiment qui est situé près de l'électrode négative. Tandis que les particules faiblement chargées se déposent dans le compartiment qui se trouve au milieu du collecteur.

La performance du processus de séparation est estimée après le pesage des quantités relatives des deux produits collectés dans chaque compartiment afin de calculer les taux de récupération et de pureté de chaque matériau. Ces deux indicateurs déterminent l'efficacité du processus [48].

Le taux de récupération et le taux de pureté des produits séparés ont été calculés par les formules suivantes :

1. Le taux de récupération : C'est un paramètre qui permet d'évaluer le taux (en pourcentage) du produit récupéré en rapport avec le produit total introduit :

$$Rec(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \times 100 \quad (III.1)$$

Avec :

m_{ic}: La quantité du produit *i* considéré collecté dans la partie qui lui est destinée.

m_{it}: La quantité totale du même produit *i* introduit dans le séparateur.

2. Le taux de pureté : C'est un paramètre permet d'évaluer le taux de la pureté (en pourcentage) du produit collecté.

$$Pur(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \times 100 \quad (III.2)$$

Avec :

m_{ic}: La quantité du produit *i* considéré collecté dans la partie qui lui est destinée.

m_{tc}: La quantité totale (des deux produits) collectée dans la même partie du collecteur.

III.2.5. La mesure de la masse granulaire

Pour déterminer le taux de la pureté et de la récupération de chaque produit, nous avons pesés les produits avant et après la séparation avec une balance électronique de précision 0.1g.



Figure III.6 : balance électronique

III.3. Résultats expérimentaux

III.3.1. Influence de la haute tension

III.3.1.1. Taux de récupération

Les figures III.7 et III.8, représentent les résultats des expériences de séparation en termes de taux de récupération des deux produits en fonction de la haute tension DC appliquée aux électrodes du séparateur pour deux angles d'inclinaison différents (25° et 90°).

a) angle d'inclinaison $\theta = 25^\circ$

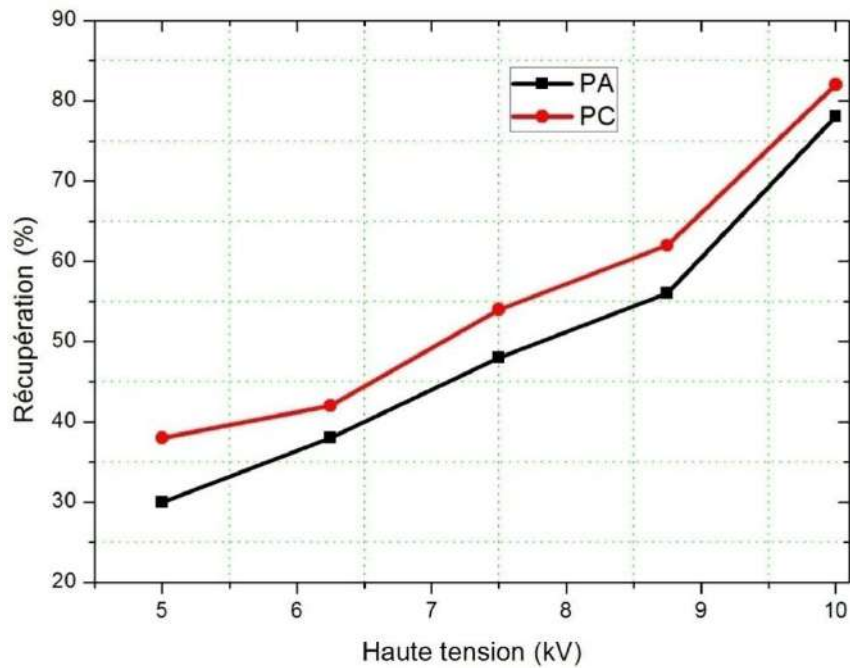


Figure III.7: Taux de la récupération du PA et PC après la séparation du mélange granulaire en fonction de la haute tension appliquée pour un angle d'inclinaison $\theta = 25^\circ$

b) angle d'inclinaison $\theta = 90^\circ$

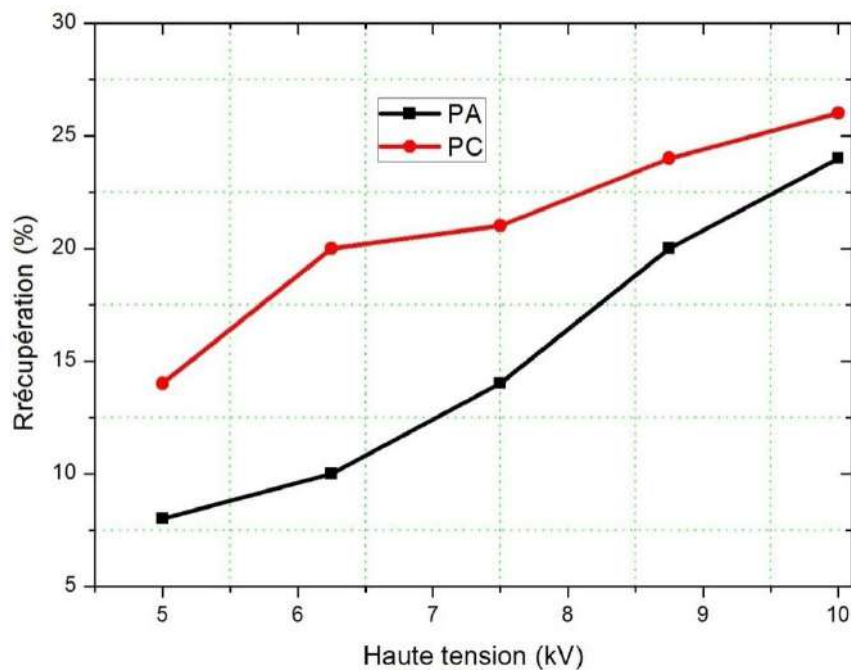


Figure III.8 : Taux de la récupération du PA et PC après la séparation du mélange granulaire en fonction de la haute tension appliquée pour un angle d'inclinaison $\theta = 90^\circ$

D'après les deux figures III.7 et III.8, on observe que les taux de récupération augmentent avec la haute tension appliquée aux électrodes quel que soit l'angle d'inclinaison. Ce résultat est dû à l'augmentation du champ électrique et, par conséquent, à l'augmentation de la force électrique appliquée aux particules. D'autre part, on voit clairement que la récupération des deux produits diminue si on augmente l'angle d'inclinaison de 25° à 90° , car la force gravitationnelle augmente plus que nécessaire ce qui rend les particules en mouvement plus rapide [49].

III.3.1.2. Taux de pureté

La pureté des deux produits récupérés en fonction de la haute tension appliquée aux électrodes du séparateur pour les deux angles d'inclinaison sont illustrés sur les figures III.9 et III.10

c) angle d'inclinaison de 25° .

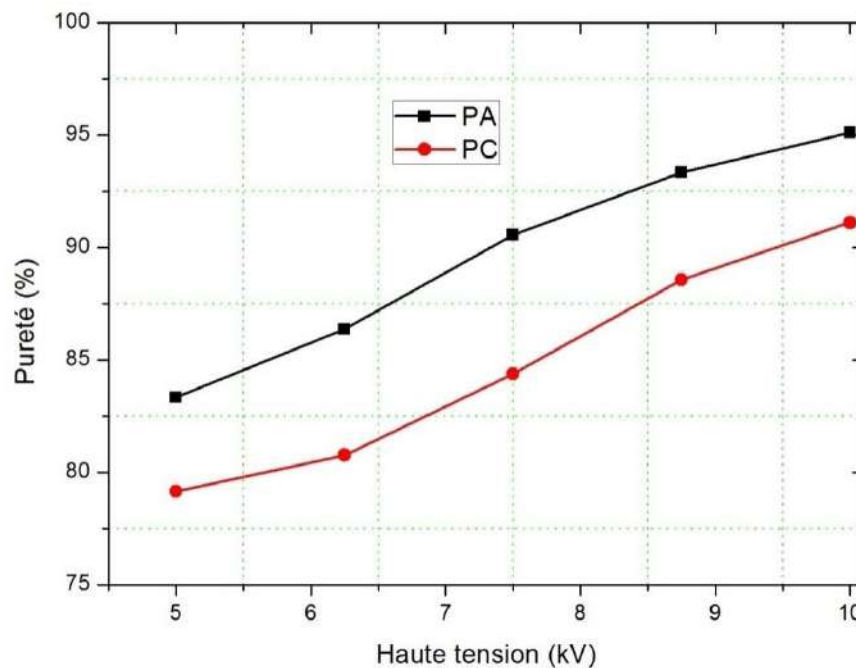


Figure III.9 : Taux de la pureté du PA et PC obtenus après la séparation du mélange granulaire en fonction de la haute tension appliquée pour un angle d'inclinaison $\theta = 25^\circ$.

d) Pour un angle d'inclinaison de 90° .

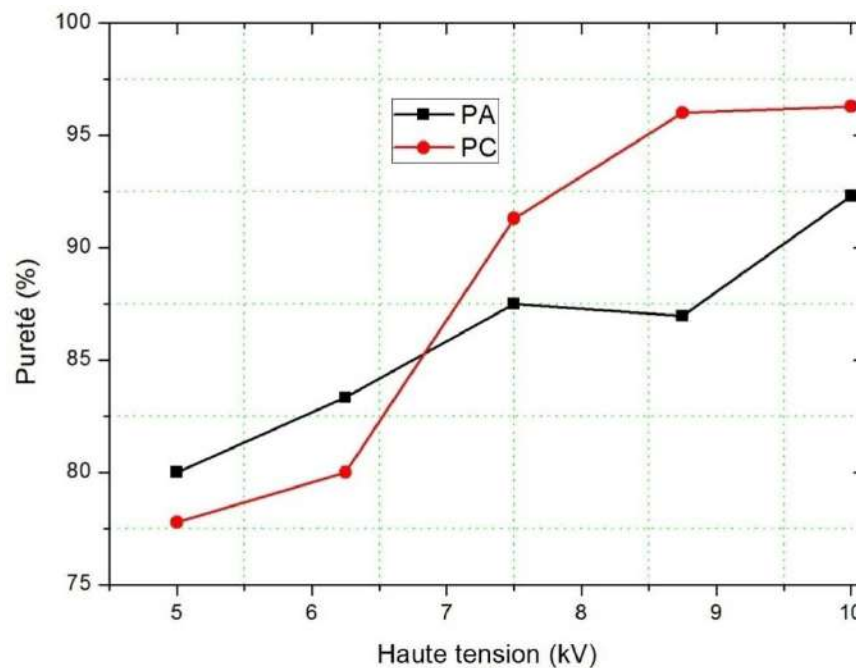


Figure III.10 : Taux de la pureté du PA et PC obtenus après la séparation du mélange granulaire en fonction de la haute tension appliquée pour un angle d'inclinaison $\theta = 90^\circ$.

La figure III.10, montre que la pureté des deux produits récupérés est légèrement augmentée avec la haute tension appliquée, avec des valeurs de pureté du PC inférieure à celui du PA. Cette observation s'explique par le fait que les particules de PA se chargent positivement et que les particules de PC se chargent négativement en raison des collisions entre eux. Mais, quand les particules des deux matériaux entrent séparément en collision avec les parois de la chambre de chargement en Polyéthylène téréphtalate « PET », ils acquièrent une charge négative. De sorte que la charge acquise par les particules de PC augment d'avantage en raison du contact avec les parois de PET. Par contre certaines particules de PA perdent une partie de leur charge puisqu'elles sont chargées avec une polarité opposée ; ce qui conduit à la réduction de la pureté du PC [50].

III.3.2. Influence de l'angle d'inclinaison

III.3.2.1. Taux de récupération

La figure III.11, montre les résultats des expériences de séparation en termes de taux de récupération des deux produits en fonction de l'angle d'inclinaison pour une haute tension fixe $V=10kV$.

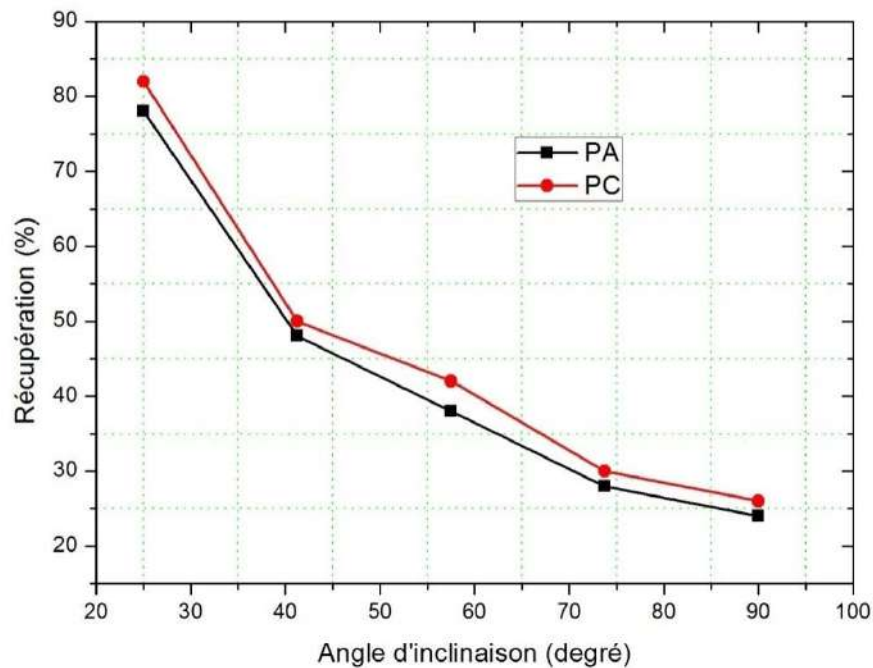


Figure III.11 : Taux de la récupération du PA et PC après la séparation du mélange granulaire en fonction d'angle d'inclinaison avec une haute tension fixe $V=10kV$.

On voit clairement que l'angle d'inclinaison a une influence significative sur le taux de récupération des produits séparés. Il est clair que plus l'angle est petit plus la récupération est meilleure (Figure III.11), puisque l'augmentation de l'angle d'inclinaison conduit nécessairement à l'augmentation de la force gravitationnelle ce qui augmente aussi la vitesse des particules. Cela mène à la réduction du temps de transit des particules [49,50].

III.3.1.1. Taux de pureté

La figure III.12, représente la pureté des deux produits dans les compartiments latéraux en fonction d'angle d'inclinaison pour une haute tension fixe $V=10kV$.

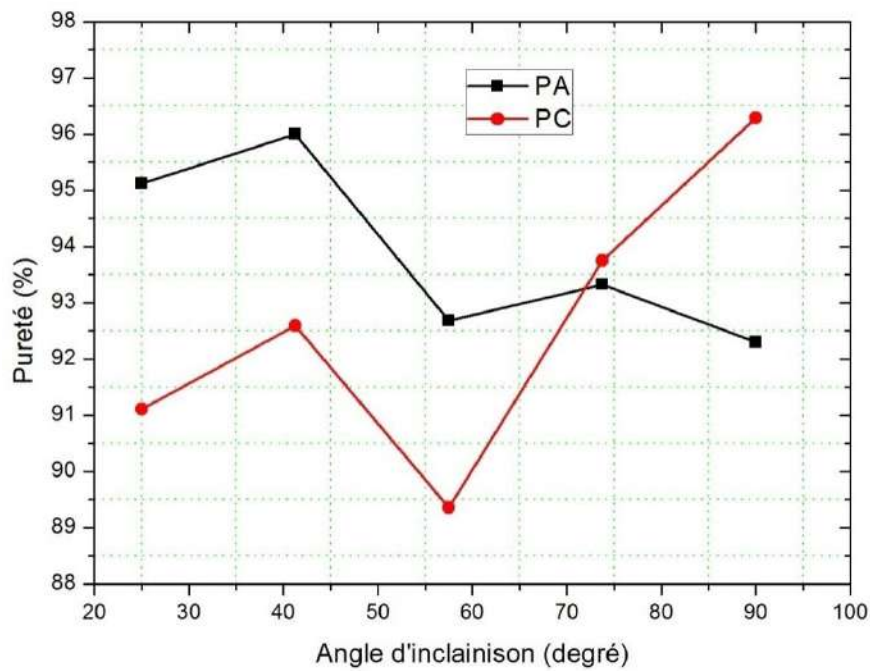


Figure III. 12 : Taux de la pureté du PA et PC après la séparation du mélange granulaire en fonction de l'angle d'inclinaison avec une haute tension fixe $V=10kV$.

La figure III.12, montre que la pureté des produits récupérés n'est pas significativement affectée par la variation de l'angle d'inclinaison. En effet, dans tous les cas, la valeur de la pureté est supérieure à 90 % pour les deux produits.

Conclusion

D'après les résultats obtenus sur l'influence de la haute tension appliquée et l'angle d'inclinaison sur la séparation du mélange granulaire PA/PC, nous pouvons conclure que :

On peut augmenter le taux de récupération des produits obtenus en augmentant la haute tension appliquée avec un angle d'inclinaison réduit.

La haute tension affecte à la fois le taux de récupération et la pureté, tandis que l'angle d'inclinaison n'influe que sur le taux de récupération

Conclusion Générale

Le travail de notre mémoire s'inscrit dans le cadre de la séparation électrique des matériaux plastiques, un des processus le plus performant dans le domaine du recyclage des déchets. L'objectif de ce travail est d'évaluer les effets des deux paramètres à savoir la haute tension appliquée et l'angle d'inclinaison sur le processus de la séparation électrique d'un mélange granulaire PA/PC en utilisant un séparateur à plan incliné.

Les résultats expérimentaux obtenus, nous permettent de tirer les principales conclusions suivantes :

- L'effet triboélectrique est un phénomène extrêmement complexe et est influencé par plusieurs facteurs externes et internes.
- La haute tension appliquée a une influence importante sur le taux de la récupération et de la pureté.
- L'angle d'inclinaison n'affecte que la récupération des produits séparés.
- Une haute tension élevée avec un angle d'inclinaison réduit mènent au résultat optimal de la récupération des produits séparés.

Références bibliographiques

- [1] COULIBALY.M,» Modélisation micromécanique et caractérisation expérimentale du comportement des matériaux hétérogènes élastoviscoplastiques. Application à la valorisation des polymères recyclés».1/7/2008.
- [2] Site web : www.curieuxdesavoir.com/112-les-plastiques-histoire-et-s.html (Consulté le 20/04/2019 .
- [3] Fontanille M.-Gnanou Y, « Chimie et physico-chimie des polymères, « Dunod, Paris, 2013.
- [4] Vêtement et revêtement, les polymères, Physique-chimie STIDD-STL.
- [5] Fairouz M, « Etude des polymères et de leurs mélanges (état fondu) additionnés de composés d'origine minérale, mémoire de master, « Université Mohamed KhiderBiskra, 2014.
- [6] Lecomte J.-Beckers, « Physiques des matériaux, polymères» université de liège, 2009.
- [7] Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites, injection des thermoplastiques A3680, A3690 et thermoformage A3660.
- [8] L. Belard, Thèse de Doctorat, Université de Reims, 2007.
- [9] V. Berthe, «Ecole doctorale n° 364 Paris Technique», Thèse de Doctorat, 2010.
- [10] M. Fontanille, Y. Gnanou, « Chimie et physico-chimie des polymères », Edition DUNOD, Paris, 2002.
- [11] : A. SEYNI, « Propriétés physico-chimiques», université de Toulouse, 2008, PP 13-26.
- [12] M.R. Murali, V. Singaravelu, M. Manjusri, K.B. Sujata, K.M. Amar, « Progress in Polymer Science», 38,1653, 2013.
- [13]www.plasticseurope.org.

- [14] baudet-environnement, « baudet-environnement, « [En ligne]. Available : <http://www.baudelet-environnement.fr>. [Access le 2018 03 24]
- [15] Bouanani A., Bendida M., «Contribution a l'étude de la séparation électrostatique d'un Mélange de trois matériaux isolants», Mémoire de Master en Électrotechnique, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2014.
- [16] Creative Commons Attributionm ,Share Alike 3.0 Unposted <http://creativecommons.org/licenses/by-as/3.0/>
- [17] site web de recyclage en France <http://www.valorplast.com/>
- [18] Dragan, C. «Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéro-électrostatique de matériaux plastiques granulaires.» Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2010.
- [19] P. Lovera Segovia, « Étude des mécanismes d'injection de charge dans les matériaux isolants au moyen de mesures électrostatiques de déclin et retour de potentiel. Nouveaux outils d'analyse, « Thèse de Doctorat, Université de Paris, 2002.
- [20] M. Karchi, « Caractérisation et contrôle de l'état de charge des matériaux polymères granulaires, « Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2012.
- [21] Laberge, A. «Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas–Application au contrôle de décollements d'écoulements.» Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2005.
- [22] S. Fakhfakh, « Etude des phénomènes de charge des matériaux diélectriques soumis à une irradiation électronique permanente, « Thèse de Doctorat, Université de Reims, 2004.
- [23] P. S. Llovera, « étude des mécanismes d'injection de charge dans les matériaux isolants au moyen de mesures électrostatiques de déclin et retour de potentiel, nouveaux outils d'analyse,» Thèse de Doctorat, Université de Paris, 2002.
- [24] M. Hairour, « Etude diélectrique d'une isolation hybride gaz-solide pour appareillage haute tension, « Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, 2007.
- [25] W.R. Harper, «Contact and Frictional Electrification.», Morgan Hill, CA: Laplacian Press, 1998.

- [26] S. Nicotra, L. Calin, A. Iuka, and N. Serbin, «Considerations on triboelectricities separation of plastic material for recycling purpose.» *Environment and Progress*, Vol. 6, pp.341- 346, 2006.
- [27] G.S.P. Castle, «Contact charging between insulators.», *J. Electrostatic*, Vol. 40 and 41, pp. 13- 18, 1997.
- [28] R.D. Pascoe, and B.O. Connell, «Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation.» *Miner Eng*, Vol. 16, pp. 1205-1212, 2003.
- [29] Geneviève sutra, «la triboélectricité», *Le journal du physique et le radium*, tom 11, PP 89, aout Septembre 1950.
- [30] Ben Salem Jamal, «Fabrication Maintenance des Systèmes automatisés de Fabrication des Cartes Electroniques (MSAFCE)», Support du cours, Institut Supérieur des Études Technologiques de Nabeul, 2013-2014.
- [31] A. F. Diaz, R. M. Felix-Navarro. (2004). «a semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties», *Journal of Electrostatics*, Volume 62, PP 277-290, Issue 4, November 2004.
- [32] A. Iuka, L. Calin, V. Nemati, A. Minacious, L. Descales, «Turbocharging of plastics granulates in a fluidized bed device» 942, *Journal of Electrostatics*, Volume 63, PP 937-, Issues 6–10, June 2005.
- [33] Tuite, Y. Kaiya, N. Shimizu and T. Tanaka, «Basic study of polymer particles separation using vibrating feeder and electrostatic high voltage generator», the Third International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology, PP 155–164, 1995.
- [34] Chün Park, Joko Park, Chuseok Jeon, B.Phil. Chun, «Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger», *Journal of Electrostatics*, Volume 66, PP 578-583, 2008.
- [35] M. Bhajan, R. Belcea, A. Iuka, and L. Descales, «Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation.» *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol 46, pp.1558 – 1563, 2010.
- [36] L. Calin, L. Celia, V. Nemati, R. Mortar, A. Iuka, A. Samuel, and L. Descales, «Turbocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation.» *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 44, pp. 1044- 1051, 2008

- [37] C. Dragan, O. Fate, M. Radu, L. Calin, A. Samuel, and L. Descales, «Turbocharging of mixed granular plastics in a fluidized bed device.» IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 47, pp. 1922-1928, 2011.
- [38] M. Malouda, K. Meddles, A. Tomatine, M. Brahmi, and L. Descales, «Modeling and optimization of a propeller-type turbocharger for granular materials.» Electrostatics, Vol. 69, pp. 631-637.2011.
- [39] M. Sarkis and A. Masumoto, «Electrostatic separation of chopped waste electric cables.» Journal of Environmental Engineering, Vol. 2, pp. 227-236, 2007.
- [40] M.M. Zelman, A.T. Rizouga, K. Meddles, and L. Descales, «Experimental comparative study of different tri-charging devices for triboelectric separation of insulating particles.» IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 49, pp. 1113-1118, 2013.
- [41] L. Descales, A. Us, S.Benet, M. Buzau, and A. Samuel, «Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices.» J. Electrostatic., Vol. 63, pp. 705-710, 2005.
- [42] Y.Higashiyama, Y. Julie, and K. Asano. «Triboelectrification of plastic particles on vibrating feeder laminated with a plastic film.» J. Electrostatic., Vol. 42, pp. 63-68, 1997.
- [43] L. Calin, L. Celia, V. Nemati, R. Mortar, A. Iuka, A. Samuel, L. Descales, «Turbocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation», Fortieth IAS Annual Meeting Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, PP 1045 – 1051, 2005, IEEE.
- [44] Cyprian Dragan, Ovidiu Fate, MirelaRadu, Laura Calin, Adrian Samuel, Lucian Descales, «Turbocharging of Mixed Granular Plastics in a Fluidized-Bed Device», IEEE Transactions on Industry Applications (Volume: 47, PP 1922 – 1928, Issue: 4, July-Aug. 2011).
- [45] Mohamed El-Moulid Zelman, Mohamed Rizouga, Amar Tomatine, Karim Meddles, Mohamed Malouda, «Experimental Comparative Study of Different Turbocharging Devices for Turboelectric Separation of Insulating Particles», IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 49, PP 1113 - 1118, No. 3, May/June 2013.

[46] JiaLi, Lucian Descales, «Newly-Patented Technical Solutions for improving the Tribo-Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids» Recent Patents on Engineering, Volume 6, Number 2, August 2012, pp. 104-115(12).

[47] M. Remadnia, « Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants », Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2012.

[48] BENSOUILEH Zine eddine, «Etude expérimentale d'un séparateur à plan incliné », Mémoire de Master, Université de Guelma, 2017.

[49] NADJEM Abdelkader, « Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques », Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2018.

[50] A. Nadjem, M. Kachi, K. Rouagdia, M. Remadnia, «Experimental Study of an Inclined-Plane Electrostatic Separator», The 3rd International Symposium on Materials and Sustainable Development (ISMSD), Springer, pp. 439-450, 2018.