

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



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département d'Électrotechnique

Thèse présentée par :

MILOUDI Mohamed

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en sciences en Électrotechnique

Option : Électrostatique

Intitulé de la thèse :

Application de la charge par effet triboélectrique des matériaux granulaires dans la séparation électrostatique

Présentée devant le jury composé de :

| | | | |
|-------------------------|-----------------------|--------------|--------------------------------|
| Président : | Pr. BENDAOUD Abdelber | Professeur | Université de Sidi Bel Abbès |
| Directeur de thèse : | Dr. MEDLES Karim | M.C classe A | Université de Sidi Bel Abbès |
| Co-directeur de thèse : | Pr. DASCALESCU Lucien | Professeur | Université de Poitiers(France) |
| Examineurs : | Pr. TILMATINE Amar | Professeur | Université de Sidi Bel Abbès |
| | Pr. HAMID Azzeddine | Professeur | UST Oran |
| | Dr. REZOUGA Mohamed | M.C classe A | UST Oran |

Soutenue en: Octobre 2012

Remerciements

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

Ce modeste travail est le fruit de quelques années de persévérance ou plusieurs personnes m'ont apporté main forte, surtout au laboratoire IRECOM dont je cite principalement mon encadreur Monsieur **MEDLES KARIM** qui m'a introduit dans le domaine d'électrostatique et m'a été d'un très grand appui pendant toute cette période.

J'exprime ma reconnaissance et le témoignage de ma profonde gratitude à Monsieur le Professeur **Lucien DASCALESCU** qui m'a accueilli et supporté pendant 18 mois, au sein de son équipe d'Électrostatique Appliquée, au Laboratoire d'Étude Aérodynamique PPRIME-IUT d'Angoulême de l'université de Poitiers. Je le remercie pour tout ce qu'il a apporté à cette thèse, aussi bien pour son encadrement scientifique, ses encouragements et son bon soutien moral.

Je tiens aussi à remercier les membres de mon jury :

Monsieur **Bendaoud Abdelber**, Professeur à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés d'avoir accepté de présider ce jury. Je suis très honoré que Monsieur **Tilmatine Amar**, Professeur à l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés, Monsieur **Azeddine Hamid** Professeur à l'USTO et monsieur **Rezouga Mohamed** Maître de conférence à l'USTO, aient accepté d'être examinateurs de ce travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements au personnel de l'IUT d'Angoulême, notamment son directeur Monsieur Tami Zeghoul et Monsieur Marc Gauthier pour leur aide et leur bonne convivialité.

Enfin, je remercie chaleureusement Mme Magali Moreau du CROUS de Poitiers, le personnel du consulat d'Algérie de Bordeaux et le service de coopération Algéro-Française pour avoir financé ce travail et facilité mon séjour en France.

MILOUDI MOHAMED

Sommaire

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 01 |
| Chapitre 1 : Etat de l'art | |
| 1.1 Dispositifs de charge triboélectriques des matériaux isolants | 04 |
| 1.1.1 Phénomènes physiques | 07 |
| 1.1.2 Dispositif à vibration | 09 |
| 1.1.3 Dispositif à cylindre tournant | 09 |
| 1.2 Fonctionnement des dispositifs de chargement à lits fluidisés | 11 |
| 1.3 Séparateurs électrostatiques | 12 |
| 1.3.1 Séparateurs de laboratoire | 12 |
| 1.3.2 Réalisations industrielles | 17 |
| Chapitre 2 : Matériaux et méthodes | |
| 2.1 Matériaux | 20 |
| 2.1.1 Granules de polymères vierges (PA et PC) | 20 |
| 2.1.2 Granules de récupération issues des produits informatiques (ABS et HIPS) | 21 |
| 2.2 Techniques de mesure | 22 |
| 2.2.1. Mesure de charge par cage de Faraday | 22 |
| 2.2.2 Estimation indirecte de charge par mesure de champ électrique | 23 |
| 2.2.3 Mesure de potentiel de surface par voltmètre électrostatique | 23 |
| 2.2.4 Instrumentation virtuelle (LabView) | 24 |
| 2.3 Méthodologie des plans d'expériences | 25 |
| 2.3.1. Plans factoriels | 25 |
| 2.3.2. Plans composites | 27 |
| 2.4. Logiciel pour les plans d'expériences | 28 |

Chapitre 3. Evaluation de deux procédés de chargement triboélectrique et application sur un nouveau séparateur à électrode tapis

| | |
|---|----|
| 3.1. Procédure expérimentale | 30 |
| 3.1.1. Dispositifs de charge triboélectriques | 30 |
| 3.1.2. Matériaux et méthode | 32 |
| 3.2. Charge des matériaux granulaires dans le dispositif à hélice | 33 |
| 3.2.1. Expériences préliminaires | 33 |
| 3.2.2. Modélisation et optimisation | 37 |
| 3.3. Charge des matériaux granulaires dans le dispositif à air comprimé | 40 |
| 3.3.1. Choix des intervalles d'étude | 40 |
| 3.3.2. Modélisation et optimisation | 40 |
| 3.4. Comparaison des deux procédés de séparation tribo-aéro-électrostatique | 42 |
| 3.4.1. Application sur un séparateur électrostatique à bande transporteuse conductrice | 42 |
| 3.4.2. Résultats et discussion | 44 |

Chapitre 4: Procédés de séparation tribo-aéro-électrostatique

| | |
|--|----|
| 4.1 Séparation des grosses particules d'ABS et HIPS (taille inférieure à 4,5 mm) dans le séparateur à débit moyen | 49 |
| 4.2. Installation pilote industrielle : Séparateur tribo-Aéro-électrostatique à bandes transporteuses conductrices | 51 |
| 4.2.1 Présentation du séparateur tribo-Aéro-électrostatique à bandes transporteuses | 52 |
| 4.3. Procédure expérimentale | 53 |
| 4.3.1. Détermination de la masse minimale à introduire dans le séparateur. | 53 |
| 4.3.2. Optimisation du séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses pour des mélanges granulaires isolants de taille inférieure à 2 mm | 59 |
| 4.4. Séparation des particules granulaires isolantes de taille 2 à 4.5mm | 63 |
| 4.4.1. Configurations du système d'électrodes | 63 |
| 4.4.2. Résultats et discussion | 65 |

| | |
|--|----|
| 4.5. Modification de la construction du séparateur tribo-aéro-électrostatique | 68 |
| 4.6 Techniques de neutralisation des produits récupérés après séparation électrostatique | 72 |
| 4.6.1. Procédure expérimentale | 72 |
| 4.6.2. Résultats et discussion | 74 |
| Conclusion générale | 77 |
| Références bibliographiques | 79 |

Chapitre I : Etat de l'art

Les ordinateurs, imprimantes, téléphones portables et autres équipements électriques et électroniques « les 3E » sont devenus les outils de travail quotidiens pour les entreprises et les particuliers. L'évolution très rapide des nouvelles technologies et l'augmentation des performances de ces appareils qui passent du simple au double pendant des périodes très courtes, a réduit la durée de vie de ces équipements ; chose qui a poussé le taux de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) à s'accroître à un rythme alarmant, en particulier dans ces vingt dernières années où les marchés sont saturés avec d'énormes quantités de nouveaux produits de ce type [1], [5],[8]

Les grandes quantités de DEEE avec la gamme variée des matériaux qu'ils contiennent, sont souvent nuisibles surtout pour la nature ; chose qui a attiré l'attention des organismes gouvernementaux et non gouvernementaux sur comment identifier, discuter, évaluer et trouver des solutions à ce problème.

Selon les dernières statistiques, les équipements électriques et électroniques connaissent une forte croissance (+25% entre 2000 et 2005), avec une proportion de plastiques qui augmente dans cette même période (+30%) [1], [2].

Dans cette famille d'équipements (figure 1.1), on distingue plusieurs catégories de produits, avec des taux et des types de plastique différents [3], [4] :

- les produits blancs (lavage, cuisson, conservation) dont le gros électroménager froid (24% de plastiques), le gros électroménager hors froid (12% de plastiques), le petit électroménager (20% de plastiques)
- les produits bruns : l'audiovisuel (22% de plastiques)
- les produits gris : informatique et bureautique
- les lampes.

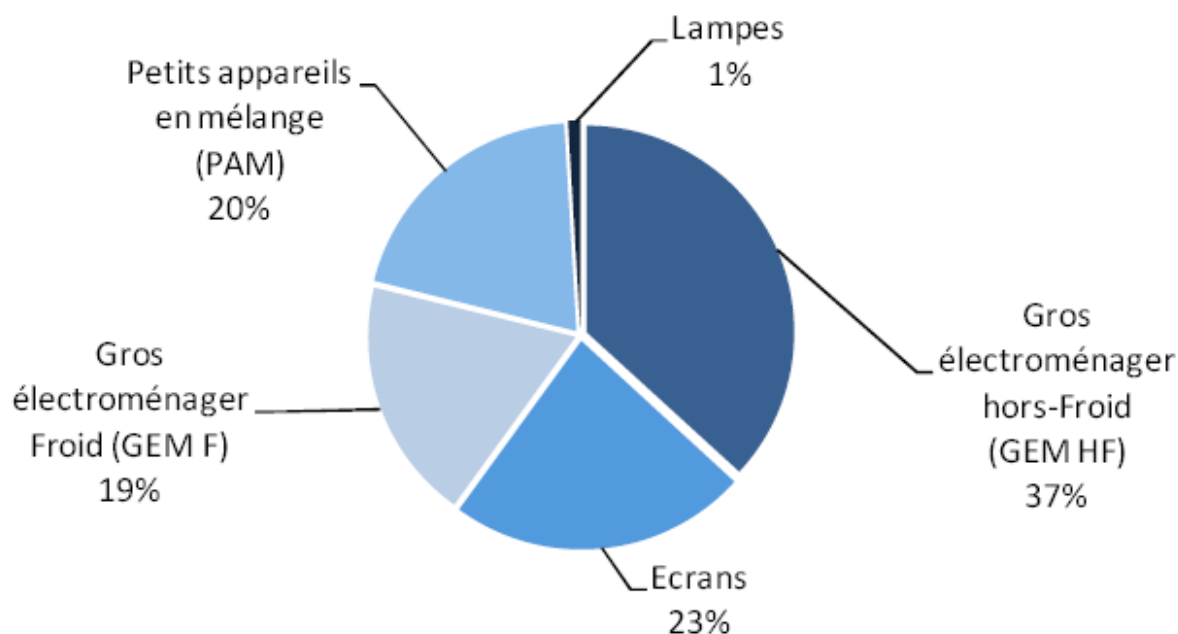


Figure 1.1 : Répartition des déchets ménagers traités en 2010 [4]

Le graphique ci-dessous présente la ventilation des tonnages d'équipements ménagers traités en 2010 par type de traitement.

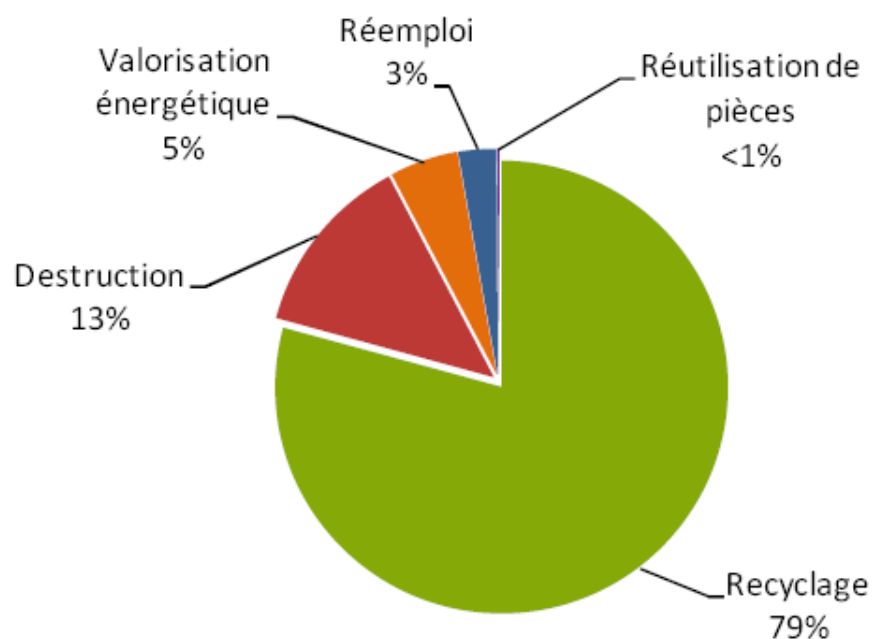


Figure 1.2: Proportion des différents constituants des déchets « DEEE » [4]

Le recyclage est le principal mode de traitement (79 % des tonnages en 2010 contre 75 % en 2009) alors que 13 % des tonnages sont détruits sans valorisation (contre 16 % en 2009).

La principale caractéristique des plastiques contenus dans les DEEE est la dominance des produits tels que le PC, l'ABS, l'ABS/PC et le HIPS représentant plus de 70% du poids total des plastiques dans ces déchets (figure 1.3) [3], [4].

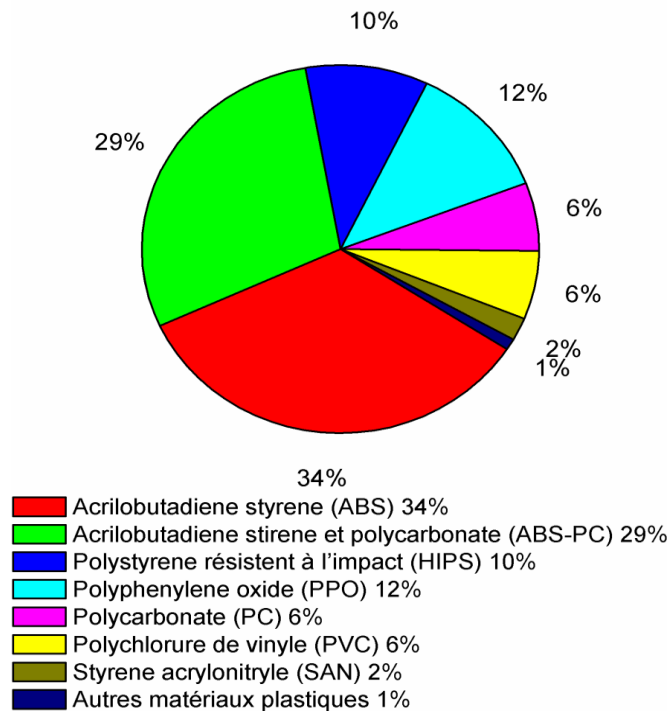


Figure 1.3: Proportion des différents constituants des déchets plastiques

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, vue la pollution quelle constitue d'un côté et vue les prix exorbitants des hydrocarbures qui ne cesse d'augmenter d'un autre côté. Cette opération de récupération nécessite l'emploi de différentes techniques et procédés parmi elles on cite :

- techniques de tri : tri densimétrique, spectroscopie, au rayons X,
- séparation chimique, le tri automatique simple ou à plusieurs étages.
- méthodes préalables de désassemblage pour constituer des lots plus homogènes.

La séparation triboélectrique constitue un axe important dans le domaine qui consiste à charger les particules isolantes par un procédé adéquat dans une première phase et faire passer ces particules dans un dispositif d'électro séparation.

1.1 Dispositifs de charge triboélectriques des matériaux isolants

La plus importante source de charges électrostatiques reste le phénomène de charge triboélectrique. La triboélectricité, une expression bien compliquée pour nommer un phénomène dont nous avons tous déjà eu l'expérience ; En effet, elle est observable dans de nombreux cas de la vie quotidienne.

1.1.1 Phénomènes physiques

L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux mais sa définition s'étend souvent aux transferts de charges électriques entre différents matériaux : lorsque deux matériaux électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement [5], [6], [9]. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible (cas des isolants), les charges ainsi générées resteront après séparation et de nouveaux contacts auront pour effet de produire de nouveaux transferts de charges.

Le frottement étant l'équivalent de contacts suivi de séparations, mais s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse.

Lorsque deux matériaux différents sont mis en contact, ils acquièrent des charges électriques du au phénomène de triboélectrisation. L'effet triboélectrique, implique ainsi le transfert de charge entre deux corps en contact (figure 1.4).

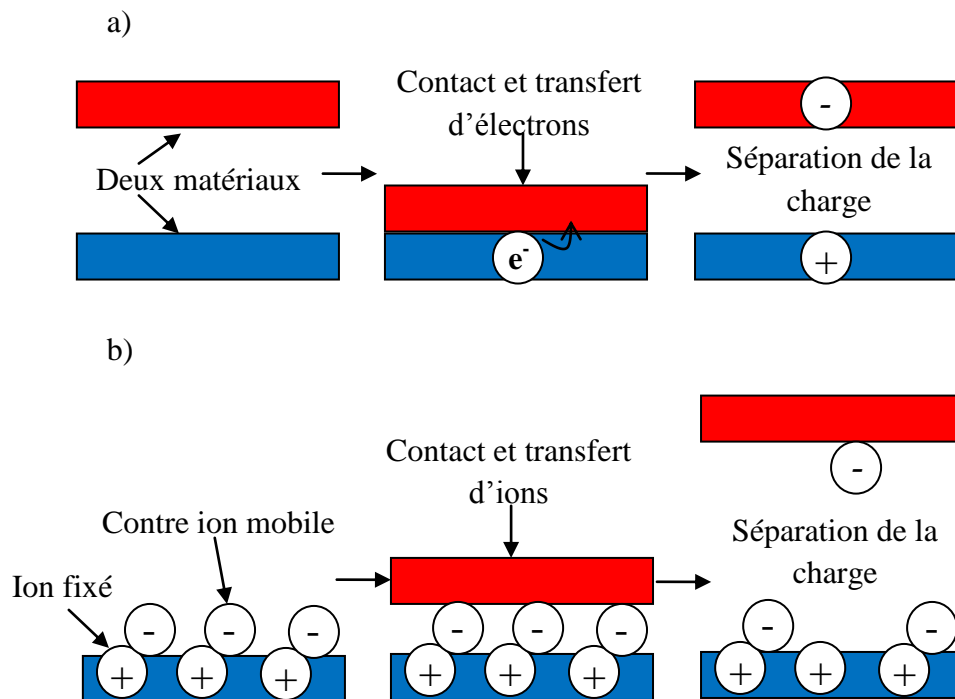


Figure 1.4 : Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ; b) Transfert d'ions [9]

Les récents travaux de LIU et BARD ont proposé un modèle de transfert d'électrons, validée par des expériences sur la charge de téflon. En revanche, WHITESIDES et Mc CARTHY [11] ont utilisé une série d'électrets ioniques qui contiennent des ions mobiles, afin de proposer le fait que le transfert d'ions est une explication possible pour le tribochargement des matériaux isolants.

La polarité des charges acquises dépend de nombreux facteurs, on peut cependant établir des listes ou séries dites triboélectriques, auxquelles on prête la valeur d'indice : plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée. En réalité, on ne peut pas se fier complètement à l'ordre des matériaux dans ces listes car différents auteurs ont tenté d'en déduire une série triboélectrique.

Il s'agit d'une table dans laquelle les matériaux sont classés dans un ordre tel que tout élément de la série devrait se charger positivement par rapport à tout élément classé au-dessus de lui dans la série et négativement par rapport à tout élément classé au-dessous.

En fait, les différents auteurs ne sont pas d'accord sur le classement des matériaux et il n'existe pas de série triboélectrique universellement reconnue. On trouvera différents exemples en bibliographie [12], [19], [20].

L'humidité et la contamination des surfaces peuvent modifier fortement les résultats. En particulier, l'humidité superficielle augmente la densité superficielle d'états en permettant le transfert de charges ioniques. Mais elle augmente simultanément la conduction de surface qui permet la recombinaison des charges. Certains auteurs ont montré que la teneur en eau d'un polymère pouvait donner des variations de la charge en fonction du temps, voire des changements de polarité [17], [18].

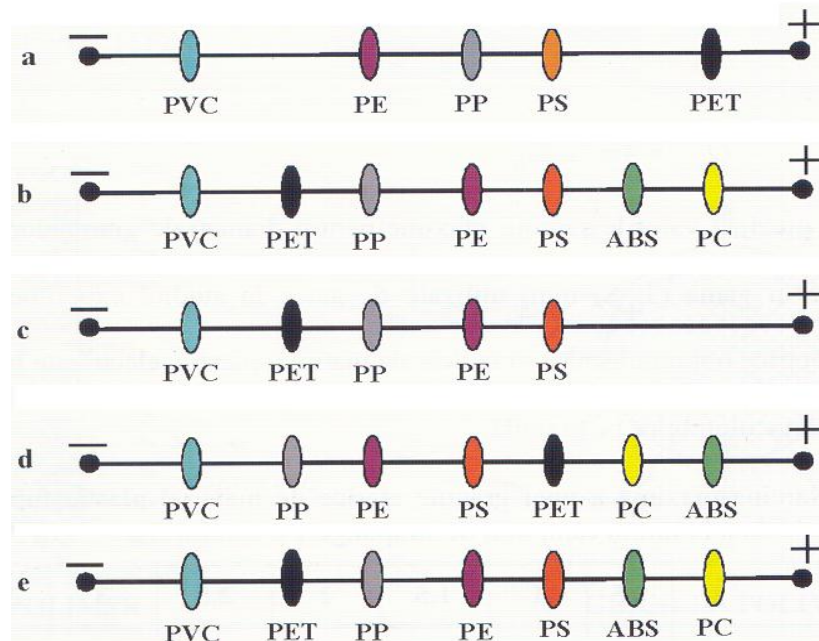


Figure 1.5: série triboélectrique expérimentale pour différents matériaux plastiques utilisés dans la fabrication des équipements informatiques et électriques selon différents auteurs : a.[13], b, c, e.[14].

1.1.2 Dispositif à vibration

Ce séparateur a été développé au sein du laboratoire d'électrostatique d'Angoulême par le Docteur Marius Blajan de l'université de Cluj (Roumanie), l'idée consistait à charger les mélanges granulaires par un dispositif à vibration (Zig Zag) (figure 1.6) qui est constitué d'un moteur à vitesse variable, couplé à un bac par un mécanisme bielle à plusieurs positions. La rotation du moteur donne naissance à un mouvement de translation en « va et vient » du bac provoquant des collisions entre particules et entre particules et paroi [21], [25].

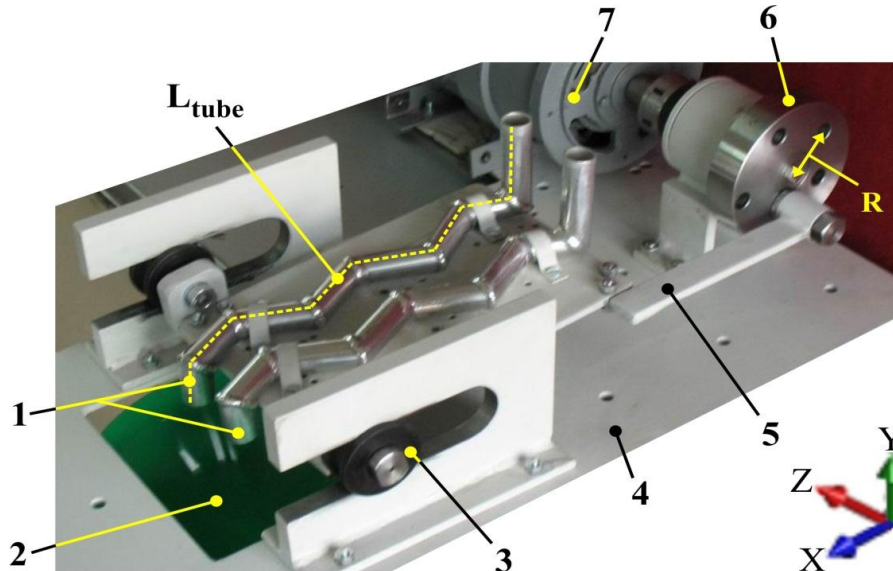


Figure 1.6 : Dispositif à vibrations; 1:tubes de charge; 2: sortie des particules chargées; 3: glissière; 4: support; 5: bielle; 6: manivelle; 7: moteur électrique; R: rayon; X, Y, Z: direction du mouvement des particules ; L_{tube} : longueur du tube.

Le matériau à charger glissent dans des canaux en zig-zag mis en mouvements vibratoires des sur 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. En changeant la vitesse du moteur, il est possible de modifier le mouvement oscillant du dispositif de charge.

1.1.3 Dispositif à cylindre tournant

Une méthode de chargement du cylindre tournant ou les particules entrent d'un côté du cylindre et sortent de l'autre côté totalement chargé, à l'intérieur les particules sont en collision quand le cylindre tourne à une certaine vitesse comme l'explique la figure 1.7 résume le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à cylindre tournant [21],[25].

Un flux de particules plastiques propre, sec et broyé est introduit dans un cylindre rotatif. La rotation du cylindre provoque la culbute des particules qui se chargent par contacts répétés : c'est le phénomène de triboélectricité.

Les particules chargées entrent ensuite dans un fort champ électrique horizontal produit entre deux électrodes soumises à haute tension de polarité opposée. Les particules

chargées sont alors déviées dans leur chute suite au champ intense qui traversent et chaque type de matériaux prend un côté dans les bacs de récupération.

Les granules chargées positivement sont attirées vers l'électrode négative, et contrairement, les granules chargées négativement sont attirées vers l'électrode positive. Les produits purifiés tombent près de l'électrode positive et de l'électrode négative, alors que les produits tombant au milieu.

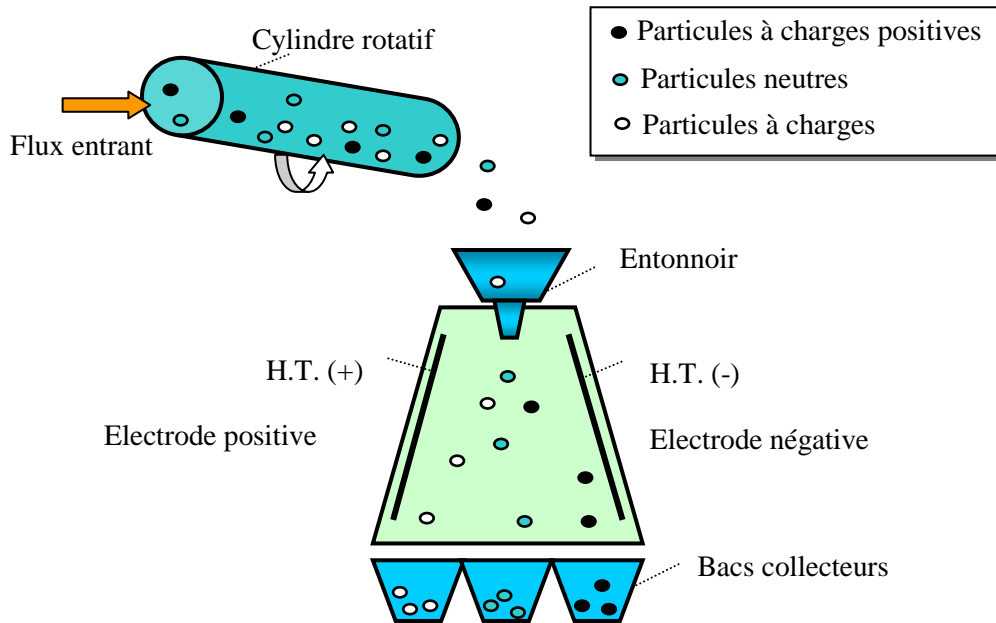


Figure 1.7 : Chargement triboélectrique par cylindre tournant et électroséparation

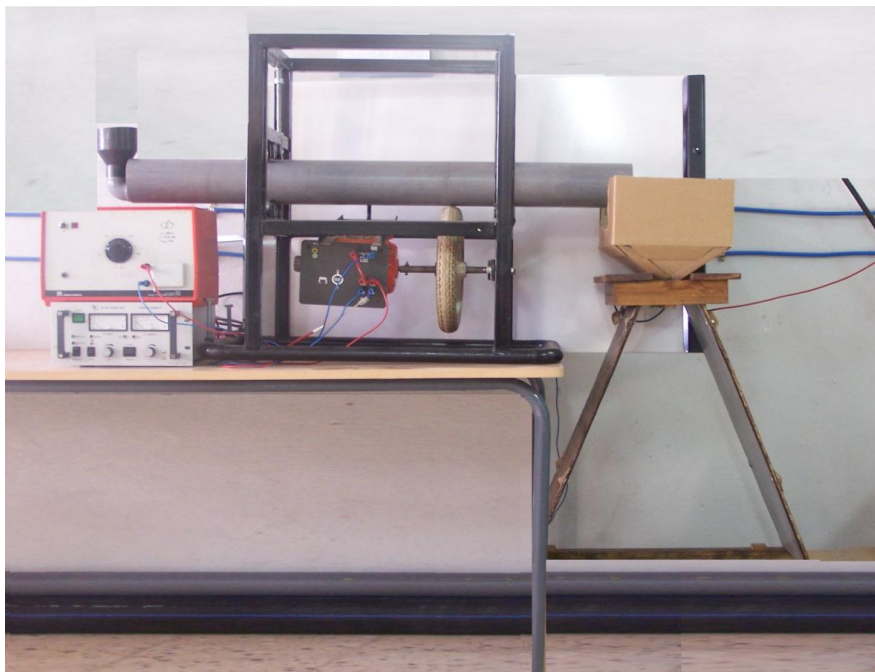


Figure 1.8 : Photographie de l'ensemble du dispositif de Séparation Triboélectrique STEMP' « Séparateur triboélectrique des matériaux plastiques » (Réalisation au laboratoire IRECOM de l'université Sidi Bel Abbas)

1.2 Fonctionnement des dispositifs de chargement à lits fluidisés

Le fonctionnement du lit fluidisé (Figure. 1.9) dans les processus de triboélectrisation est délimité par la vitesse minimale de fluidisation et la vitesse terminale de chute libre des particules [26].

Le début du processus de triboélectrisation dans les dispositifs à lit fluidisé correspond à la phase de « lit fixe » mais il devient efficace dans les phases appelées « lit bouillonnant » et « fluidisation turbulente », caractérisées par des impacts forts. On constate, expérimentalement, que la fluidisation des matériaux plastiques granulaires dans les phases « lit bouillonnant » et « fluidisation turbulente » est accompagnée par la présence des bulles dans tout le volume du matériau, (qui peuvent se réunir pour former courants gazeux voir zone sans particules) et l'agitation de la suspension ayant l'aspect d'un liquide bouillant. La vitesse minimale de fluidisation u_{mf} , la vitesse terminale de chute libre des particules et la chute de pression du lit fluidisé Δp sont les principaux paramètres de contrôle du lit fluidisé [27]. Un lit fixe de granules de plastique est transformé en état de fluidisation par un courant d'air qui dépasse la vitesse minimale de fluidisation u_{mf} . Les particules sont maintenues en suspension par le courant d'air.

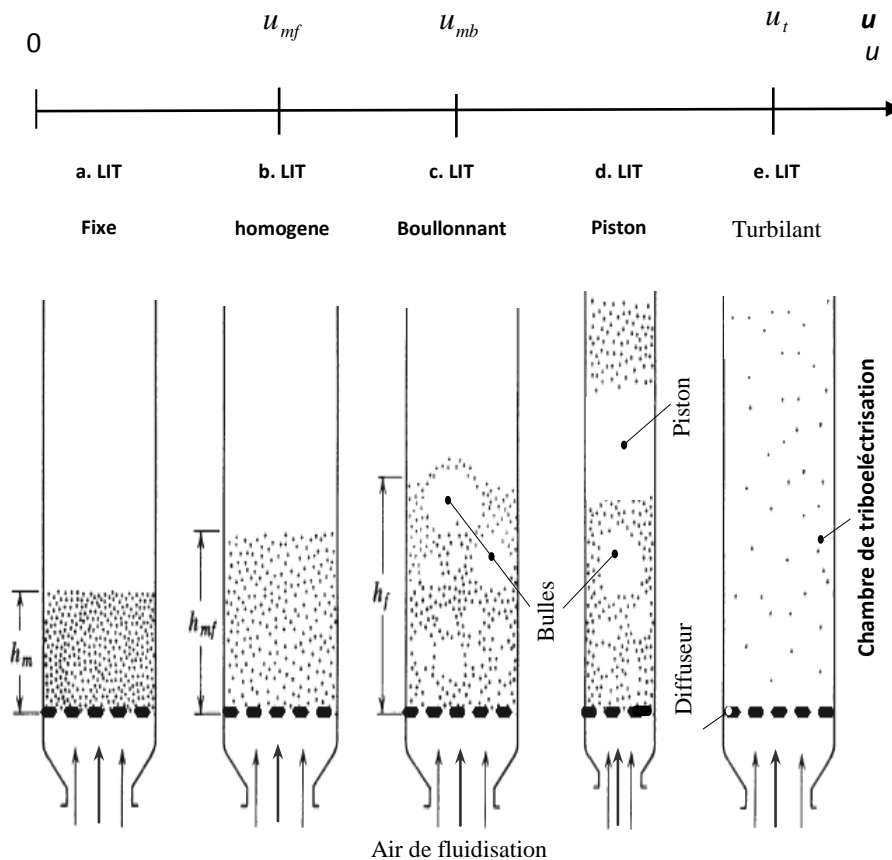


Figure 1.9 Les régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation; u_{mf} - vitesse minimale de fluidisation; u_{mb} - vitesse minimale d'apparition des boules; u_t - vitesse de transport pneumatique.

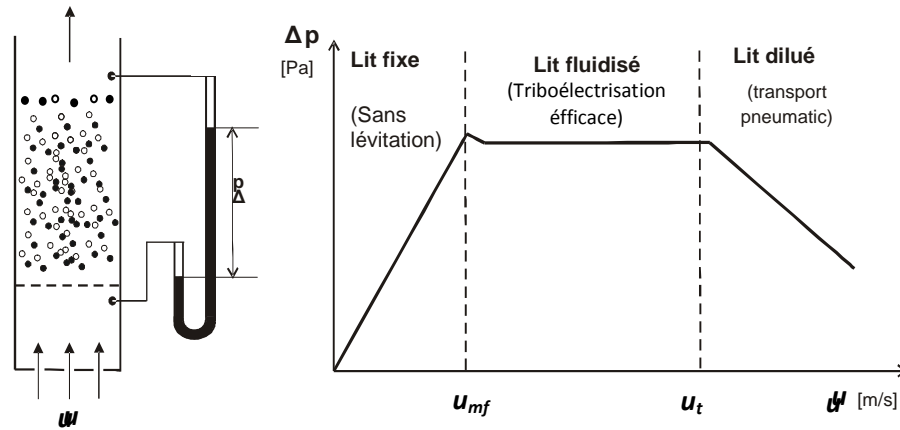


Figure 1.10 : La caractéristique de la différence de pression Δp en fonction de la vitesse d'air u dans différentes étapes de la fluidisation des matériaux plastiques granulaires [36].

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

$$\Delta p = \frac{F_G - F_a}{A_t} = g(\gamma_p - \gamma_a)h(1 - \beta) \quad (1.1)$$

où : β représente la porosité du lit fluidisé – le rapport entre le volume d'air entre les particules et le volume total du lit fluidisé dont h [m] la hauteur du lit fluidisé et;

γ_p masse volumique du matériau plastique [kg/m^3];

γ_a masse volumique de l'air de fluidisation [kg/m^3].

L'étude des phénomènes de fluidisation et de triboélectrisation des matériaux plastiques granulaires, ayant les caractéristiques suivantes :

- i) parois transparents en plexiglas pour l'étude visuel du processus de fluidisation et le mouvement des particules dans la chambre de triboélectrisation;
- ii) distributeur d'air facilement réglable à travers un variateur de vitesse, en fonction des dimensions des particules.

1.3 Séparateurs électrostatiques

La séparation électrostatique est définie comme le tri sélectif des matériaux granulaires par l'emploi des forces électriques agissant sur les corps chargés introduits dans un champ électrique intense ; cette technique est technique de plus en plus utilisée dans l'industrie du recyclage des déchets vue son efficacité, son bon rendement et sa préservation à l'environnement.

La matière à recycler est introduite, après broyage, dans un dispositif pour chargement électrique puis la séparation électrostatique. Les particules subissent une mise en charge

entraînant l'apparition de charges positives ou négatives par transfert d'électrons. Les phénomènes d'attraction / répulsion électrostatique de ces particules chargées permettent la séparation. On utilise en particulier la plus ou moins grande rapidité que met la matière à prendre ou à perdre des charges superficielles statiques.

1.3.1 Séparateurs de laboratoire

Depuis toujours les laboratoires de recherche constituent une base arrière pour appuyer le développement industriel ; l'augmentation alarmante des déchets a poussé ces derniers à trouver des solutions innovantes pour pallier à ces problèmes écologiques.

1.3.1.1 Séparateur électrostatique à chute libre à vibration

Le dispositif est constitué de deux parties, la première sert à charger le mélange granulaire par vibration (§1.2) qui débite dans un électroséparateur à électrodes plaques verticales.

Les particules chargées positivement seront attirées par l'électrode négative et ceux chargés négativement seront attirés par l'électrode positive. Les produits purs sont récupérés dans des bacs séparés (figure 1.11) [29].

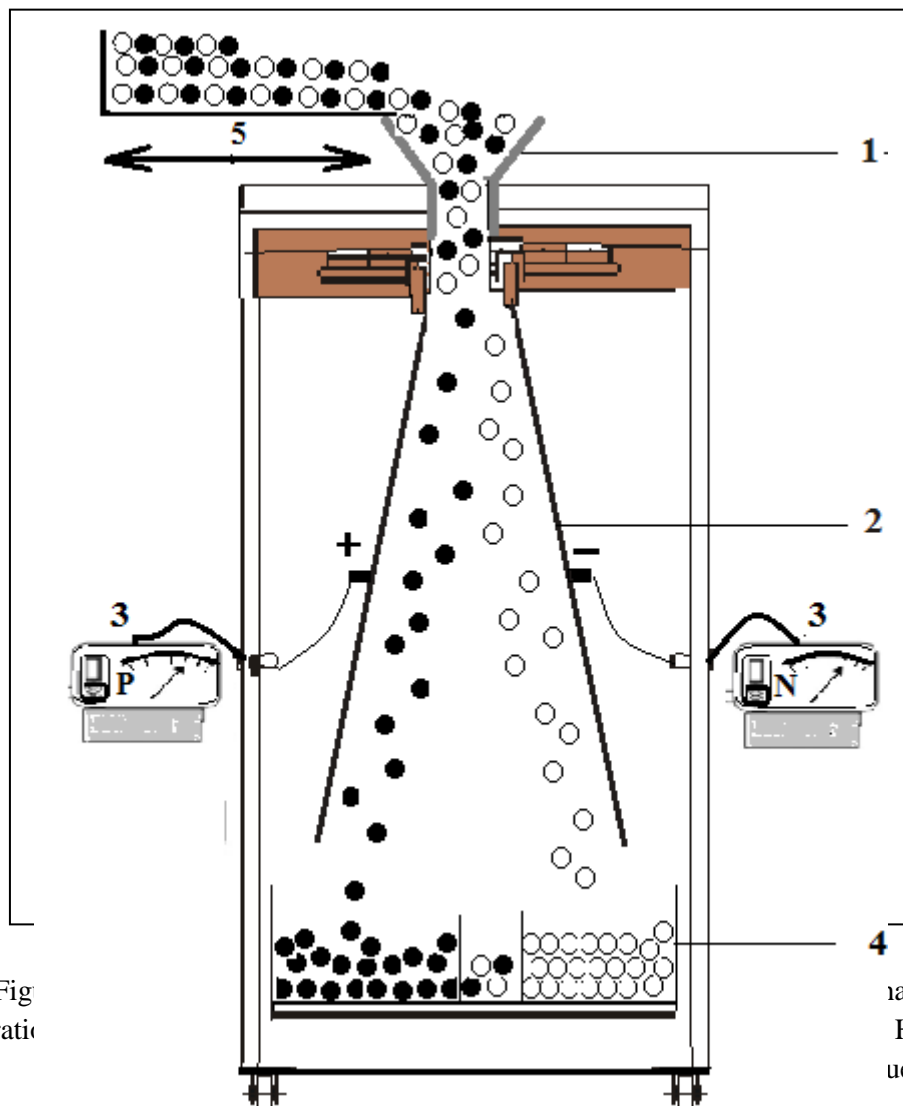


Fig
vibrati

largement à
Haute tension,
ue

1.3.1.2 Séparateur à lits fluidisés

Les séparateurs à lits fluidisés se basent sur l'utilisation des forces d'air injecté pour charger les mélanges granulaire dans une chambre de fluidisation où règne un champ électrique intense généré par deux électrodes de polarité inversée ; ainsi toute particule chargée sera attirée par l'électrode de polarité opposée.

Deux dispositifs à lit fluidisé ont été construits dans le but de faciliter la compréhension des phénomènes physiques en jeu et de tester la faisabilité de la séparation tribo-aéro-électrostatique de certains mélanges de matériaux granulaires, on cite principalement dans ce contexte, le séparateur à lit fluidisé à faible débit (à électrode verticales) développé au laboratoire d'Angoulême par Mr Mihai BILICI de l'université de Cluj (Roumanie) et le second dispositif à débit moyen développé par le Docteur Ciprian Dragan de la même université, se basant sur le même principe sauf que les électrodes sont à angle variable, dont l'idée consistait à créer un champ électrique dans la chambre de fluidisation afin de récupérer que les particules qui ont acquis une charge électrique suffisante avec lequel d'excellents résultats étaient obtenus.

A. Dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales

Destiné aux études préliminaires de faisabilité, sur des petites quantités de matériaux, ce dispositif à lit fluidisé est constitué de deux parties : d'un prisme rectangulaire (115 mm x 85 mm x 400 mm), avec deux parois verticales opposées en polycarbonate, les deux autres plaques d'aluminium alimentées par deux sources de hautes tensions continues de polarité inverses, la seconde partie forme la chambre d'air en forme de cube en PMMA dont le rôle principal est de diffuser et uniformiser l'air [30], [31].

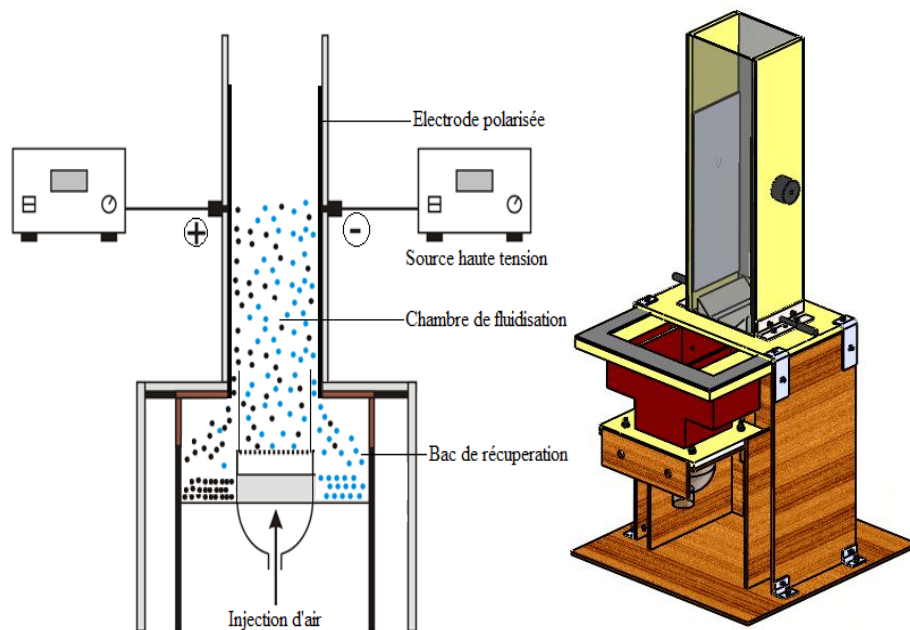


Figure 1.12. : Dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales

Le mélange granulaire est déposé à partir d'une goulotte oscillante vers la chambre de fluidisation dont le débit d'air est contrôlé par un variateur de fréquence. Les granules chargés sont attirés par les électrodes de polarité opposée et récupérées dans les deux trémies de collecte.

B. Dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées

Ce deuxième dispositif expérimental a des dimensions plus proches de celles envisagées pour l'installation industrielle, construit à la base du dispositif précédent (à faible débit) à l'exception des électrodes haute tension qui étaient à angle variable, afin de pouvoir mieux étudier aussi les aspects aérodynamiques Il a été construit en PMMA transparent pour faciliter l'observation [32].

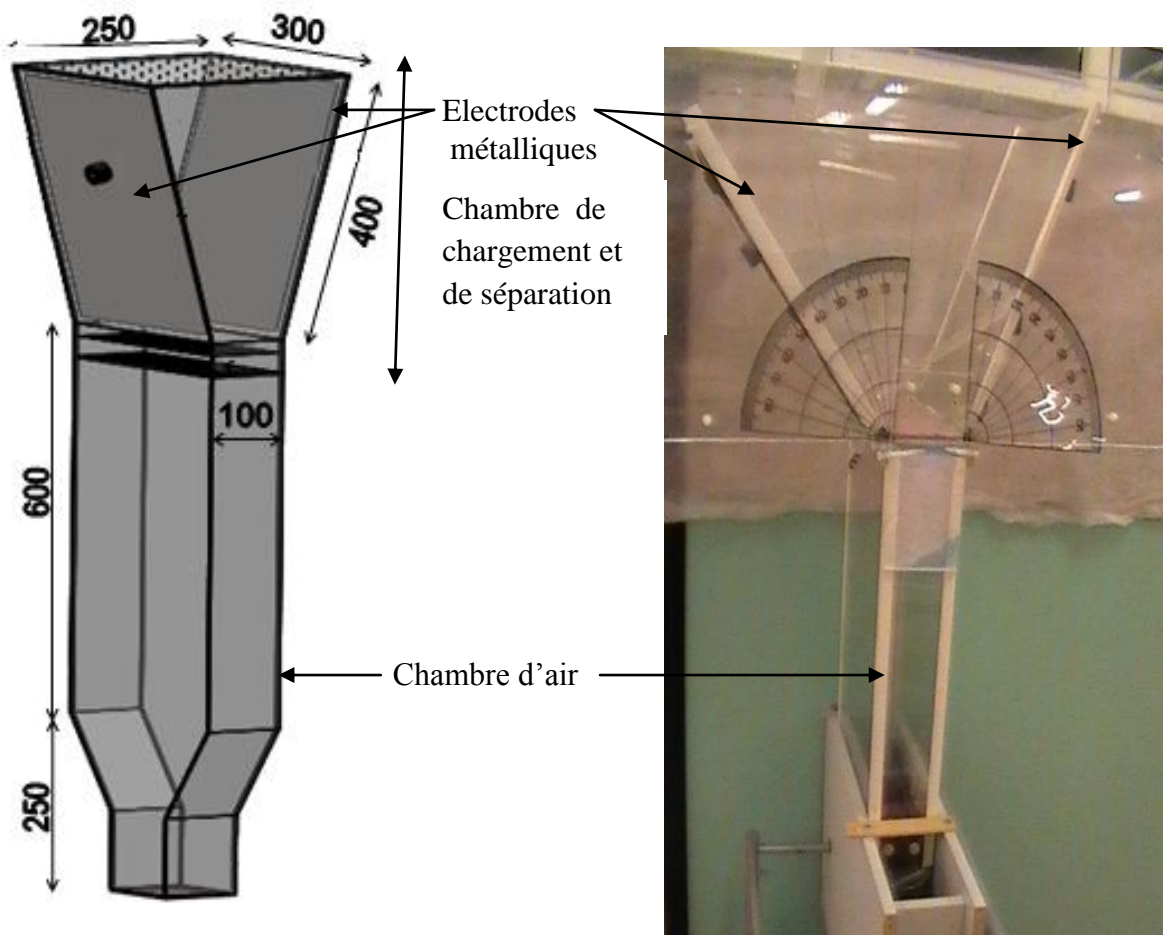


Figure 1.13 : Dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et à électrodes inclinées

L'injection d'air est assuré par une soufflante triphasé de 3 kW dont le débit est régulé par un variateur de vitesse de marque « Leroy Sommer »

C. Le séparateur électrostatique à chute libre à lit fluidisé

Le séparateur électrostatique à chute libre à lit fluidisé TESS (TriboElectroStatic Separator) a été conçu pour la recherche fondamentale et applicative dans le domaine de la triboélectrisation, de la séparation des matériaux granulaires plastiques et de la purification des minerais [33] ; il est composé de deux parties distinctes (figure 1.14) :

a.1. Chambre de fluidisation : les mélanges granulaires sont mis à l'intérieur de cette chambre ou ils subissent un chargement triboélectrique grâce à l'injection d'air ; une fois chargées, les particules sortent vers le séparateur à chute libre à travers un clapet commandé.

a.2. Le séparateur à chute libre (à plaques) : Il est constitué de deux plaques conductrices soumises à des hautes tensions continues de polarité opposées et des bacs de récupérations des produits ; l'ensemble est enveloppé dans une enceinte en plexiglas transparentes permettant de visualiser le processus de séparation.

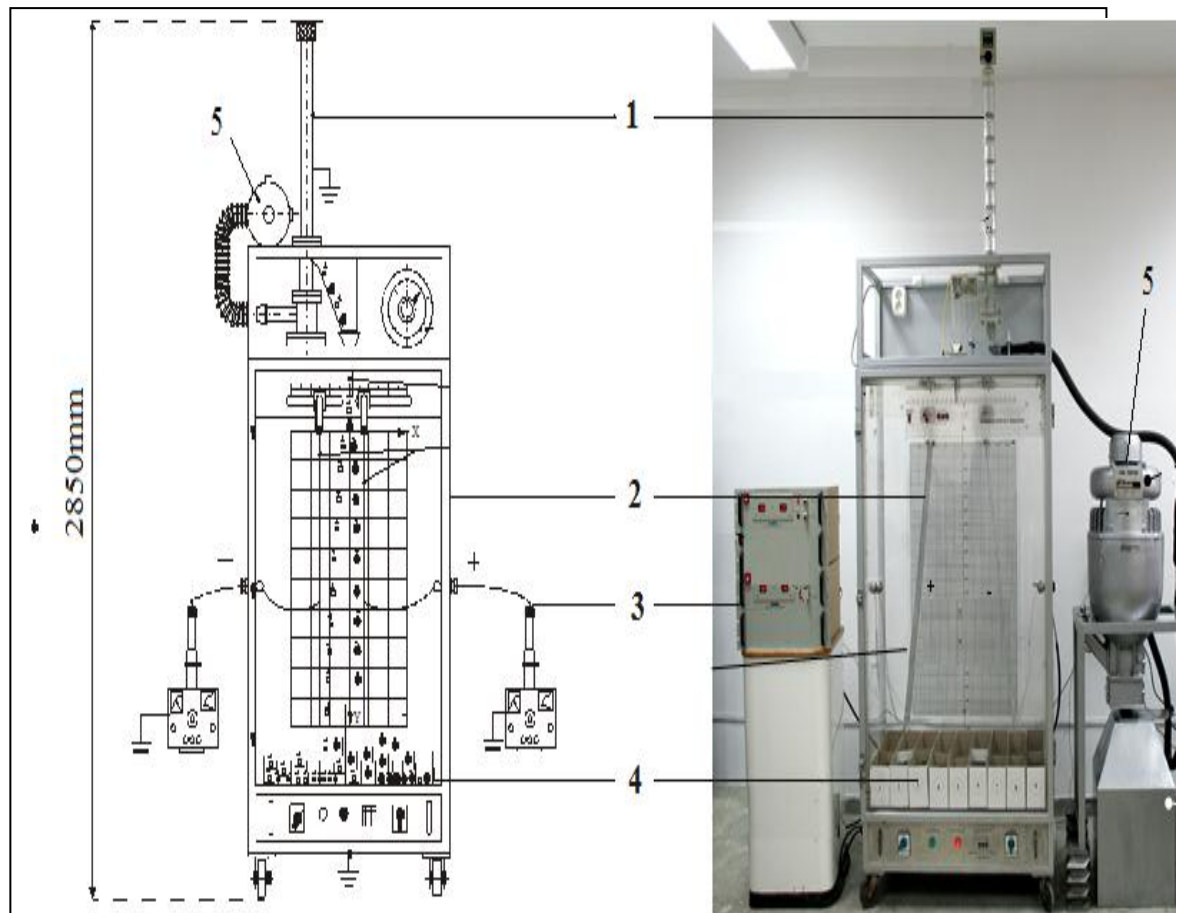


Figure 1.14 : installation expérimentale de séparation électrostatique à lit fluidisé à l'université de Cluj (Roumanie) : 1 : chambre de fluidisation, 2 : Electrode sous haute tension, 3 : Source Haute tension, 4 : Bacs de récupération, 5 : soufflante à débit réglable

1.3.2 Réalisations industrielles

Actuellement il y a beaucoup de sociétés qui fabriquent, utilisent et commercialisent des installations de séparation électrostatique dans le monde ; on cite principalement la société allemande HAMOS gmbh leader mondial dans le domaine dont Son séparateur EKS (Fig. 1.15) est largement utilisé dans l'industrie du recyclage ou le mélange de plastique broyé est introduit par un convoyeur vibrant dans l'unité de charge tribo-électrique, son passage dans un champ électrique, entraîne la séparation électrostatique. Les particules positives sont attirées par une électrode négative, tandis que les particules négatives sont rejetées et vice-versa. Il est possible de séparer toutes sortes de mélanges plastiques différents, sans grand effort à travers des modifications mineures à l'unité de chargement et en modifiant la position de la plaque de séparation.

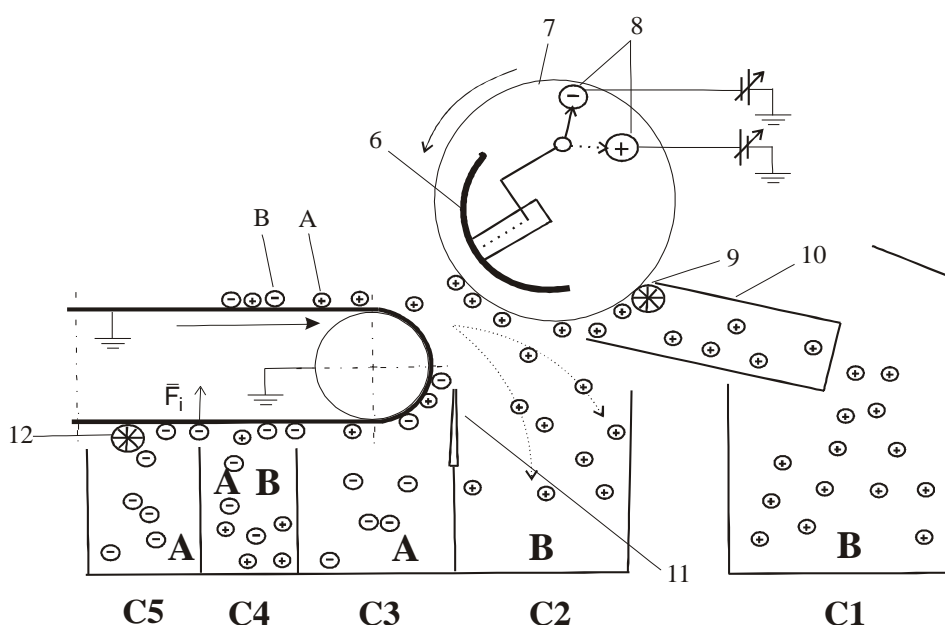


Figure 1.15 : Schéma de principe de la zone de séparation électrostatique de séparateur EKS-HAMOS: A, B – granules en plastique; 6- électrode haute tension; 7- cylindre métallique rotatif; 8- contacts haute tension; 9,12- brosses pour enlever le matériau; 10- tube collecteur; 11- palette défecteur; C1,..., C5- collecteurs.

La société américaine CARPCO est aussi connue dans le domaine surtout par son séparateur en « V » [34], [35] (figure 1.16), qui se base sur l'introduction des mélanges granulaires isolants dans un champ électrique intense généré par deux électrodes cylindriques rotatives de polarités inverses ; l'une attire les particules chargées positivement et la seconde ceux chargés négativement ; il peut séparer deux ou plusieurs matériaux. Le nouveau design de cette installation est facilement adaptable aux besoins des applications, notamment à la séparation des minerais et des plastiques dont la taille varie de 1 mm à 1 cm). Le séparateur utilise un champ électrostatique de 120 kV, produit par deux sources variables de haute tension, 0-60 kV.

Tandis que l'entreprise russe NEVOTECH fabrique un séparateur couronne à chute libre pour la séparation de mica.

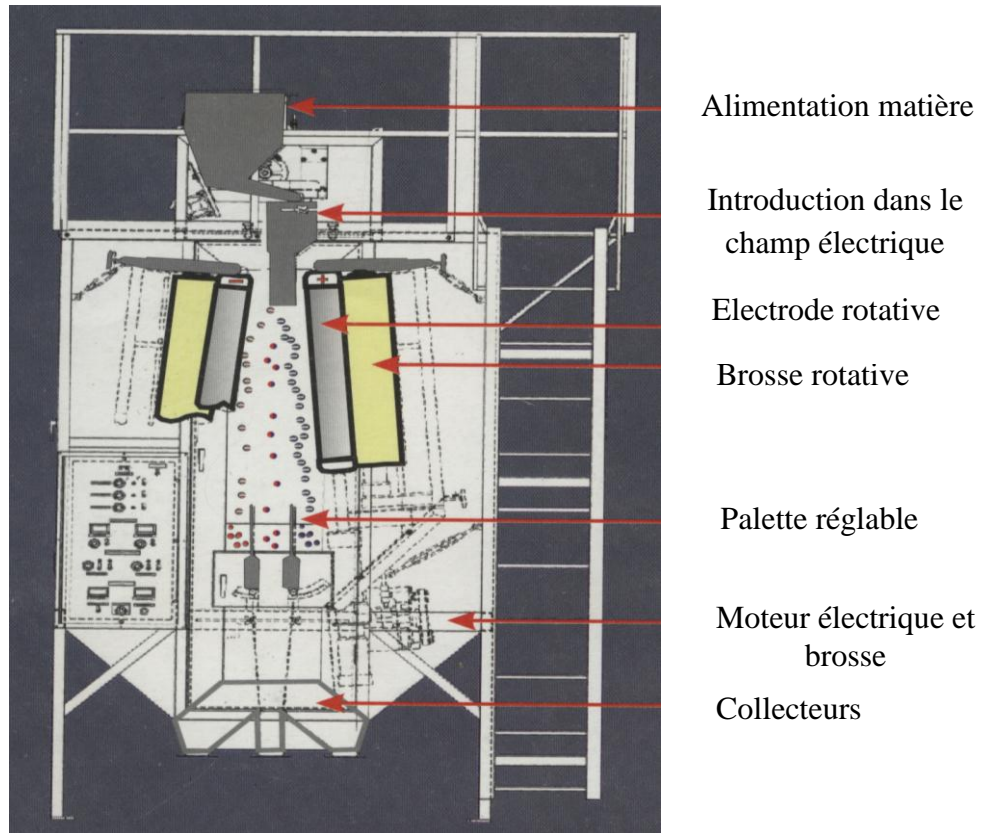


Figure 1.16 : Séparateur tribo électrostatique à chute libre Carpco



Figure 1.17 : Exemple d'installation industrielle de récupération et de séparation des produits plastiques [docs TECNOFER, Italie].

Conclusion

L'utilisation des séparateurs à lit fluidisé pour les mélanges granulaires isolants, a surpassé les autres types de séparateur du fait que cette dernière nécessite le passage par deux phases qui sont distinctes l'une de l'autre, la première pour le chargement et la seconde pour la séparation et le paradoxe qui se pose est toujours l'optimisation de la charge afin d'améliorer la séparation ; cela constitue une grande contrainte pour la séparation en régime continu (alimentation en matière et séparation sans interruption) d'où le besoin et la recherche d'autres techniques et d'autres moyens afin de satisfaire ce besoin qui très convoité pour l'usage industriel.

Chapitre 2 : Matériaux et méthodes

Les recherches ont été réalisées sur plusieurs types de matériaux granulaires isolants (sous-chapitre 2.1), en utilisant différentes techniques de mesure (sous-chapitre 2.2) et la méthode des plans d'expérience (sous-chapitre 2.3).

2.1. Matériaux

Deux types de matériaux plastiques granulaires ont été utilisés dans cette étude; polymères vierges et produits récupérés issus du broyage de déchets d'équipements électriques et électroniques.

2.1.1. Granules de polymères vierges (PA et PC)

Les granules de polymères vierges utilisés dans la plasturgie ont des caractéristiques physiques et géométriques bien définies (Fig. 2.1), ce qui les rend très appropriés pour réaliser les essais de mise au point des dispositifs de laboratoire :

- ❖ Les PolyCarbonates ou « PC » sont des polymères thermoplastiques contenant des groupes carbonate (-O-(C = O)-O-). Ils sont facilement moulés et thermoformés, sont caractérisés par une très bonne résistance à la température et aux chocs mécaniques, mais se raient facilement. Cette famille de matériaux trouve de nombreuses applications principalement dans la fabrication de certains composants extérieurs des automobiles,
- ❖ Le Polyamide (PA) est le premier thermoplastique conçu à base de polymères synthétiques (1938) [4] ; connu commercialement par le nom de « nylon », il est très utilisé dans la fabrication des tapis , vêtements , airbags , pneus, attaches, cordes, bandes transporteuses, ...

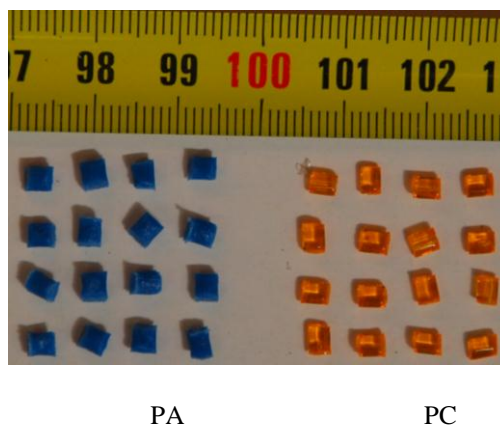


Figure 2.1 : Aspect et dimensions des granules de Polycarbonate (PC) et de polyamide (PA)

Tableau 2.1 : Propriétés physiques du PA et du PC [39], [40]

| Matières | PC | PA |
|---------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| Température de service | -40 À 75 ° C | -70 - 105 ° C |
| Densité [kg / m ³] | 1200 à 1220 | 1120 à 1240 |
| Résistivité [Ω.m] | 10 ¹⁵ | 10 ¹⁷ à 10 ²⁰ |
| Rigidité diélectrique | 15-67 kV / mm | 17 à 35 kV / mm |
| L'absorption d'eau | 0.16 à 0.35% | 2 à 4% |

2.1.2. Granules de récupération issues des produits informatiques (ABS et HIPS)

L'orientation des travaux vers ces deux types de matériaux vient du fait que leur proportion dans les déchets plastiques excède les 44%, selon des statistiques récentes [4]. De plus, l'utilisation de ces matériaux ayant des excellentes caractéristiques mécaniques (robustesse, dureté, légèreté) et esthétique ne cesse de progresser. D'où notre orientation de notre travail vers cette famille de polymères qu'on résume leur identification :

❖ Acrylonitrile-Butadiène-Styrène (ABS) obtenu de la polymérisation de l'acrylonitrile, du butadiène et du styrène, il est essentiellement utilisé à des fins mécaniques ; il a également des propriétés électriques qui assez constantes sur une large plage de fréquences. Caractérisé par un poids léger, une excellente dureté, une bonne brillance et des propriétés d'isolation électrique, l' ABS a la capacité d'être moulé par injection et extrusion ; très utilisé dans la fabrication de produits tels que des canalisations de fluides, des instruments de musique, des composants automobiles, notamment des pare-chocs, des boîtiers pour les assemblages électriques et électroniques, des panneaux de meubles, des bagages et des étuis de protection, des petits appareils électroménagers et des jouets . [40]

❖ High Impact Polystyrène (HIPS) est de la famille des polystyrènes compacté à haute pression, caractérisé par sa bonne résistance dimensionnelle, des propriétés équilibrés de résistance aux chocs et résistance à la chaleur ; il est aussi facile à usiner, et son coût est relativement faible. En raison de sa bonne résistance aux chocs à basse température, il est généralement utilisé pour des appareils ménagers, des jouets et des composants électriques et informatiques.

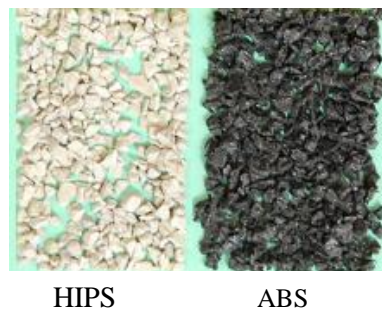


Figure 2.2 : Aspect des granules de HIPS et d'ABS

Les Propriétés physiques de l'ABS et du HIPS sont résumées dans le tableau 2.2 :

Tableau 2.2 : Propriétés physiques de l'ABS et du HIPS

| Matière | ABS | HIPS |
|---------------------------------|--------------------------------------|------------------|
| Température de service | -20 À 80 ° C | -40 À 75 ° C |
| Densité [kg / m ³] | 1060 - 1080 | 1040 – 1050 |
| Résistivité [Ω.m] | 10 ¹⁵ à 2.7 ²⁰ | 10 ¹⁷ |
| Rigidité diélectrique | 14 à 20 kV / mm | 40 à 100 kV / mm |
| L'absorption d'eau | 0,2 à 0,45 % | 0,05 à 0,6 % |

2.2. Techniques de mesure

Les grandeurs à mesurer sont la charge électrique, le champ électrique et le potentiel électrique de surface.

2.2.1. Mesure de charge par cage de Faraday

Une cage de Faraday est une enceinte réalisée en matériaux conducteurs, typiquement utilisée pour protéger un appareil électriques des nuisances électromagnétiques extérieures ou inversement de l'empêcher à polluer son environnement. Lorsqu'elle sert à la mesure de charge, la cage de Faraday est le plus souvent constituée de deux cylindres concentriques séparés par un isolant. Le cylindre extérieur est relié à la terre pour réduire les perturbations électriques extérieures et le second cylindre est connecté à un électromètre pour la mesure des charges électriques des objets introduits dans la cage [41].

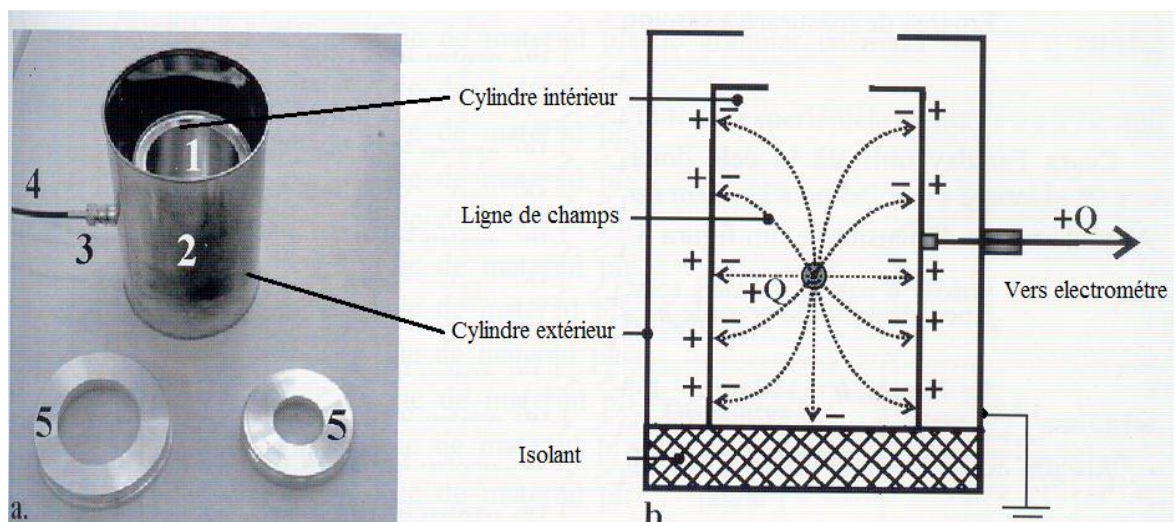


Figure 2.3 [29] : Construction (a) et principe de mesure de la charge électrique (b) d'une cage de Faraday : 1. Cylindre métallique intérieur (cage), 2. Cylindre métallique extérieur (Ecran électrostatique), 3. Connecteur BNC, 4. Câble coaxial pour la mesure, 5. Couvercles supérieurs des deux cylindres

2.2.2 Mesure indirecte de charge par champ mètre

La mesure du champ électrostatique produit par les granulés plastiques chargés par a été faite par un mesureur de champs et de potentiel de marque SIMCO (Nederland) B.V. type SS-2X (Figure 2.4).

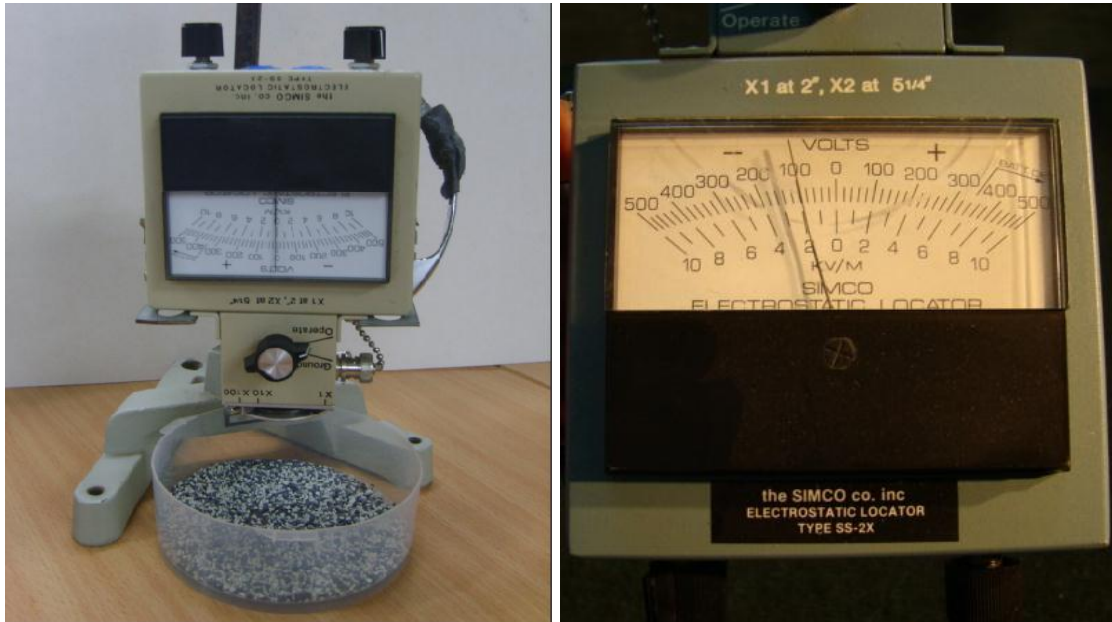


Figure 2.4. : Modalité d'utilisation (a) et aspect du cadran (b) du mesureur de champs et de potentiel SS-2X de chez SIMCO (Nederland)

L'appareil de mesure de champs électrostatiques SS-2X a été développé pour mesurer l'électricité statique (champs et potentiel de surface). Un champ homogène est requis pour assurer une mesure fiable, la distance de mesure standard est de 5 cm.

L'appareil est doté de trois calibres :

- « X1 » ou la lecture se fait directement.
- « X10 » pour les potentiels supérieurs à 500 V (champ supérieur à 10 kV/m) ou la lecture doit être multipliée par 10.
- « X100 » pour les potentiels supérieur à 5000 V (champs supérieur à 100 kV/m) ou la lecture doit être multipliée par 100.

2.2.3 Mesure de potentiel de surface par voltmètre électrostatique

La mesure du potentiel à la surface d'une couche de granules isolants chargés se fait par simple transfert de ceux-ci sous une sonde électrostatique à condensateur vibrant de type Trek 3435 reliée à un voltmètre électrostatique Trek, modèle 341B [42]. La sonde électrostatique est située à une distance $h = 3$ mm au-dessus de la surface libre des échantillons.

L'acquisition des données expérimentales a été réalisée par un instrument virtuel, développé sous un environnement LabView. Un électromètre numérique Keithley modèle 6514, est

connecté au voltmètre électrostatique et communique avec l'instrument virtuel implanté sur ordinateur à l'aide d'un bus GPIB de la norme IEEE 488. La figure 2.5 illustre le principe de mesure du potentiel en surface.

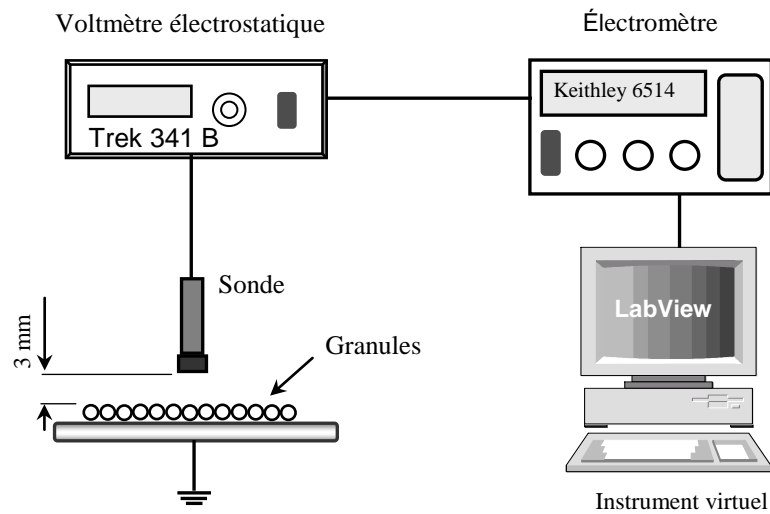


Figure 2.5 : Poste de mesure du déclin de potentiel en surface

2.2.4 Instrumentation virtuelle (LabView)

LabView est l'abréviation de « Virtual Laboratory Instrumentation Engineering Workbench » ; c'est un environnement de développement de programme comme les langages C ou BASIC élaboré par National Instrument USA (NI) [43]. Cependant, LabView diffère de ces applications sur un point important; En effet, alors que les autres outils de programmation emploient des langages textuels, LabView utilise un langage de programmation graphique pour créer des programmes sous la forme de diagrammes.

De plus, LabView comprend plusieurs bibliothèques avancées permettant, par exemple, de faire de l'acquisition de données et du contrôle d'instruments série ou GPIB; il est fondé sur le langage de programmation graphique G. Ce type de langage, très convivial, simplifie les calculs et les interfaces de communication. Un programme LabView est appelé VI (Virtual Instrument) à cause de sa ressemblance avec les instruments réels. Les VIs sont décomposées en trois parties: la face-avant, le diagramme et l'icône/connecteur. La face-avant est principalement utilisée pour les boutons de commandes, les graphiques et les différents types d'indicateurs. Le diagramme est le code source du programme. Comme les VIs sont modulaires, il est très facile de diviser le programme en petits modules qui seront reliés entre eux dans le diagramme. L'icône/connecteur permet de personnaliser son VI et de pouvoir l'utiliser en tant que sous-VI [48].

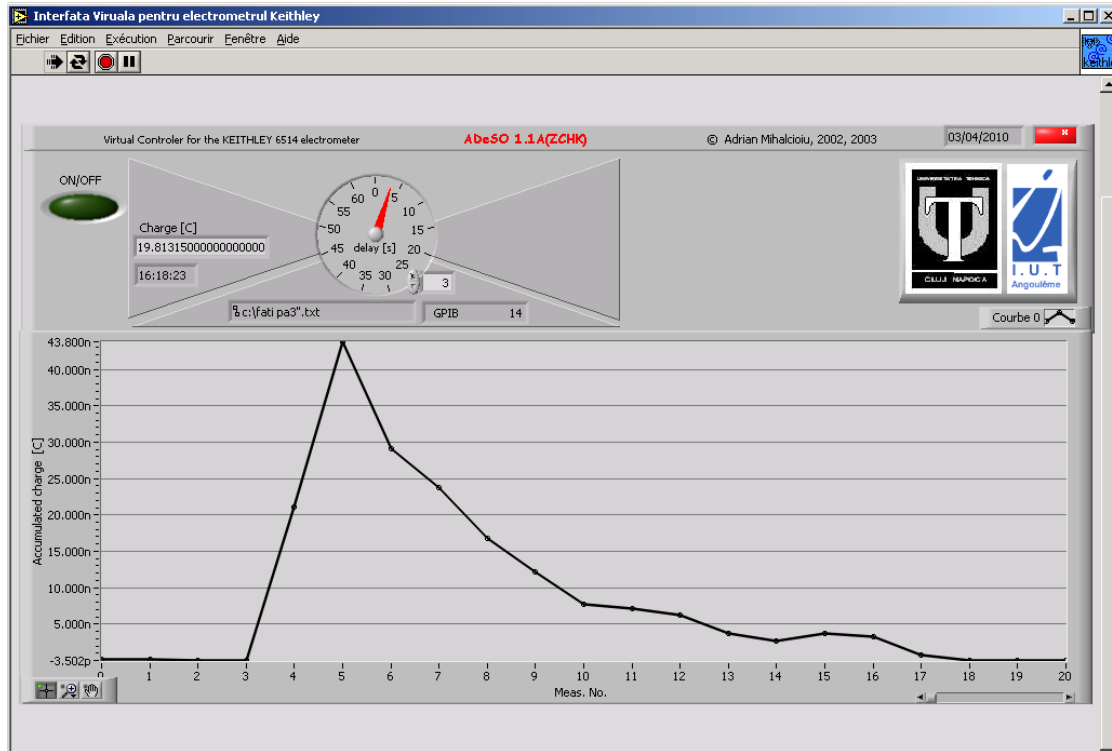


Figure 2.6 : Panneau frontal de l'instrument virtuel « LabView » pour la mesure de la charge acquise par effet tribo électrique [47]

2.3. Méthodologie des plans d'expériences [44], [45], [46]

Avec les plans d'expériences, il est possible d'obtenir le maximum de renseignements sur le fonctionnement d'un processus avec le minimum d'essais. Cette méthode prescrit le nombre d'expériences à accomplir afin d'atteindre un objectif bien déterminé et prédit le comportement des systèmes dans le domaine d'utilisation en fonction de plusieurs facteurs qui peuvent varier simultanément ; elle permet d'évaluer les effets de ces facteurs et leurs interactions.

2.3.1. Plans factoriels

L'étude d'un processus peut, le plus souvent, être schématisé de la manière suivante : une variable de sortie Y qui sera appelée par la suite *réponse* dépend d'un grand nombre de variables, x_1, x_2, \dots, x_n , appelées *facteurs*.

La modélisation mathématique consiste à trouver une fonction f telle que $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Dans la méthode classique d'étude, la réponse Y est mesurée pour plusieurs valeurs de la variable x_i tout en fixant les valeurs des $(n - 1)$ autres variables. On itère alors cette méthode pour chacune des variables. Ainsi, par exemple, dans le cas de 4 variables, chacune prenant 5 valeurs, il faut effectuer $5^4 = 625$ expériences. Ce nombre est excessive tant en temps qu'en coût. Il faut donc réduire le nombre d'expériences à effectuer sans pour autant perdre la qualité des résultats recherchés.

Les plans d'expériences complets sont les plus simples, ils sont aussi les plus utiles car ils forment la base de tous les débuts d'étude. Les premiers résultats obtenus grâce à ces plans peuvent toujours être complétés par de nouvelles expériences permettant d'atteindre le degré de précision et d'information recherché.

Un plan comportant l'étude de k facteurs prenant chacun deux niveaux est désigné par la notation 2^k . Le domaine d'étude d'un plan 2^2 peut être représenté comme sur la figure 2.7.

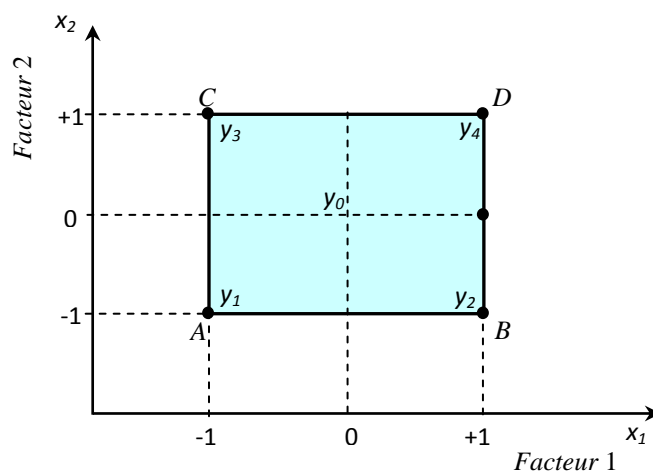


Figure. 2.6 : Définition du domaine d'étude

Le meilleur emplacement des points expérimentaux se situe aux sommets du carré représentant le domaine d'étude : points A , B , C et D . Cette représentation géométrique est commode pour comprendre le mécanisme des plans d'expériences, mais elle ne peut plus être employée dès que le nombre de facteurs est supérieur à trois. Pour les espaces multidimensionnels, une représentation matricielle doit être adoptée. A titre d'exemple, la construction de la matrice d'expériences du plan 2^2 associée à la figure 2.7 est illustrée par le Tableau 2.2.

La matrice d'expériences est constituée de deux sous-tableaux : le premier définit les essais à réaliser et le second le domaine d'étude. Le premier sous tableau comprend trois colonnes ; la première identifie les essais : ici par exemple : 1, 2, 3 et 4 ; la seconde et la troisième indiquent les coordonnées des points représentatifs des expériences prévues. Le deuxième sous tableau indique, en unités courantes, les valeurs des niveaux haut et bas de chacun des facteurs. Les deux représentations, géométrique et matricielle, sont équivalentes. Il faut savoir passer de l'une à l'autre pour bien interpréter les résultats des plans d'expériences.

Tableau 2.2 : Matrice d'expériences

| Essais à réaliser | | |
|--------------------------|-------------------|-------------------|
| N° Essai | Facteur 1 | Facteur 2 |
| 1 (A) | -1 | -1 |
| 2 (B) | +1 | -1 |
| 3 (C) | -1 | +1 |
| 4 (D) | +1 | +1 |
| Domaine d'étude | | |
| Niveau - | X _{1min} | X _{2min} |
| Niveau + | X _{1max} | X _{2max} |

Le modèle mathématique adopté a priori est un polynôme prenant en compte la moyenne, les effets de chaque facteur et toutes les interactions entre les facteurs pris deux à deux, trois à trois, quatre à quatre, ..., k à k .

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum a_{ij\dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (2-2)$$

Un plan 2^k comporte 2^k points expérimentaux qui se situent aux 2^k sommets d'un hyper cube de k dimensions. Le modèle mathématique contient 2^k coefficients qui sont les inconnues. L'ensemble des résultats d'un plan 2^k conduit donc à un système de 2^k équations à 2^k inconnues, si l'on ne tient pas compte des erreurs expérimentales. Ce système peut se mettre sous la forme matricielle :

$$Y = Xa \quad (2-3)$$

avec :

Y : vecteur ayant pour composantes les réponses de chaque essai, et représenté par une matrice colonne ($2^k, 1$),

a : vecteur ayant pour composantes la moyenne, les effets des facteurs et toutes les interactions, et représenté par une matrice colonne ($2^k, 1$) ; ces composantes sont les inconnues à déterminer,

X : matrice carrée ($2^k, 2^k$) composée de -1 et $+1$ suivant les valeurs des niveaux x_i .

2.3.2. Plans composites

Le modèle mathématique est analogue à (2.2) à laquelle on ajoute un terme carré:

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots a_{i..k} x_i \dots x_k + \sum a_{ii} x_i^2 \quad (2-4)$$

Dans le cas d'un plan à deux facteurs, la formule est la suivante :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 \quad (2.5)$$

Il y a donc six inconnues à déterminer.

Le plan d'expériences fournit un certain nombre de valeurs de la réponse y , ce qui permet la résolution d'un système de n équations (s'il y a n réponses) et p inconnues (s'il y a p coefficients). Il est commode d'écrire ce système sous forme matricielle sans tenant compte des erreurs expérimentales :

$$y = X \cdot a \quad (2.6)$$

$(n,1) \quad (n,p) \quad (p,1)$

La résolution de ce système est généralement conduite selon la méthode des moindres carrés, et la solution est notée \hat{a} . Cette solution est donnée par la formule suivante:

$$\hat{a} = (X^t X)^{-1} X^t y \quad (2.7)$$

Le calcul de l'inconnue \hat{a} est beaucoup moins facile que pour les plans 2^k . L'emploi d'un logiciel se révèle absolument nécessaire.

Il existe plusieurs types de plans composites. Pour ce qui concerne les plans composites centrés utilisés dans cette thèse; leur construction consiste à rajouter des points en étoile à partir d'un plan factoriel complet. Ces points en étoile sont positionnés à une distance $\pm\alpha$ du centre du domaine suivant les axes des facteurs. L'ensemble de ces points constitue un dispositif au sein duquel on ne fait varier qu'un seul facteur à la fois. Il y a donc $2k$ points en étoile, k étant le nombre des variables du plan d'expériences (Figure 2.8).

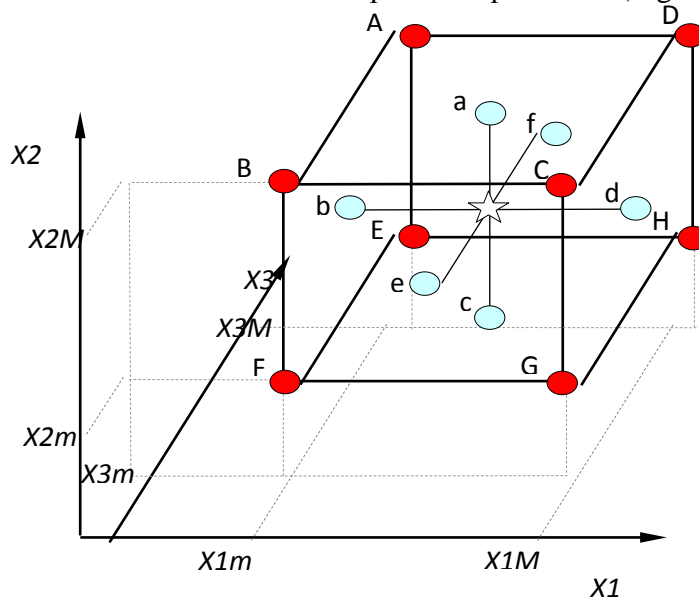


Fig. 2.8. Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite.

2.4. Logiciel pour les plans d'expérience

Le Plan d'Expérience est une méthode efficace pour savoir le comportement d'un processus en fonction de ces facteurs et de déterminer son modèle mathématiques afin de trouver le point de convergence du système vers son optimal ; L'outil informatique est nécessaire à la réalisation rapide et précise d'une telle étude vue la complexité des interactions des différents facteurs.

La compagnie suédoise « Umetrics » a proposé un programme « Modde », outil puissant fonctionnant sous Windows, facilitant cette tâche pour réaliser tous les calculs fastidieux (recherche des estimateurs, tests d'hypothèses, *etc...*) et enfin pour obtenir tous les types de sorties conviviales existant (représentations graphiques des surfaces de réponses, points optimaux *etc...*) [49].

Le résultat est un modèle de causalité prédictive montrant l'importance de tous les facteurs et leurs interactions. Ces modèles peuvent être résumées comme parcelles d'information mettant en évidence la combinaison optimale des paramètres de facteur.

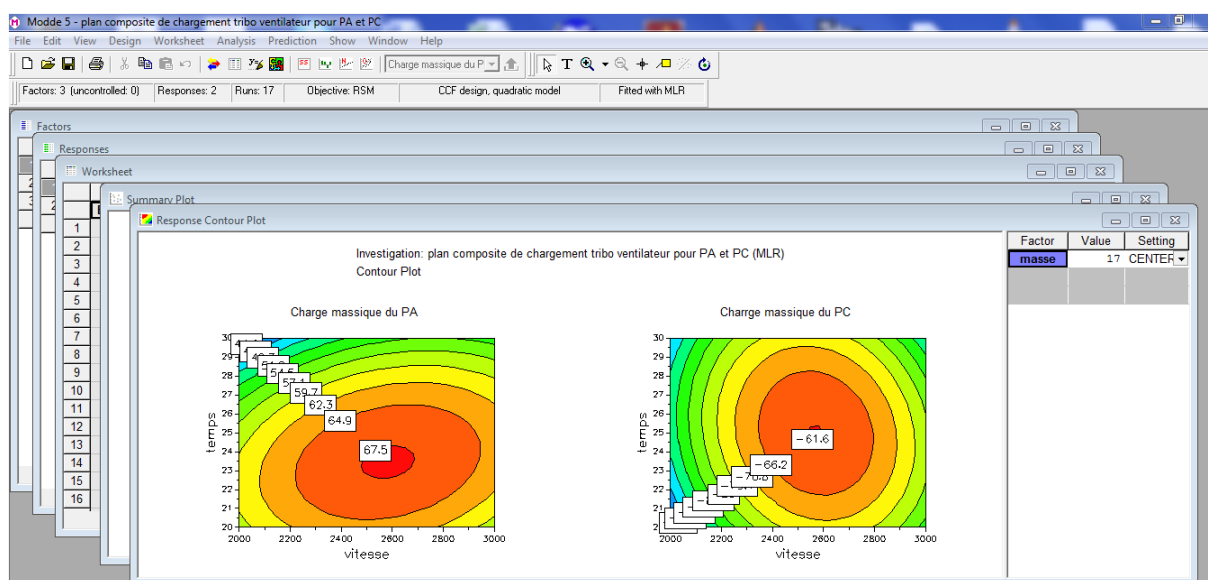


Figure 2.9 : exemple d'application du programme « modde 5.0 » pour un plan d'expérience

Conclusions

1. Les essais seront réalisés avec des matériaux permettant la validation de procédés de séparation électrostatique nouveaux pour l'industrie du recyclage.
2. Plusieurs techniques de mesures seront mises en œuvre pour évaluer l'efficacité des procédés de charge triboélectrique des plastiques granulaires,

Les plans d'expériences constituent une bonne stratégie pour la modélisation des systèmes complexe, comme le séparateur tribo-aéro-électrostatique.

Chapitre 3. Evaluation de deux procédés de chargement triboélectrique et application sur un nouveau séparateur à électrode tapis

Ce chapitre présente les dispositifs et les installations de chargement tribo-aéro-électrostatiques réalisés au sein du Laboratoire de d'électrostatique de l'IRECOM, à l'Université de Sidi Bel Abbés/Algérie. L'auteur est à l'origine d'un nouveau procédé, pour le chargement triboélectrique à base d'un ventilateur. Il a participé aussi à la réalisation d'un autre dispositif de chargement tribo-aéro-électrique où l'injection d'air est assurée par un compresseur. Ces dispositifs ont été utilisés ensuite pour la séparation électrostatique des mélanges granulaires dans une installation à tapis roulant.

Les études ont porté d'abord sur le chargement et la séparation des particules isolantes vierges, ce qui a permis de comparer les deux nouveaux dispositifs. Ensuite, la méthode des plans d'expériences a été utilisée pour modéliser le chargement et la séparation des particules isolantes provenant des déchets d'équipements informatiques.

3.1. Procédure expérimentale

3.1.1. Dispositifs de charge triboélectriques

L'acquisition de charge par effet triboélectrique se produit entre deux surfaces de matière différentes. La charge statique qui en résulte n'est généralement pas perceptible, elle se produit dans un système que si la conductivité du matériau est faible, ce qui permet de d'atteindre des niveaux de charge élevés. Cette accumulation de charge statique est importante dans le traitement de grandes quantités de poudres sèches comme la farine, les produits chimiques ou les polymères. Ce phénomène peut être employé efficacement pour le tri des différentes particules chargées dans un champ électrique.

Deux dispositifs de chargement triboélectrique ont été conçus et réalisés au sein du laboratoire IRECOM de l'université de Sidi Bel Abbés ; le premier est à base d'un ventilateur et le second est à base d'injection d'air comprimée.

Le premier dispositif est constitué d'un moteur à courant continu entraînant une hélice dans un cylindre en Plexiglas (PMMA) de diamètre 10 cm et de hauteur de 35 cm (figure 3.1) [51], [52], [54], [55]. La rotation de l'hélice crée un courant d'air ascendant donnant naissance à des turbulences aérodynamique hélicoïdales multipliant les collisions des particules à l'intérieur du cylindre.

Le second dispositif de chargement triboélectrique à air comprimé a la même structure mécanique à l'exception du moteur qui est remplacé par un entonnoir adapté au diamètre du cylindre en PVC pour l'injection d'air (Figure 3.2) [59], [61].

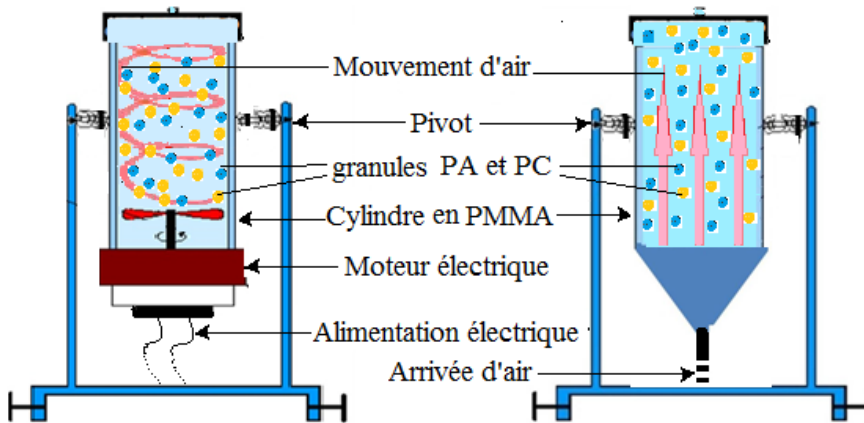


Figure 3.1: Synoptique du dispositif de chargement triboélectrique par ventilateur

Figure 3.2: Synoptique du dispositif de chargement triboélectrique par air comprimée

Mis en forme : Police :Non Gras, Police de script complexe :Non Gras

Mis en forme : Police :Non Gras, Police de script complexe :Non Gras

Mis en forme : Police :Non Gras, Police de script complexe :Non Gras

Mis en forme : Police :Non Gras, Police de script complexe :Non Gras

Mis en forme : Police :Non Gras, Police de script complexe :Non Gras

Pour les deux procédés, la structure de base a été conçue de sorte à que la récupération du mélange granulaire chargé, après l'écoulement d'un temps bien défini, s'effectue par le pivotement du cylindre du dispositif par rapport à un axe dédié. Ceci se fait sans arrêter le moteur ou l'injection d'air, afin d'éviter le collage des particules contre les parois et de vider tous le contenu (voir figure 3.3). Trois types de collisions ont eu lieu dans ces dispositifs:

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

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

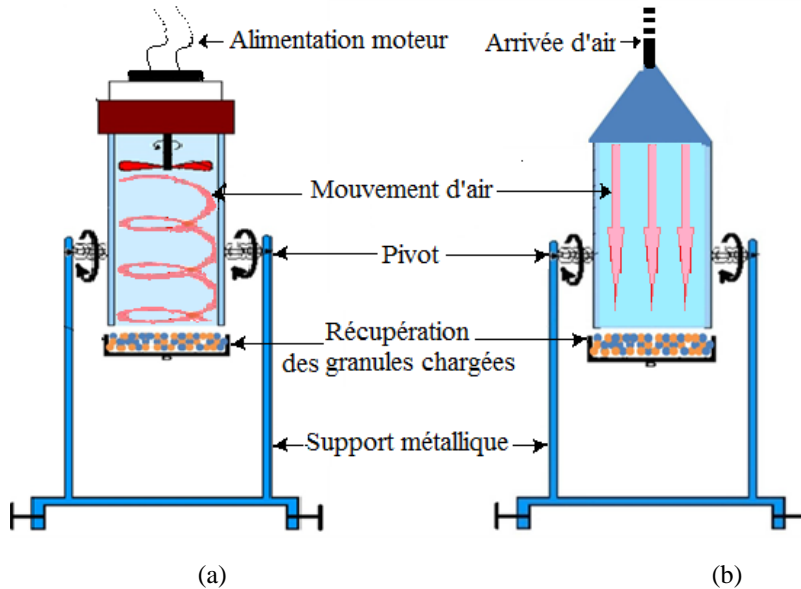


Figure 3.3 : Récupération des granules chargées des deux dispositifs triboélectriques : (a) à base de ventilateur, (b) à base d'air comprimé

Pour l'ensemble des expériences, les échantillons de plastique granulaire étaient de couleurs différentes, afin de faciliter l'analyse des résultats. Dans le dispositif de chargement triboélectrique à base de ventilateur (figure 3.1), trois variables ont été étudiées, à savoir :

1. La masse des particules utilisées « m ».
2. La vitesse de rotation de l'hélice « n ».
3. Le temps de séjour des particules en mouvement « t ».

Les variables prises en considération pour le second dispositif de chargement triboélectrique à base d'air comprimé (figure 3.2) sont :

1. La masse des particules utilisées « m ».
2. La pression de l'air injecté dans le tube « p ».
3. Le temps de séjour des particules en mouvement « t ».

3.1.2. Matériaux et méthode

Pour chacun des deux dispositifs, l'interaction entre les trois facteurs peut être très compliquée à déterminer, d'où le besoin d'employer la méthode des plans d'expérience afin de réduire le nombre d'essais et d'atteindre rapidement le point de fonctionnement optimal. La démarche à suivre consiste dans un premier temps à déterminer la plage de variation de chaque facteur donnant les bons points de fonctionnement du dispositif (chargement triboélectrique) suivie par la réalisation du plan d'expérience adéquat afin d'optimiser le processus. L'utilisation de l'outil informatique était incontournable, notamment le logiciel

« MODDE 5.0 » de « Umetrics, Suède » [49] qui propose des solutions simples et rapides pour la modélisation des processus.

Les mesures sont faites à l'aide d'un mesureur de champ électrique et de potentiel de surface (modèle SS-SX, SIMCO, Pays-Bas). Chaque mesure est effectuée trois fois et la valeur moyenne est utilisée dans les calculs.

Pour les deux procédés, les expériences ont été effectuées sur des particules isolantes, principalement du polyamide de couleur bleu (PA) et du polycarbonate de couleur orange (PC).

3.2. Charge des matériaux granulaires dans le dispositif à hélice

3.2.1. Expériences préliminaires

Des expériences préliminaires sont nécessaires pour la détermination des limites de variation des variables de contrôle (les facteurs) du processus de chargement.

A. Détermination de la vitesse de rotation de l'hélice en fonction de la tension d'alimentation du moteur électrique

Un moteur à courant continu a été utilisé pour faire tourner l'hélice du ventilateur. Pour des raisons d'accessibilité à la mesure de la vitesse pendant les essais, la tension d'alimentation du moteur a été utilisée pour déterminer la vitesse du moteur d'après la relation:

$$U=K.\Omega \quad (3.1)$$

avec : K : Constante, U : Tension d'alimentation du moteur à courant continu [V].

Ω : Vitesse angulaire [rad/s]

Plusieurs essais ont été effectués en changeant la tension U pour déterminer le facteur K ; l'ensemble des résultats est résumé dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Correspondance entre la tension d'alimentation du moteur et sa vitesse de rotation.

| | | | | | | |
|------------------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|
| U (Volt) | 5 | 10 | 12 | 15 | 18 | 20 |
| Ω (rad/s) | 125 | 219,8 | 278,41 | 350,63 | 449,01 | 497,16 |
| K | 0,04 | 0,0449 | 0,0431 | 0,0427 | 0,04008 | 0,04022 |
| n (tr/min) | 1194,26 | 2100 | 2660 | 3350 | 4290 | 4750 |

La valeur moyenne de la constante K pour la suite de notre étude sera $K= 0,042$

Alors pour chaque valeur de la tension la vitesse peut être calculée avec la relation suivante :

$$(3.2)$$

$$\Omega = U/K$$

avec : Ω : vitesse du moteur [rad/s]

U : tension d'alimentation du moteur [V]

Sachant que :

$$\Omega = n * 2\pi / 60 \quad (3.3)$$

avec n : vitesse du moteur (tr/min) en remplaçant l'équation (3.2) dans (3.3) la vitesse s'exprime comme :

$$n = 227.36 * U \quad (3.4)$$

B. Influence du temps de chargement sur la charge acquise

Les résultats obtenus concernant la mesure du champ électrostatique, produit par les granulés PA et PC, en fonction du temps sont présentés dans le tableau 3-2 et illustrés par la figure 3-4. La température ambiante était de l'ordre de 26,8° C et le taux d'humidité d'environ 43%. La masse des échantillons granulés ainsi que la vitesse du moteur d'entraînement du dispositif de chargement par triboélectricité sont maintenues constantes (masse $m = 5$ g et $n = 2730$ tr/min).

Tableau 3.2 : Influence du temps sur le chargement des particules (potentiel de surface)

| Temps [s] | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
|--|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Potentiel de surface des particules PA [V] | 40 | 500 | 800 | 800 | 700 | 850 | 850 | 700 | 600 |
| Potentiel de surface des particules PC [V] | -80 | -600 | -600 | -700 | -700 | -800 | -700 | -800 | -800 |

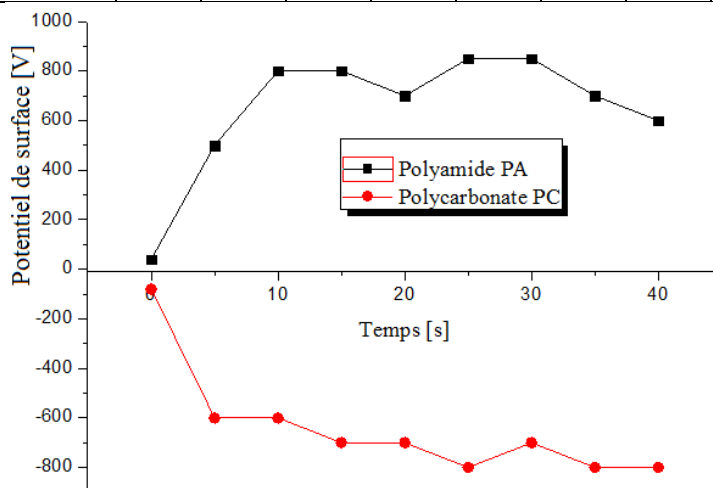


Figure 3.4 : Variation du potentiel de surface en fonction du temps.

L'efficacité du processus dépend considérablement du temps de chargement des particules traitées, la valeur maximum du potentiel est atteinte pour les deux types de particules dans l'intervalle 20 à 30 s. Au-delà de 30 secondes, les particules de « PA » ont atteint la saturation. Notons que les particules PA se chargent positivement et les particules PC se chargent négativement.

Suite à ces résultats, la durée de chargement sera fixée à $t = 25$ s pour la suite des expériences.

C. Influence de la vitesse de l'hélice sur le chargement des particules

Les résultats obtenus concernant la mesure du potentiel de surface, produit par les granulés PA et PC, en fonction de la vitesse de l'hélice sont présentés dans le tableau 3.3, et illustrés par la figure 3.5. La température ambiante était d'environ 24.8° C et le taux d'humidité était l'ordre de 37%. Le temps de chargement des échantillons granulés ainsi que la masse des échantillons granulés sont maintenus constants (temps= 25 s et $m = 5$ g). Les différents échantillons sont chargés dans ce dispositif à des vitesses variant de 1592 tr/min à 4094 tr/min.

Tableau 3.3: Influence de la vitesse du moteur du dispositif de chargement par triboélectricité sur le potentiel de surface.

| | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|
| Tension moteur [V] | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 18 |
| Vitesse n [tr/min] | 1592 | 2047 | 2502 | 2957 | 3412 | 4094 |
| Potentiel de surface des particules PA [V] | 1000 | 1100 | 1200 | 1000 | 900 | 1100 |
| Potentiel de surface des particules PC [V] | -800 | -800 | -800 | -800 | -800 | -700 |

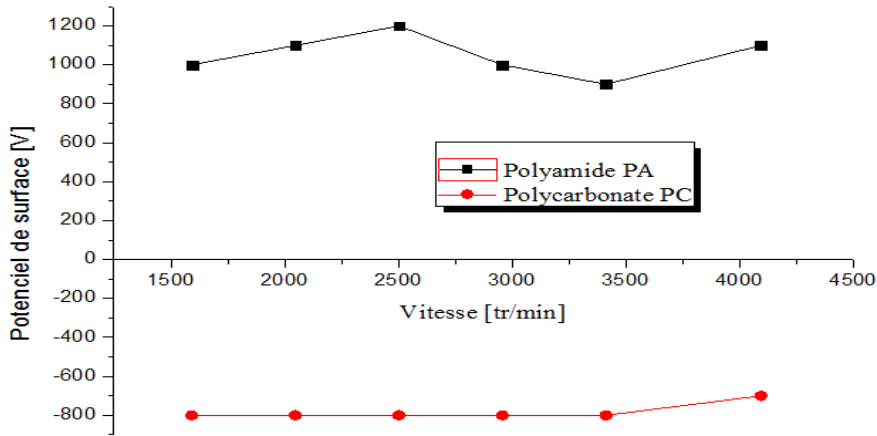


Figure 3.5: Variation du potentiel de surface en fonction de la vitesse de rotation de l'hélice du dispositif de chargement par triboélectricité.

L'influence de la vitesse de rotation de l'hélice n'est pas considérable ; le chargement des particules est plus au moins constante dans l'intervalle 2047 tr/min jusqu'à 2957 tr/min.

L'efficacité du procédé diminue lorsque la vitesse de rotation de l'hélice est grande, car les granules se saturent rapidement.

Une vitesse de 2500 tr/min a été fixée pour la suite des expériences parce qu'elle se situait au milieu de la plage des valeurs optimales.

D. Influence de la masse sur la charge acquise

Les résultats obtenus concernant la mesure du potentiel de surface (champ électrostatique) produit par les granulés PA et PC en fonction de la masse sont présentés dans le tableau 3.4 et illustrés par la figure 3.6; La température ambiante était de l'ordre de 25°C et le taux d'humidité était de 36%. Le temps de chargement des échantillons granulés ainsi que la vitesse du moteur de dispositif de chargement par triboélectricité sont maintenues constant (temps = 25 s et $n = 2500$ tr/min). La masse des différents échantillons varie de 5 g à 20 g.

Tableau 3.4 : variation du potentiel de surface en fonction de la masse

| Masse (g) | 5 | 8 | 11 | 14 | 17 | 20 |
|--|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Potential de surface des particules PA (V) | 700 | 1200 | 1000 | 1200 | 1200 | 1300 |
| Potential de surface des particules PC (V) | -600 | -1000 | -1200 | -1250 | -1700 | -1600 |

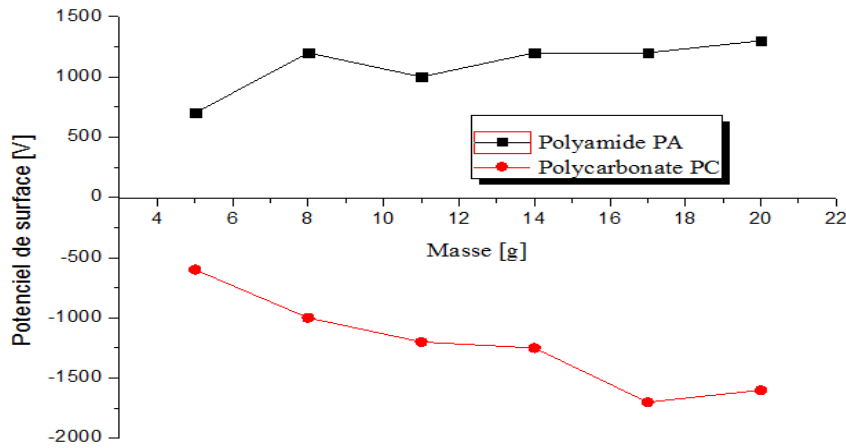


Figure 3.6: Variation du potentiel de surface en fonction de la masse de l'échantillon chargé.

La masse de l'échantillon introduit dans le dispositif de chargement influe plus sur la charge les particules de « PC » que celle de « PA ». Les meilleurs résultats sont obtenus pour une masse entre 14 et 20 g.

3.2.2. Modélisation et optimisation

3.2.1. Choix des intervalles d'étude

Les intervalles d'étude des différents facteurs ont été choisis suivants les réponses obtenues à partir des essais préliminaires (tableaux 3.2, 3.3 et 3.4) :

➤ Pour le temps : $20 \text{ s} \leq t \leq 30 \text{ s}$ (3.5)

➤ Pour la vitesse : $2000 \text{ tr/min} \leq n \leq 3000 \text{ tr/min}$ (3.6)

➤ Pour la masse : $14 \text{ g} \leq m \leq 20 \text{ g}$ (3.7)

➤

3.2.2. Choix du plan expérimental :

Après une première étude des différents facteurs qui ont une influence sur l'efficacité du chargement par effet triboélectrique, nous avons essayé d'établir une relation entre les grandeurs d'entrée (t, n, m) et les grandeurs de sortie (Potentiel massique des particules de « PA » et Potentiel massique des particules de « PC »), Dans un premier temps, nous avons fait les 11 expériences d'un plan factoriel complet (2^3 points aux extrémités du domaine expérimental + 3 points au centre). Le modèle polynomial de premier degré obtenu à la suite de ce plan d'expérience n'étant pas valide, nous sommes passés à un plan composite nous permettant de trouver un modèle du second degré :

L'intérêt des plans composites réside dans le fait qu'ils prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel. Il suffit d'effectuer les expériences qui correspondent aux points « en étoile » et de faire les calculs sur l'ensemble des expériences (figure 3.7).

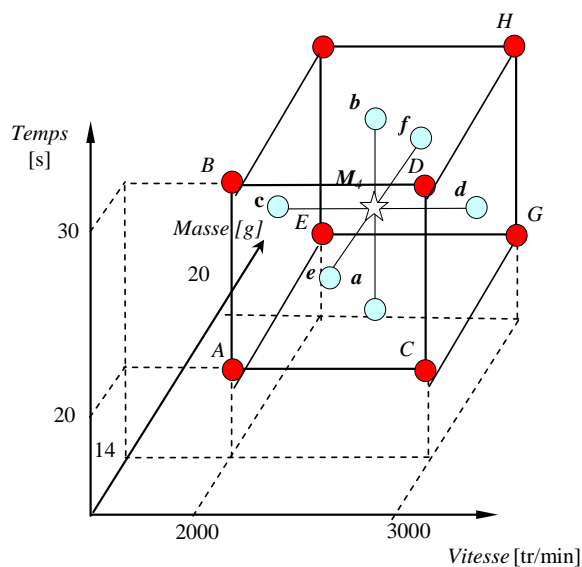


Figure 3.7 : Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite.

3.2.2.1. Résultats des expérimentations

Les résultats des 17 expériences effectuées selon le plan d'expériences composite sont reportés dans le tableau 3.5 ($RH = 34\%$ et $T = 21,2^\circ\text{C}$).

Tableau 3.5 : Résultats du plan d'expériences composite

| Essai | Temps [s] | Vitesse [tr/min] | Masse [g] | Ratio potentiel/masse du PA [V/g] | Ratio potentiel/masse du PC [V/g] |
|-------|-----------|------------------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 20 | 2000 | 14 | 64,29 | -78,57 |
| 2 | 30 | 2000 | 14 | 53,00 | -85,71 |
| 3 | 20 | 3000 | 14 | 57,14 | -71,43 |
| 4 | 30 | 3000 | 14 | 57,14 | -92,43 |
| 5 | 20 | 2000 | 20 | 63,00 | -98,00 |
| 6 | 30 | 2000 | 20 | 40,00 | -75,00 |
| 7 | 20 | 3000 | 20 | 70,00 | -65,00 |
| 8 | 30 | 3000 | 20 | 60,00 | -60,00 |
| 9 | 20 | 2500 | 17 | 62,06 | -81,24 |
| 10 | 30 | 2500 | 17 | 50,94 | -76,47 |
| 11 | 25 | 2000 | 17 | 56,82 | -100,00 |
| 12 | 25 | 3000 | 17 | 61,06 | -82,35 |
| 13 | 25 | 2500 | 14 | 70,48 | -54,82 |
| 14 | 25 | 2500 | 20 | 67,94 | -44,10 |
| 15 | 25 | 2500 | 17 | 66,59 | -60,82 |
| 16 | 25 | 2500 | 17 | 67,71 | -59,06 |
| 17 | 25 | 2500 | 17 | 66,82 | -62,94 |

Les modèles mathématiques obtenus sont les suivants :

1) Pour les particules de PA :

$$Y_{PA} = 65,34 - 5,54.t + 2,82.V - 0,11.m + 3,03.t.V - 2,71.t.m + 3,75.V.m - 7,5.t^2 - 5,11.V^2 + 5,1.m^2 \quad (3.8)$$

avec : $R^2 = 98,1\%$; $Q^2 = 88,4\%$

2) Pour les particules de PC :

$$Y_{PC} = -65,24 + 0,46.t + 6,61.V + 4,1.m - 3,98.t.V + 7,01.t.m + 5,94.V.m - 10,29.t^2 - 22,6.V^2 + 19,1.m^2 \quad (3.9)$$

avec : $R^2 = 95,9\%$; $Q^2 = 85,2\%$

3.2.2.2. Influence des facteurs

Les modèles mathématiques obtenus nous aident à étudier l'influence de chaque facteur sur chacune des réponses. Ainsi, en utilisant le logiciel « MODDE », nous avons pu tracer la variation des réponses en fonction des facteurs choisis (figure 3.8).

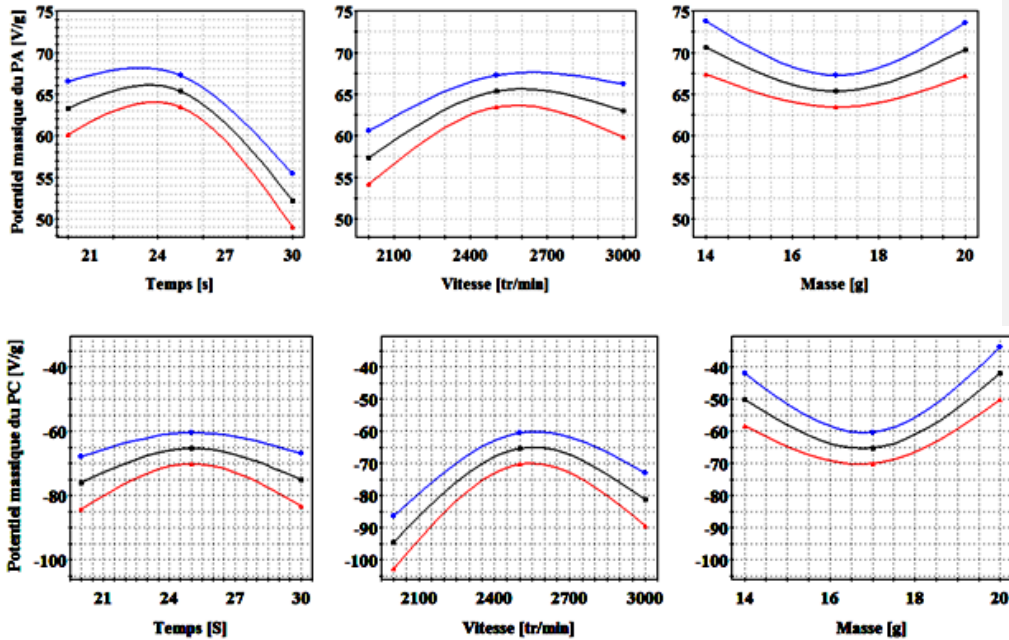


Figure 3.8. Valeurs du ratio potentiel/masse du PA et du PC, prédites par « MODDE 5.0 »

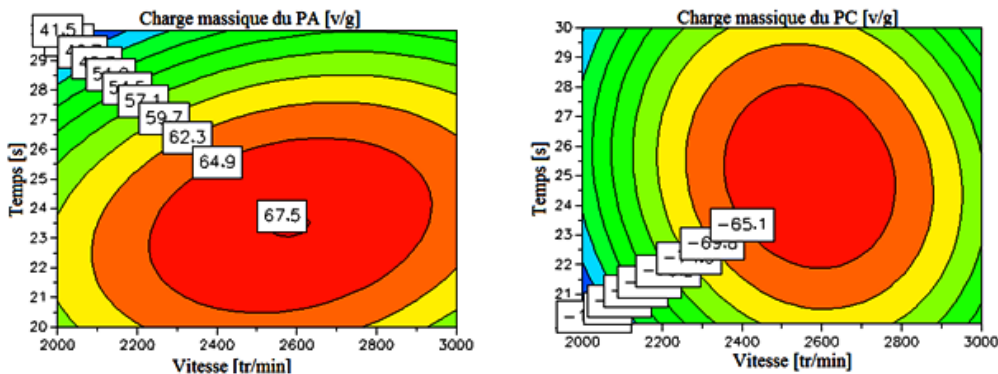


Figure 3.9. Réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, en fonction des variables temps et vitesse pour une masse $m = 17$ g.

Le point de fonctionnement optimal doit maximiser la charge massique des particules PA et minimiser la charge massique des particules PC.

En introduisant ces critères dans le programme « MODDE 5.0 », on obtient les valeurs optimales suivantes : $t = 20$ s, $n = 2000$ tr/min, $m = 20$ g. Les réponses prédites pour ces conditions sont $Y_{PA} = 62,88$ [V/g] et $Y_{PC} = -96,71$ [V/g].

Expérimentalement, nous avons obtenu pour les variables d'entrée $t = 20$ s, $n = 2000$ tr/min et $m = 20$ g les réponses suivantes : $Y_{PA} = 65,4$ [V/g] et $Y_{PC} = -95,80$ [V/g] qui sont très proches des valeurs prédites par le logiciel.

3.3. Charge des matériaux granulaires dans le dispositif à air comprimé

3.3.1. Choix des intervalles d'étude

En suivant la même démarche que pour le premier dispositif, des expériences effectuées en faisant varier un facteur à la fois, nous ont permis d'établir les limites du domaine d'étude [62] :

➤ Pour le temps : $30 \text{ s} \leq t \leq 40 \text{ s}$ (3.10)

➤ Pour la pression : $3 \text{ bar} \leq P \leq 5 \text{ bar}$ (3.11)

➤ Pour la masse : $11 \text{ g} \leq m \leq 17 \text{ g}$ (3.12)

3.3.2. Modélisation et optimisation

Le modèle polynomial de premier degré obtenu à la suite d'un plan d'expérience factoriel complet de type 2^3 n'étant pas valide, nous sommes passés à un « plan composite à faces centrées ». Celui-ci nous a permis d'obtenir un modèle polynomial de deuxième degré en vue d'une modélisation par des surfaces de réponse (RSM).

Les résultats des 17 expériences étaient nécessaires pour le plan composite à trois facteurs (le temps, la pression et la masse), sont groupés dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 : les 17 expériences du plan composite du dispositif de chargement à air comprimé

| Essais | Temps [s] | Pression [bar] | Masse [g] | Ratio potentiel/masse du PA [V/g] | Ratio potentiel/masse du PC [V/g] |
|--------|-----------|----------------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 30 | 3 | 11 | 90,9 | -72,7 |
| 2 | 40 | 3 | 11 | 154,5 | -81,8 |
| 3 | 30 | 5 | 11 | 145,5 | -109,1 |
| 4 | 40 | 5 | 11 | 165 | -139,5 |
| 5 | 30 | 3 | 17 | 75 | -78,8 |
| 6 | 40 | 3 | 17 | 105,9 | -70,6 |
| 7 | 30 | 5 | 17 | 115 | -82,4 |
| 8 | 40 | 5 | 17 | 100 | -105,9 |
| 9 | 30 | 4 | 14 | 130 | -97,1 |
| 10 | 40 | 4 | 14 | 164,3 | -107,7 |
| 11 | 35 | 3 | 14 | 125 | -78,6 |
| 12 | 35 | 5 | 14 | 150 | -114,3 |
| 13 | 35 | 4 | 11 | 210,7 | -81,9 |
| 14 | 35 | 4 | 17 | 153,6 | -54,9 |
| 15 | 35 | 4 | 14 | 202 | -80,7 |
| 16 | 35 | 4 | 14 | 204 | -77,4 |
| 17 | 35 | 4 | 14 | 200 | -78,6 |

Mis en forme : Police :11 pt, Police de script complexe :11 pt

Nous avons obtenu ainsi les modèles mathématiques suivants :

1) Pour les particules de PA :

$$Y_{PA} = 189,34 + 13,33.t + 12,42.P - 21,71.m - 32,70.t^2 - 42,34.P^2 + 2,30.m^2 - 11,25.t.P - 8,4.t.m - 3,87.m.P \quad (3.13)$$

avec : $R^2=98,7\%$; $Q^2=92,1\%$

2) Pour les particules de PC :

$$Y_{PC} = -82,69 - 6,54.t - 16,87.P + 4,24.m - 16,85.t^2 - 10,90.P^2 + 14.m^2 - 6,62.t.P + 3,02.t.m + 6,89.P.m \quad (3.14)$$

avec : $R^2=99,0\%$; $Q^2=92,3\%$

En examinant les équations 3.13 et 3.14, nous pouvons bien voir l'effet de chaque facteur ainsi que leur interactions. Grâce au logiciel « MODDE », nous avons pu tracer les réponses prédites par rapport à la variation de chaque facteur (figure 3.10).

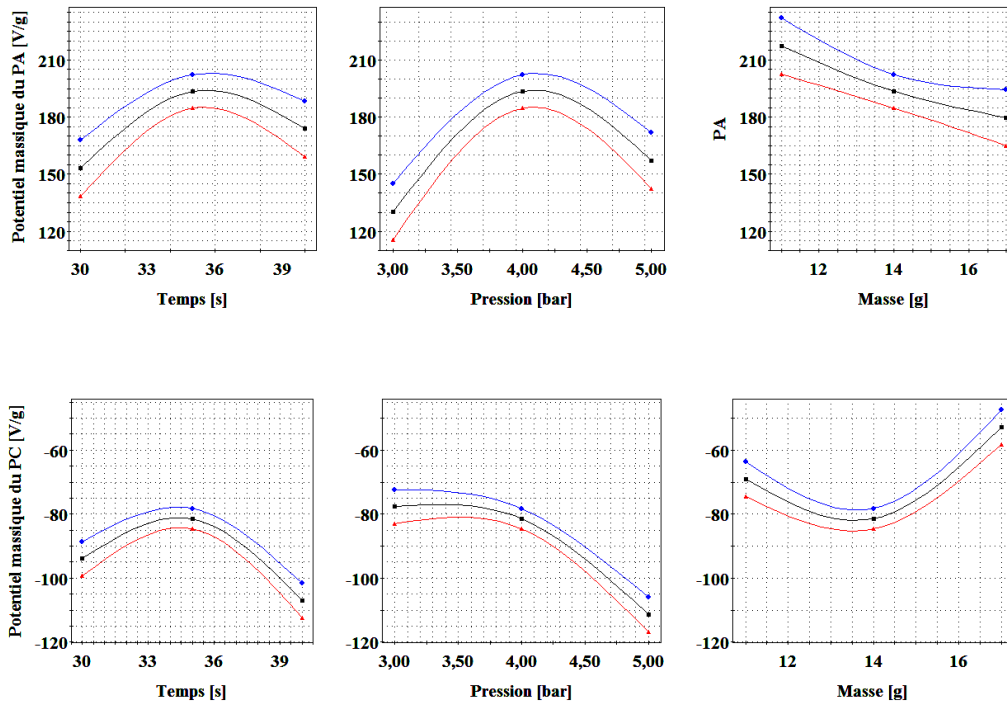


Figure 3.10 : Valeurs du ratio potentiel/masse du PA et PC, prédites par « MODDE 5.0 »

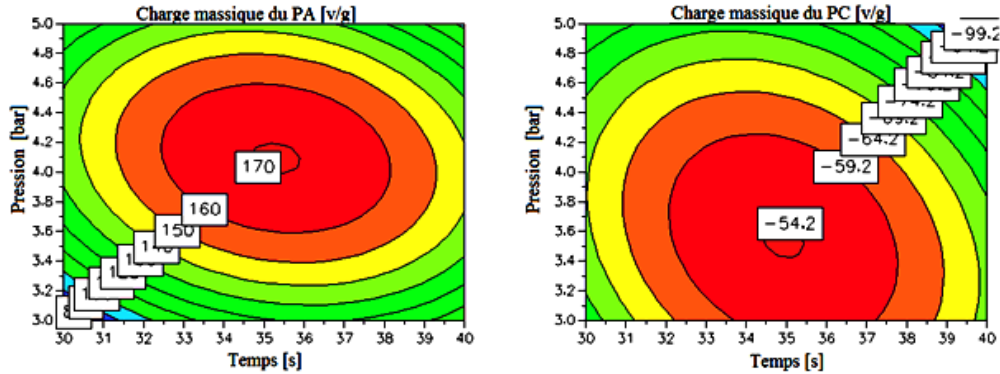


Figure 3.11: Réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, en fonction des variables temps et pression pour une masse $m = 14g$.

Le fonctionnement optimal est obtenu pour :

$t = 40$ s, $P = 4,93$ bar et $m = 11$ g donnant un potentiel massique de : 167,04 V/g pour le PA et -137V/g pour le PC. Expérimentalement, pour ces valeurs des facteurs donnant le point optimal, nous avons obtenu : 158,84 V/g pour le PA et -144 V/g pour le PC, des résultats qui sont très proches des prédictions du programme « MODDE ».

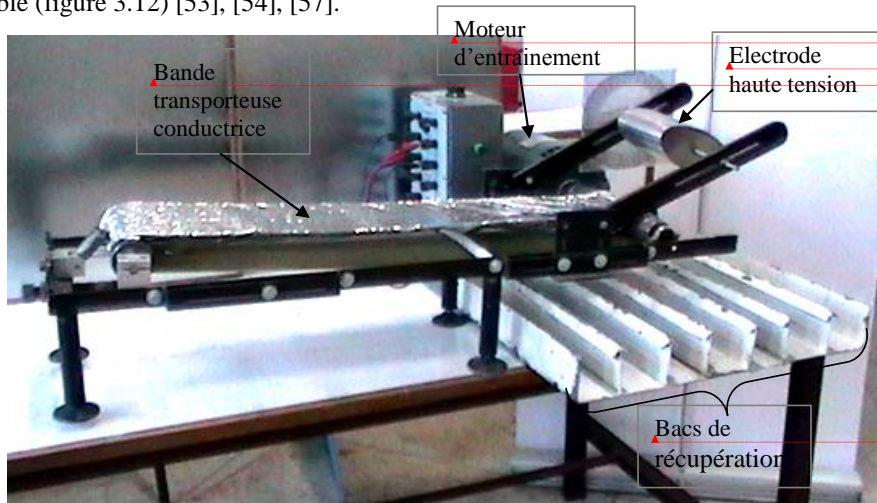
3.4. Comparaison des deux procédés de séparation tribo-aéro-électrostatique

A ce stade la seule conclusion que nous avons pu faire est que le dispositif à air comprimé charge nettement mieux les deux types de particules, Les valeurs obtenues sont presque le double en moyenne des celles obtenus avec le dispositif à hélice. Ces résultats doivent être interprétés avec prudence parce que pour le second dispositif la durée du chargement est plus longue et la masse est plus petite..

L'objectif de la construction de ces deux dispositifs a été de charger les mélanges granulaires isolants en vue de leur séparation électrostatique. Alors nous avons jugé nécessaire de faire une application de séparation dans les conditions optimales afin de pouvoir choisir le meilleur des deux.

3.4.1. Application sur un séparateur électrostatique à bande transporteuse conductrice

Un séparateur à électrode tapis a été conçu par l'auteur au cours de la préparation de la thèse. Son principe repose sur l'utilisation d'une bande transporteuse métallique liée à la terre et d'une électrode elliptique statique (axes : 15x5 cm) soumise à une haute tension positive réglable (figure 3.12) [53], [54], [57].



Mis en forme : Police :11 pt, Police de script complexe :11 pt

Mis en forme : Police :11 pt, Police de script complexe :11 pt

Mis en forme : Police :11 pt, Police de script complexe :11 pt

Mis en forme : Police :11 pt, Police de script complexe :11 pt

Figure 3.12 : Photo du séparateur électrostatique à électrode tapis construit au Laboratoire IRECOM, Université de Sidi Bel Abbés

Les matériaux chargés (par l'un des deux dispositifs) sont déposés par gravité sur un vibrotransporteur qui les transfère à une vitesse constante sur la bande métallique du convoyeur à vitesse variable, entraîné par un moteur à courant continu. Le dépôt de matériaux et la vitesse d'avance du convoyeur sont ajustés, de telle sorte à que les granules forment une monocouche à la surface du tapis.

Le convoyeur introduit les particules dans la zone de champ électrique généré entre l'électrode statique à haute tension de polarité positive et la bande métallique liée à la terre. Les granules chargés négativement sont soumis à une force d'attraction exercée par l'électrode de polarité positive, tandis que les autres sont épinglés à la surface du tapis, jusqu'au moment où une brosse les enlève mécaniquement.

Sur la base des résultats de plusieurs expériences préliminaires, l'électrode à haute tension est positionnée à $h = 7$ cm au-dessus du plan de la bande (fig. 3.13), tandis que la vitesse de l'entraînement moteur à courant continu est ajustée à 15 tr/min.

Pour analyse des résultats, la récupération des produits est assurée par huit bacs dont sept de 5 cm en largeur chacun et le huitième de 45 cm.

Ce dispositif a été optimisé [53], [54] [57] pour la séparation de différents matériaux granulaires isolants.

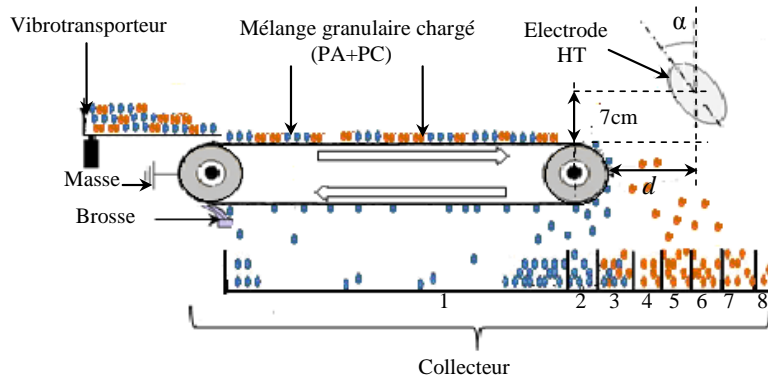


Figure 3.13 : Vue synoptique du séparateur à tapis roulant

3.4.2. Résultats et discussion

Plusieurs proportions de PA et de PC étaient utilisées dans 20 g de mélange. L'ensemble des résultats des séparations réalisées par l'installation à tapis roulant est groupé dans les tableaux 3.7 et 3.8.

Tableau 3.7 : Résultats de la séparation électrostatique de cinq proportions de mélange de PA et de PC par l'installation à tapis roulant (chargement par ventilateur).

| Chargement triboélectrique | | Séparation électrostatique par tapis roulant | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|--|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Ventilateur | 20 g de mélange | | PA [g] | | Mixte | | PC [g] | | | | |
| | PA % | PC % | Bac 1 | Bac 2 | PA [g] | PC [g] | Bac 4 | Bac 5 | Bac 6 | Bac 7 | Bac 8 |
| | | | | | | | | | | | |
| | 100% | 0% | 0,51 | 19,06 | 0,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 75% | 25% | 1 | 13,65 | 0,3 | 0,15 | 0,85 | 3,69 | 0,26 | 0 | 0 |
| | 50% | 50% | 2,1 | 7,45 | 0,4 | 0,29 | 0 | 7,65 | 2,01 | 0 | 0 |
| | 25% | 75% | 0,76 | 3,7 | 0,5 | 1,22 | 0,34 | 8 | 4,95 | 0,34 | 0,11 |
| | 0% | 100% | 0 | 0 | 0 | 0,88 | 13 | 5,4 | 0,7 | 0 | 0 |

Tableau 3.8 : Résultats de la séparation électrostatique de cinq proportions de mélange de PA et de PC par l'installation à tapis roulant (chargement par air comprimé).

| Chargement triboélectrique | | Séparation électrostatique par tapis roulant | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|--|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Compresseur | 20 g de mélange | | PA [g] | | Mixte | | PC [g] | | | | |
| | PA % | PC % | Bac 1 | Bac 2 | PA [g] | PC [g] | Bac 4 | Bac 5 | Bac 6 | Bac 7 | Bac 8 |
| | | | | | Bac 3 | | | | | | |
| | 100% | 0% | 0,75 | 19 | 0,22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 75% | 25% | 4,14 | 10,45 | 0,4 | 0,81 | 2,41 | 1,33 | 0,44 | 0 | 0 |
| | 50% | 50% | 6,2 | 3,65 | 0,14 | 0,66 | 7,95 | 0,94 | 0,43 | 0 | 0 |
| | 25% | 75% | 1,26 | 2,75 | 0,95 | 0,2 | 2,47 | 11,5 | 0,8 | 0 | 0 |
| | 0% | 100% | 0 | 0 | 0 | 0,4 | 2,12 | 15,71 | 1,76 | 0 | 0 |

Pour une meilleure analyse descriptive de la distribution des produits dans les différents bacs de récupération, nous avons travaillé avec les proportions de masse en pourcentage (Tableau 3.9),

Tableau 3.9 : Expression en pourcentage des résultats de la séparation électrostatique de cinq proportions de mélange de PA et de PC par l'installation à tapis roulant (chargement par ventilateur).

| Chargement triboélectrique | | Séparation électrostatique par tapis roulant | | | | | | | | | |
|----------------------------|----------------|--|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Ventilateur | 20g de mélange | | PA [%] | | Mixte | | PC [%] | | | | |
| | PA % | PC % | Bac 1 | Bac 2 | PA [%] | PC [%] | Bac 4 | Bac 5 | Bac 6 | Bac 7 | Bac 8 |
| | | | | | Bac 3 | | | | | | |
| | 100% | 0% | 2,55 | 95,30 | 2,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 75% | 25% | 6,67 | 91,00 | 2,00 | 3,00 | 17,00 | 73,80 | 5,20 | 0,00 | 0,00 |
| | 50% | 50% | 21,00 | 74,50 | 4,00 | 2,90 | 0,00 | 76,50 | 20,10 | 0,00 | 0,00 |
| | 25% | 75% | 15,20 | 74,00 | 10,00 | 8,13 | 2,27 | 53,33 | 33,00 | 2,27 | 0,73 |
| | 0% | 100% | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 4,40 | 65,00 | 27,00 | 3,50 | 0,00 | 0,00 |

Chapitre 3 : Evaluation de deux procédés de chargement triboélectrique et application sur un nouveau séparateur à électrode tapis

Tableau 3.10 : Expression en pourcentage des résultats de la séparation de cinq proportions de mélange de PA et de PC par le tapis roulant résultats en pourcentage (chargement par air comprimé).

| Chargement triboélectrique | | Séparation électrostatique par tapis roulant | | | | | | | | | | |
|----------------------------|------|--|------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20g de mélange | | PA [%] | | Mixte | | PC [%] | | | | | | |
| | | PA % | PC % | PA [%] | PC [%] | Bac 1 | Bac 2 | Bac 3 | Bac 4 | Bac 5 | Bac 6 | Bac 7 |
| Compresseur | 100% | 0% | 3,75 | 95 | 1,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 75% | 25% | 27,6 | 69,67 | 2,67 | 16,2 | 48,2 | 26,6 | 8,8 | 0 | 0 | 0 |
| | 50% | 50% | 62 | 36,5 | 1,4 | 6,6 | 79,5 | 9,4 | 4,3 | 0 | 0 | 0 |
| | 25% | 75% | 25,2 | 55 | 19 | 1,33 | 16,47 | 76,67 | 5,33 | 0 | 0 | 0 |
| | 0% | 100% | 0 | 0 | 0 | 2 | 10,6 | 78,55 | 8,8 | 0 | 0 | 0 |

Pour un mélange de 75% de PA et 25% de PC, les résultats sont représentés sur les figures 3.14 et 3.15,

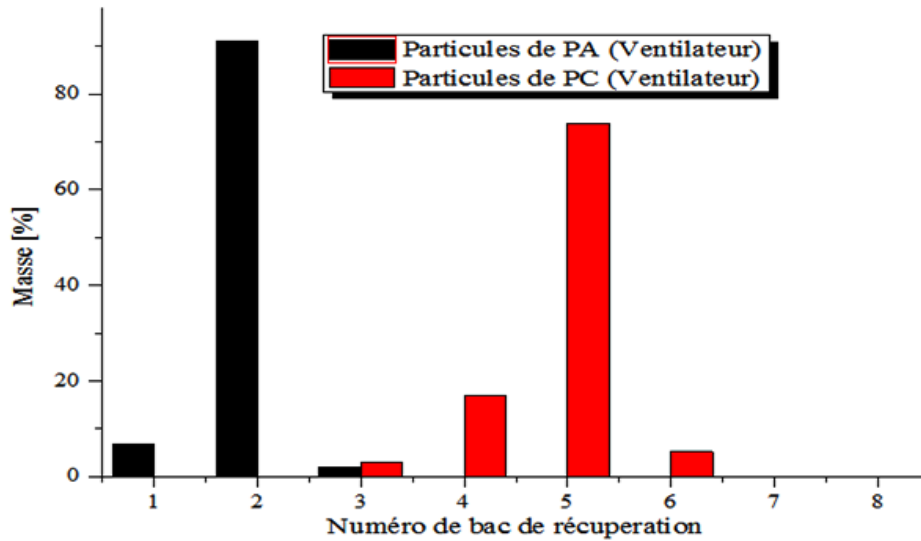


Figure 3.14 : Séparation de 20 g de mélange (75% PA et 25% PA) (chargement par ventilateur)

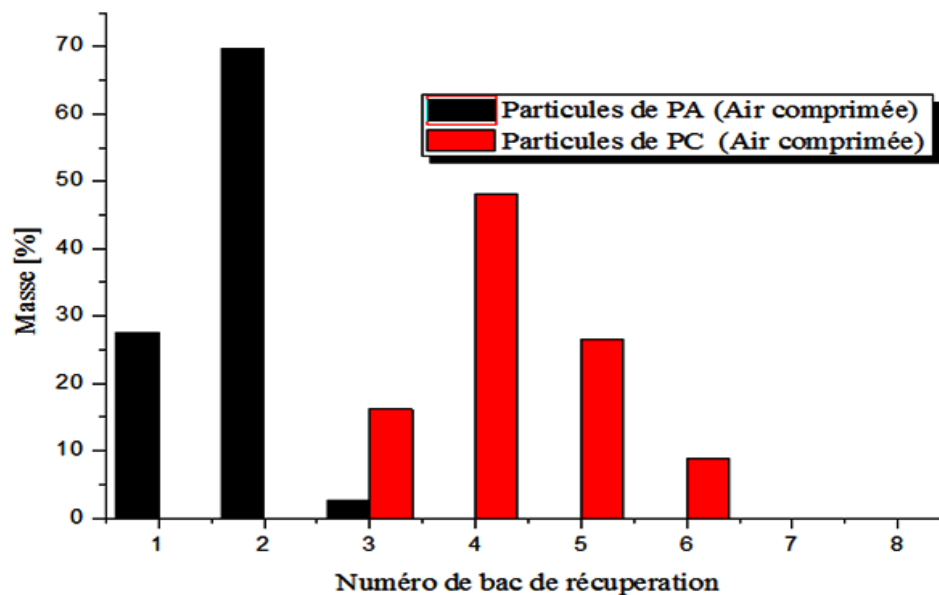


Figure 3.15 : Séparation de 20 g de mélange 75% PA et 25% PC (chargement par air comprimé)

Ces figures nous donnent une idée sur la répartition des deux types de particules dans les bacs de récupération.

En regroupant les produits de la même famille collectés dans des différents bacs, nous avons obtenu les résultats donnés dans les tableaux 3.11 et 3.12,

Tableau 3.11 : Quantités de PA et de PC récupérées après chargement par ventilateur et séparation électrostatique par l'installation à tapis roulant

| Chargement triboélectrique | | produit pur récupéré | | |
|----------------------------|--------------------------------|----------------------|--------|--------|
| Ventilateur | Composition de 20 g de mélange | | PA [%] | PC [%] |
| | PA % | PC % | | |
| | 100% (20g) | 0% | 97,85 | 0 |
| | 75% (15g) | 25% (5g) | 97,67 | 96 |
| | 50% (10g) | 50% (10g) | 95,50 | 96,6 |
| | 25% (5g) | 75% (15g) | 89,20 | 91,6 |
| | 0% | 100% | 0,00 | 95,5 |

Chapitre 3 : Evaluation de deux procédés de chargement triboélectrique et application sur un nouveau séparateur à électrode tapis

Tableau 3.12 : Quantités de PA et de PC récupérées après chargement par air comprimée et séparation électrostatique par l'installation à tapis roulant

| Chargement triboélectrique | | produit pur récupéré | | |
|----------------------------|--------------------------------|----------------------|--------|--------|
| Compresseur | Composition de 20 g de mélange | | PA [%] | PC [%] |
| | PA % | PC % | | |
| | 100% (20g) | 0% | 98,75 | 0,00 |
| | 75% (15g) | 25% (5g) | 97,27 | 83,60 |
| | 50% (10g) | 50% (10g) | 98,50 | 93,20 |
| | 25% (5g) | 75% (15g) | 80,20 | 98,47 |
| | 0% | 100% | 0,00 | 97,95 |

Nous constatons que pour les deux dispositifs la récupération des produits purs dépend de la composition du mélange ; si elle est bonne pour le produit majoritaire, elle est faible pour l'autre.

Conclusion

Le chargement triboélectrique est un phénomène très complexe et l'emploi des plans d'expériences est inévitable afin de réduire le nombre d'essais à réaliser afin d'atteindre le point optimal.

La comparaison entre les deux procédés de chargement triboélectrique nous conduit à dire que les granules mieux chargés ne sont pas forcément caractérisés par un meilleur taux de récupération, mais qu'il faut trouver juste la charge nécessaire pour une séparation électrostatique efficace.

Chapitre 4: Procédés de séparation tribo-aéro-électrostatique

La problématique dans les dispositifs de chargement triboélectrique et de tri électrostatique est de savoir à partir de quelle charge les mélanges granulaires peuvent être séparés ; trop chargés, ils impliquent une surconsommation d'énergie et moins chargés ils conduisent à une mauvaise séparation. Il faut donc faire pour chaque type de produit une étude d'optimisation de la charge avant de passer à la séparation électrostatique ; en effet, le rendement de tout processus de séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules : plus cette dernière est contrôlée, plus la séparation est améliorée.

Le but de ce chapitre est d'évaluer les effets de plusieurs facteurs qui pourraient influencer sur l'efficacité d'un processus de charge en lit fluidisé à savoir la vitesse de l'air de fluidisation, la haute tension appliquée aux électrode, l'humidité..., afin de valider un nouveau concept de séparateur tribo-aéro-électrostatique.

Le travail s'est focalisé sur l'amélioration d'un pilote industriel de séparateur tribo-aéro-électrostatique à base de bandes transporteuses qui vient d'être breveté à l'IUT d'Angoulême (Université de Poitiers). Un autre dispositif de séparation à débit moyen a été utilisé comme appui pour des essais préliminaires.

4.1 Séparation des grosses particules d'ABS et HIPS (taille inférieure à 4,5 mm) dans le séparateur à débit moyen

Le dispositif a été réalisé par le docteur Ciprian Dragan à l'IUT d'Angoulême/France [9] son avantage est qu'il utilise des quantités de produit moins importantes que le séparateur industriel ce qui facilite la réalisation des essais préliminaires, préparant le passage à une plus grande échelle. Plusieurs aménagements ont été faits par l'auteur afin de mieux exploiter le procédé : augmentation de la taille des parois avec une échelle graduée permettant de faire varier l'angle des électrodes de 0° à 90° sachant que la variation initiale était de 0° à 15° ; remplacement du diffuseur d'air du lit fluidisé par un autre plus fin dans le but d'empêcher la pénétration des particules dans la chambre d'air.



(a): Avant modification

(b) : Après modification

Mis en forme : Gauche

Figure 4.1 : Dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et à électrodes inclinées

Après la modification du dispositif, une série d'expériences a été effectuée sur les particules de tailles 2 à 4,5 mm, avec des échantillons 50% d'ABS et 50% de HIPS (masse de l'échantillon : 200 g). La durée du processus de séparation tribo-aéro-électrostatique a été fixée à une minute, la tension appliquée étant 12,5 kV et la vitesse du moteur de la soufflante d'air 3200 tr/min.

La seule variable du processus a été l'inclinaison de l'angle des électrodes.

Pendant le processus, les particules chargées [67], [68], [69] sortent du lit fluidisé et restent piégées sur les électrodes, d'où elles sont récupérées pour mesurer les masses ; l'ensemble des résultats est groupé dans le tableau 4.1

Tableau 4.1 : Quantité des produits purs récupérés en fonction de l'angle d'inclinaison des électrodes.

| Inclinaison électrode [°] | Masse ABS pur [g] | Masse HIPS pur [g] |
|---------------------------|-------------------|--------------------|
| $\alpha=20^\circ$ | 3,4 | 8,68 |
| $\alpha=30^\circ$ | 6,12 | 9,94 |
| $\alpha=40^\circ$ | 11,4 | 19,84 |
| $\alpha=50^\circ$ | 15,39 | 22,95 |
| $\alpha=60^\circ$ | 26,37 | 27,84 |
| $\alpha=75^\circ$ | 36,1 | 38,95 |
| $\alpha=90^\circ$ | 48,88 | 55,46 |

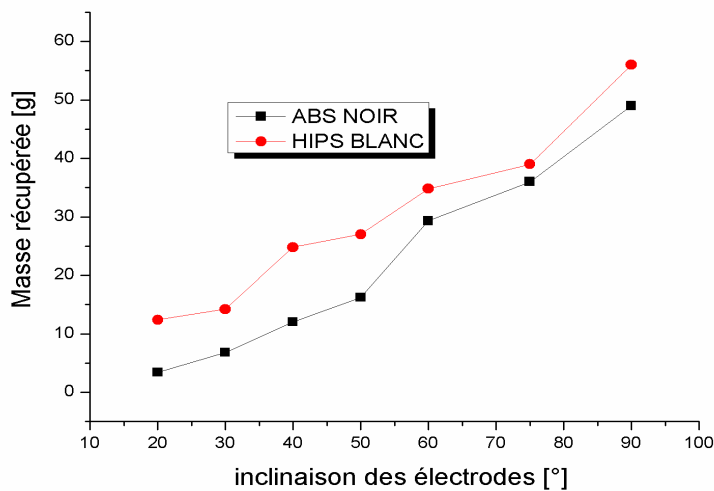


Figure 4.2 : Quantité des produits purs récupérés en fonction de l'angle d'inclinaison des électrodes,

Pour toutes les valeurs de l'angle d'inclinaison des électrodes, la quantité de produit pur est très faible, mais le principal constat est que la masse récupérée augmente en fonction de l'angle d'inclinaison des électrodes ; cela apparaît cohérent avec la théorie car plus que les électrodes se rapprochent, plus le champ augmente et encore les forces aérauliques augmentent aussi ce qui atténue l'effet de la masse des particules.

4.2. Installation pilote industrielle : Séparateur tribo-Aéro-électrostatique à bandes transporteuses conductrices

L'installation dont l'idée vient du docteur Laur Calin de l'Université Technique de Cluj (Roumanie) [64], a été réalisée par le docteur Ciprian Dragan en 2010 [9]. Pour une période de dix-huit mois, le travail de l'auteur consistait à le faire fonctionner et perfectionner les performances de cette installation,

Dans une première phase, l'objectif était seulement la mise en marche du séparateur. L'étanchéité de l'installation qui posait un grand problème ; après plusieurs tentatives, l'auteur est parvenu à surpasser cet obstacle.

Le dispositif a subi plusieurs transformations tout en gardant le principe de fonctionnement de base ; la surface du lit fluidisé a été réduite, les composants d'étanchéité ont été doublés, la position des points d'alimentation en haute tension a été changée et enfin avec la collaboration de deux stagiaires la protection de l'accès aux parties active (HT) de l'installation a été renforcée.

4.2.1 Présentation du séparateur tribo-Aéro-électrostatique à bandes transporteuses

Le dispositif est constitué de deux parties (figure 4.3 :

- ❖ La chambre d'air en plexiglas de 150 x 350 x 500 mm (largeur x longueur x hauteur) constitue le premier élément lié à la soufflante d'air. Cette chambre ayant la forme d'un tronc de

pyramide renversé assure la bonne diffusion et l'uniformisation de la quantité d'air injecté grâce à la présence d'un diffuseur présent à sa partie supérieure et assurant la jonction avec la seconde section du dispositif.

❖ La chambre de fluidisation et de séparation dont deux parois sont en plexiglas et les deux autres en Inox sont constituées des bandes transporteuses du tapis roulant, (0.2 mm d'épaisseur ; 40 cm de largeur), soumises à des hautes tensions continues de polarités opposées.

L'entraînement des deux bandes transporteuses est assuré par des moteurs triphasés alternatifs de 90 W, commandés par des variateurs de fréquence.

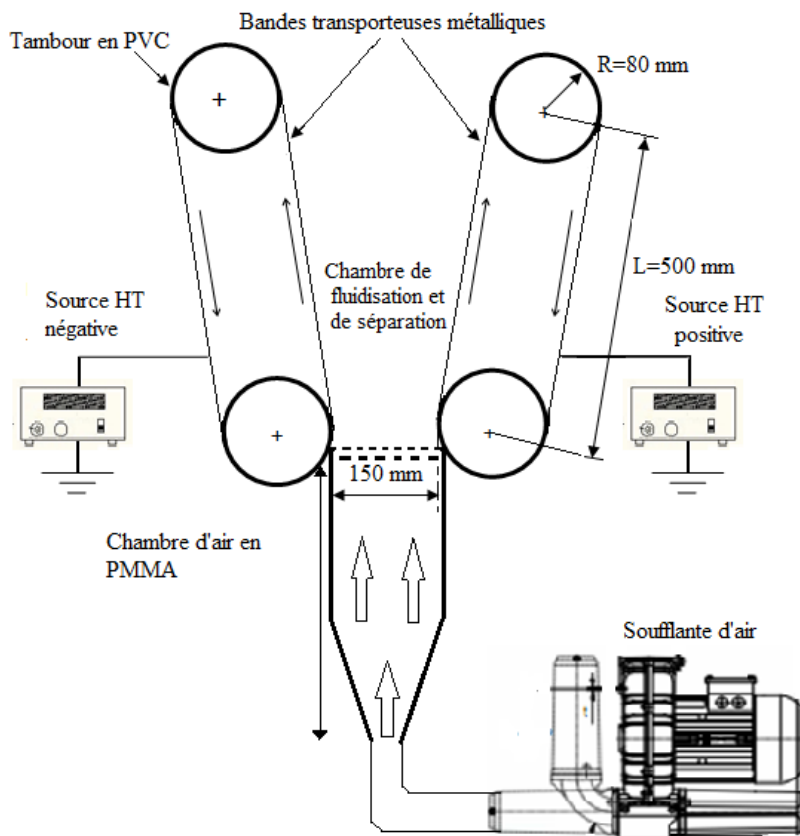


Figure 4.3 : Représentation schématique de l'installation de séparation tribo Aéro-électrostatique.

Soumis à l'action de la pesanteur et des forces aérauliques, le mélange granulaire admis dans la chambre de séparation forme un lit fluidisé. Le débit de l'air de fluidisation est ajusté par un régulateur de pression à une valeur assurant le fonctionnement du lit fluidisé en régime d'ébullition, favorisant ainsi les impacts entre les granules et leur électrisation par effet tribo-électrique. Chaque granule chargé positivement ou négativement se déplace sous l'action de la force de Coulomb dans le champ électrique horizontal créé entre deux électrodes de type tapis roulants conducteur, alimentées par deux générateurs de haute tension continue de polarité opposée ajustable. Sous l'action de la force d'image électrique, les granules chargés adhèrent à la surface des électrodes et cette bande transporteuse permet leur évacuation (produits purs) vers les bacs de récupération.

4.3. Procédure expérimentale

Une première mise en marche d'une installation pilote industriel nécessite un très grand soin pour sa mise au point et l'évaluation de ces performances. La première question à éclaircir, pour ce nouveau dispositif : à partir de quelle masse minimale à séparer sera-t-il vraiment exploitable ?

4.3.1. Détermination de la masse minimale à introduire dans le séparateur.

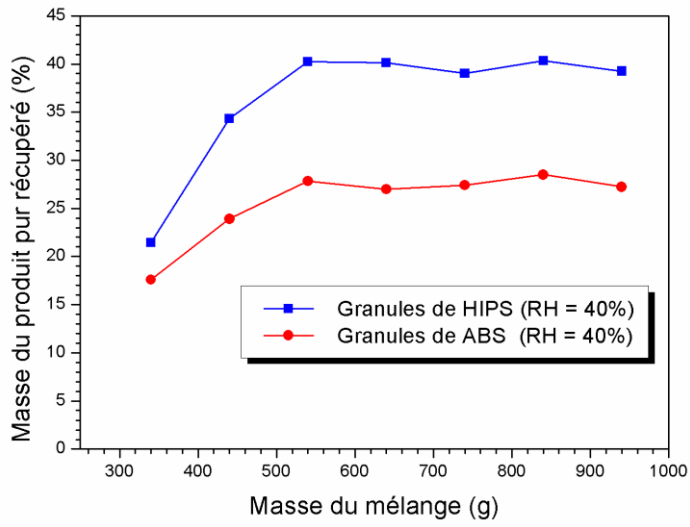
Les expériences ont été réalisées sur deux classes de matériaux isolants qui se trouvent dans les mélanges non conducteurs granulaires triés par les séparateurs électrostatiques: l'ABS (Acrylonitrile-Butadiène-Styrène) et le HIPS (High-Impact Polystyrène) provenant de déchets d'équipements informatiques (imprimantes, claviers...etc.) [64]. La taille de granules des deux matériaux est inférieure à 2 mm.

Deux types d'échantillons: A et B. Les échantillons A sont constitués de 50% de granules de ABS et 50% de granules de HIPS maintenues en contact avec l'air ambiant à des valeurs constantes de température et humidité: 18°C, 40% \pm 1% respectivement pendant 12 h, avant d'être soumis aux essais. Les échantillons B, constitués de la même classe de granules, ont été pré-conditionnés pendant 12 h à une température constante égale à 18°C et une humidité relative $RH = 20\% \pm 1\%$.

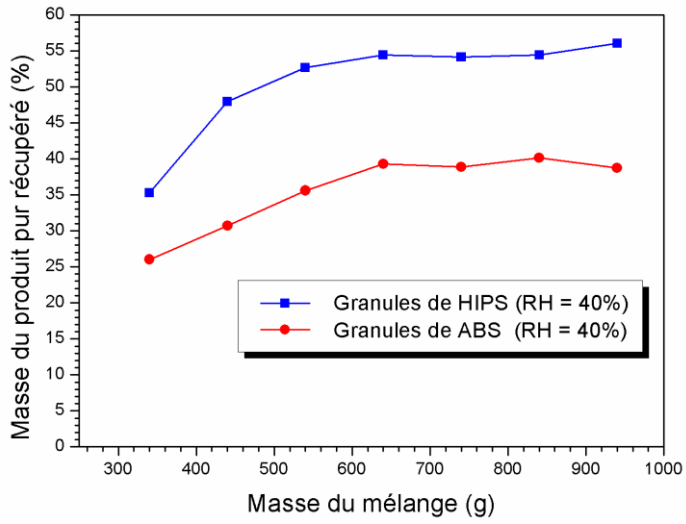
Les expériences préliminaires faites sur un mélange binaire de 700 g (50% ABS + 50% HIPS), dans l'air ambiant (humidité relative: $RH = 40\% \pm 1\%$, température: $T = 18^\circ\text{C}$), les électrodes étant alimentées à $V_{\text{électrode}} = \pm 11$ kV, et se déplaçant à une vitesse $v = 16$ cm/s, montrent que le lit fluidisé se détériore considérablement lorsque la masse de granules se trouvant dans la chambre de séparation est inférieure à 340 g. Cette quantité a été ensuite prise comme base de départ pour une série d'expériences, réalisées avec différentes quantités du mélange granulaires $M = 340$ g, 440 g, ..., 940 g et pour deux durées de séparation $t = 30$ s et $t = 60$ s. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.2 et sur la figure 4.4. La pureté des produits est pratiquement de 100%.

Tableau 4.2: Masses des produits purs récupérés (HIPS et ABS) à partir de différentes masses du mélange granulaire

| Durée (s) | Masse (g) | | | Masse (%) | |
|--------------|-----------|--------|--------|-----------|-------|
| | Mélange | HIPS | ABS | HIPS | ABS |
| 30 | 340 | 36,43 | 29,93 | 21,43 | 17,61 |
| | 440 | 75,48 | 52,59 | 34,31 | 23,90 |
| | 540 | 109,04 | 75,18 | 40,20 | 27,84 |
| | 640 | 128,40 | 86,36 | 40,13 | 26,99 |
| | 740 | 144,30 | 101,38 | 39,00 | 27,40 |
| | 840 | 169,39 | 119,74 | 40,33 | 28,51 |
| | 940 | 184,52 | 127,93 | 39,26 | 27,22 |
| 60 | 340 | 60,00 | 44,20 | 35,29 | 26,00 |
| | 440 | 105,40 | 67,60 | 47,91 | 30,73 |
| | 540 | 142,20 | 96,10 | 52,67 | 35,59 |
| | 640 | 174,00 | 125,70 | 54,38 | 39,28 |
| | 740 | 200,30 | 143,80 | 54,14 | 38,86 |
| | 840 | 228,50 | 168,60 | 54,40 | 40,14 |
| | 940 | 263,20 | 182,10 | 56,00 | 38,74 |



(a)



(b)

Figure 4.4: Taux de récupération des produits purs en fonction de la masse du mélange granulaire après $t = 30s$ (a) et $t = 60s$ (b); ($T = 18^{\circ}C$; $RH = 40\% \pm 1$, $n = 16$ cm/s et $V_{\text{electrode}} = \pm 11$ kV).

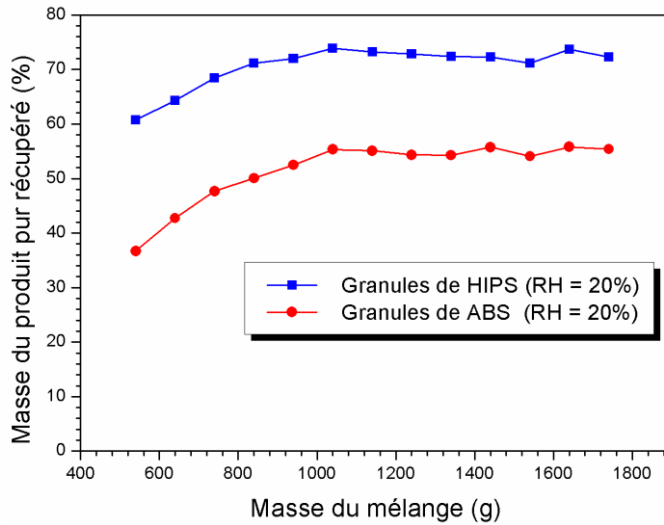


Figure 4.5: Taux de récupération des produits purs en fonction de la masse du mélange granulaire après $t = 60s$; ($T = 18^{\circ}C$; $RH = 20\% \pm 1$, $n = 16 \text{ cm/s}$ et $V_{\text{électrode}} = \pm 11 \text{ kV}$)

Le premier constat est que les quantités de produit récupéré augmentent proportionnellement avec la masse du mélange introduite dans le séparateur mais pour les conditions ambiantes ($T = 18^{\circ}C$; $RH = 40\% \pm 1$) à partir de 640 g, le taux de récupération de chaque produit s'est plus au moins stabilisé ; alors nous avons jugé que ça sera la masse minimale pour laquelle la séparation est intéressante.

Sur la figure 4.5, nous avons représenté le taux de récupération des produits purs (HIPS et ABS) en fonction de la masse du mélange granulaire pour une valeur d'humidité relative égale à 20% et un temps de séparation de 60 s. Les autres conditions expérimentales sont similaires à celles utilisées pour $RH = 40\%$. Dans ce cas de figure, à partir de 1040 g, le taux de récupération de chaque produit s'est plus au moins stabilisé ; alors ça sera la masse minimale pour laquelle la séparation est intéressante dans ces conditions ($T = 18^{\circ}C$; $RH = 20\% \pm 1\%$).

Tableau 4.3 : Masse des produits purs récupérés à partir de différentes masses du mélange granulaire pour un temps de séparation $t = 60$ s, à $RH = 20\% \pm 1\%$

| Masse [g] | | | Masse [%] | |
|-----------|--------|--------|-----------|-------|
| Mélange | HIPS | ABS | HIPS | ABS |
| 540 | 164,05 | 99,09 | 60,76 | 36,70 |
| 640 | 173,64 | 115,43 | 64,31 | 42,75 |
| 740 | 184,71 | 128,74 | 68,41 | 47,68 |
| 840 | 192,16 | 135,14 | 71,17 | 50,05 |
| 940 | 194,51 | 141,72 | 72,04 | 52,49 |
| 1040 | 199,48 | 149,39 | 73,88 | 55,33 |
| 1140 | 197,61 | 148,69 | 73,19 | 55,07 |
| 1240 | 196,67 | 146,66 | 72,84 | 54,32 |
| 1340 | 195,29 | 146,45 | 72,33 | 54,24 |
| 1440 | 195,16 | 150,50 | 72,28 | 55,74 |
| 1540 | 192,16 | 145,98 | 71,17 | 54,07 |
| 1640 | 199,04 | 150,66 | 73,72 | 55,80 |
| 1740 | 195,10 | 149,53 | 72,26 | 55,38 |

Si on considère les deux résultats des figures 4.4 et 4.5, on peut observer l'effet de l'humidité relative sur la variation des deux matériaux [70]. Il apparaît que la diminution de l'humidité relative (de 40% à $20\% \pm 1\%$) a été accompagnée par une augmentation du taux de récupération de HIPS (de moins de 55% à plus de 70%). Pour l'ABS, l'augmentation a été encore plus importante (de moins de 40% à plus de 55%).

Ces observations faites sur l'installation de laboratoire sont pertinentes et doivent être prises en considération dans l'interprétation des phénomènes physiques qui expliquent le comportement des deux matériaux: pratiquement tous les granules HIPS qui sont attirés par l'électrode adhèrent à la surface de celles-ci et sont entraînés en dehors de la zone occupée par le lit fluidisé, vers le collecteur de produits. Une partie de granules d'ABS se détachent de l'électrode avant d'atteindre la fin de la bande transporteuse et pénètrent de nouveau dans la zone de lit fluidisé.

Pour la suite des expériences, la masse minimale à introduire dans le séparateur sera de 1040 g, quantité pour laquelle les taux de récupération avoisinent ou dépassent les 50% après une minute de séparation. Ce sont des performances assez encourageantes pour une première mise en marche de cette installation, sauf que ce taux est supérieur pour le HIPS de plus de 10% par rapport à celui de l'ABS dans la majorité des résultats. La différence de masse récupérée entre les particules de HIPS et d'ABS étant influencée par les conditions de température et d'humidité, des mesures de déclin de potentiel de surface (DPS) ont été faites afin de mettre en évidence une explication possible de cette situation : la capacité différente des deux matériaux à retenir la charge électrique.

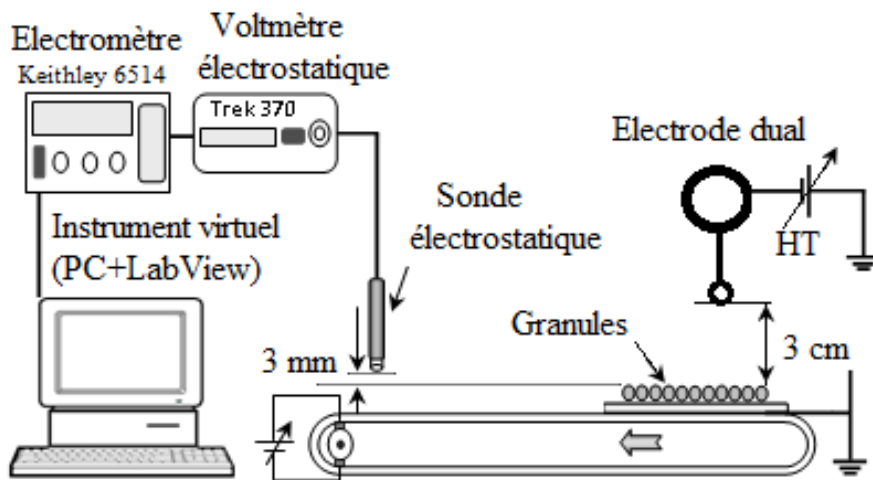
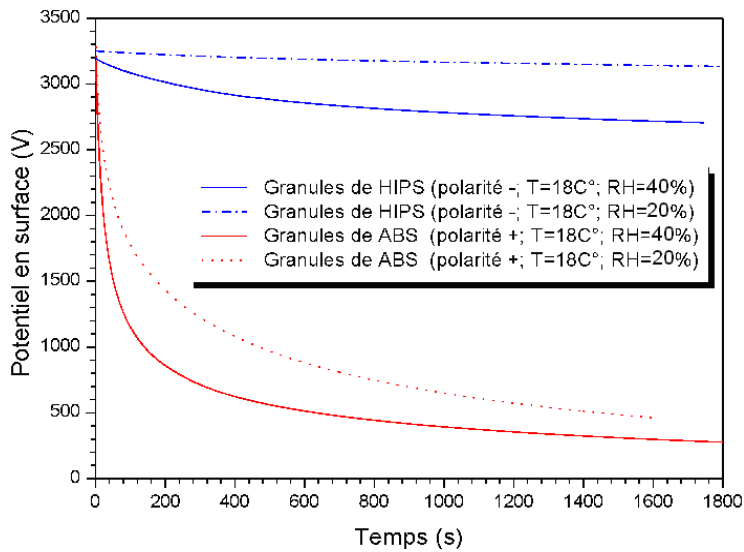
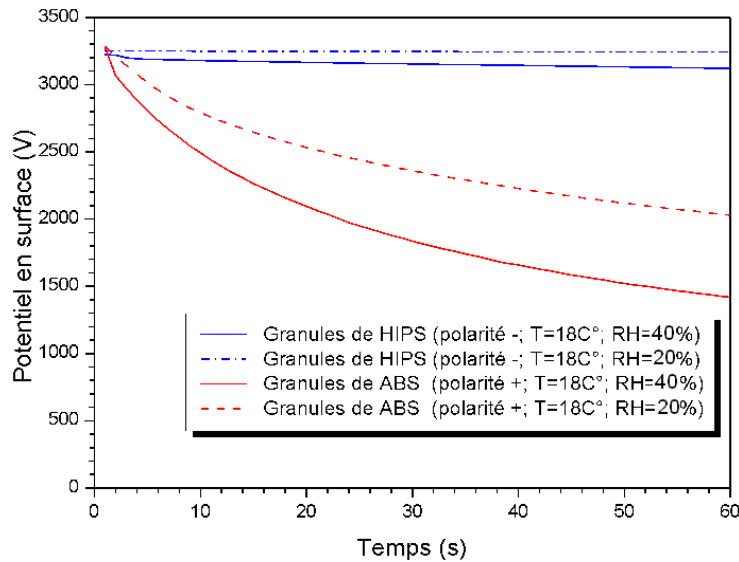


Figure 4.6: Installation de mesure de déclin de potentiel (DPS) des granules isolantes



(a) T= 30min



(b) T=1min

Figure 4.7 : Déclin de potentiel en surface dans les granules de HIPS et ABS dans les conditions ambiantes et contrôlées pour $t = 1800$ s (a) et $t = 60$ s (b) (potentiel en valeurs absolue),

La courbe de variation du potentiel de surface sur la figure 4.7.b confirme le comportement différent des granulés de HIPS et d'ABS en contact avec une plaque métallique au cours des premières 60 secondes:

1. A une plus grande humidité relative ($RH = 45\%$), la valeur absolue du potentiel de surface des granules HIPS a diminué de 3,2%, en passant de 3223 V, à environ 3120V, et la valeur du potentiel de surface des granules ABS s'est réduite d'environ 56 %, de 3272 V à 1417 V

2. Pour une faible humidité relative ($RH = 20\%$), la valeur absolue du potentiel de surface des granules HIPS a diminué de plus de 0,26%, tandis que pour les granulés d'ABS le potentiel de surface s'est réduit à moins de 62% de la valeur initiale.

Ces résultats expliquent le faible taux de séparation des granules d'ABS, surtout à l'humidité élevée car ils sont plus hydrophiles que les HIPS ; un mince film d'eau peut se former à leur surface et favorise la fuite de charge à travers la bande métallique. Alors les forces électriques agissant sur les granulés ABS (moins chargés) ne sont pas suffisantes pour les maintenir en contact avec la bande transporteuse.

4.3.2. Optimisation du séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses pour des mélanges granulaires isolants de taille inférieure à 2 mm

Un protocole de travail a été mis en place pour le déroulement des expériences. La mise en marche des bandes transporteuses (électrodes) est faite après avoir déposé dans la chambre de séparation le mélange granulaire de 1040 g de proportion égale d'ABS et de HIPS de taille inférieure à 2 mm. La haute tension est appliquée ensuite aux deux électrodes et la soufflante assurant l'injection de l'air de fluidisation est démarrée.

Les variables à étudier sont :

1. La vitesse des bandes transporteuses : v [cm/s]
2. La valeur de la haute tension appliquée: U [kV]
3. Le taux d'humidité : RH [%]

4.3.2.1 Méthode

La méthode des plans d'expérience a été utilisée pour la détermination du model quadratique de la récupération des masses d'ABS et du HIPS (%) dont le model est défini par:

(4.1)

où y est la fonction réponse (i.e., la masse en pourcent du produit pur récupéré) et u_c est la valeur centrale normalisée de chaque facteur :

$$x_i = (u_i - u_{ic}) / \Delta u_c = u_i^* \quad (4,2)$$

Avec

$$u_c = (u_{i\max} + u_{i\min}) / 2; \Delta u_i = (u_{i\max} - u_{i\min}) / 2 \quad (4,3)$$

Vue le nombre d'interactions entre les différents facteurs, l'emploi d'un logiciel dédié à la modélisation expérimentale des processus complexes : MODDE 8.0, de la société Umetrics (Suède) s'est avéré très utile.

Après une première étude des différents facteurs qui ont une influence sur les critères de performance du séparateur électrostatique, une relation a été établie entre les grandeurs d'entrée (RH , v , U) et les grandeurs de sortie (% masse récupérée d'ABS et % masse récupérée de HIPS). En utilisant un « plan composite à faces centrées », qui conduit à une modélisation par des surfaces de réponse (RSM), le polynôme quadratique exprimant la réponse du processus sera de la forme:

$$y = a_0 + a_1RH^* + a_2v^* + a_3U^* + a_{12}RH^*v^* + a_{13}RH^*U^* + a_{23}v^*U^* + a_{11}RH^{*2} + a_{22}v^{*2} + a_{33}U^{*2} \quad (4.4)$$

4.3.2.2. Résultats et discussion

L'application des plans d'expériences nécessite à faire varier les facteurs dans des intervalles prédéfinis à savoir :

- $20 \% < RH < 45 \%$ (4.5)

- $5.5 \text{ cm/s} < v < 16.5 \text{ cm/s}$ (4.6)

- $7 \text{ kV} < U < 15 \text{ kV}$ (4.7)

Chaque expérience a été réalisée avec une masse de un kilogramme de mélange et le temps de séparation a été fixé à 60 secondes. L'ensemble des résultats est groupé dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Les 17 expériences du plan composite

| RH [%] | v [cm/s] | U [kV] | taux récup % ABS | taux récup % HIPS |
|--------|----------|--------|------------------|-------------------|
| 20 | 5,5 | 7 | 29,92 | 38,2 |
| 45 | 5,5 | 7 | 26,02 | 30,32 |
| 20 | 16,5 | 7 | 32,52 | 36,78 |
| 45 | 16,5 | 7 | 28,02 | 28,64 |
| 20 | 5,5 | 15 | 41,62 | 65,32 |
| 45 | 5,5 | 15 | 36,08 | 46,38 |
| 20 | 16,5 | 15 | 50,4 | 65,08 |
| 45 | 16,5 | 15 | 38,86 | 45 |
| 20 | 11 | 11 | 51,08 | 57,84 |
| 45 | 11 | 11 | 42 | 48 |
| 32,5 | 5,5 | 11 | 39,68 | 49,58 |
| 32,5 | 16,5 | 11 | 45,18 | 50,38 |
| 32,5 | 11 | 7 | 30,36 | 34,56 |
| 32,5 | 11 | 15 | 47,1 | 58,88 |
| 32,5 | 11 | 11 | 46,28 | 59,68 |
| 32,5 | 11 | 11 | 45,18 | 58,3 |
| 32,5 | 11 | 11 | 47,58 | 61 |

Le model quadratique pour cette étude est le suivant:

➤ Pour les particules d'ABS :

$$y_{ABS} = 46,1668 - 3,756RH^* + 1,866v^* + 7,022U^* - 0,449999RH^*v^* - 1,46RH^*U^* + 0,494999v^*U^* + 0,50817RH^{*2} - 3,60183v^{*2} - 7,30183U^{*2} \quad (4.4)$$

➤ Pour les particules de HIPS :

$$y_{HIPS} = 56,4679 - 6,488RH^* - 0,392002v^* + 11,216U^* - 0,174999RH^*v^* - 2,875RH^*U^* + 0,184999v^*U^* - 1,15381RH^{*2} - 4,0938v^{*2} - 7,3538U^{*2} \quad (4.5)$$

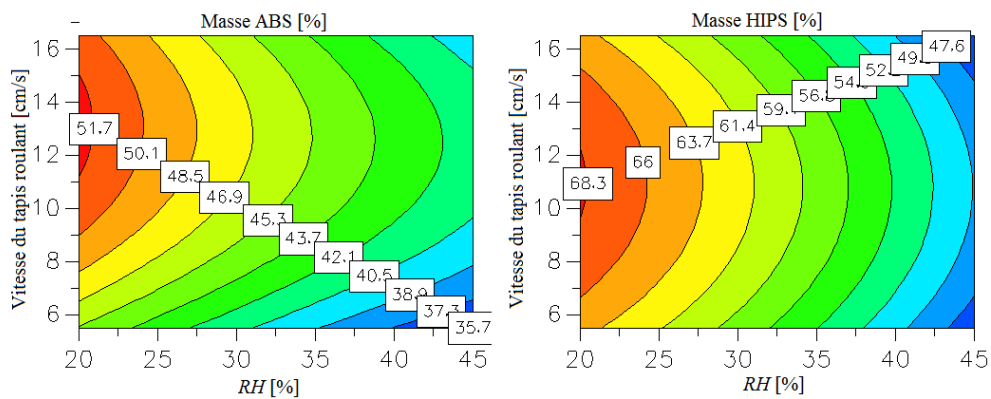


Figure 4.8 : Taux de récupération d'ABS et du HIPS prédit par « Modde 8.0 » pour $U = 15$ kV en fonction du taux d'humidité RH et de la vitesse du tapis v .

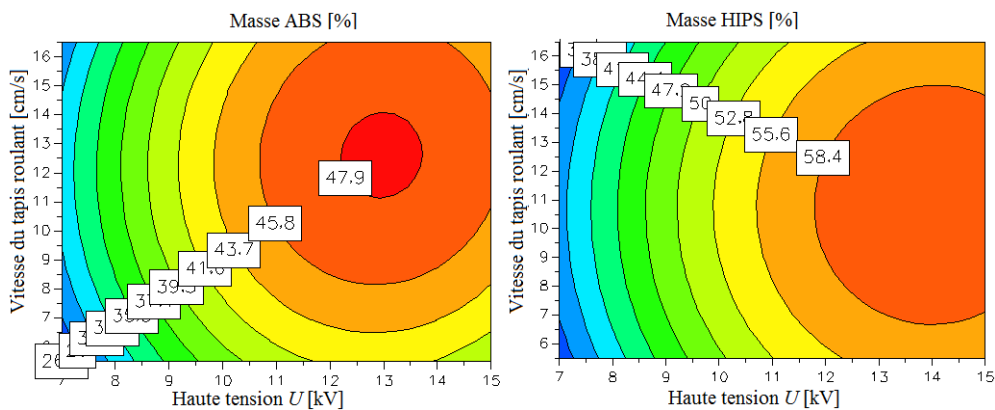


Figure 4.9 : Taux de récupération d'ABS et du HIPS prédit par « Modde 8.0 » pour $RH = 32.5\%$ en fonction de la haute tension U et la vitesse du tapis v .

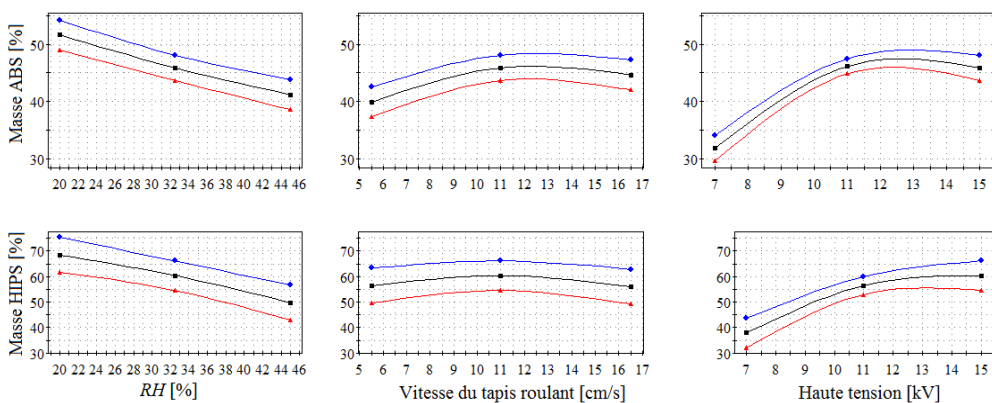


Figure 4.10 : Taux de récupération d'ABS et du HIPS prédit par « Modde 8.0 » en fonction du taux d'humidité RH , de la vitesse du tapis v , et de la haute tension U .

L'optimisation des taux de récupération pour un taux d'humidité $RH = 32.5\%$ a donné les résultats montrés sur la figure 4,11,

| Factor | Role | Value | Low Limit | High Limit | Response | Criteria | Weight | Min | Target | Max | |
|--------|-------|-------|-----------|------------|----------|----------|--------------|----------|--------|---------|---------|
| 1 | RH | Const | 32,5 | | | | | | | | |
| 2 | speed | Free | | 5,5 | 16,5 | 1 | % recup ABS | Maximizé | 1 | 49,5559 | 52,0847 |
| 3 | HV | Free | | 7 | 15 | 2 | % recup HIPS | Maximizé | 1 | 62,6679 | 66,2871 |

Iteration: 43 Iteration slider: _____

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|------|---------|---------|-------------|--------------|------|--------|
| | RH | speed | HV | % recup ABS | % recup HIPS | iter | log(D) |
| 1 | 32,5 | 11,6854 | 13,5014 | 47,9176 | 60,508 | 39 | 0,4204 |
| 2 | 32,5 | 11,6807 | 13,5045 | 47,915 | 60,5107 | 38 | 0,4205 |
| 3 | 32,5 | 11,7324 | 13,4706 | 47,9436 | 60,4805 | 38 | 0,4196 |
| 4 | 32,5 | 11,6999 | 13,4869 | 47,9283 | 60,497 | 41 | 0,42 |
| 5 | 32,5 | 11,704 | 13,4881 | 47,9287 | 60,4967 | 41 | 0,42 |
| 6 | 32,5 | 11,6854 | 13,5014 | 47,9176 | 60,508 | 39 | 0,4204 |
| 7 | 32,5 | 11,6807 | 13,5045 | 47,915 | 60,5107 | 38 | 0,4205 |
| 8 | 32,5 | 11,7078 | 13,4837 | 47,9318 | 60,4935 | 43 | 0,4199 |

Figure 4.11 : Taux optimaux estimés par « Modde 8.0 » pour la récupération d'ABS et du HIPS pour un taux d'humidité $RH = 32.5\%$

L'ensemble des résultats décrits ci-dessous démontre fortement l'effet de l'humidité sur la séparation électrostatique pour cette nouvelle génération de séparateurs, où le passage de l'humidité de 40% à 20% est accompagné d'une augmentation du taux de récupération minimale d'environ 15% pour chaque produit.

4.3.3. Séparation des particules granulaires isolantes de taille 2 à 4.5mm

Le dispositif de séparation électrostatique a prouvé son efficacité pour le tri de granules isolants de taille inférieure ou égale à 2 mm atteignant des taux de récupération extraordinaire en masse d'ABS et de HIPS pendant une minute [50], mais son efficacité a été mise en cause pour des particules de taille supérieure à 2 mm (inférieure ou égale à 4.5mm) ; à priori plusieurs causes peuvent être à l'origine de ces résultats à savoir la masse et la taille des particules, l'intensité du champs, l'état de surface des bandes transporteuses.

L'objectif de la présente étude est d'améliorer la conception du dispositif pilote de séparation tribo-aero-électrostatique, afin de permettre le traitement d'une gamme étendue de déchets d'équipements électriques et électroniques. Les essais ont été réalisées pour trois configurations différentes électrodes, sur un mélange composé d'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et le polystyrène "choc" ou HIPS (high-impact polystyrene) provenant du recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques. [56], [58].

Le mélange granulaire à séparer, composé de 50% ABS et de 50% HIPS provenant du broyage de boîtiers d'ordinateurs hors usage, a été fourni par la société APR2, Bonnières-sur-Seine, France ; la granulométrie typique était de l'ordre de 2 à 4,5 mm. (figure 4.12). La masse de chaque échantillon a été de 2000 g.

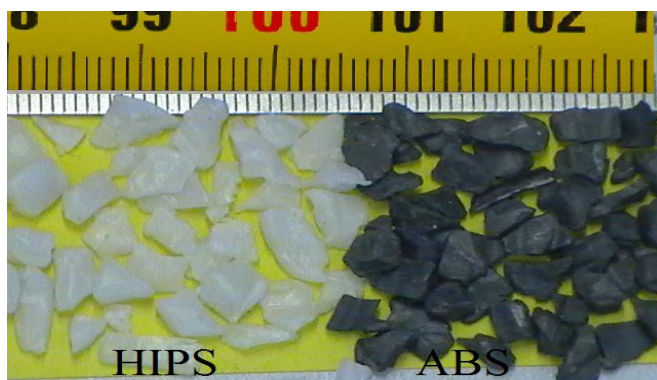


Figure 4.12 : Aspect et dimensions des granules d'ABS et de HIPS.

4.3.3.1. Configurations du système d'électrodes

Afin d'améliorer le rendement du dispositif dans le cas des grosses particules (2 à 4,5 mm), trois nouvelles solutions ont été testées : (1) ajouter une électrode mise à la terre pour renforcer le champ électrique (figure 4.13) ; (2) mettre une couche mince isolante sur les bandes transporteuses afin d'augmenter l'adhérence des particules récupérées (figure 4.14) ; (3) combiner les deux éléments (figure 4.15) .

Tous les essais ont comporté l'enchaînement des opérations suivantes :

- Charger le mélange granulaire pendant 4 minutes (sans haute tension), la soufflante tournant à la vitesse maximale de 3600 tr/min
- Appliquer la haute tension $U = \pm 30$ kV aux deux électrodes, avec la mise en marche simultanée des bandes métalliques pour la récupération des produits (vitesse : 16 cm/s)
- Mesurer les quantités de produits récupérés après 4, 10 et 15 minutes (au-delà de 15 minutes, il n'y a pratiquement plus de particules collectées aux électrodes).

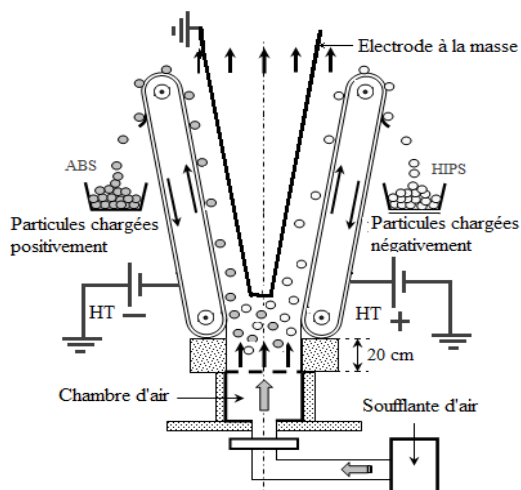


Figure 4.13 : Configuration d'électrodes II : Lit fluidisé à 20 cm plus base et ajout d'une électrode mise à la terre

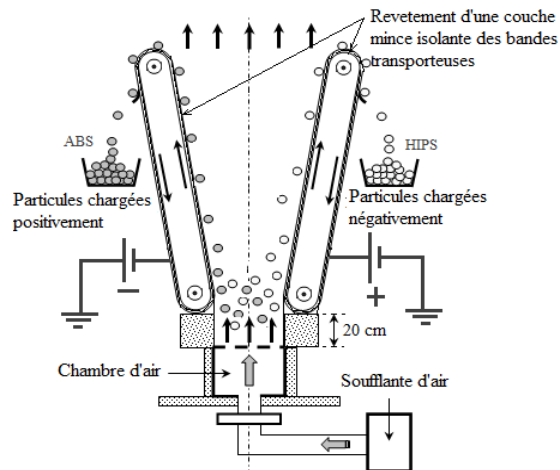


Figure 4.14 : Configuration d'électrode III : Lit fluidisé à 20 cm plus bas et ajout d'un revêtement isolant sur les électrodes.

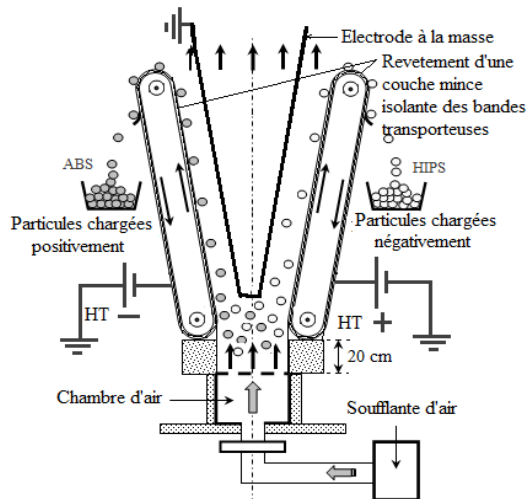


Figure 4.15 : Configuration d'électrodes IV : Lit fluidisé à 20 cm plus bas, ajout d'une électrode supplémentaire et d'un revêtement isolant sur les bandes métalliques.

4.3.3.2. Résultats et discussion

Afin de mieux cerner le problème de la séparation des grosses particules (taille inférieure ou égale à 4,5 mm), une première série d'essais a été réalisée avec la configuration II (figure 4.13), mais sans abaisser la position du diffuseur d'air (niveau de base) du lit fluidisé. Les résultats ont été comparés avec ceux obtenus avec la configuration originale (Figure 4.3), à une température ambiante $T = 18 \pm 1^\circ\text{C}$ et une humidité relative $RH = 46 \pm 2\%$ (Tableau 4.5 et figure 4.16).

Tableau 4.5: Taux de séparation pour deux configurations

| Configuration d'électrodes | I (initiales) | | II (avec électrode liée à la terre) | |
|----------------------------|---------------|----------|-------------------------------------|----------|
| | ABS [%] | HIPS [%] | ABS [%] | HIPS [%] |
| 4 | 4,65 | 1,11 | 14,05 | 7,13 |
| 10 | 19,26 | 4,12 | 27,45 | 12,7 |
| 15 | 29,88 | 5,21 | 36,55 | 15,8 |

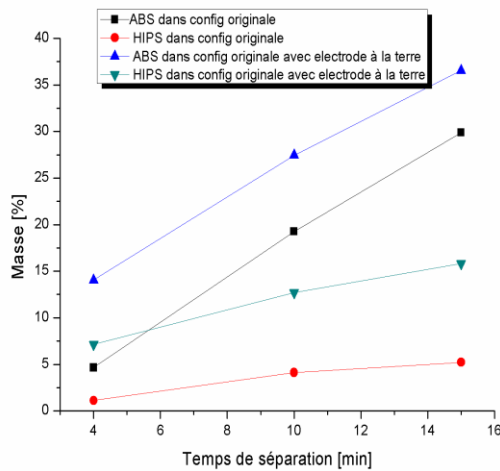


Figure 4.16 : Taux de séparation d'ABS et de HIPS pour la configuration initiale et pour celle avec une électrode supplémentaire mise à la terre.

Ces résultats montrent qu'après 15 minutes les meilleurs taux de récupération sont 36,55% pour l'ABS et 15,83% de la masse du HIPS. Ce sont des taux très faibles, dû au fait que les particules s'accumulent assez vite en bas des électrodes, mais leur charge n'est pas suffisante pour qu'elles restent collées à celles-ci sous l'action des forces électriques. D'où l'idée de descendre le lit fluidisé de 20 cm afin de rendre plus difficile l'accès des particules aux électrodes [56], [58], [44] ; elles doivent passer un temps plus long dans le lit fluidisé et acquérir une charge suffisante pour que les forces du champ électrique les déplacent jusqu'aux électrodes. Cette charge, plus grande que dans le cas du lit fluidisé en position originale, permettra aux particules de rester attachées aux bandes transporteuses métalliques et d'être évacuées vers les collecteurs de produits.

Les expériences réalisées dans les quatre configurations présentées sur la figure 4.17 ont confirmé les prédictions théoriques. Ainsi, la présence du revêtement isolant rugueux a diminué la perte de charge des particules en contact avec l'électrode et augmenté le coefficient de frottement entre les particules et les bandes métalliques transporteuses, conduisant à une légère augmentation des quantités d'ABS récupérées (Tableau 4.6). Cependant, la diminution de la force d'image

électrique, suite à l'interposition du revêtement isolant entre la particule et l'électrode, a eu comme effet la diminution de la récupération du HIPS.

L'effet de l'introduction d'une électrode supplémentaire liée à la terre est bénéfique, notamment dans le cas des particules de HIPS. L'intensification du champ électrique renforce les forces électriques qui attachent les matériaux granulaires chargés à la surface des électrodes. Les quantités de produits collectées sont supérieures aux autres cas (Tableau 4.7)

Tableau 4.6 : Pourcentages d'ABS et de HIPS récupérés dans les quatre cas de figure

| Configuration | Masse [%] | | | | | | | |
|----------------------|-----------|-------|-------------------------|-------|--------------------------------|-------|---|-------|
| | I | | III | | II | | IV | |
| | Originale | | Avec revêtement isolant | | Avec électrode liée à la terre | | Avec revêtement isolant e électrode liée à la terre t | |
| Produit | ABS | HIPS | ABS | HIPS | ABS | HIPS | ABS | HIPS |
| $t = 4 \text{ min}$ | 29,26 | 12,84 | 30,3 | 10,95 | 32,65 | 30,42 | 30,6 | 14,36 |
| $t = 10 \text{ min}$ | 39,76 | 16,14 | 49,95 | 14,42 | 43,65 | 38,92 | 43,26 | 20,22 |
| $t = 15 \text{ min}$ | 46,76 | 18,14 | 57,83 | 15,87 | 48,15 | 42,4 | 50,7 | 27,67 |

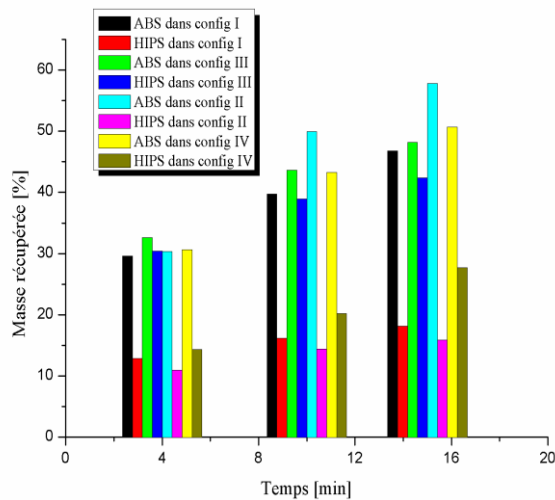


Figure 4.17 : Les taux de récupération d'ABS et de HIPS pour les quatre configurations du système d'électrodes

Tableau 4.7 : Quantification des augmentations/diminution des taux de récupération des deux produits dans les configurations II à IV, par rapport à la configuration I.

| Passage de la configuration | Variation de la masse récupérée [%] | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------|--------|-------|--------|------|
| | I à III | | I à II | | I à IV | |
| | ABS | HIPS | ABS | HIPS | ABS | HIPS |
| $t = 4 \text{ min}$ | 1,04 | -1,89 | 3,39 | 17,58 | 1,34 | 1,52 |
| $t = 10 \text{ min}$ | 10,19 | -1,72 | 3,89 | 22,78 | 3,5 | 4,08 |
| $t = 15 \text{ min}$ | 11,07 | -2,27 | 1,39 | 24,26 | 3,94 | 9,53 |

Pour toutes les configurations, la quantité d'ABS récupérée est supérieure à celle de HIPS, dû à l'effet des parois de la chambre de fluidisation qui sont en PMMA. Selon la série triboélectrique cela favorise le chargement de l'ABS par rapport au HIPS.

L'effet de l'habillage des bandes transporteuses apparaît favorable sur les particules d'ABS qu'au-delà de la quatrième minute engendrant un accroissement de l'ordre de 10%, par contre il n'apporte aucune amélioration sur les particules de HIPS.

La mise en place d'une électrode supplémentaire liée à la masse contribue fortement à l'augmentation de produit récupéré atteignant les 25 % entre les deux composants (ABS et HIPS) par contre la combinaison des deux variantes (l'habillage des bandes conductrices et l'électrode mise à la terre) n'améliore pas d'une façon importante les résultats.

La principale conclusion est que le choix se fera sur la configuration III (avec Electrode terre) pour la facilité de la faisabilité d'un côté et parce que dans ce cas de figure on a les taux de récupération de l'ABS et du HIPS qui sont tous les deux supérieurs à 40% d'un côté (Tab.3) et aussi la différence entre ces deux taux est la plus faible par rapport aux autres cas, chose qui réglera partiellement le problème du déséquilibre des proportions de l'ABS et du HIPS dans le mélange présent dans la chambre de fluidisation pour le régime d'électroséparation en continu.

4.4. Modification de la construction du séparateur tribo-aéro-électrostatique

Lors de tous les essais de séparation des grosses particules (taille 2 à 4.5 mm) il a été constaté une accumulation des particules en bas du séparateur mais elles ne parviennent pas toutes à être transportées par la bande du convoyeur. Cette accumulation de produit pur en bas du dispositif nous a incités à examiner l'intensité du champ électrique dans la zone de séparation.

Une simulation faite sur « Comsol »[65] (Fig. 4.18) nous a conduit à la conclusion que l'intensité du champ électrique diminue à la partie supérieure du séparateur, ce qui est bien logique car les deux électrodes s'écartent de plus en plus. En s'appuyant aussi sur les résultats expérimentale obtenues sur le séparateur à débit moyen (Tableau 4.1 et figure 4.2), nous avons décidé d'effectuer une grande modification de la construction du dispositif qui consiste à changer l'angle des deux électrodes tapis.

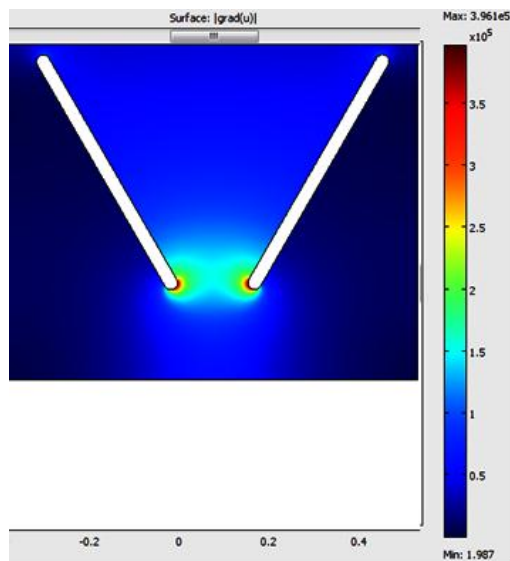


Figure 4.18 : Modélisation du champ électrique des deux électrodes tapis dans la configuration originale du dispositif [65]

En effet, une autre simulation sur le logiciel « Comsol » nous a montré que le champ électrique sera plus intense si les deux électrodes sont en parallèle (Fig. 4.19).

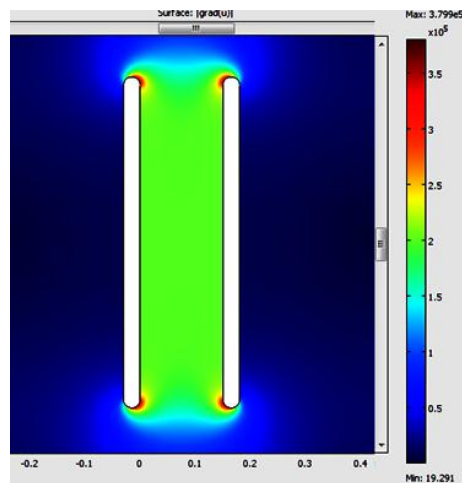


Figure 4.19: Modélisation du champ électrique des deux électrodes disposées en parallèle [65]

En comparant les deux figures ci-dessous, on voit clairement que la disposition en parallèle des deux électrodes tapis renforcera l'intensité du champ électrique à l'intérieur de la chambre de fluidisation et de séparation ce qui va contribuer fortement à l'augmentation de la récupération des produits purs par notre installation.

Une autre modification a été proposée pour mieux charger les particules : descendre le niveau du lit fluidisé de 20cm par rapport à sa position initiale afin d'augmenter le temps de séjour du mélange granulaire.

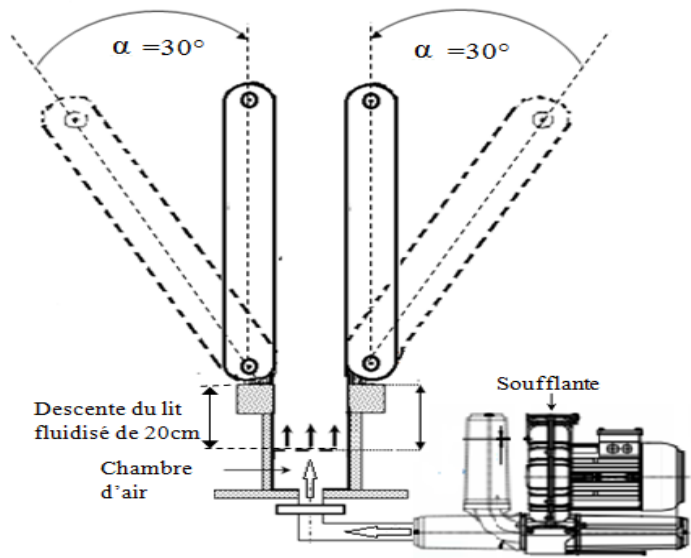


Figure 4.20 : Modification à apporter sur la disposition des deux électrodes

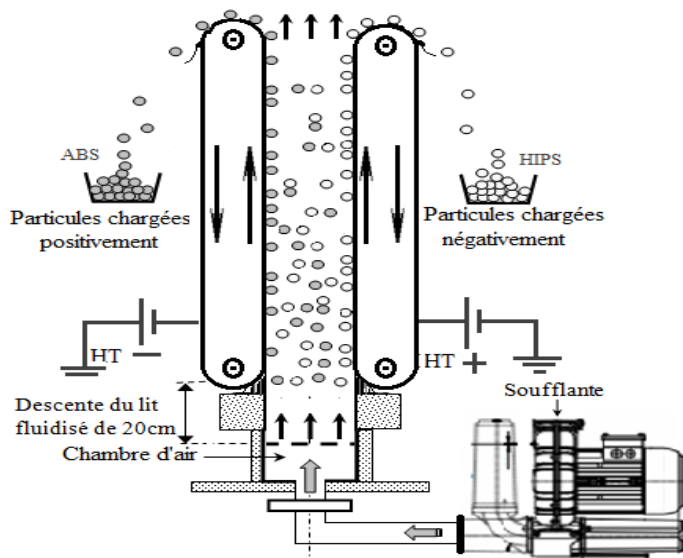


Figure 4.21 : Dispositif après modification

Une fois la modification du dispositif achevée, nous avons repris une série d'essais de séparation d'une même quantité de mélange granulaires (2 kg) d'ABS et de HIPS de taille 2 à 4.5 mm sous les mêmes conditions que celle du § 4.3.3.2 afin de comparer la nouvelle configuration (position verticales des tapis) et la configuration initiale (tapis inclinés)

Tableau 4.8 : Résultats de séparation obtenus avec les deux configurations : tapis inclinés et tapis verticaux

| Temps de récupération [min] | Avant modification du dispositif : Tapis incliné | | Après modification du dispositif : Tapis vertical | |
|-----------------------------|---|----------------|--|----------------|
| | [%] masse ABS | [%] masse HIPS | [%] masse ABS | [%] masse HIPS |
| 1 | -- | -- | 7,2 | 14,02 |
| 2 | -- | -- | 20,7 | 34,42 |
| 3 | -- | -- | 25,2 | 47,17 |
| 4 | 4,65 | 1,11 | -- | -- |
| 10 | 19,26 | 4,12 | -- | -- |
| 15 | 29,88 | 5,21 | -- | -- |

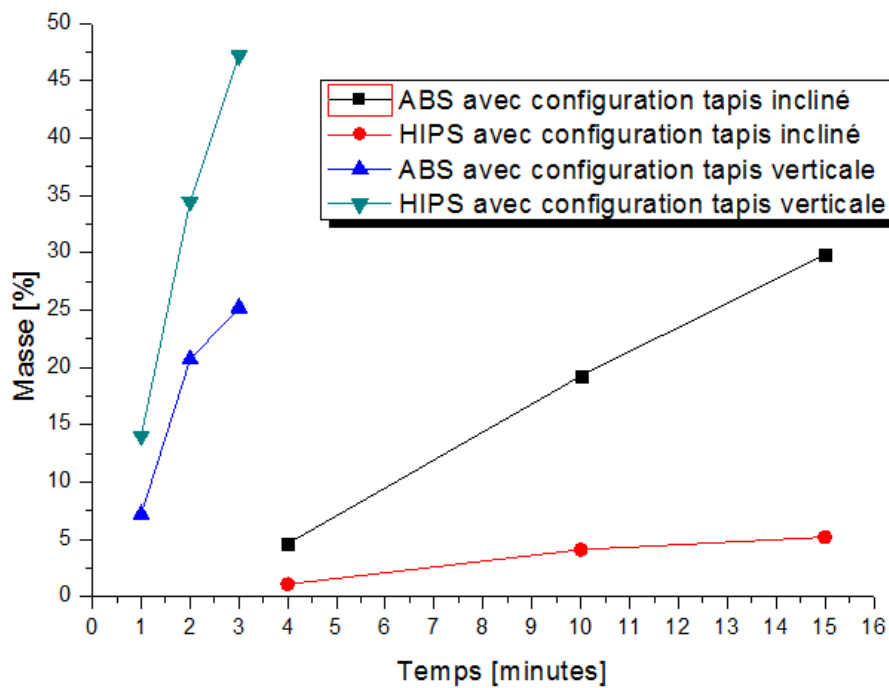


Figure 4.22 Résultats de séparation obtenue avec les deux configurations : tapis incliné et tapis verticaux,

Plusieurs observations peuvent être faites, à savoir :

1) Cette modification a beaucoup favorisé les particules de HIPS ; la quantité de ces particules est presque le double de celle d'ABS sur les trois premières minutes, malgré la faible charge acquise par le HIPS.

2) La quantité de HIPS collectée pendant trois minutes est égale à celle obtenue après 15 min d'opération avec l'ancienne configuration. Pour l'ABS, la quantité récupérée en 2 min est la même que celle collectée avec l'ancienne configuration, pendant 10 minutes.

Ces observations confirment les prédictions théoriques : l'intensification du champ électrique augmente l'efficacité de la séparation,

4.5 Techniques de neutralisation des produits récupérés après séparation électrostatique

La charge des particules récupérées après la séparation dans le séparateur à tapis ou tout autre séparateur électrostatique peut entraîner l'apparition de haute tension suite à une accumulation de charges électriques sur les composants isolants; ce phénomène peut être très nuisible pour les personnes et le matériel [66]. Une série de mesures sur des produits récupérés a donné un potentiel de surface en valeur absolue moyen d'environ $3,2 \pm 0,3$ kV équivalent à $8,5 \pm 1$ $\eta\text{C/g}$. Afin de pouvoir étudier le processus de neutralisation, un dispositif spécifique permet de charger ces particules par l'utilisation d'une électrode couronne soumise à une haute tension polarisée : négative pour le HIPS et positive pour l'ABS (c'est la charge acquise par ces particules dans le lit fluidisé). Ensuite ces particules sont soumises à la décharge électrique produite par une autre électrode couronne alimentée à une haute tension alternative et une évaluation est faite de la réduction de la charge résiduelle.

4.5.1. Procédure expérimentale

L'ensemble des expériences est effectué sur des particules d'ABS marron et de HIPS noir de taille comprise entre 2 et 4.5 mm (figure 4.23).



Figure 4.23 : Photo des granules d'ABS (marron) et de HIPS (noir)

Dans une première phase on a jugé utile de mesurer la charge des particules isolantes avant toute manipulation et sur trois échantillons, les résultats montrent que la charge initiale est très faible (tableau 4.9).

Tableau 4.9 : Valeur de la charge massique du produit vierge

| Produit vierge | | |
|----------------|-------------|----------------|
| Masse [g] | Charge [nC] | Rapport [nC/g] |
| 20 | 2,95 | 0,15 |
| 23 | 4,6 | 0,20 |
| 48 | 7,44 | 0,16 |

Le dispositif pour l'étude de la neutralisation comporte un plan métallique incliné, lié à la terre (figure 4.24), au-dessus duquel nous avons placé deux électrodes alimentées par deux sources haute tension : la première polarisée pour le chargement électrique et la seconde alternative pour la neutralisation des charges acquises.

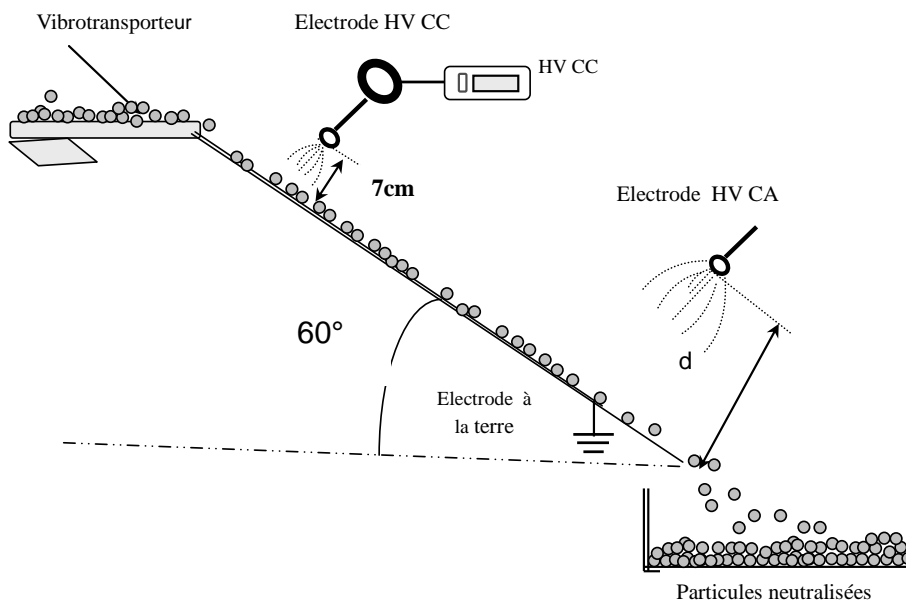


Figure 4.24 : Dispositif de chargement et de neutralisation par électrode alternative à plan incliné

La première électrode, située à une distance de 7 cm de la surface de la plaque métallique, sert à charger les granules isolants jusqu'à un niveau similaire à celui acquis par des granules de même nature pendant la fluidisation dans le séparateur ; ce niveau est de l'ordre de $8,5 \pm 1 \text{ nC/g}$. Une fois ce niveau atteint, l'ensemble des granules passent sous à la seconde électrode (de neutralisation), située à une distance d ajustable de l'électrode liée à la terre.

La matière est introduite dans l'installation par un vibrotransporteur avec un débit réglé fixe pour toutes les expériences. Après avoir glissé sur le plan métallique incliné, les granules sont récupérées dans un bac puis mis dans une cage de Faraday connectée à un électromètre pour mesurer la charge.

4.5.2. Résultats et discussion

La première phase consistait à trouver le niveau de tension qui permet de charger les particules d'ABS et de HIPS avec l'électrode soumise à la haute tension continue (positive pour l'ABS et négative pour le HIPS) et suite à plusieurs essais nous avons trouvé les valeurs suivantes : $U_{ch} = -25,4$ kV pour le HIPS et $U_{ch} = +27$ kV pour l'ABS. Sur six expériences on a obtenu les résultats suivants :

Tableau 4.10 : chargement de l'ABS et du HIPS par électrodes couronne polarisées

| Chargement sans neutralisation ABS | | | Chargement sans neutralisation HIPS | | |
|---------------------------------------|-------------|----------------|--|-------------|----------------|
| Masse [g] | Charge [nC] | Rapport [nC/g] | Masse [g] | Charge [nC] | Rapport [nC/g] |
| 61 | 548 | 8,98 | 23 | -229 | -9.95 |
| 88,8 | 788 | 8,87 | 31 | -285 | -9.19 |
| 94,4 | 856 | 9,07 | 22.2 | -200 | -9.009 |
| 103,2 | 850 | 8,24 | 24 | -213 | -8,88 |
| 60,4 | 588 | 9,74 | 26 | -230 | -8,85 |
| 91,4 | 835 | 9,14 | 33 | -298 | -9,03 |
| charge moyenne [nC/g] | | 9,01 | 8,92 | | |

la valeur moyenne de la charge massique acquise est : $Q_{ABS} = 9,01$ η C/g et $Q_{HIPS} = -8,92$ η C/g.

Dans ces conditions, les expériences de neutralisation ont été réalisées pour deux positions de l'électrode de neutralisation : $d = 8$ cm et $d = 3,5$ cm par rapport au plan incliné. La tension d'alimentation de cette électrode a été : $U_{neur} = 11,5$ kV, 50 Hz.

Le taux de neutralisation des charges électriques, sera estimé selon la relation suivante :

$$R = (Q_{ch} - Q_N) * 100 / Q_{ch} \quad (4.6).$$

Avec :

Q_{ch} : charge massique acquise sans neutralisation des particules en [η C/g]

Q_N : Charge massique résiduelle après neutralisation en [η C/g]

L'ensemble des résultats de chargement et neutralisation est illustré dans les tableaux 4.11 et 4.12 pour les deux distances choisies :

Tableau 4.11 : Chargement et neutralisation sur plan incliné avec électrode alternative à $d=8\text{cm}$

| Chargement et neutralisation ABS | | | Chargement et neutralisation HIPS | | |
|---------------------------------------|-------------|------------------------|-----------------------------------|-------------|------------------------|
| Masse [g] | Charge [nC] | Charge massique [nC/g] | Masse [g] | Charge [nC] | Charge massique [nC/g] |
| 96,5 | 42 | 0,44 | 47,7 | 104 | 2,18 |
| 125,2 | 357 | 2,85 | 72,2 | 173 | 2,4 |
| 130,33 | 378 | 2,9 | 72,4 | 164 | 2,27 |
| 119,6 | 368 | 3,08 | 66 | 159 | 2,41 |
| 105,8 | 353 | 3,34 | 81 | 178 | 2,2 |
| 110 | 56 | 0,51 | 59 | 136 | 2,31 |
| charge massique moyenne [nC/g] | | 2,18 | 2,29 | | |

On peut alors estimer le taux de neutralisation selon la relation 4.6 :

- pour l'ABS : $R=(9.01-2.18)*100/9.01=75.80\%$
- pour le HIPS : $R=(8.92-2.29)*100/8.92=74.32\%$

Tableau 4.12 : Chargement et neutralisation sur plan incliné avec électrode alternative à $d=3.5\text{cm}$

| Chargement et neutralisation ABS | | | Chargement et neutralisation HIPS | | |
|---------------------------------------|-------------|------------------------|-----------------------------------|-------------|------------------------|
| Masse [g] | Charge [nC] | Charge massique [nC/g] | Masse [g] | Charge [nC] | Charge massique [nC/g] |
| 70,8 | 140 | 1,98 | 80,3 | -52 | -0,647 |
| 93 | 184 | 1,98 | 81,8 | -32,75 | -0,4 |
| 162 | 0,11 | 0,00 | 79,4 | -30,18 | -0,38 |
| 178 | 53,3 | 0,30 | 89,7 | -29,03 | -0,323 |
| 122,7 | 60 | 0,49 | 21,4 | -75,1 | -0,285 |
| 89 | 136 | 1,53 | 100,3 | -44,73 | -0,446 |
| charge massique moyenne [nC/g] | | 1,05 | 0,4135 | | |

On peut alors estimer le taux de neutralisation à :

- pour l'ABS : $R=(9.01-1.05)*100/9.01=95.6\%$
- pour le HIPS: $R=(8.92-0.4135)*100/8.92=95.36\%$

Pour cette configuration, on voit nettement que pour une distance $d=3.5\text{cm}$ de l'électrode alternative, la neutralisation est presque totale.

Conclusion

La mise en marche de l'installation pilote industrielle nécessite un très grand soin à apporter lors d'une démarche expérimentale ; à savoir les limites d'exploitation et l'influence de tous les facteurs sur son efficacité.

La modification effectuée sur le séparateur à débit moyen a été d'un grand apport pour comprendre et expliquer certains phénomènes avec l'appui de l'outil informatique. Cette démarche nous a permis d'améliorer la conception du pilote industriel et d'augmenter sa plage d'utilisation (taille des particules) avec un très bon rendement.

La solution de neutralisation des particules sur une plaque métallique inclinée liée à la terre est adaptable au dispositif et complète l'installation de séparation électrostatique en vue d'un usage industriel.

CONCLUSION GENERALE

La grande diversité de matières plastiques contenues dans les déchets d'équipements électriques et électronique impose la recherche et le développement de nouvelles technologies de séparation physique, en vue de la récupération et du recyclage de ceux-ci. Après une brève synthèse sur l'état de l'art dans ce domaine, la thèse présente les équipements de laboratoire et pilote industriel conçus et mis au point par l'auteur, ainsi que les résultats des recherches réalisées sur la triboélectrisation des matériaux plastiques et sur la séparation tribo-aéro-électrostatique des mélanges de polymères. La conclusion générale de notre travail peut être formulée ainsi: la charge triboélectrique réalisée simultanément avec la séparation en champ électrostatique est un procédé efficace de récupération des principaux polymères des DEEE

a. Les principales contributions originales

1. Identification des problèmes scientifiques et techniques à résoudre dans le domaine de la séparation tribo électrostatique des mélanges des matériaux plastiques granulaires provenant des déchets d'équipements électriques et électroniques.
2. Description des phénomènes physique associés au processus de triboélectrisation des matériaux plastiques granulaires.
3. Mise en marche de l'installation pilote industrielle et étude de plusieurs configurations du système d'électrodes.
4. Proposition d'un dispositif de neutralisation de la charge.
5. Réalisation de deux dispositifs expérimentaux, l'un pour la charge triboélectrique à base d'un ventilateur et le second pour la séparation des mélanges granulaires isolants au sein du Laboratoire IRECOM de l'Université de Sidi Bel Abbés.
6. Modélisation de la triboélectrisation des granules de matériaux plastiques provenant des déchets d'ABS et d'ABS-PC, par la méthode des plans d'expériences, en utilisant le logiciel MODDE 5.0.
7. Recherche et développement au sein du Laboratoire IRECOM de l'Université Technique de Sidi Bel Abbés d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique de petites dimensions.

8. Etude de l'effet des parois du séparateur tribo-aéro-électrostatique sur la charge triboélectrique des matériaux plastiques.
9. Etude expérimentale de la séparation tribo-aéro-électrostatique des deux mélanges binaires (PC et PA), à de diverses concentrations des constituants : 50%-50%, 75%-25%, 25%-75%.
10. Démonstration de l'intérêt de l'utilisation de la méthode des plans d'expériences à la quantification des effets des facteurs et des interactions entre eux, afin d'exprimer les taux de déclin de potentiel de surface et le taux de récupération des produits granulaires: HIPS et ABS par des modèles mathématiques. La combinaison des mesures du déclin de potentiel de surface et la méthode de plans d'expériences semble constituer un outil très intéressant pour mieux prédire les résultats d'un processus de séparation électrostatique.

b. Perspectives de recherche

La thèse ouvre des perspectives sur des nouveaux problèmes de recherche dans le domaine de la séparation tribo-aéro-électrostatique des matériaux plastiques provenant de déchets d'équipements électriques et électroniques :

1. Modélisation physique du processus de charge triboélectrique des matériaux granulaires dans les séparateurs tribo-aéro-électrostatiques.
2. Amélioration de la construction de l'installation pilote de séparation tribo-aéro-électrostatique, en tenant compte des observations faites pendant les expériences réalisées au laboratoire d'Angoulême.
3. Validation de l'algorithme de contrôle de boucle fermée de l'installation, en partant de l'analyse de diverses solutions de mesure et de régulation du débit de matière à l'entrée et en sortie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Widmer. R, Oswald-Krap. H, Sinha-Khetriwal, D, Schnellmann, M, Böni, H, “Global perspectives on e-waste”. *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 25 (5), pp. 436–458, 2005.
- [2] Ongondo. F.O, Williams. I.D , Cherrett. T.J, “How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes”. *Waste Management*, vol. 31. pp. 714–730, 2011.
- [3] ADEME “Actualisation de l’inventaire national des sites de traitement des déchets d’équipements électriques et électroniques”; janvier 2007
- [4] ADEME “Rapport annuel sur la mise en œuvre de la réglementation des déchets d’équipements électriques et électroniques (DEEE) ”, septembre 2011
- [5] Ali. F.S, Inculet. I.I, Tedoldi. A, “Charging of polymer powder inside a metallic fluidized bed”. *Journal of Electrostatics*, vol. 45, pp. 199-211. 1999.
- [6] Ali. F.S, Inculet. I.I, “Electric field analysis of the tribocharged fluidized bed powder coating process”. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*. 36 (5), 1247-1250 (2000).
- [7] Anderson. J.H, “The effect of additives on the tribocharging of electrophotographic toners”. *Journal of Electrostatics*, vol. 37 (3), pp. 197-209, 1996.
- [8] American Plastics Council. “Plastics from residential electronics recycling”. 2000.
- [9] Ciprian. D “Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéro-électrostatique de matériaux plastiques granulaires”, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2010.
- [10] Chong-Yang. L, Allen J. B, “Electrostatic Electrochemistry with Polymers Charged by Contact Electrification”, *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics*, 2011.
- [11] McCarty. L.S, Whitesides. G.M, “Electrostatic Charging Due to Separation of Ions at Interfaces: Contact Electrification of Ionic Electrets”. *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 47, pp. 2188-2207, 2008.

Mis en forme : Anglais (États Unis)

Références bibliographies

- [12] Diaza. F, Felix-Navarror. M, “A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties”. *Journal of Electrostatics*, vol. 62, pp. 277-290, 2004.
- [13] Wu. Y, Castle. G.S.P, Inculet. I.I, ”Particle size analysis in the study of induction charging of granular materials” *Journal of Electrostatics*. vol. 63, pp 189-202, 2005.
- [14] Armstrong. D, Thurman. R, “Plastic recovery module. Addressing defense requirements with tomorrow’s technology”. *National Defence Center for Environmental Excellence*. 2003.
- [15]** Association of Plastics Manufactures in Europe. “Insight into consumption and recovery in Western Europe”, 2000.
- [16] Coste. J, “Idées actuelles sur l’origine des charges électrostatiques : phénomènes de contact et de frottement”, *Journées d’études SEE Électrostatique*, 1984.
- [17] Chul Hyun. P, Jai Koo. P , Ho Seok. J , Byoung. C, “Turboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger”, *Journal of Electrostatics*. vol. 66, pp 578–583, 2008.
- [18] Atten. P, Denat. A, “Convection and Breakdown in fluids” *2nd International Workshop on Electrical Conduction*, Grenoble, France, 2000.
- [19] Bailey. A.G, “The charging of insulator surfaces”. *Journal of Electrostatics*, vol. 51-52, pp. 82-90, 2001.
- [20] Blajan. M, Beleca. R, Iuga. A, Dascalescu. L, “Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46 (4), pp. 1558-1563, 2010.
- [21] Tilmatine. A, Bendimerad. S, Medles. K, Bendaoud. A, Younes. M, Dascalescu. L, “Set point identification and robustness testing of a free-fall triboelectrostatic separation process” *IEEE/Industry Applications Society Annual Meeting* Edmonton, Canada, 5-9 Oct. 2008, DOI 10.1109/08IAS.2008.102 Page(s):1 - 7.
- [22] Bendimerad. S, Tilmatine. A, Ziane. M, Dascalescu. L, “Plastic wastes recovery using freefall triboelectric separator”, *International Journal of Environmental Studies*, vol. 66, pp. 529-538, 2009.
- [23] Tilmatine. A, Bendimerad. S, “Plastic wastes recovery using electrostatic forces” *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China* , vol. 4, pp.446-450, 2009
- [24] Blajan. M, Samuila.A, Neamtu. V, Beleca.R, Caliap.L, Vadan. D, Iuga. A, Dascalescu.L, “Experimental modeling of particle electrification in vibrated zigzag shaped metallic tubes”.

Proceedings of ESA/IEJ/IEEE-IAS/SFE Joint Conference on Electrostatics, University of California, Berkeley, California, pp.538-543, 2006 .

[25] Escalante. S.L, Touchard. G, Dominguez. G, “Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes”, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 694-697, 2002.

[26] Mountain. J.R, Mazumder. M.K, Sims. R.A, Wankum. T.C, Pettit. P.H, “Triboelectric charging of polymer powders in fluidization and transport processes”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, v.ol 37, pp.778-783, 2001.

[27] Brown. J.D, “An industrial electrostatic separation process”, *TECH talk*. 2 (1), 1998.

[28] Blajan. M, “Séparation de la muscovite des pegmatites feldspathiques en utilisant des champs électriques intenses”, Thèse de doctorat en co-tutelle, Université de Poitiers, France et Université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie, 2006,

[29] 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 Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* , vol. 18, pp. 1476-1483, 2011

[30] Bilici. M, Dascalescu. L, Barna. V, Gyorgy. T, Rahou. F, Samuila. A, “Experimental modeling of the tribo-aero-electrostatic separation of mixed granular plastics”, *ESA Annual Meeting on Electrostatics*, 2011.

[31] Dragan. C, Fati. O, Radu.M, Calin. L, Samuila. A, Dascalescu. L, “Tribocharging of mixed granular plastics in a fluidized-bed device”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47(4), pp. 1922-1928, 2011.

[32] Calin. L, Caliap. L, Neamtu. V, Morar. R, Iuga. A, Samuila. A, Dascalescu. L, “Tribocharging of Granular Plastic Mixtures in View of Electrostatic Separation” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44 (4), pp. 1045-1051, 2008.

[33]*** Carpco Inc., Jacksonville, USA. “Carpco application sheet. Rejection of PVC from PET flake using the Carpco V-STAT separator”. *Bulletin* No. 97713.

[34]*** Carpco Inc., Jacksonville, USA. “The Solution to Separation”. *Technical Information Bulletin*, 1997.

[35] Tennal. M, Mazumder. K, Lindquist. D, Zhang. J, Tendeku. F, “Triboelectric separation of granular materials”, *IEEE/Industry Applications Conference*, , pp. 1724-1729, 1997.

[36] Castle. G. S. P, “Contact charging between insulators”, *Journal of Electrostatics*, vol. 40, pp. 13-20, 1997.

Références bibliographies

- [37] Castle. G.S.P, Schein. L.B, "General model of sphere-sphere insulator contact electrification". *Journal of Electrostatics*, vol, 36(2), pp.165-173, 1995.
- [38] ***, "Propriétés du plastique et directives de traitement", Brochures ENSENGER, 2006.
- [39] Gallez. P, "Structure et propriétés des matériaux, polymères et composites", IUT Annecy Département Mesures Physiques MPh2, 2011.
- [40] Paul. A. H, "Understanding the Faraday cage, what is the physics of shields for electromagnetic fields and waves?", ??May 9, 2008
- [41] Noras. M. A, "Non-contact surface charge/voltage measurements. Capacitive probe Principle of operation", *TREK Application Note*, N°.3001, 2002.
- [42] Li. J, Dascalescu. L, Miloudi.M, Bilici. M, Xu. Z, "Physical model of granule adhesion to the belt-electrodes of a tribo-aero-electrostatic separator", *7th International Conference on Applied Electrostatics*, Dalian, China, Sep. 2012,
- [43] Tinsson. W, "Plan d'expérience: constructions et analyses statistiques", Edition Springer-Verlag Berlin, 2010.
- [44] Goupy. J, Creighton. L, "Introduction aux plans d'expériences, avec applications", Collection: Technique et Ingénierie, Dunod, 4ème édition, 2009.
- [45] Dascalescu. L, Mihalcioiu. A, Tilmatine. A, Mihailescu. M, Iuga. A, Samuila. A, "Electrostatic separation processes.A linear-interaction optimization model using Taguchi's experimental design technique", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 10, pp. 19-25, 2004.
- [46] Mihalcioiu. A, Dascalescu. L, Das. S, Medles. K, Munteanu. R, "Virtual instrument for statistic control of powder tribocharging processes". *Journal of Electrostatics*, vol. 63, pp. 565-570, 2005.
- [47] Mihalcioiu. A. "Measurement Techniques and Virtual Instruments for the Study of Electrostatic Processes", Thèse de Doctorat en co-tutelle, Université de Poitiers et Université Technique de Cluj-Napoca, 2005.
- [48] Umetrics AB, MODDE 8.0. "User Guide and Tutorial. Umetrics", Umea, Sweden, 1999
- [49] Miloudi. M, Remadnia. M, Dragan. C, Medles. K, Tilmatine. A, Dascalescu. L, "Experimental study of the effect of ambient air humidity on the efficiency of tribo-aero-electrostatic separation of mixed granular solids", *Industry Applications Society Annual Meeting Orlando, FL, USA*, 2011.

Mis en forme : Anglais (États Unis)

Mis en forme : Anglais (États Unis)

- [50] Miloudi. M, Medles. K, Tilmatine. A, Brahami. M, Dascalescu. L, “Modeling and Optimization of a Propeller-type Tribocharger for Granular Materials”, *Journal of Electrostatics*, vol. 69, pp. 631-637, 2011.
- [51] Miloudi. M, Medles. K, Tilmatine. A, Brahami. M, Dascalescu. L, “Modélisation et optimisation d'un procédé de charge triboélectrique pour les particules isolantes”. *7th Conference of the French Society of Electrostatics*, Montpellier, France, 2010.
- [52] Miloudi. M, Medles. K, Tilmatine. A, Brahami. M, Dascalescu. L, “Optimization of belt-type electrostatic separation of granular plastic mixtures tribocharged in a propeller-type device”. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 301; N°1, 2011.
- [53] Miloudi. M, Medles. K, Aksa. W, Tilmatine. A, Brahami. M, Dascalescu. L, “Association et optimisation de deux nouveaux procédés de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique pour les particules isolantes”, *8^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension*, Tiaret, 09-11 Mai, 2011.
- [54] Miloudi. M, Medles. K, Tilmatine. A, Brahami. M, Dascalescu. L, “Modélisation et optimisation d'un procédé de charge triboélectrique pour les particules isolantes”, *International conférence de électrotechnique, ICEL '2009*, USTO Oran, 10-11 Nov. 2009.
- [55] Miloudi. M, Dascalescu. L, Li. J, Bilici. M, El-Moussaoues. S, Medles. K, “Conception d'un séparateur tribo-Aéro électrostatique amélioré pour le recyclage des déchets granulaires d'équipements électriques et électroniques”, *Conférence Francophone sur l'Eco-conception dans le Génie Electrique*, Ecole de Technologies supérieures de Montréal, Canada, 28-30 Mai 2012.
- [56] Miloudi. M, Medles. K, Tilmatine. A, Dascalescu. L, “Optimisation of belt-type electrostatic separation of tribo-aerodynamically charged granular plastic mixtures”, *Joint Conference on Electrostatics*, Cambridge, Ontario, Canada, June 12-14, 2012.
- [57] Miloudi. M, Dascalescu. L, Li. J, El Mossouess. S, Medles. K, ”Design of an Improved Tribo-aero-electrostatic Separator for Coarse Granular Plastics”, *8th Conference of the French Society of Electrostatics*, Cherbourg, France, 2012.
- [58] Aksa. W, Miloudi. M, Medles. K, Tilmatine. A, Dascalescu. L, “Réalisation et optimisation d'un dispositif de chargement triboélectrique par air comprimé pour les particules isolantes”, *8^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension*, Tiaret, 09-11 Mai, 2011.
- [59] Boukhoulda M. F, Miloudi. M, Medles. K, Rezoug. M, Tilmatine A, Dascalescu. L, “Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers”, *Joint Conference on Electrostatics*, Cambridge, Ontario, Canada, June 12-14, 2012.

Références bibliographies

- [60] Zelmat. M, Rizouga. M, Tilmatine. A, Medles. K, Miloudi. M, Dascalescu. L, “Experimental comparative study of different tribocharging devices for triboelectric separation of insulating particles” *Joint Conference on Electrostatics*, Cambridge, Ontario, Canada, June 12-14, 2012.
- [61] Aksa. W, Medles. K, Rezoug, Boukhoulda. M.F, M, Bilici. M, Dascalescu. L, “Two Stage Electrostatic Separator for the Recycling of Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment”, *Joint Conference on Electrostatics*, Cambridge, Ontario, Canada, June 12-14, 2012.
- [62] Iuga. A, Dascalescu. L, “Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification”, *Proceedings of the 4th International Workshop Materials for Electrotehnics*, Bucuresti, Romania, pp. 203-208, 2004.
- [63] Calin. L, “Séparation électrostatique des matériaux plastiques provenant d’équipements informatiques, en utilisant la triboélectrisation en lit fluidisé”, Thèse de Doctorat en co-tutelle, Université de Poitiers et Université Technique de Cluj-Napoca, 2008
- [64] COMSOL « Reaction ingeneering », LAB 3.5a, 2009.
- [65] Taillet. J, “Élimination des charges électrostatiques engendrées dans le traitement des produits pulvérulents”, *Journées d’études SEE Électrostatique*, 12-13 mai, 1992.
- [66] Calin. L, Caliap. L, Neamtu. V, Morar. R, Iuga. A, Samuila. A, Dascalescu. L, “Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation”, *Industry Applications Society, 40th Annual Meeting*, Hong Kong, pp. 1435-1441, 2-6 Oct. 2005
- [67] Calin. L, Mihalcioiu. A, Iuga. A, Dascalescu. L, “Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification”. *Particulate Science and Technology*, vol. 25(2), pp. 205-211, 2007.
- [68] Calin. L, Caliap. L, Neamtu. V, Morar. R, Iuga. A, Samuila. A, Dascalescu. L, “Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44. pp. 1045-1051. 2008
- [69] Calin. L, Dragan. C, Iuga. A, Samuila. A, Dascalescu. L, “Influence of the air humidity and temperature on fluidised bed triboelectrostatic separation”, *Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1-4, 2008.
- [70] Calin, L., Dragan, C., Iuga, A., Samuila, A., Dascalescu, L. ”Influence of the air humidity and temperature on fluidised bed triboelectrostatic separation”. MmdE-2008&ROMSC-2008 Conference at “Politehnica” University of Bucharest, 16-18 June, 2008.

Références bibliographiques

تتكون نفايات أجهزة الإعلام الآلي من مجموعة كبيرة من المواد البلاستيكية، يتم فرزها - و هي على شكل حبيبات - حسب نوعها قبل عملية البثق لتصنيع قطع جديدة، و من أجل ذلك توجد حلول تقنية لإعادة تصنيع هذه المواد البلاستيكية، كما أن عملية تجميعها تشهد تطورا ملحوظا، و بالموازاة مع ذلك أصبح لدى المنتجين و المصنعين درجة كبيرة من الوعي تجاه هذه العملية، فإعادة التصنيع تسمح بالمحافظة على كميات كبيرة من الطاقة الأولية و على رأسها المادة الأولية التي تدخل في صناعة معظم المواد البلاستيكية و هي النفط، لكنه في حقيقة الأمر لا تزال عملية إعادة التصنيع تتطلب المزيد من البحث لتطوير تكنولوجيات جديدة للفصل المادي.

في هذه الأطروحة سلطنا الضوء على دراسة خصائص الشحن و الفصل الكهربائي جزيئات عازلة مليمترية متواجدة على سطح قطب موصول بالأرض، حيث أجرينا قياساتنا على فئتين من المواد العازلة (الأكريلو نيتريل بوتادين ستايرين و البوليسيتيرين هاي أمباكت) تم الحصول عليها من نفايات أجهزة الإعلام الآلي.

الدراسة التجريبية سمحت لنا بإظهار أهمية استخدام طريقة تصميم التجارب لدراسة تأثير العوامل التالية: التوتر الكهربائي و حجم الحبيبات، بالإضافة إلى التفاعلات المتواجدة بين هذه العوامل الثلاثة، و هذا من خلال تقييم انخفاض التوتر الكهربائي على مستوى سطح الطبقات في المدى القريب و البعيد، فقد سمحت لنا هذه التقنية المثيرة للإهتمام باقتراح نماذج رياضية للتعبير عن نسبة الانخفاض الكهربائي و نسبة إسترجاع المواد العازلة التي نحن بصدد دراستها.

هذا العمل يشكل نهجا مبتكرا يسمح لنا بالربط بين قياسات انخفاض التوتر الكهربائي و طريقة تصميم التجارب و هما تشكلا أدوات هامة جدا للتنبؤ بنتائج أفضل لعملية حقن الشحن و الفصل الكهربائي.

Les déchets d'équipements informatiques sont composés d'une grande diversité de matériaux plastiques. Ceux-ci sont triés par nature (ABS, PC, HIPS, PP, etc.) et granulés avant d'être extrudés et utilisés pour fabriquer de nouvelles pièces. Les solutions techniques de recyclage des déchets plastiques sont nombreuses. La gestion des déchets plastiques évolue favorablement, les collectes sélectives se sont progressivement généralisées. Parallèlement, les producteurs et transformateurs du secteur plastique ont pris conscience de l'enjeu. En effet le recyclage permet d'économiser une grande quantité d'énergie primaire, notamment du pétrole, la principale matière première de la plupart des matériaux plastiques. Le développement de ce secteur industriel nécessite la recherche et le développement de nouvelles technologies de séparation physique.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au chargement et la séparation triboélectrostatique des matériaux granulaires isolants. Nous avons réalisé nos expériences sur deux classes de matériaux isolants qui se trouvent dans les mélanges non conducteurs : à savoir ceux qui sont inférieur à 2mm et ceux de taille inférieur à 4.5mm: l'ABS (Acrylonitrile-Butadiène-Styrène) et le HIPS (High-Impact Polystyrene) provenant de déchets d'équipements informatiques

Les travaux réalisés ont permis de mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation de la méthode des plans d'expériences à la quantification des effets des facteurs ainsi que des interactions entre eux, par l'évaluation du taux de déclin de potentiel de surface, à court et à long terme. Cette technique est particulièrement intéressante, elle nous a permis de réaliser deux dispositifs innovants dans le domaine

Ce travail constitue donc une approche innovante qui permet de corréler les mesures et la réalisation expérimentale ainsi que la théorie qui constituent des outils très intéressants pour mieux prédire les résultats des processus de chargement et de séparation électrostatique.