

THESE

Pour l'obtention du Grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS
Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées

(Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006)

Ecole Doctorale : Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Energétique et Aéronautique

Secteur de Recherche : Sciences pour l'ingénieur

Spécialité : Génie électrique

Présentée par :

Ciprian DRAGAN

MODELISATION DU PROCESSUS DE CHARGE ET SEPARATION TRIBO-AERO-ELECTROSTATIQUE DE MATERIAUX PLASTIQUES GRANULAIRES

Directeur de Thèse : Lucien DASCALESCU

Soutenue le 21 octobre 2010

devant la Commission d'Examen

JURY

M. Radu MUNTEANU, Professeur, Université Technique de Cluj-Napoca
M. Khashayar SALEH, Professeur, Université de Technologie, Compiègne
M. David MALEC, Professeur, Université Paul Sabatier, Toulouse
M. Gérard TOUCHARD, Professeur, Université de Poitiers
M. Nouredine ZOOUZOU, Maître de conférences, Université de Poitiers
M. Lucien DASCALESCU, Professeur, Université de Poitiers

Rapporteur
Rapporteur
Examinateur
Examinateur
Examinateur
Examinateur

“If I had the opportunity to smell the enchanted wind of a spring flower, I would take a deep breath, to relax.

If I had the chance to get the tingling emotion of warm white sea sand slipping through my fingers, I would hold on to the feeling.

If I could see the pure and carefree smile of a child, as the original nature of honesty, it would be so refreshing, being able to respond.

If I could hear the greatest sound, the silence of forest in the early morning, just interrupted and up valued by the lonely call of a bird, I would answer.

Now, that I'm here, breaking my relationship with time and space, watching my life through the clear glasses of a window, I get aware of the small things, which are least, the greatest.”

Kai FRANZ

REMERCIEMENTS

Cette thèse est le fruit de trois années de travail, dans le domaine de l'électrostatique appliquée au sein de l'équipe Electro-fluido-dynamique du département Fluides, Thermique, Energétique de l'Institut PPRIME, UPR 3346 CNRS-Université de Poitiers-ENSMA.

Quelques lignes sont trop courtes pour exprimer ma profonde reconnaissance pour mon directeur de thèse, Monsieur **Lucien DASCALESCU**, professeur à l'Université de Poitiers. Tout a commencé il y a 5 ans, quand il a encadré mon stage de fin d'étude d'ingénieur, dans le cadre d'un échange ERASMUS avec l'Université Technique de Cluj-Napoca. C'est lui qui m'a formé à la rigueur de la démarche expérimentale et aux exigences de la communication scientifique, en dirigeant aussi mon stage de Master, effectué au Laboratoire d'Electrostatique Appliquée de l'IUT d'Angoulême. Ses conseils éclairés, ses encouragements constants et sa confiance sans faille ont été essentiels à notre succès au cours des trois années de thèse.

Je suis profondément honoré par le fait que le jury devant lequel je vais défendre ma thèse sera présidé par Monsieur le professeur **Radu MUNTEANU**, membre de l'Académie Roumaine des Sciences Techniques, Recteur de l'Université Technique de Cluj-Napoca, membre fondateur de la Société Roumaine d'Electrostatique. Je lui en remercie infiniment d'avoir accepté d'être rapporteur de mon travail.

Ma reconnaissance va aussi à Monsieur **Khashayar SALEH**, professeur à l'Université de Technologie, Compiègne, pour ces précieux conseils concernant la construction et le fonctionnement des lits fluidisés, mais aussi pour le rapport qu'il a rédigé sur mon travail.

Je remercie également au Monsieur **David MALEC**, professeur de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, qui a répondu à l'invitation qui lui avait faite d'être examinateur de cette thèse.

C'est avec reconnaissance que je remercie à Monsieur **Gérard TOUCHARD**, professeur de l'Université de Poitiers, qui après m'avoir fait bénéficier de son expérience scientifique par des conseils avisés et des discussions fructueuses, a accepté aussi de faire partie du jury.

J'exprime mes remerciements les plus sincères à Monsieur **Noureddine ZOUZOU**, maître de conférences à l'Université de Poitiers, membre aussi de ce jury de thèse, pour les conseils techniques et scientifiques qu'il m'a prodigué, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Ce mémoire de thèse reflète aussi un travail fait au sein du Laboratoire de Recherche « Champs Electriques Intenses » de l'Université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie. J'y ai bénéficié des encouragements et des multiples suggestions concernant les techniques expérimentales de la part du professeur **Alexandru IUGA**, mais aussi de la rigueur scientifique et la compréhension précise des phénomènes électrostatiques du professeur **Adrian SAMUILA**. Je leur exprime mes plus vifs remerciements, pour leur accueil chaleureux et leur grande disponibilité. Ma reconnaissance s'adresse aussi à Monsieur Dr. Ing. **Laur CALIN**, pour la générosité avec laquelle il a partagé avec moi plusieurs solutions techniques innovantes qui se sont avérées essentielles à l'avancement de mon travail.

Je tiens également à remercier à mes collègues **Ovidiu FATI**, **Mihai BILICI**, **Subhankar DAS**, **Boni DRAMANE**, **Jean-Charles LAURENTIE**, **Michel DAABOUL**, **Belaid TABTI**, **Mohamed ELADAWY** pour leur aide amicale. C'est avec reconnaissance que je remercie à toute l'équipe Electrofluidodynamique de l'Institut P'. Grâce aux Mesdames **Catherine ECALE** et **Chantal LETURC**, je n'ai jamais rencontré des problèmes administratifs pendant ces trois ans.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur **Marc GAUTHIER**, technicien principal à l'IUT d'Angoulême, pour les nombreux conseils pratiques qui ont contribué à la mise au point de la plupart de dispositifs expérimentaux décrits dans la thèse.

J'exprime ma gratitude à **Bernadette et Gérard DENIS**, qui ont pris soin de moi comme si j'étais leur enfant.

Ce travail a pu être commencé et mené au bout grâce à une bourse offerte par le **Conseil Régional Poitou-Charentes**, auquel j'exprime ici toute ma reconnaissance.

Je tiens à remercier aussi à ma famille. C'est ma sœur, **Manuela** qui m'a encouragé à poursuivre mes études supérieures en France. Je dois à mes parents, **Mia** et **Vasile DRAGAN** beaucoup de ce que je suis devenu. Je les remercie pour leur amour, leur soutien et leur confiance à travers les dernières 28 années. Mes parents ont toujours placé l'éducation comme la première priorité dans ma vie et m'ont incité à fixer des très hauts objectifs pour moi-même. Ils m'ont appris à mettre l'honnêteté et le courage au-dessus de toutes les autres vertus.

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

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
 Chapitre 1 : ETAT DE L'ART	
 1.1. Charge triboélectrique des matériaux granulaires	4
1.1.1. Mécanismes physiques	5
1.1.2. Modèles numériques	8
1.1.3. Dispositifs de charge	9
1.2. Lits fluidisés	11
1.2.1. Fluidisation des matériaux granulaires	12
1.2.2. Forces aérodynamiques et électrostatiques	18
1.2.3. Application à la charge de matériaux plastiques granulaires	24
1.3. Installations de séparations électrostatiques de matériaux granulaires	25
1.3.1. Etudes de laboratoire	25
1.3.2. Applications industrielles	26
 Chapitre 2 : CHARGE DE MATERIAUX GRANULAIRES DANS LES	
INSTALLATIONS DE TRANSPORT PNEUMATIQUE	
2.1. Installations de transport pneumatique pour les matériaux granulaires	30
2.1.1. Description de l'installation expérimentale	30
2.1.2. Méthodes de mesure	33
2.1.3. Méthode des plans des expériences	36
2.2. Transport des granules isolants dans des tubes en PVC et Aluminium	37
2.3. Charge triboélectrique dans les dispositifs annulaires	45

Chapitre 3 : CHARGE TRIBOELECTRIQUE DE MELANGES DE MATERIAUX GRANULAIRES DANS LES LITS FLUIDISES

3.1. Installations expérimentales	52
3.1.1. Dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales	52
3.1.2. Dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées	53
3.1.3. Procédure expérimentale	54
3.2. Charge d'un mélange binaire de matériaux plastiques granulaires dans un dispositif à lit fluidisé à faible débit et électrodes verticales	57
3.2.1. Etude de la faisabilité du processus de charge tribo électrique	57
3.2.2. Etude des facteurs influents	61
3.2.3. Effet de la composition du mélange	63
3.3. Charge d'un mélange binaire de matériaux plastiques granulaires dans un dispositif à lit fluidisé à débit moyen et électrodes inclinées	66
3.3.1. Etude de la faisabilité du processus de charge par effet triboélectrique	66
3.3.2. Etude des facteurs influents	73
3.3.3. Effet de la composition du mélange	76

Chapitre 4 : SEPARATION TRIBO-AERO-ELECTROSTATIQUE DE MELANGES DE MATERIAUX GRANULAIRES

4.1. Conception et réalisation d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique	80
4.1.1. Principe de fonctionnement	80
4.1.2. Génération du champ électrique intense	85
4.2. Fluidisation des matériaux plastiques	87
4.2.1. Dimensionnement du lit fluidisé	87
4.2.2. Choix de la soufflante	87

4.3. Flux de matière	89
4.3.1. Alimentation en matière	89
4.3.2. Calcul et mesure du débit de matière à la sortie	90
4.3.3. Analyse du fonctionnement de l'installation	91
4.4. Etude des facteurs influents du processus de séparation	95
4.4.1. Effet de la composition du mélange	95
4.4.2. Effet de la paroi en PMMA sur l'électrisation des granules d'ABS et de PA	102
CONCLUSION GENERALE	105
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	107
LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX	116

INTRODUCTION

Il y a 20 ans, l'industrie du recyclage était à peine intéressée par la valorisation des déchets d'équipements informatiques (figure. i.1). Aujourd'hui, cette catégorie de déchets connaît la plus forte croissance en termes de volume à traiter [4]. C'est pour cela que le problème de la récupération et du traitement des équipements informatiques en fin de vie est devenue une préoccupation majeure pour toutes les entreprises qui travaillent dans ce secteur.

Les méthodes de récupération de matériaux provenant des déchets informatiques sont variées [10]. Les procédés gravitationnels ou par flottation étant moins efficaces, les technologies électrostatiques se sont imposés comme la solution de choix pour le recyclage des matériaux plastiques contenus dans ces déchets [6]. D'autant plus que la séparation électrostatique est une technologie non-polluante, caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien.

Stimulées par la demande de l'industrie du recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques, multiples recherches avaient déjà été réalisées par des laboratoires européens, américains, canadiens ou japonais sur la séparation électrostatique des matériaux plastiques granulaires et sur les principaux mécanismes de charge impliqués. L'équipe de recherche en Electrostatique appliquée de l'Institut Universitaire de Technologie d'Angoulême, en collaboration avec le Laboratoire de Champ Electriques Intenses de l'Université Technique de Cluj-Napoca, a conduit les premières études dans ce domaine il y a une dizaine d'années, afin de répondre à un triple défi posé par des partenaires industriels : croissance rapide des quantités à traiter, diversification continue des matériaux à recycler, augmentation progressive des exigences concernant la qualité des concentrés obtenus.

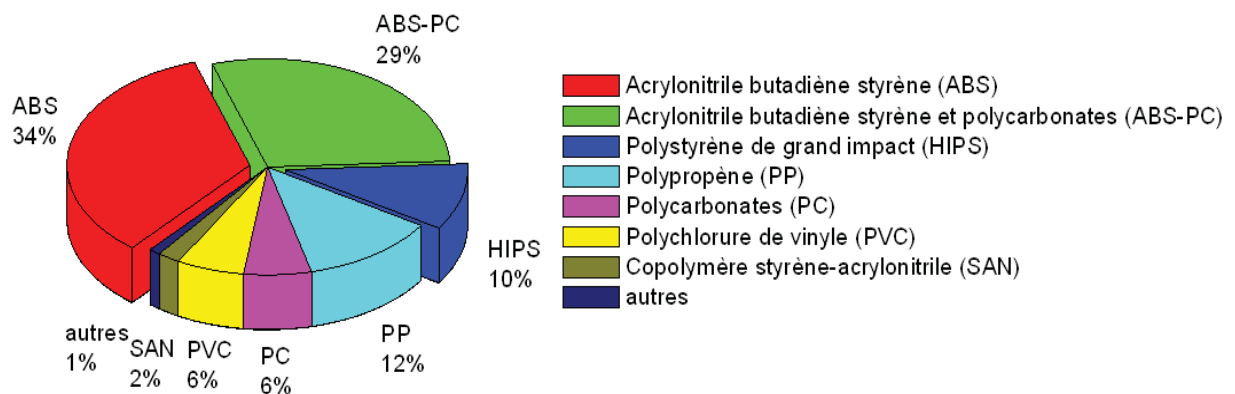


Figure i.1: Classes des matériaux plastiques dans les composants informatiques [6]

Au vu des résultats de ces études, une demande de brevet intitulée « *Procédé de séparation électrostatique d'un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en œuvre* », a été déposée, le 23 mars 2009, aux noms conjoints de la société APR2 et de l'Université de Poitiers, citant le Professeur Lucian DASCALESCU et le Dr. Ing. Laur CALIN comme inventeurs. Compte tenu de l'application possible de l'invention protégée par ce brevet dans le domaine du recyclage des matériaux plastiques, la société APR2 a confié à l'Institut Pprime la mise au point d'un pilote industriel découlant de ce procédé innovant, qui utilise en même temps l'effet triboélectrique, la force de Coulomb, et la force image électrique.

Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse, qui était d'améliorer les méthodes de séparation électrostatique actuelles et de proposer des solutions viables à des nouvelles applications industrielles, ainsi que la démarche d'investigation choisie, ont dû s'exprimer dans un programme expérimental original, dont la réalisation a demandé la conception de dispositifs innovants et la mise au point de procédures expérimentales appropriées.

Ainsi, un modèle de laboratoire du séparateur à lit fluidisé est en construction sur le site d'Angoulême de l'Institut Pprime. Il devrait permettre de trouver les facteurs d'échelle à adopter pour créer le régime de charge optimal dans un lit fluidisé de dimensions industrielles. Même si la durée limitée du travail de thèse n'a pas permis de mettre pleinement au profit les outils réalisés, ceux-ci se sont constitués dans une très bonne base technique sur laquelle des recherches futures pourront se développer, afin de continuer à apporter une réponse optimale aux trois défis énoncés plus haut.

Dans le **1er chapitre**, quelques concepts sur l'effet tribo-électrique sont passés en revue, ainsi que la construction et les principes de fonctionnement de certains dispositifs de triboélectrisation et de séparation électrostatique. L'étude de l'état de l'art a permis de mieux cerner les problèmes qui restent à résoudre et de préciser les objectifs du travail.

Les expériences présentées dans le cadre du **2^{ème} chapitre** ont visé l'évaluation des propriétés électriques des matériaux isolants granulaires par rapport à leur déplacement dans des installations de transport pneumatique. Les résultats des études menées en utilisant la méthodologie des plans d'expériences montrent que la charge triboélectrique des particules

dans ces installations peut être utilisée pour améliorer l'efficacité globale d'une installation de séparation électrostatique.

A l'aide de deux dispositifs expérimentaux originaux, il a été possible d'évaluer les effets de plusieurs facteurs qui pourraient influencer sur l'efficacité d'un processus de charge en lit fluidisé, en présence d'un champ électrique. Les données expérimentales présentées dans le **3^{ème} chapitre** valident le nouveau concept de séparateur tribo-aéro-électrostatique, mais elles indiquent aussi ses limites d'application et les problèmes à résoudre. .

C'est à partir de ces études, auxquels se sont rajoutés les résultats des essais effectués sur une installation construite par le Laboratoire de Champs Electriques Intenses de Cluj-Napoca, que le cahier de charges d'une installation industrielle a pu être rédigé. Ainsi, le **4^{ème} chapitre** contient les solutions techniques préconisées pour la réalisation du système d'électrodes et d'alimentation haute tension, pour la construction du lit fluidisé et de l'alimentation en air comprimé, ainsi que pour la conception du système de contrôle du flux de matière.

Associer dans un même dispositif la charge triboélectrique en lit fluidisé et la séparation électrostatique conduit à un procédé efficace de traitement des déchets granulaires de matériaux isolants. Cette **conclusion générale**, qui clôture le mémoire, s'accompagne d'une synthèse des principales **contributions** que la thèse apporte dans le domaine étudié, ainsi que de l'énoncé des **perspectives** ouvertes par ce travail.

1. ETAT DE L'ART

Séparation électrostatique [72] est le terme générique pour une classe importante de technologies de traitement des matériaux, largement utilisés pour le tri sélectif des matériaux solides par des forces électriques [74] qui agissent sur les particules chargées ou polarisées [87, 91]. Dans la plupart des cas, les champs électriques dans l'ordre de 10^6 Vm^{-1} sont nécessaires [96,97], et c'est pourquoi le développement des technologies et des équipements de séparation électrostatique [98] a toujours été synchronisé avec les progrès de l'ingénierie de haute tension. La gamme d'applications, se traduisant par des centaines de brevets, s'étend de le traitement des minérales et de conditionnement des semences [26] jusqu'au recyclage des métaux et plastiques à partir de déchets industriels [4,6,44,55].

1.1. Charge tribo-électrique des matériaux granulaires

Deux mécanismes physiques sont couramment employés pour charger les matériaux granulaires en vue de leur séparation dans un champ électrique intense : l'effet couronne [24,25], assurant la charge par « bombardement ionique » et l'effet triboélectrique, impliquant le transfert de charge entre deux corps en contact.

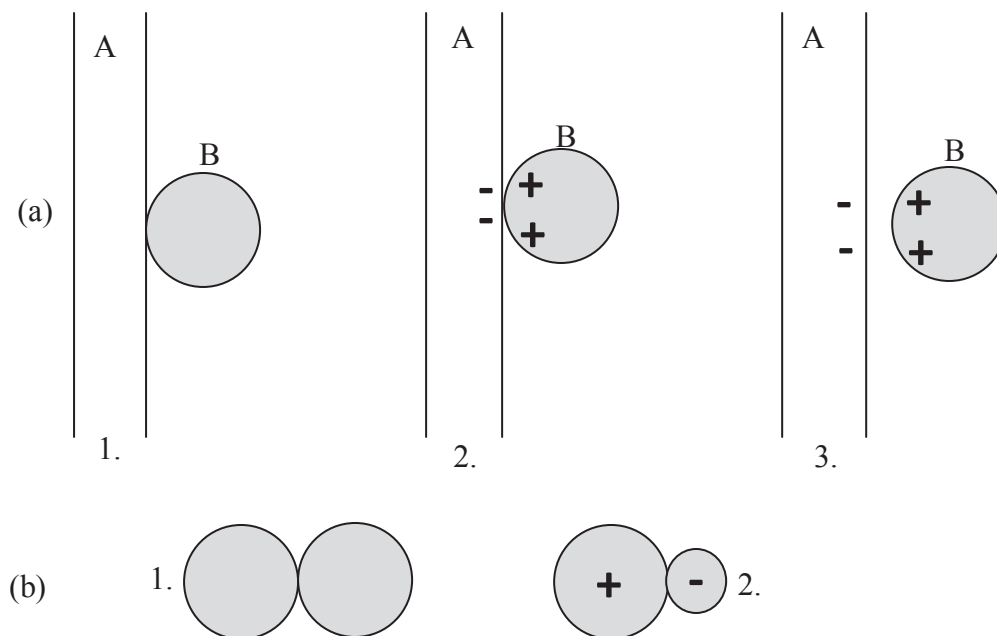


Figure 1.1 : L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux surfaces:
 (a) : 1. Surface A neutre, particule B est neutre ; 2. La surface A et la particule B sont en contact ; 3. Après la séparation, la surface A a la tendance de se charger négativement, et la particule B positivement ; (b) : 1. Deux particules neutres de même taille en contact ; 2. les particules grandes ont la tendance de se charger positivement et les petites négativement.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord passer en revue quelques concepts théoriques sur l'effet tribo-électrique. Ensuite, nous allons décrire la construction et présenter les principes de fonctionnement des dispositifs de triboélectrisation les plus importants.

1.1.1. Mécanismes physiques

Lorsque deux matériaux différents sont mis en contact (figure 1.1) ils acquièrent des charges électriques du au phénomène de triboélectrisation.

A l'échelle atomique, le mouvement des électrons obéit aux lois de la mécanique quantique. Il est caractérisé par le module au carré de la fonction d'onde de l'électron, représentant la probabilité de présence d'un électron en chaque point du milieu. Le concept de localisation ou délocalisation a des conséquences sur la conductivité du matériau. Elles sont montrées dans la figure 1.2. Les vibrations thermiques des atomes d'un cristal parfait entravent le déplacement des électrons et diminuent la conductivité ou augmentent la résistivité. Lorsque les électrons occupent des états localisés dans un matériau désordonné, les vibrations thermiques peuvent fournir une énergie suffisante à l'électron, pour quitter son site par l'effet tunnel. Ici la conduction augmente avec la température (T), contrairement à celle des solides ordonnés, c'est ce que l'on appelle la conduction par sauts. Comme Touchard [105] le précise, ce processus de conduction par saut résulte d'un transfert d'électrons entre les états localisés, dans la bande interdite (E_g) au voisinage du niveau Fermi (E_f). En particulier, lorsque la densité d'états près du niveau Fermi est élevée, la mobilité des porteurs augmente de façon importante. Ce mécanisme s'observe parfaitement dans les solides isolants.

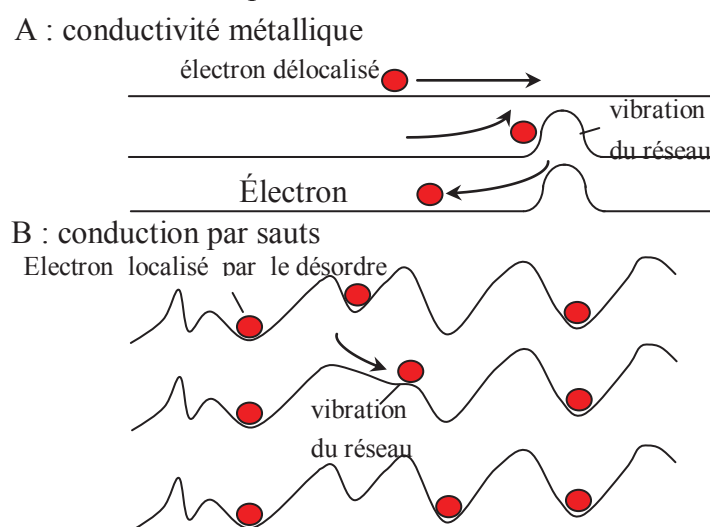


Figure 1.2 : Effets de la localisation et de la délocalisation des électrons

Les récents travaux de Liu et Bard [75] ont proposé un modèle de transfert d'électrons, validée par des expériences sur la charge de téflon. En revanche, Whitesides et McCarthy [81] 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 la tribocharge des matériaux isolants.

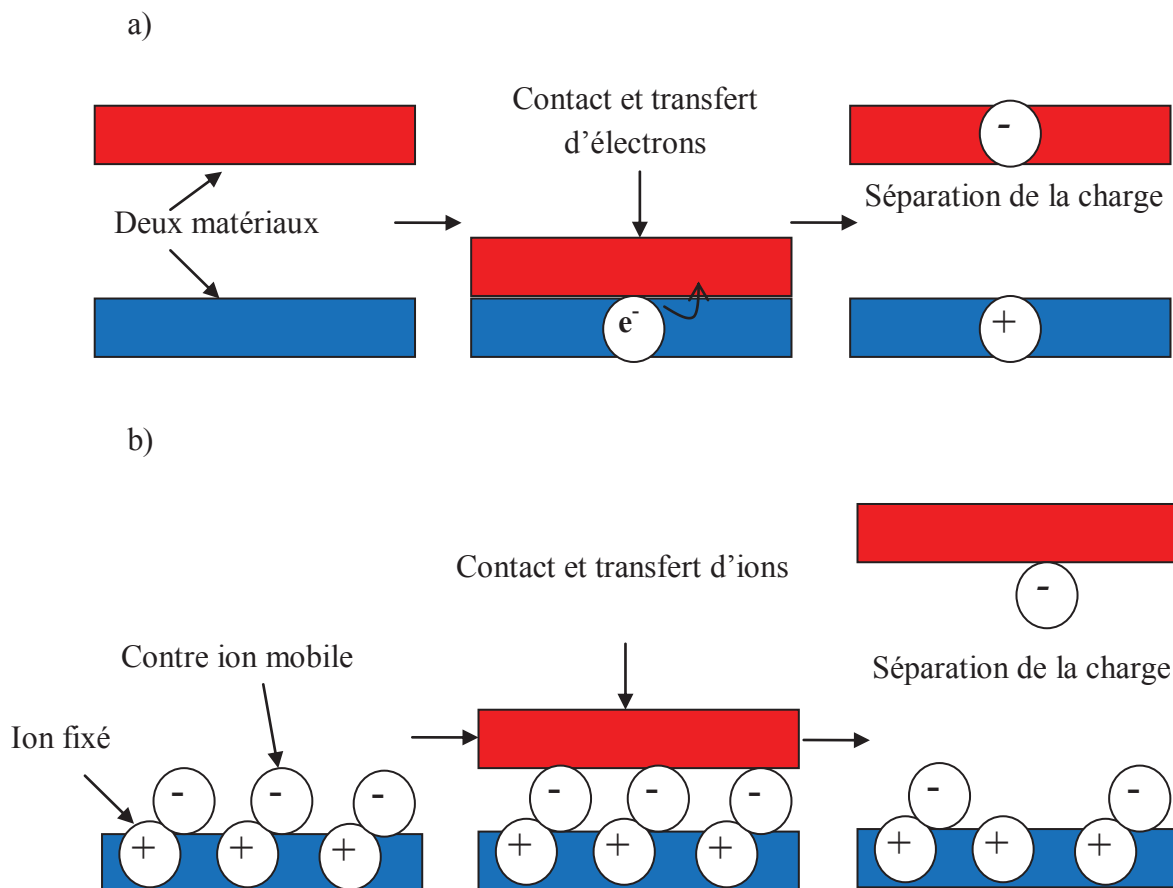


Figure 1.3 : Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ; b) Transfert d'ions

La plupart des chercheurs ont supposé que la tribo électrisation des isolants implique également le transfert d'électrons, [80,95], mais les observations expérimentales semblent contredire ce point de vue. La tribo électrisation des isolants n'est pas en corrélation avec les propriétés électroniques des matériaux, tels que la constante diélectrique, ou des propriétés atomiques, tels que l'énergie d'ionisation, affinité électronique, ou électronégativité. [13,14]

Des considérations théoriques s'opposent aussi à un mécanisme faisant intervenir le transfert d'électrons. Plusieurs chercheurs ont remarqué que le processus de tribo électrisation est en corrélation avec l'acidité ou la basicité des matériaux isolants. En 1902, Knoblauch a fait observer que les solides organiques acides tendent se charger négativement, et les solides organiques bases tendent à se charger positivement [65]. Il a proposé un mécanisme de transfert de proton pour l'effet tribo. Medley a fait des observations similaires en 1953 [82], et Diaz a proposé qu'un mécanisme de transfert de proton puisse expliquer la tribo électrisation d'un large éventail de matériaux isolants [32,33]. Ces observations, que les propriétés acides ou basiques des matériaux sont en corrélation avec leurs propriétés tribo électriques, sont difficiles à concilier par un mécanisme qui implique le transfert d'électrons.

Dans sa monographie sur la tribo électrisation, Harper analyse les éléments de preuve pour le mécanisme de transfert d'électrons, et conclut: « *Je suis d'avis que la réponse définitive ne peut maintenant être donnée, qui est que les transporteurs [des] chargés ne sont jamais des électrons - lorsque le matériau en cours de charge est uniquement un isolant.* »[47] Ses arguments contre le mécanisme de transfert d'électrons sont convaincants, bien que sa rationalisation mécaniste de l'alternative (le mécanisme de transfert d'ions) soit moins. En particulier, il n'a jamais expliqué de façon convaincante l'origine des ions mobiles (ce qui serait nécessaire pour un mécanisme impliquant le transfert d'ions) à la surface des polymères non ioniques. Le livre de Harper (1967, réédité en 1998) n'a pas convaincu d'autres chercheurs que la tribo électrisation des isolants implique le transfert d'ions et d'électrons pas: l'article par Lowell et Rose-Innes atteint la conclusion inverse [76], en dépit de citation complète du travail de Harper. Quarante ans après la publication de la monographie de Harper, la question de l'ion contre le transfert d'électrons pour matériaux isolants non ioniques reste sans réponse.

1.1.2. Modèles numériques

Depuis 1979 avec Cundall et Strack [23], de nombreux chercheurs se sont penchés sur les méthodes numériques pour calculer les mouvements de particules solides formant un ensemble. Ces simulations sont notamment utiles pour prédire le mouvement d'un ensemble de roches par exemple, mais elles permettent également de calculer des vidanges de trémies ou de tamis. Associées à des calculs de la mécanique des fluides, les méthodes de simulation « DEM » (discrete element method) permettent de simuler des transports pneumatiques de poudres ou de granulés, dans l'industrie agroalimentaire, dans l'industrie chimique ou pharmaceutique. La base de cette méthode consiste à calculer les forces générées par tous les chocs (chocs entre particules et avec les parois). Une fois les forces calculées, on en déduit les vitesses et donc les positions des particules au pas de temps suivant. La méthode est étudiée au sein du Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques, à Poitiers, par Traore et al. [106] Les modèles de contacts entre particules peuvent prendre en compte (soft model) ou non (hard model) la déformation des corps en contact, ainsi que la forme des particules (cylindres, sphères, polygones), et la cohésion entre elles. L'interaction entre deux particules est la résultante d'une force normale et d'une force tangentielle, décrite par le modèle Kelvin-Voigt (figure 1.4)

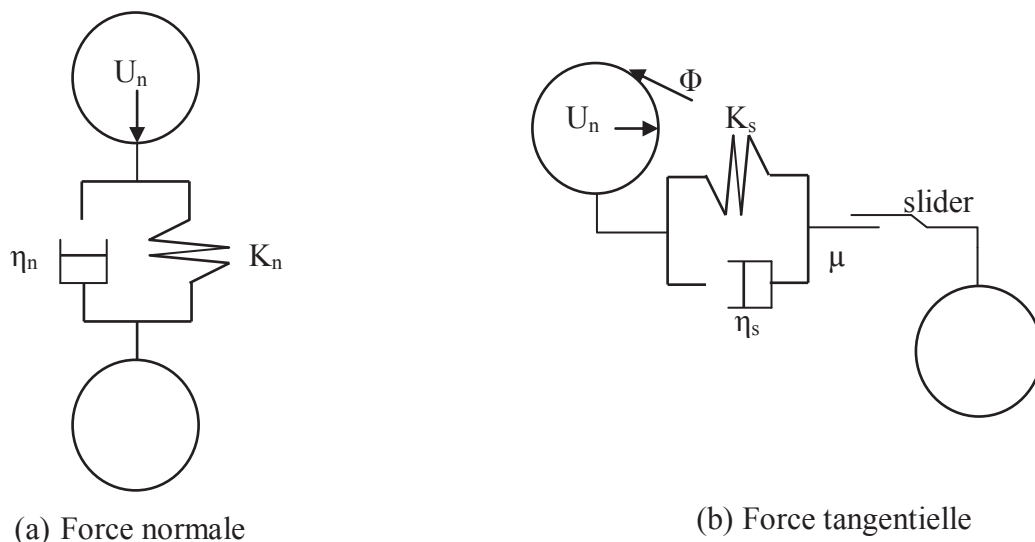


Figure 1.4: Modèle Kelvin-Voigt [73]

Ce modèle peut être complété par la prise en compte de l'effet triboélectrique. L'échange de charge au contact entre particules de polymère a été étudié par Castle et al [3]. En s'appuyant sur cette étude, Laurentie a réalisé des simulations numériques basées sur l'hypothèse que l'échange de charge q par unité de surface lors d'une collision entre deux particules sphériques isolantes dépend des propriétés physiques des matériaux en contact et peut être exprimée comme suit [73] :

$$q = \frac{\varepsilon_0}{\delta e} (\Phi_i - \Phi_j - E \delta e) \quad (1.1)$$

Où: ε_0 , la permittivité de l'espace libre; δ , la distance de coupure du transfert de charge [100] (typiquement 500 nm); e , la charge de l'électron; Φ , la fonction de la surface de travail, le représentant de l'énergie nécessaire pour extraire un électron de la surface d'une particule; E , le champ électrique au point d'impact [79] des deux particules.

1.1.3. Dispositifs de charge

Il existe une multitude de dispositifs de charge triboélectrique ayant déjà une application industrielle. A titre d'exemple, nous allons présenter deux des solutions les plus efficaces.

La première installation présentée, c'est le dispositif de charge à cylindre rotatif [35]. Le matériau granulaire est mis en mouvement à l'intérieur d'un cylindre, qui tourne autour d'un axe horizontal ou légèrement incliné (figure 1.5). La charge accumulée par les particules est due aux collisions entre particules (mécanisme principal) et entre particules et la paroi du cylindre (mécanisme secondaire).

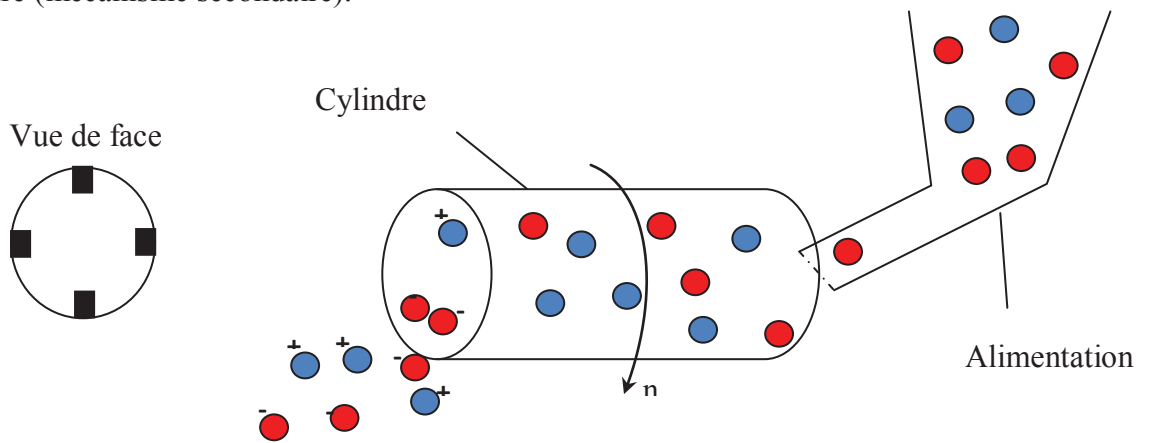


Figure 1.5: Dispositif à cylindre rotatif

Une autre solution pour charger les particules est représentée par le dispositif à vibrations. Une installation de ce type a été développée par Blajan et al [9] (figure 1.6). Le matériau à charger glissent dans des canaux en zigzag mis en mouvements vibratoires [29,50] 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.

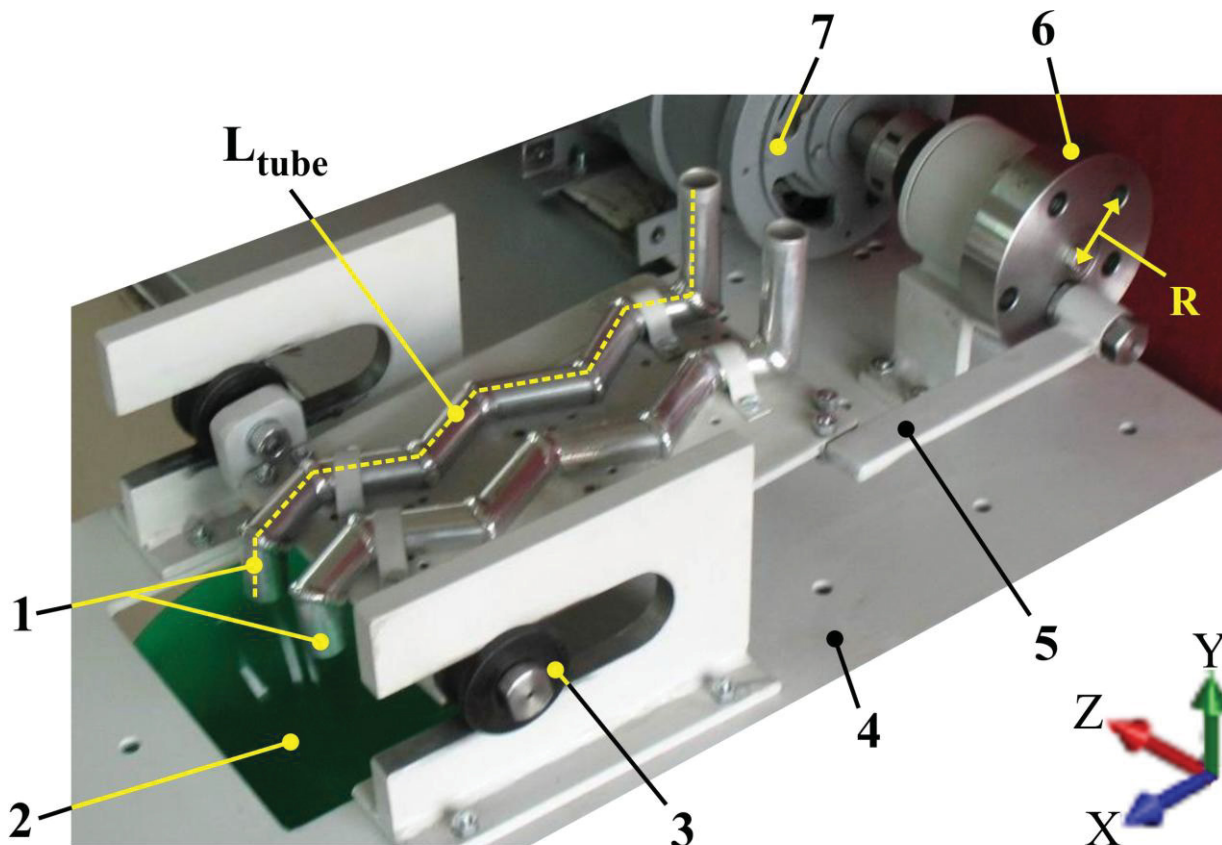


Figure 1.6 : Dispositif à vibrations; 1:tubes de charge; 2: sortie des particules chargées; 3: glissière; 4: support; 5: bielle; 6: manivelle; 7: moteur électrique; R: rayon; X, Y, Z: direction du mouvement des particules ; L_{tube} : longueur du tube.[9]

1.2. Lits fluidisés

Dans la pratique, il existe des nombreuses variantes de lits fluidisés, en fonction des applications [17]. Certains dispositifs de cette catégorie sont utilisés pour la charge triboélectrique des matériaux granulaires ou pulvérulents [77].

1.2.1. Fluidisation des matériaux granulaires

Le fonctionnement du lit fluidisé (figure 1.7) dans les processus de triboélectrisation est délimité par la vitesse minimale de fluidisation u_{mf} et la vitesse terminale de chute libre des particules u_t [40].

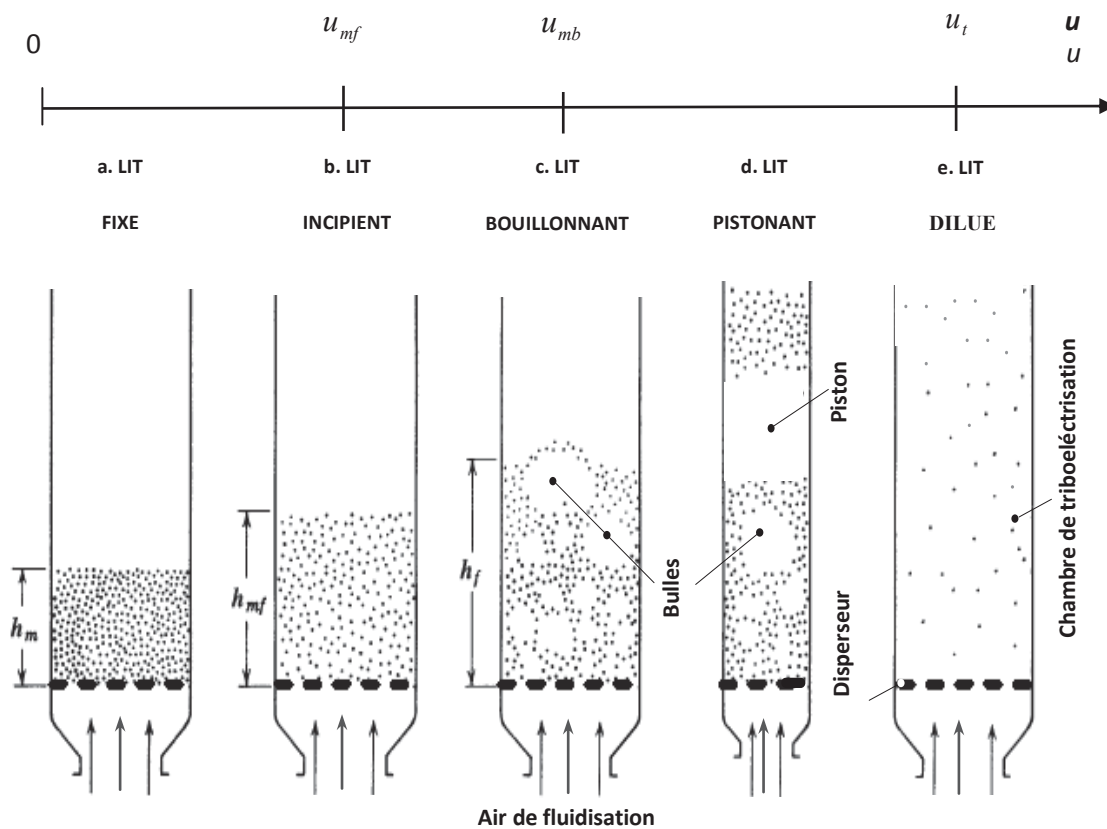


Figure 1.7 : Les régimes de lit fluaise en jonction ae la vitesse de fluidisation; u_{mf} - vitesse minimale de fluidisation; u_{mb} - vitesse minimale d'apparition des boules; u_t - vitesse de transport pneumatique.

Le début du processus de triboélectrisation dans les dispositifs à lit fluidisé correspond à la phase de « lit fixe » mais il devient efficace dans les phases appelées « lit bouillonnant » et « fluidisation turbulente », caractérisées par des impacts forts. On constate,

expérimentalement, que la fluidisation des matériaux plastiques granulaires dans les phases « lit bouillonnant » et « fluidisation turbulente » est accompagnée par la présence des bulles dans tout le volume du matériau, (qui peuvent se réunir pour former courants gazeux voir zone sans particules) et l'agitation de la suspension ayant l'aspect d'un liquide bouillant. La vitesse minimale de fluidisation u_{mf} , la vitesse terminale de chute libre des particules u_t et la chute de pression du lit fluidisé Δp sont les principaux paramètres de contrôle du lit fluidisé. Un lit fixe de granules de plastique est transformé en état de fluidisation par un courant d'air qui dépasse la vitesse minimale de fluidisation u_{mf} . Les particules sont maintenues en suspension par le courant d'air.

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

$$\Delta p = \frac{F_G - F_a}{A_t} = g(\gamma_p - \gamma_a)h(1 - \beta) \quad [\text{Pa}] \quad (1.2)$$

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

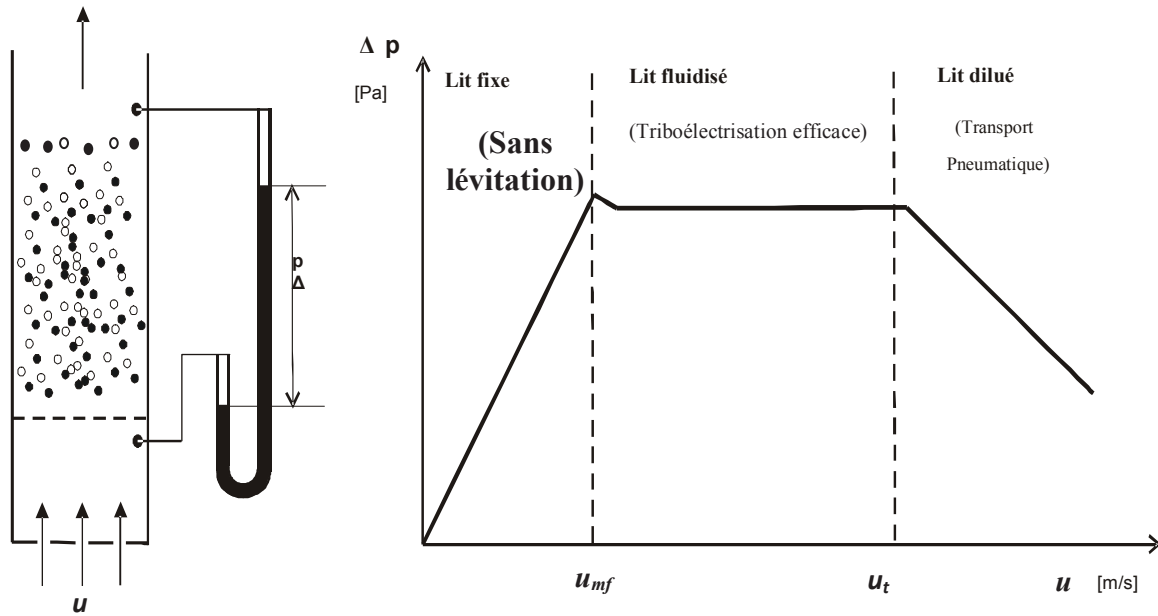


Figure 1.8 : Variation de la perte de pression Δp en fonction de la vitesse d'air u pendant les différentes étapes de la fluidisation des matériaux plastiques granulaires[53].

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

Dans le processus de fluidisation les particules ont des comportements spécifiques, qui peuvent affecter les caractéristiques de la couche fluidisée. Geldart [53] propose une classification de ces comportements dans quatre groupes A, B, C, D (figure 1.9).

Les matériaux du groupe C sont des poussières très fines où les forces d'adhésion sont plus grandes que la force ascensionnelle de l'air, faisant la fluidisation très difficile. Les propriétés de fluidisation peuvent être améliorées par des moyens mécaniques (vibrateurs) ou par des additives de fluidisation.

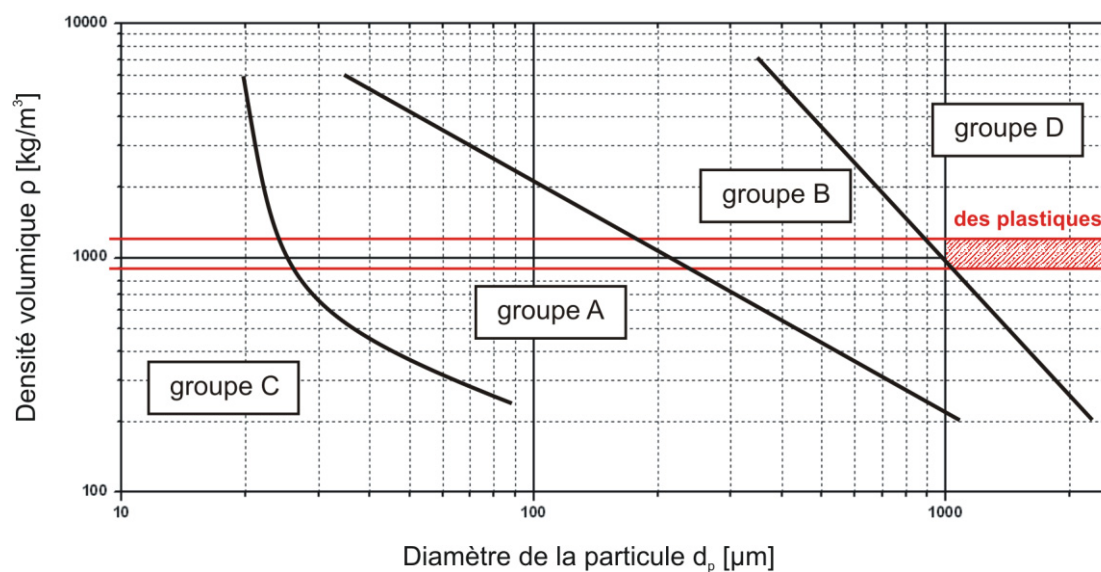


Figure 1.9 : Diagramme Geldart pour les régimes de fluidisation des granules en fonction de leur densité et diamètre [53]

Les matériaux du groupe A ont des dimensions d'ordre 0,1 mm ou faibles densités. La couche de fluidisation est uniforme jusqu'à le moment où les bulles se forment à $u_{mb} > u_{mf}$.

Les matériaux du groupe B ont des dimensions et densités moyennes (par exemple le sable). Les bulles se forment à $u_{mb} \approx u_{mf}$. Quand l'alimentation d'air est interrompue, le lit disparaît brusquement.

Les particules du groupe D ont des diamètres plus grands que 0,5 mm ou des densités élevées. Les bulles commencent à se former immédiatement après le point de fluidisation et montent lentement. A l'interruption brusque de l'air de fluidisation, le lit disparaît

brusquement. Les plastiques sont un des composants de ce groupe. La triboélectrisation en lit fluidisé est caractérisée par des explosions des grandes bulles à la surface (lit bouillant).

Un des buts essentiels des études menées sur les lits fluidisés, consiste à caractériser la structure de l'écoulement dans la colonne. Une bonne connaissance des caractéristiques hydrodynamiques du lit fluidisé favorise l'optimisation des paramètres de fonctionnement. Cet aspect a été étudié par Touchard et al [40], en utilisant deux systèmes de mesure pour déterminer le comportement hydrodynamique d'un lit.

La figure 1.10 illustre la représentation graphique du profil longitudinal de pression dans une colonne à lit fluidisé.

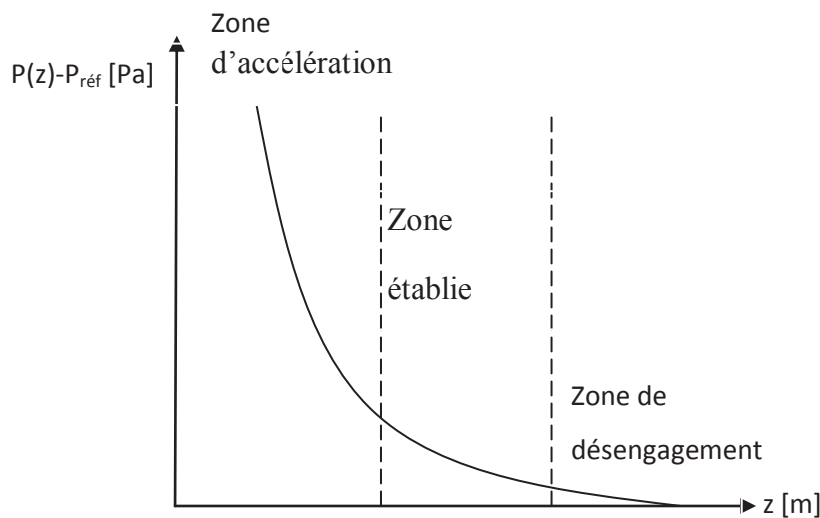


Figure 1.10 : Profil longitudinal de pression dans une colonne à lit fluidisé

Ce profil peut être schématisé par trois zones :

- Une zone d'accélération ou la concentration des particules est plus ou moins dense.
- Une zone d'écoulement dit établie, particulièrement étudiée par Molodsof [84].
- Une zone de sortie.

Le gradient longitudinal de pression $\delta P / \delta z$ est constant dans tout l'écoulement et le profil transversal de pression est le même dans une section droite. Enfin, le gradient longitudinal de

pression équilibre le poids du lit de particules et les frottements des deux phases (fluide et solide) sur la paroi.

Molodtson a montré que les termes de frottement du gaz et du solide sur la paroi sont négligeables devant le terme de gravité et en conséquence, il en déduit le gradient longitudinal de pression :

$$-\frac{\partial P}{\partial z} = [\rho_g \varepsilon_m + \rho_s (1 - \varepsilon_m)] g \quad (1.3)$$

où ε_m est la fraction de vide dans la zone, ρ_g et ρ_s sont les masses volumiques du gaz et du solide respectivement et g l'accélération de la pesanteur.

Un autre système de mesure utilise des sondes de prélèvement, permettant de caractériser la structure interne de l'écoulement dans la colonne, grâce aux relevés de flux massique. La sonde de prélèvement est un tube d'acier de diamètre bien défini en forme de L , qui est lié à un circuit de prélèvement.

Au centre de la colonne, les particules se déplaceraient avec une forte vitesse, mais avec une concentration faible, alors qu'au voisinage des parois, le phénomène inverse se produit [40] (figures 1.11a et 1.11b).

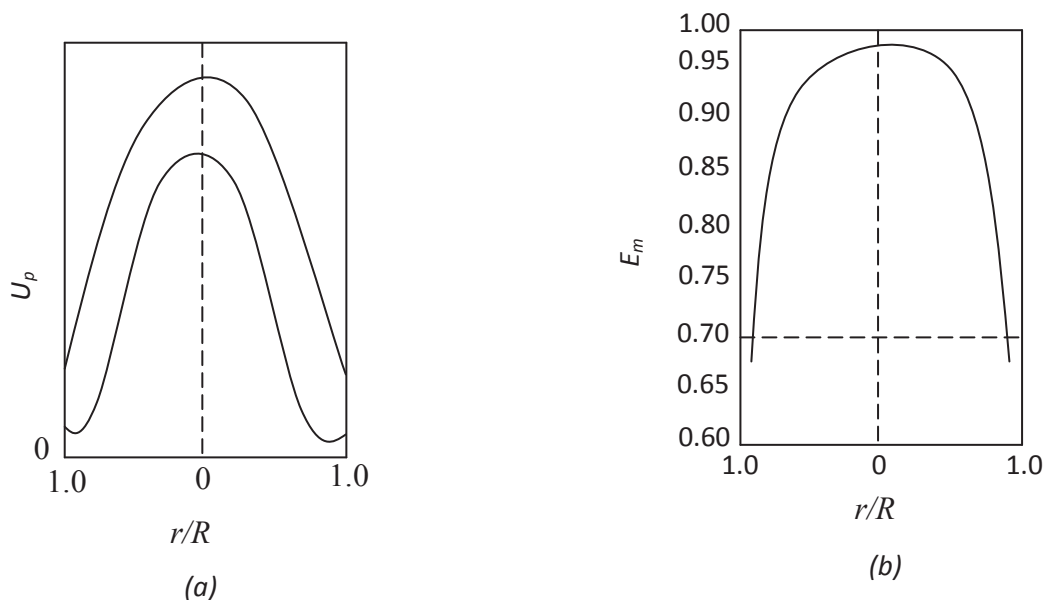


Figure 1.11 : Profils radiaux de la vitesse des particules (a) et du taux de vide (b) dans une colonne

La trace de la valeur locale correspondant à la vitesse des particules en fonction de la distance radiale de la section de la colonne, présente un maximum au centre. La vitesse des

particules diminue quand on s'approche de la paroi pour s'y annuler et dans certains cas, il existe un changement de signe de la vitesse de particules (le flux massique est descendant) [40].

La mesure locale de la concentration des particules (figure 1.11. b) montre que plus nous nous approchons du centre de la colonne, plus le taux de vide est important et logiquement, la concentration de particules est faible au centre. A cet endroit, les particules peuvent être considérées comme isolées. Par contre, près de la paroi, elles sont en grande quantité et bien souvent les auteurs les présentent comme des agglomérats.

Lorsque l'influence de la hauteur du lit de particules (H_{lit}) est moindre sur la vitesse des particules (U_p), la concentration de particules diminue en fonction de l'axe longitudinal de la colonne.

Lorsque les forces de frottement du gaz, exercées sur les particules deviennent suffisantes pour équilibrer le poids d'un lit de particules par unité d'aire de section droite, les particules se mettent à vibrer et son comportement à ceci d'un fluide. Ce seuil, nommé vitesse minimale de fluidisation, est très essentiel à la caractérisation des matériaux.

A la vitesse minimale de fluidisation (U_{mf}), le poids du lit est supporté par le débit d'air et la chute de pression devient constante. Les valeurs de la vitesse minimale de fluidisation (U_{mf}), sont calculées à partir de la perte de pression ΔP à travers le lit de particules (équation d'Ergun [28]).

$$\frac{\Delta P}{H_{lit}} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{\mu U_g}{(\varphi_p d_p)^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_m) \rho_g U_g^2}{\varepsilon_m^3 \varphi_d d_p} \quad (1.4)$$

où H_{lit} est la hauteur du lit de particules, d_p est le diamètre moyen des particules, U_g est la vitesse, μ est la viscosité dynamique et ρ_g est la masse volumique du gaz. Le premier terme à droite représente la perte de pression produite par les effets visqueux, c'est le terme dominant dans un régime laminaire. ($Re < 10$). Le second terme est la perte de pression due aux forces d'inertie, qui sont dominantes à grands nombres de Reynolds ($Re > 200$). Les valeurs des constantes (150 et 1,75) ont été obtenues à partir de la compilation de mesures faites par divers auteurs.

Cette perte de pression au minimum de fluidisation est juste suffisante pour équilibrer le poids des particules constituant le lit. En d'autres termes :

$$\frac{\Delta P_{mf}}{H_{lit}} = (\rho_s - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf})g \quad (1.5)$$

où ρ_s est la masse volumique des particules, ε_{mf} est la fraction de vide au minimum de fluidisation et g est l'accélération de pesanteur. Au minimum de fluidisation, la fraction de vide (ε_{mf}) du lit est légèrement supérieur à celle du lit fixe (ε_m).

La vitesse minimale de fluidisation (U_{mf}) est alors déduite de l'équation issue de l'égalité entre les deux équations. Il en résulte une équation du deuxième degré pour la vitesse minimale de fluidisation (U_{mf}).

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi_p} \left[\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right]^2 + 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi_p^2} \left[\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right] = d_p^3 \frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (1.6)$$

Ou

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi_p} Re_{p,mf}^2 + 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \varphi_p^2} Re_{p,mf} = Ar \quad (1.7)$$

Ar et $Re_{p,mf}$ étant respectivement le nombre d'Archimède et le nombre de Reynolds relatif au diamètre moyen de la particule (d_p) pour le minimum de fluidisation. Ces deux nombres se calculent par les expressions suivantes :

$$Ar = d_p^3 \frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (1.8)$$

$$Re_{p,mf} = \frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu} \quad (1.9)$$

La vitesse minimale de fluidisation (U_{mf}) est ensuite déduite de la valeur du nombre de Reynolds ($Re_{p,mf}$) par l'équation :

$$U_{mf} = \frac{Re_{p,mf} \mu}{d_p \rho_g} \quad (1.10)$$

La vitesse minimale de fluidisation (U_{mf}) augmente en fonction de la hauteur du lit (H_{lit}) et les valeurs obtenues dans la colonne rectangulaire présentent une évolution plus importante. Ce phénomène est vraisemblablement dû à l'électrisation du système (particules et parois de la colonne) pendant le processus de fluidisation. Cette électrisation dépend de beaucoup de paramètres, tels que : la taille des particules (d_p), la surface de contact, la vitesse du gaz (U_g), l'humidité relative (HR) etc.

Les colonnes rectangulaires présentent de grandes surfaces de parois ; en conséquence, elles produisent plus d'électricité statique. Par ce phénomène, lorsque la vitesse du gaz (U_g) est légèrement supérieure à la vitesse minimale de fluidisation (U_{mf}), les forces électrostatiques sont plus importantes que les forces hydrodynamiques, en produisant une cohésion entre les particules et par conséquent, une diminution de la perte linéique de pression ($\Delta P/L$) dans la colonne.

D'autres travaux ont été menés par Saleh et al [92] sur l'influence de la taille des particules sur l'agglomération et la densité des particules dans un lit fluidisé. Saleh s'est intéressé aussi sur les effets des propriétés physico-chimiques, tels que la viscosité et la mouillabilité des surfaces des particules solides dans un lit fluidisé [93].

1.2.2. Forces aérodynamiques et électrostatiques

Le transport, le stockage, les mélanges, l'écoulement, la densification des matériaux pulvérulents sont influencés par les forces inter particulaires qui prennent naissance lors de la friction ou du simple contact.

Trois types de forces s'exercent sur les matériaux granulaires :

- A. Les forces de la pesanteur
- B. Les forces de London-Van der Waals
- C. Les forces électrostatiques.

A. Forces de la pesanteur

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

$$P=mg \tag{1.11}$$

Avec $g=9.81 \text{ m/s}^2$.

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

B. Forces de LONDON – van der WAALS

Ce sont des forces de nature électrostatique qui s'exercent sur des molécules ou des particules électriquement neutres. Elles peuvent être estimées en faisant la somme de toutes les combinaisons possibles de paires d'atomes entre particules et s'écrivent :

$$F = \frac{\lambda}{a^7} \quad (1.12)$$

où a est la distance entre les deux centres et λ est une constante, qui dépend de la polarisation et de l'énergie d'ionisation des atomes impliqués.

Les forces de London – van der Waals étant inversement proportionnelles à la septième puissance de leur distance, cela entraîne un accroissement rapide de l'interaction pour les courtes distances.

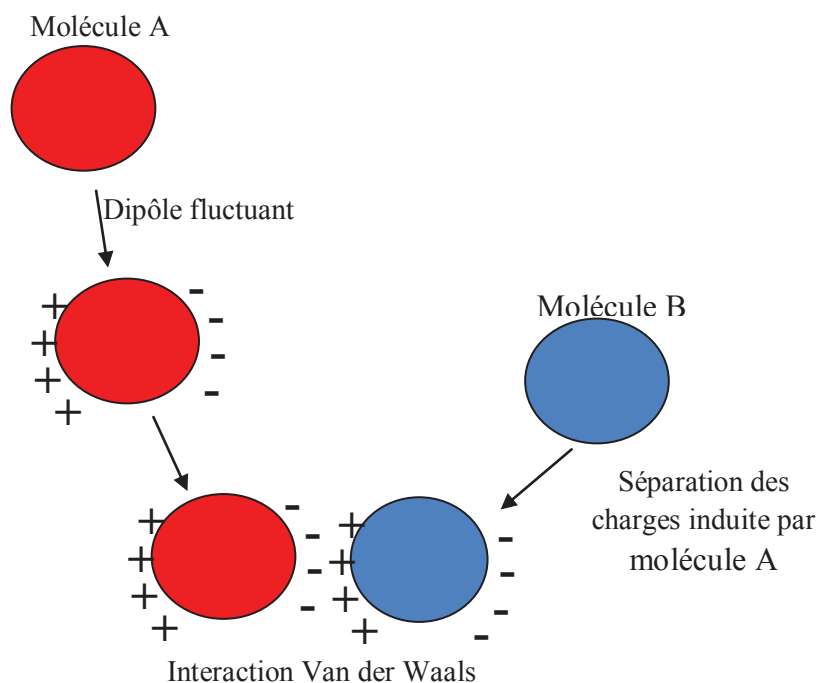


Figure 1.12 : Le phénomène physique derrière la force Van der Waals : polarisation électrique des atomes ou molécules neutres

Le tableau 1.1 donne la valeur des forces d'interaction entre des particules séparées par une distance de 50 Å, en fonction de leur rayon. Pour des particules de 1 mm, elles sont approximativement identiques. Ces constatations expliquent le fait que les fines particules aient plus tendance à s'agglomérer que les grosses.

Tableau 1.1 : Forces de Van der Waals et de pesanteur en fonction de la taille des particules, d'après Higuchi

Rayon [cm]	Forces de Van der Waals $a=50 \text{ Å}$ [cm/s ²]	Poids [g·cm/s ²]
10 ⁻⁵	3.3 x 10 ⁻⁴	4.1 x 10 ⁻¹²
10 ⁻⁴	3.3 x 10 ⁻³	4.1 x 10 ⁻⁹
10 ⁻³	3.3 x 10 ⁻²	4.1 x 10 ⁻⁶
10 ⁻²	3.3 x 10 ⁻¹	4.1 x 10 ⁻³
10 ⁻¹	3.3	4.1

C. Force de Coulomb

Ces sont des forces attractives ou répulsives qui s'exercent entre particules chargées. Si Q_a et Q_b sont les charges des deux particules et a la distance entre leurs centres, la loi de Coulomb permet d'écrire :

$$F = \frac{Q_a Q_b}{a^2} K \quad (1.13)$$

avec Nm^2/C^2 $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9$ et ϵ_0 étant la permittivité du vide. Le calcul de ces forces a été établi pour des éléments supposés sphériques de charges données, de tailles différentes et en proche contact.

Le tableau 1.2 montre une comparaison entre les forces électrostatiques et les forces de pesanteur, pour des petites particules.

Tableau 1.2 : Forces d'interaction électrostatique entre deux sphères chargées

Rayon [cm]	Forces [cm/s^2]	Poids [$\text{g}\cdot\text{cm/s}^2$] Densité=1
10^{-4}	9×10^{-6}	4.1×10^{-9}
10^{-3}	9×10^{-4}	4.1×10^{-6}
10^{-2}	9×10^{-2}	4.1×10^{-3}
10^{-1}	9	4.1
1	9×10^2	4.1×10^3

Par conséquent, entre deux particules de 1 μm de diamètre, avec le même maximum de charges, la force qui s'exerce est 1000 fois supérieure à celle de la pesanteur. En analysant les deux tableaux, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les forces de Van der Waals diminuent plus rapidement que les forces électrostatiques, quand la distance entre les particules augmente.
- Pour des particules de diamètre égal ou inférieur au micron, les forces de Van der Waals sont plus importantes que les forces électrostatiques, lorsque ces particules sont en contact.
- Quand le diamètre des particules diminue, les forces de van der Waals décroissent plus lentement que les forces électrostatiques.

L'importance de ces deux forces dépend de la taille des particules et les distances qui les séparent. Les propriétés d'écoulement des matériaux granulaires sont fonction des interactions particulières. Chaque particule se déplace en fonction de son poids, mais elles seront gênées dans leur mouvement par des contacts, soit avec les autres particules, soit avec les parois.

Les phénomènes d'adhésion et de cohésion peuvent être expliqués par les forces de Coulomb qui s'exercent soit entre deux particules, soit entre une particule et la paroi.

D. Cohésion due aux forces électrostatiques

La cohésion entre particules est due aux forces d'attraction de nature électrostatique qui prennent naissance lors du contact ou de la friction. Les charges électrostatiques formées au niveau des surfaces de contact se comporteront de diverses façons en fonction de la nature du matériau: conducteur ou isolant.

Lorsque deux isolants chargés de signe opposé se rencontrent, la cohésion a lieu et persiste. Les électrons ne peuvent pas se répartir et les force d'attraction ne s'annulent pas. Les charges restent localisées aux points de contact et de friction avec le matériau responsable de l'électrisation. Ces points sont souvent des arrêtes et protubérances.

E. Adhésion due aux forces électrostatiques

L'adhésion des particules sur une paroi dépend des forces capillaires d'adhésion, des forces d'interaction électrostatique et de Van der Waals. Le mouvement d'une particule dans un système d'écoulement est donc le résultat des forces d'adhésion F_1 et de la force de pesanteur F_2 . (figure 1.13)

Comme nous l'avons déjà souligné, les forces de Coulomb jouent un rôle prépondérant et il est bien évident que la nature du matériau support influencera de façon considérable ce phénomène.

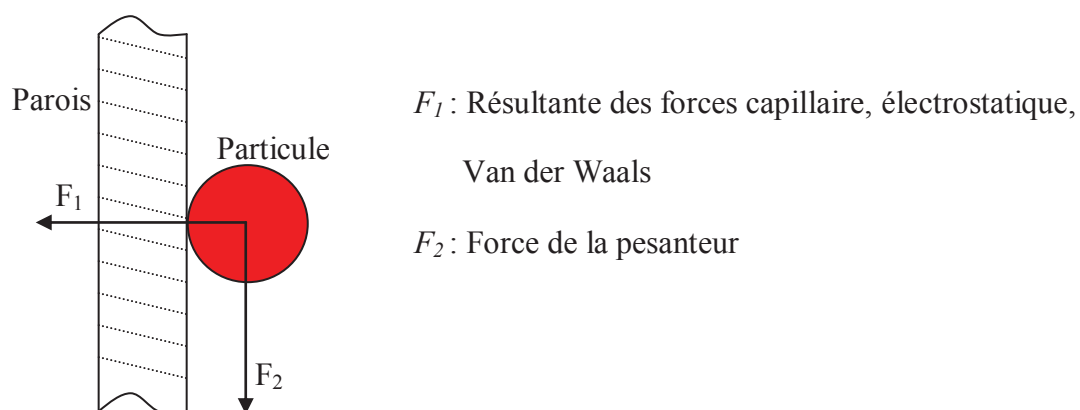


Figure 1.13 : Représentation de différentes forces intervenant dans l'interaction particule-parois

F. Forces aérodynamiques

Dans l'étude théorique du mouvement des particules en présence ou en absence de champ électrique, il faut tenir compte des forces aérodynamiques agissant sur ces particules.

L'équation des forces agissant sur une particule chargée électriquement est la suivante :

$$F_i = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad (1.14)$$

où :

F_i est la force d'inertie, F_{el} est la force exercée par un champ électrique uniforme d'intensité E_0 sur une particule chargée, de charge Q , située à une distance x de l'électrode.

F_a c'est la force aérodynamique et F_g la force gravitationnelle. La force d'inertie F_i est donnée par la relation :

$$F_i = W(\rho_s - K_\rho) \frac{dv}{dt} \quad (1.15)$$

où :

v c'est la vitesse de particule, K – coefficient de forme [94] (pour les particules sphériques $K = 0,5$), W – le volume d'une particule ayant la densité ρ_s ; ρ – densité de l'air.

La force aérodynamique s'exprime par la relation :

$$F_a = C_d \pi R^2 \rho v_r^2 / 2 \quad (1.16)$$

C_d étant en fonction du nombre du Reynolds, v_r – vitesse relative d'une particule dans l'air.

Friction de l'air, ou la résistance de l'air, est un exemple de frottement du fluide. La force de friction est dépendante de la vitesse. Cette dépendance peut être très compliquée, et seulement les cas spéciaux peuvent être traités analytiquement. À des vitesses très faibles des particules, la résistance de l'air est approximativement proportionnelle à la vitesse et peut être exprimée sous la forme :

$$F_f = -bv \quad (1.17)$$

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

1.2.3. Application à la charge de matériaux plastiques granulaires

Plusieurs études ont été déjà faites sur la triboélectrisation des matériaux granulaires. Au sein du Laboratoire de Champs Electrique Intense de l'Université Technique de Cluj-Napoca et de l'équipe de recherche en d'Electrostatique Appliquée d'Angoulême, Université de Poitiers, une installation de triboélectrisation à lit fluidisé a été construite [15](figure 1.14).

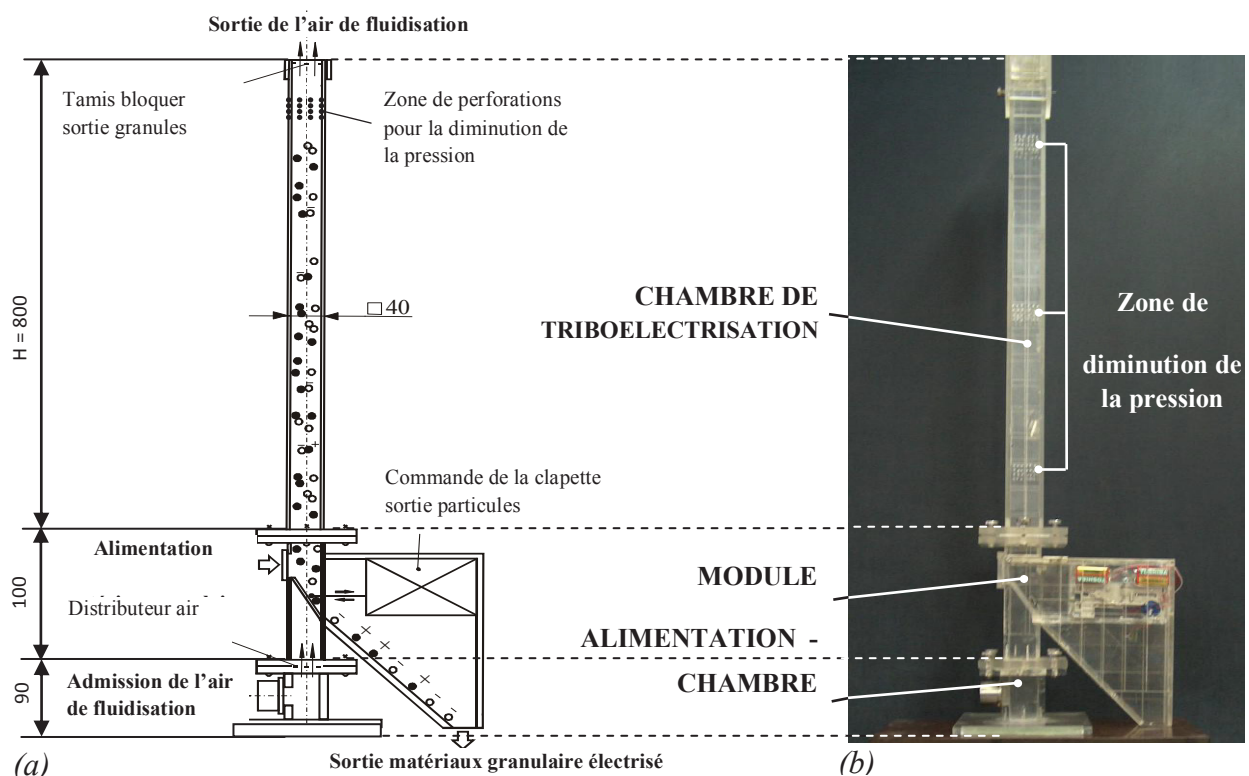


Figure 1.14 : Dispositif de triboélectrisation à lit fluidisé développé au sein du Laboratoire des Champs Electriques Intenses pour l'étude des matériaux plastiques recyclables: a- pièces composantes, dimensions et principe de triboélectrisation; b- l'aspect constructif du dispositif équipé d'une chambre de triboélectrisation en PMMA [16].

Le dispositif [16,17] présenté dans la figure 14 permet l'étude des phénomènes de fluidisation et de triboélectrisation des matériaux plastiques granulaires, ayant les caractéristiques suivantes :

- parois transparents en plexiglas pour l'étude visuel du processus de fluidisation et le mouvement des particules dans la chambre de triboélectrisation ;
- distributeur d'air facilement échangeable, en fonction des dimensions des particules ;

- chambre de triboélectrisation en PMMA facilement échangeable avec une autre, métallique (Al, Cu) ou en plastique (PVC, PE, PET, PP) ;
- fonctionnement indépendant pour des expériences de triboélectrisation et fonctionnement intégré avec le séparateur électrostatique [63] à chute libre pour des expériences de séparation ;
- solution constructive en trois modules, permettant l'adaptation du dispositif à des différentes conditions expérimentales : chambre d'air, module entrée – sortie des granules en plastique et chambre de triboélectrisation.

1.3. Installations de séparation tribo-électrostatique de matériaux granulaires

1.3.1. Etudes de laboratoire

Le séparateur électrostatique à chute libre TESS (TriboElectroStatic Separator) présenté sur la figure 1.15 a été conçu pour la recherche fondamentale et applicative dans le domaine de la triboélectrisation, de la séparation des matériaux granulaires plastiques [18,19,59,60] et de la purification des minerais [20].

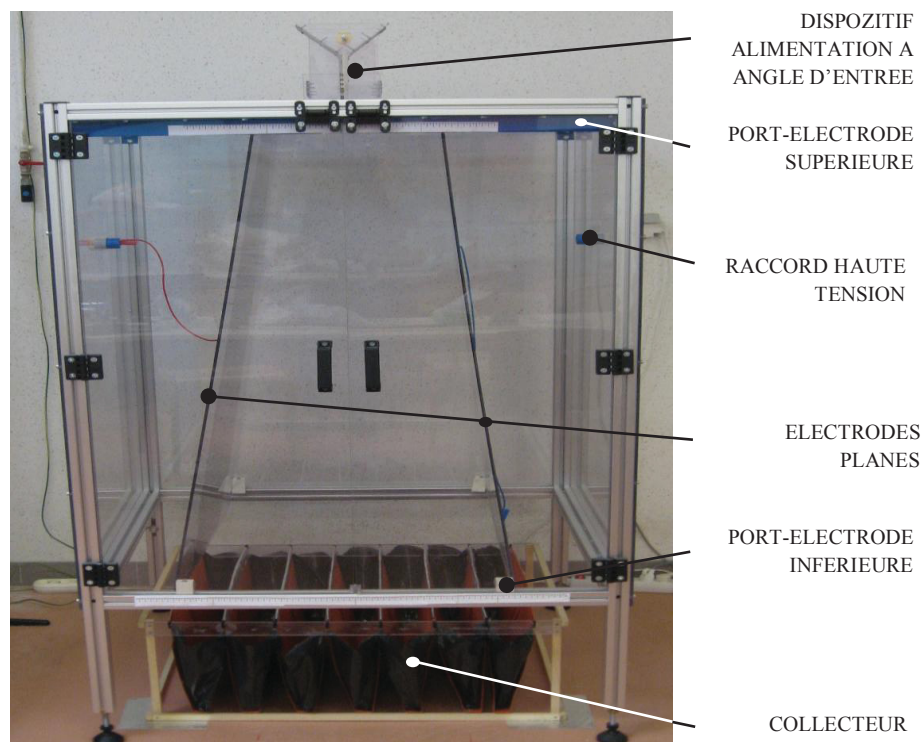


Figure 1.15 : Séparateur tribo électrostatique à chute libre développé au sein du Laboratoire d'Electrostatique d'Angoulême, pour l'étude de la séparation des matériaux plastiques granulaires[16].

Le développement du séparateur TESS satisfait plusieurs besoins techniques:

- construction modulaire : module de triboélectrisation, chambre de séparation et module électrique pour faciliter l'utilisation dans des conditions différentes;
- zone active étendue (900x500x1400) mm pour obtenir de produits de séparation de haute pureté;
- module de triboélectrisation permettant d'attacher différents dispositifs d'électrification;
- distance réglable de 50 mm à 600 mm entre les électrodes dont les dimensions sont (200x1000) mm;
- chambre de séparation équipée de parois transparentes pour visualiser le processus de séparation;
- tension d'alimentation des électrodes jusqu'à 200 kV en utilisant deux sources haute tension réglables et de polarité opposée.

1.3.2. Applications industrielles

Hamos Gmbh est un leader mondial dans le domaine de la séparation électrostatique des matériaux granulaires. [10,45,46] Son séparateur EKS (figure. 1.16) est largement utilisé dans l'industrie du recyclage [44].

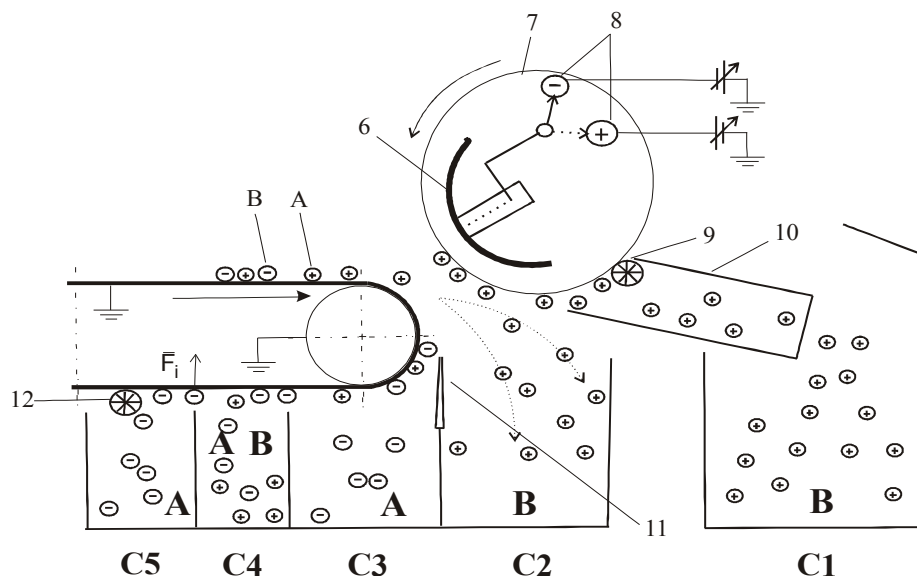


Figure 1.16 : Schéma de principe de la zone de séparation électrostatique de séparateur EKS-HAMOS: A, B – granules en plastique; 6- électrode haute tension; 7- cylindre métallique rotatif; 8- contacts haute tension; 9,12- brosses pour enlever le matériau; 10- tube collecteur; 11- palette déflecteur; C1,..., C5- collecteurs [68].

Le mélange de plastiques est introduit par un convoyeur vibrant dans l'unité de charge tribo-électrique [69]. Le mélange de granules de plastique chargés passe par un champ électrique intense où est réalisée 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 [67,68].

Le séparateur V Carpco [11,12] (figure 1.17), est un représentant du groupe des séparateurs tribo électrostatiques à chute libre, de grande capacité, pour la séparation de 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, ajustables dans la gamme 0-60 kV.

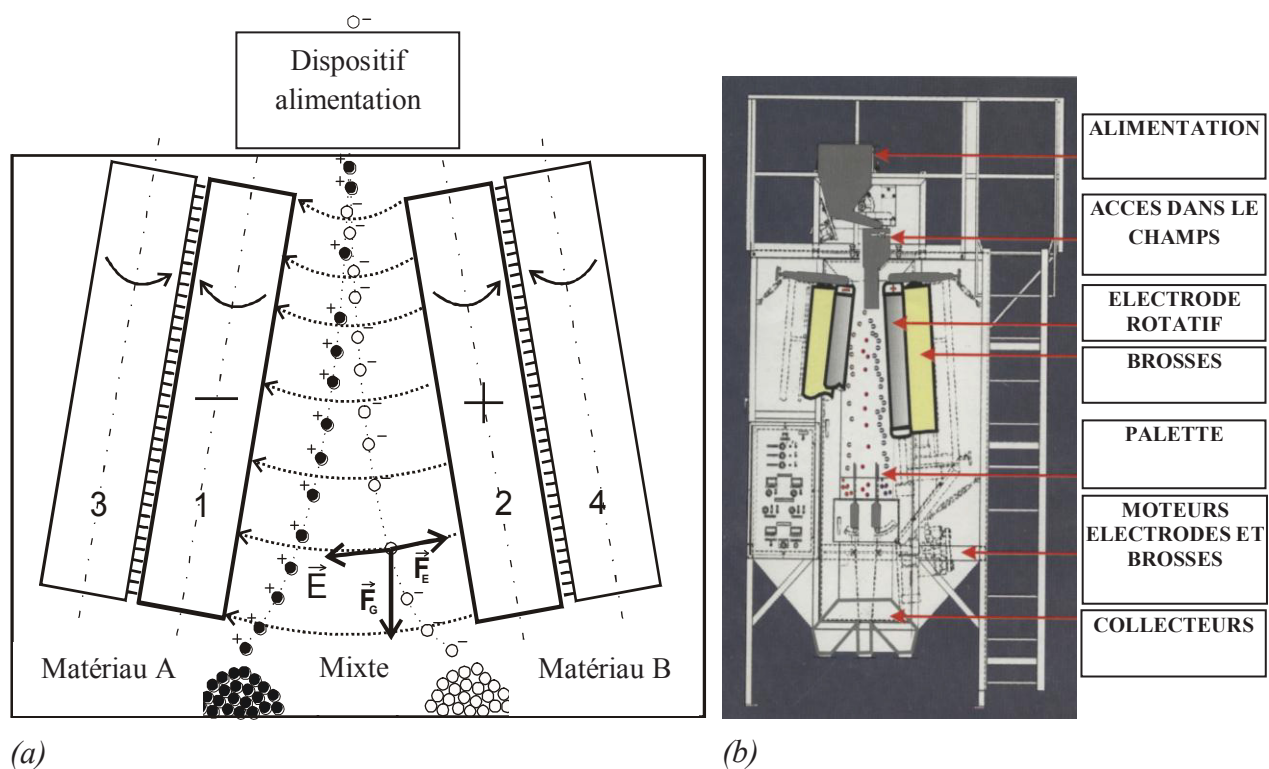


Figure 1.17 : Séparateur tribo électrostatique à chute libre Carpco[11]

Les granules sont chargées électriquement par un dispositif de type cyclone. Elles s'accumulent après dans un dispositif de stockage temporaire pour assurer un flux constant de particules à l'entrée du séparateur, dans les conditions où le matériau est envoyé à débit variable.

Les granulés sont placés dans la chambre de séparation par l'intermédiaire d'un élément dont le rôle est de créer une couche fine de matériau nécessaire pour une bonne séparation. Sous l'action de la gravité et des forces électrostatiques, les granules chargés avec des charges différentes sont déviés vers les deux électrodes connectées à deux sources de haute tension variable. Ceux qui ont une charge positive sont déviés vers l'électrode de polarité négative, et ceux qui ont une charge négative, vers l'électrode positive. Les particules qui ne sont pas suffisamment chargées ne seront pas attirées par les électrodes et vont tomber dans la région centrale. Elles feront l'objet d'une nouvelle séparation [88,89]. Les granules légers ou très fortement chargés qui restent collés sur les électrodes sont retirés de leur surface par des brosses rotatives.

La charge acquise par les particules dans les dispositifs utilisés actuellement n'est pas homogène : certaines particules arrivent à se charger convenablement et pourront donc être séparées dans un champ électrique assez intense, d'autres sortent des dispositifs de charge triboélectriques avec un niveau de charge insuffisant. L'état de charge des particules pourrait être amélioré en augmentant la durée du processus de charge, au détriment de la productivité du procédé.

Pour une durée de charge fixée, la quantité de charge effectivement acquise par les particules peut varier d'une façon significative avec la température et l'humidité ambiantes [20], ainsi qu'avec l'état de surface des matériaux. L'efficacité du processus de charge pourrait être améliorée en introduisant des opérations de conditionnement thermique des matériaux et en contrôlant l'atmosphère ambiante, mais ces opérations augmenteraient le coût du procédé.

La productivité des installations utilisées pour la séparation des matériaux isolants granulaires est assez faible et la qualité des produits obtenus ne répond pas toujours aux exigences des clients. Les procédés actuels sont très peu robustes aux variations aléatoires des conditions ambiantes et des propriétés physico-chimiques des matériaux à séparer.

Conclusions

1. Les phénomènes tribo-électriques étant extrêmement complexes et mal expliqués, l'approche expérimentale est indispensable à l'étude des applications possibles dans le domaine de la séparation des matériaux granulaires en utilisant les forces des champs électriques.
2. Il existe une multitude de dispositifs de charge triboélectrique (rotatifs, à vibrations, à lit fluidisé) dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières.
3. Les études réalisées par d'autres chercheurs sur des modèles de laboratoires montrent que les lits fluidisés pourraient représenter une solution viable pour la charge tribo-électrique des matériaux plastiques granulaires, ce qui justifie l'orientation de la thèse sur ce type de dispositifs.
4. Le rendement des installations de séparation électrostatique utilisant des dispositifs de charge tribo-électrique est lié à l'efficacité du processus de charge. La proposition d'une solution originale à ce problème est un des objectifs de ce travail.

2. CHARGE DE MATERIAUX GRANULAIRES DANS LES INSTALLATIONS DE TRANSPORT PNEUMATIQUE

Les expériences présentées dans le cadre de ce chapitre ont comme objectif l'évaluation des propriétés électriques des matériaux granulaires par rapport à leur déplacement dans des installations de transport pneumatique [85,101,102,103,104]. Une meilleure connaissance de ces propriétés, notamment de la charge électrique accumulée pendant le processus de transport, permettra d'interpréter certains phénomènes électrostatiques et électro-fluido-dynamiques qui pourraient affecter l'efficacité des procédés de séparation électrostatique qui font l'objet de ce travail.

2.1. Installation de transport pneumatique pour les matériaux granulaires

Les phénomènes tribo-électrostatiques liés aux collisions entre deux particules ou entre les particules et les parois des installations de transport pneumatique ont déjà fait l'objet d'investigations scientifiques [5,64]. Le but de notre travail est d'évaluer les effets de deux facteurs qui influencent la charge des particules dans ces installations: le débit de matériau et le débit d'air dans une conduite équipée d'un aspirateur de type cyclone.

L'étude concerne le comportement des particules millimétriques d'ABS et de HIPS, deux matériaux granulaires provenant des déchets informatiques. Les essais ont été réalisés avec des conduites en PVC et en Aluminium.

2.1.1. Description de l'installation expérimentale

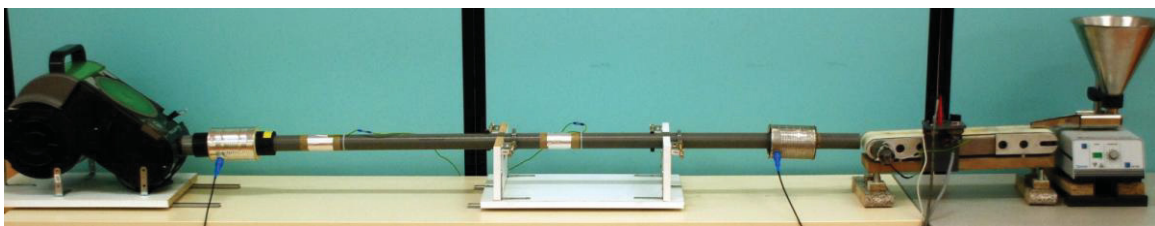


Figure 2.1: Installation expérimentale pour la charge triboélectrique des granules d'ABS et de HIPS

L'installation utilisée pour les expériences (figure 2.1), peut être divisée en trois entités fonctionnelles distinctes : la partie d'admission des matériaux granulaires, le dispositif de transport et l'instrumentation de mesure.

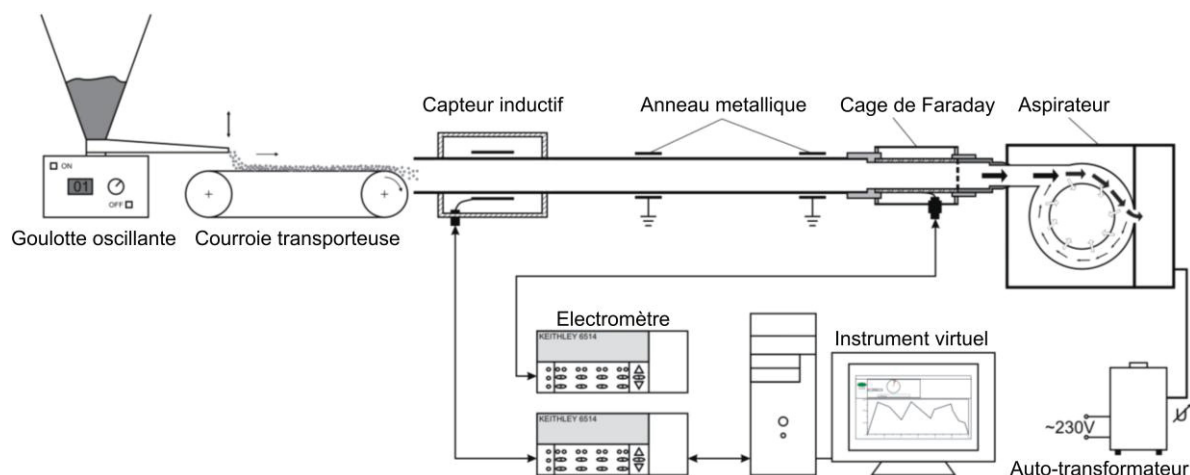
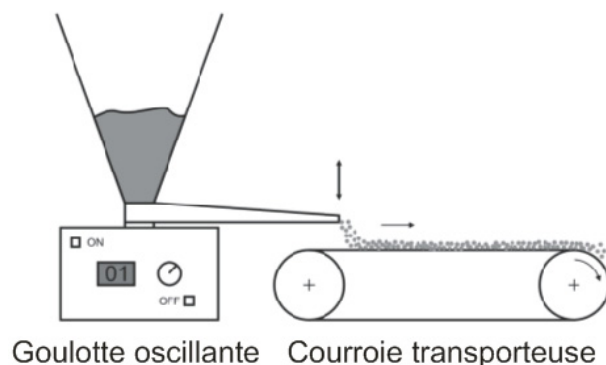


Figure 2.2: Représentation schématique de l'installation expérimentale pour l'étude du processus de charge des matériaux granulaires.

L'admission des matériaux granulaires est assurée par une goulotte oscillante et une courroie transporteuse entraînée par un moteur de courant continu alimenté d'un générateur de tension continue variable (figure 2.3.a). Le débit de matériaux et la vitesse de la bande transporteuse sont variables et ont été corrélés pour assurer un débit constant d'admission pendant la durée de chaque essai : 12 secondes. Le matériau est déposé à une extrémité de la courroie transporteuse et aspiré vers le tuyau qui se trouve à une distance < 1 cm de l'autre extrémité.



(a)



(b)

Figure 2.3 : Le processus d'aspiration des matériaux granulaires : photo (a) et schéma (b).

Le transport pneumatique se produit dans un tuyau droit de longueur de 1,5 m et de diamètre intérieur de 40 mm. Les tuyaux utilisés pour les essais sont en PVC et en aluminium (figure 2.4.a). L'air est entraîné par un aspirateur cyclone modifié, modèle Rowenta R07165. La tension d'alimentation de l'aspirateur est réglée par un autotransformateur, ce qui permet de contrôler le débit d'air aspiré.

Les mesures de charge sont effectuées dans différentes positions sur les tuyaux (figure 2.4.b) à l'aide de deux cages de Faraday.

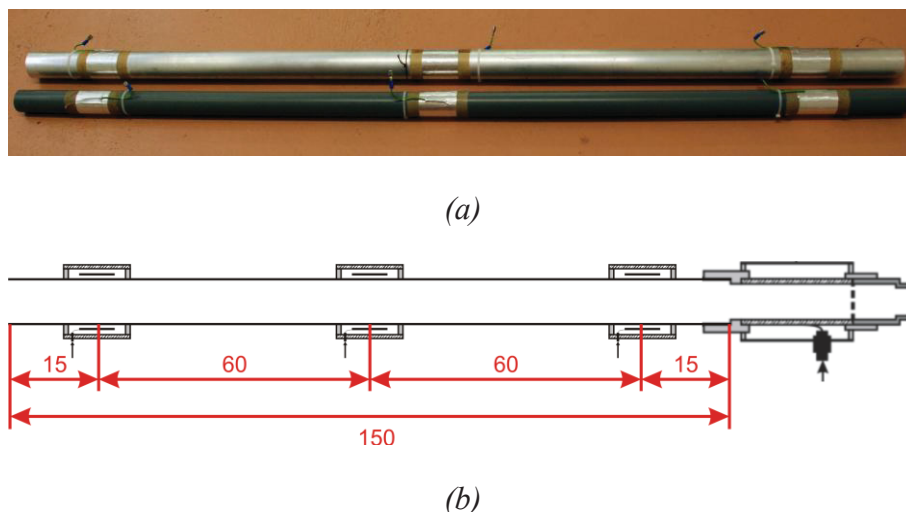


Figure 2.4 : Points de mesure de la charge électrique : photo (a) et schéma (b).

Les cages sont reliées à un électromètre Keithley 6415, fonctionnant en coulomb mètre et contrôlé par un instrument virtuel développé en utilisant le logiciel LabVIEW 5.0 [86]. L'instrument virtuel [83] est en effet un outil informatique permettant l'acquisition et le traitement des données. Le coulomb mètre mesure la charge qui s'accumule dans la cage de Faraday pendant des intervalles de temps Δt dont la durée peut être programmée à partir d'un « potentiomètre » se trouvant sur le panneau frontal de l'instrument virtuel (Fig. 2.5). Cette durée doit être suffisamment courte (2 à 5 s), pour que le coulomb mètre ne sature pas.

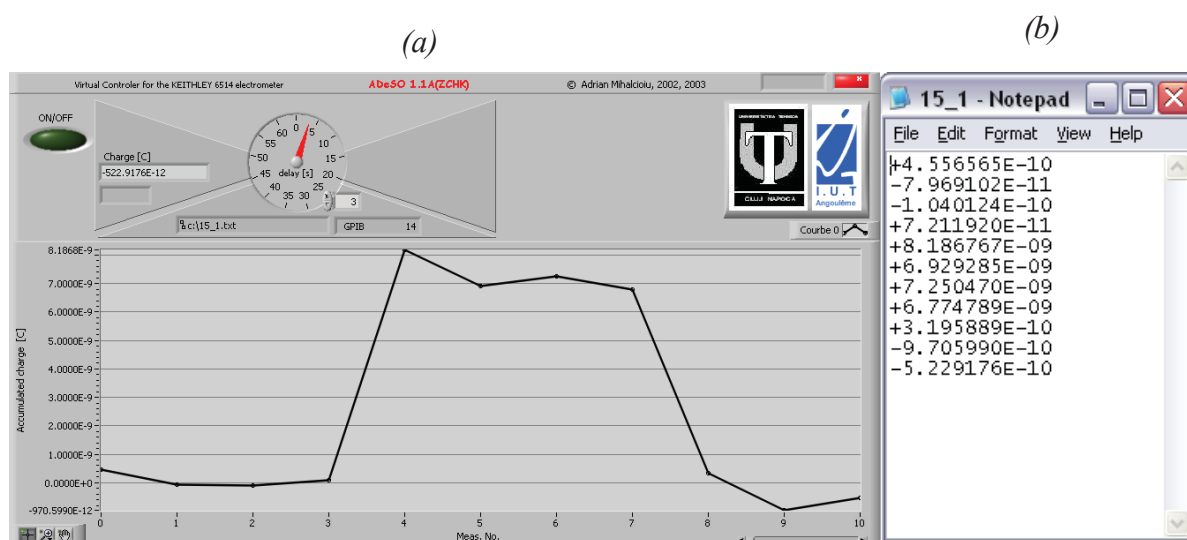


Figure 2.5 : L'instrument virtuel: le panneau frontal (a) et le fichier contenant les données de mesure (b)

Dès qu'il a enregistré la valeur de cette charge, l'instrument virtuel déclenche un nouveau cycle de mesure Δt , après avoir commandé la mise à la terre de la cage de Faraday. La somme des valeurs enregistrées par l'instrument virtuel pendant n cycles de mesure entre le moment initial $t = 0$ et le moment $t = n\Delta t$ donne la charge globale des particules accumulées dans la cage de Faraday.

2.1.2. Méthodes de mesure

La mesure de la charge électrique est un processus affecté par les conditions ambiantes et soumis à des nombreuses erreurs de manipulation. L'interprétation des résultats ne peut pas se faire sans bien comprendre la physique du processus de mesure et les hypothèses qui ont été faites.

A. Mesure de la charge électrique induite dans la paroi du tuyau

La mesure de la charge électrique qui s'accumule dans les tuyaux isolants composants d'un système de transport pneumatique peut être effectuée par un capteur utilisant le phénomène d'induction électrostatique [8,111]. Cette installation expérimentale a déjà été utilisée pour étudier le processus d'induction de la charge électrique par un écoulement des particules millimétriques d'ABS-PC [27,38,105].

Du point de vue constructif, le dispositif de mesure est constitué d'une électrode de mesure de 6 cm en longueur (bande en aluminium d'épaisseur de 0.5 mm) séparé de tuyau par une bande isolante en téflon d'épaisseur de 0.5 mm (figure 2.6).

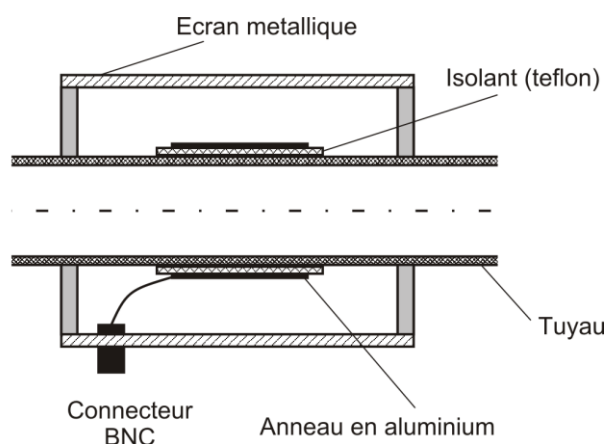


Figure 2.6: Dispositif de mesure de la charge électrique induite dans la paroi d'un tuyau isolant.

L'électrode de mesure est protégée par un écran métallique de l'influence des champs électriques extérieurs. Elle est connectée par un câble BNC à un électromètre Keithley, fonctionnant en coulomb mètre.

La charge électrique dans la zone de mesure (figure 2.7) induit dans l'électrode de mesure une charge égale et de signe opposé. Considérons une particule non chargée qui entre dans la zone vue par l'électrode de mesure à l'instant $t = t_0$, subit une collision avec la paroi du tuyau isolant à l'instant $t = t_1$ et acquit une charge négative $Q_p = -Q_1$. Comme $Q_i = Q_1$, la charge totale vue par le capteur est zéro. Dès que la particule chargée sort de la zone de mesure (c'est-à-dire à $t = t_2$), l'électromètre connecté au capteur mesure la charge $Q_i = Q_1$.

Après le passage d'une deuxième particule, qui échange une charge Q_2 avec la paroi du tuyau, l'électromètre mesure une charge $Q_1 + Q_2$ (à $t = t_5$). Au passage d'une troisième particule chargée, portant déjà la charge $Q = -Q_3$, l'instrument indique une charge totale $Q_i = Q_1 + Q_2 - Q_3$ (à $t = t_7$). Si cette particule traverse la zone vue par le capteur sans toucher la paroi du tuyau, l'instrument va montrer la valeur $Q_i = Q_1 + Q_2$, à $t = t_8$. Si une autre particule chargée $Q = -Q_4$ arrive plus proche de la paroi, qui porte une charge de signe opposé, elle est attirée par celle-ci. Dans ce cas, à $t = t_{11}$, l'instrument mesure $Q_i = Q_1 + Q_2 - Q_4$.

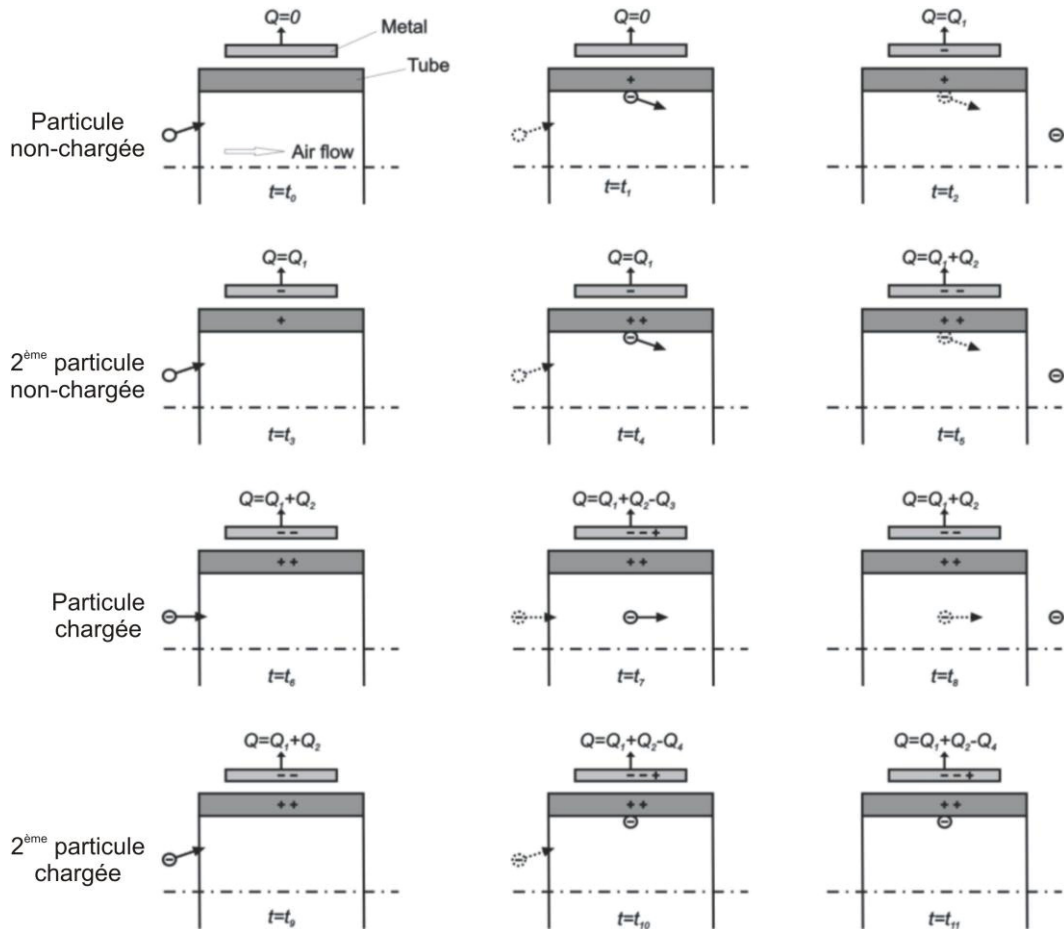


Figure 2.7 : Le principe de la mesure de charge triboélectrique induite par des particules millimétriques dans la paroi d'un tube isolant

D'une manière générale, la charge Q_i mesurée par l'électromètre après l'aspiration d'une certaine quantité de matériau pendant un intervalle de temps t_m bien défini est égale à la somme algébrique de toutes les charges acquises par la zone du tuyau vue par le capteur, et la charge des particules colées sur la paroi.

B. Mesure de la charge électrique des particules

Un dispositif plus proche de la cage de Faraday classique (figure 2.8) a été conçu pour faire des mesures sur le même processus de triboélectrisation mais en utilisant une méthode différente.

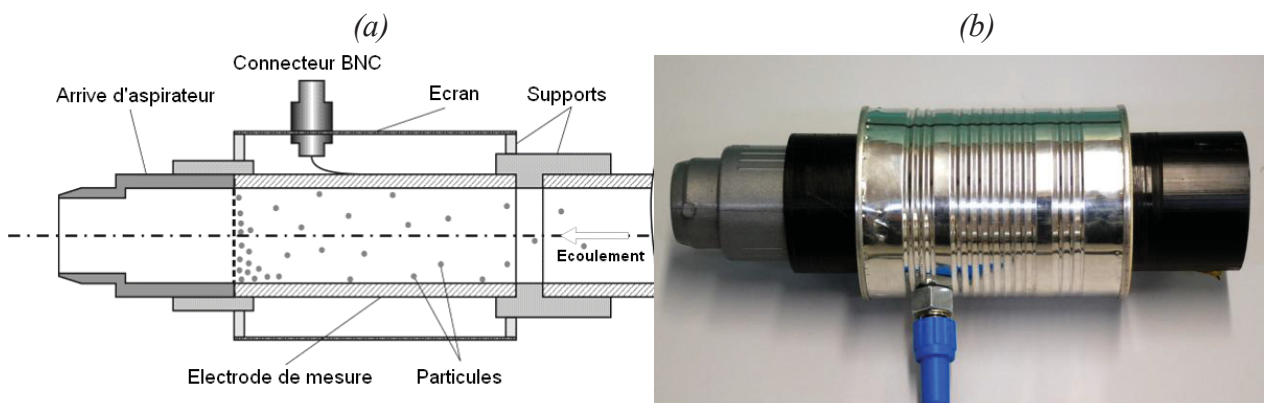


Figure 2.8 : L'aspect de la cage de Faraday utilisé pour mesurer la charge des particules :
Représentation schématique (a) et photo du dispositif (b)

L'électrode de mesure est composée d'un tuyau métallique (figure 2.8.a) d'une longueur de 12 cm et de même diamètre intérieur que les tuyaux employés pour transport. A une extrémité, le dispositif est équipé d'un tamis métallique, dont le maillage est suffisamment fin pour que les particules entraînées par le flux d'air restent à l'intérieur de la cage. L'électrode de mesure est fixée par deux supports cylindriques en plastique utilisés aussi pour fixer l'écran relié à la terre.

Les dimensions de ce dispositif imposent des restrictions sur la quantité maximale de matériau qui peut être aspirée pendant un essai. Cette quantité, limitée aussi par les charges pneumatiques non négligeables qu'elle génère, a été fixée à 20 g.

2.1.3. Méthode des plans des expériences

Cette méthode permet la modélisation et l'optimisation d'un processus [39,42]. Le comportement d'un système peut être défini en exprimant les n variables de sortie y_i , $i = 1, \dots, n$, comme fonctions des variables d'entrée u_i , $i = 1, \dots, m$, qui peuvent être contrôlées (figure 2.9).

Dans la conception d'un plan d'expériences il faut bien choisir les variables d'entrée (les facteurs) qui ont un effet important sur le processus. Les variables de sortie (les réponses du système) sont obtenues par mesure ou calcul et caractérisent la qualité du processus.

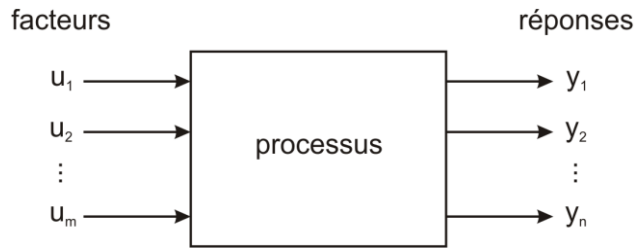


Figure 2.9 : La représentation schématique d'un processus quelconque

Chaque réponse y_i peut s'exprimer sous la forme d'une fonction polynomiale de variables u_i , comme suit :

$$y = c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ij} u_i^2, \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (2.1)$$

Pour chaque facteur u_i , une variable centrée réduite x_i est définie avec la relation :

$$x_i = \frac{(u_i - u_{i0})}{\Delta u_i} = u_i^* \quad (2.2)$$

où

$$u_{i0} = \frac{(u_{i\max} + u_{i\min})}{2} ; \quad \Delta u_i = \frac{(u_{i\max} - u_{i\min})}{2} \quad (2.3)$$

La fonction de réponse devient :

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,i} x_i^2, \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (2.4)$$

où x_i a la valeur -1 pour le niveau inférieur $u_{i\min}$ du facteur et la valeur +1 pour le niveau supérieur du même facteur $u_{i\max}$.

Le problème d'optimisation d'un processus ne peut être abordé qu'en utilisant des plans d'expériences permettant d'exprimer la réponse par un modèle polynomial de second degré. Les plans composites centrés sont inclus dans cette catégorie ; leur construction consiste à rajouter des points en étoile à partir d'un plan factoriel complet (figure. 2.10). 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.

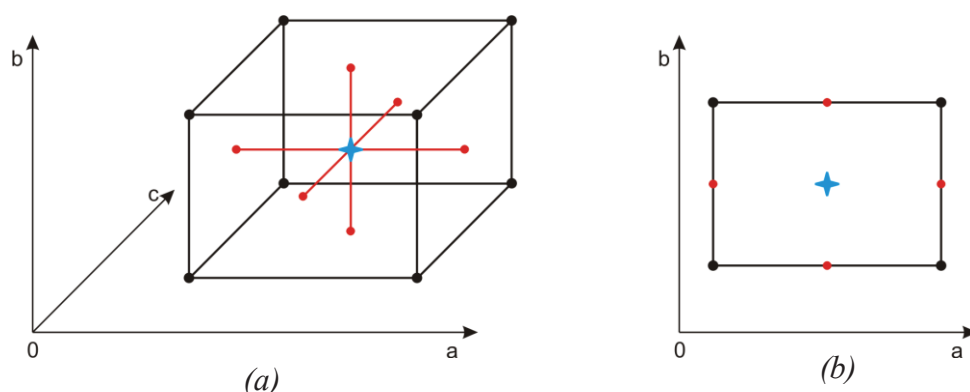


Figure 2.10 : Représentation graphique des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences composite pour un domaine défini par 3 facteurs (a) ou 2 facteurs (b)

Le domaine de variation d'un facteur est représenté par un segment, et le point de mesure est marqué par un point. L'étoile marque le centre du domaine total de la variation, correspondant du centre de chaque facteur. Le nombre total des essais N , pour K facteurs est trouvé avec la relation :

$$N = 2^k + 2 \cdot k + 3 \quad (2.5)$$

2.2. Transport des granules isolants dans des tubes en PVC et Aluminium

Les matériaux qui font l'objet de ces études [27] sont des plastiques utilisés couramment pour la fabrication d'équipements informatiques (imprimantes, claviers). Il s'agit de particules en ABS et en HIPS provenant de déchets informatiques traités par l'entreprise APR2, Bonnières-sur-Seine.

Afin d'assurer la reproductibilité de résultats il est nécessaire d'utiliser des matériaux appartenant à une classe granulométrique bien définie. Compte tenu des applications en vue, la classe 1..2 mm a été considérée comme la plus représentative. L'aspect de matériaux granulaires étudiés est montré sur la figure 2.11.

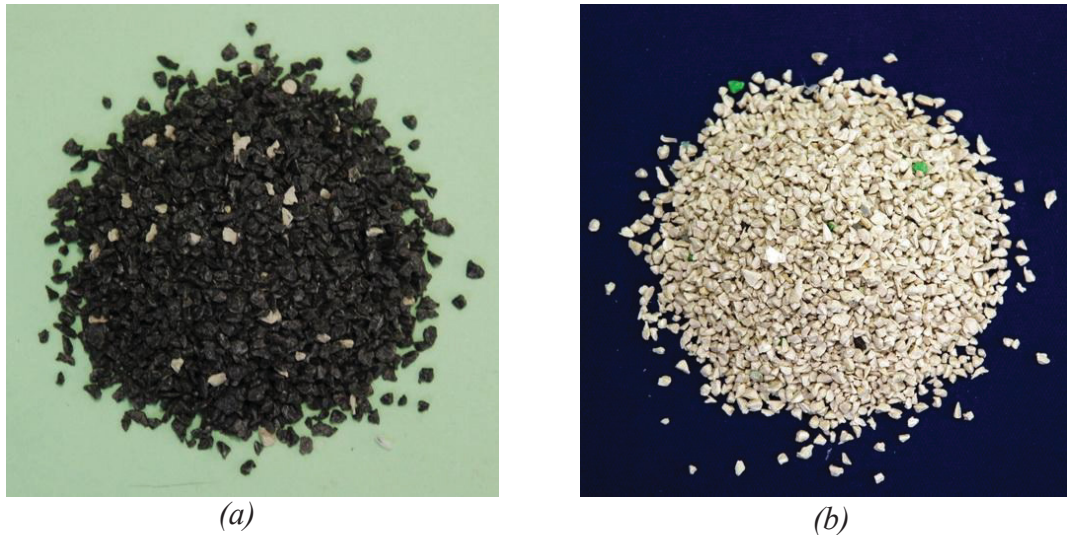


Figure 2.11 : Aspect des granules d'ABS (a) et de HIPS (b) appartenant à la classe granulométrique 1..2 mm.

L'ABS est un copolymère polyphasé constitué d'un copolymère acrylonitrile et styrène, avec des nodules de butadiène noyés dans la matrice acrylonitrile/styrène. Les proportions de ces trois monomères peuvent être modifiées pour optimiser les propriétés du polymère résultant. L'ABS présente une surface lissée, une bonne sensibilité thermique et résistance à l'impact. La présence du styrène dans sa composition indique que le matériau est inflammable. La densité volumique ρ est de 1020..1280 kg/m³ et la permittivité électrique relative $\epsilon_r = 3,1..3,4$. Ce matériau est utilisé pour la fabrication des carcasses d'ordinateurs et des claviers [6,31].

Le HIPS s'obtient par l'ajout de caoutchouc pendant la polymérisation du polystyrène. Le matériau a des propriétés similaires à l'ABS et est utilisé pour la fabrication des carcasses d'imprimantes, photocopieurs et des cartouches de tonner [34]. La densité volumique $\rho = 1020..1060$ kg/m³ et la permittivité électrique relative $\epsilon_r = 2,5..2,6$.

Le matériau granulaire a été aspirée dans les tuyaux à des débits d'alimentation m , compris entre $m_{min} = 50$ g/min et $m_{max} = 100$ g/min. L'aspiration de 100 g/min nécessitait un débit d'air ϕ supérieur à $\phi_{min} = 21$ dm³/s. Avant chaque nouvelle expérience, le tuyau a été déchargé en le connectant à la terre en plusieurs points sur une durée suffisamment longue pour que le potentiel de surface décroisse à une valeur inférieure à 10% de son niveau initial.

Quand l'objectif est l'optimisation d'un processus, la méthode de plans d'expériences [39,42], recommande l'adoption d'un modèle quadratique:

$$y = f(x_i) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{12}x_1x_2 \quad (2.6),$$

où y est la réponse du processus et x_i est la valeur normalisée centrée pour chaque facteur u_i .

$$x_i = (u_i - u_{ic}) / \Delta u_i = u_i^* \quad (2.7)$$

avec :

$$u_{ic} = (u_{i\max} + u_{i\min}) / 2, \Delta u_i = (u_{i\max} - u_{i\min}) / 2 \quad (2.8)$$

Pour les facteurs pris en compte dans la présente étude, à savoir, le débit massique des granules transportés m et le débit volumique d'air ϕ , le modèle quadratique de la réponse q , c'est à dire la charge acquise par les particules, prendra la forme suivante:

$$q = a_0 + a_1 m^* + a_2 \phi^* + a_{12} m^* \phi^* + a_{11} n^{*2} + a_{22} \phi^{*2} \quad (2.9)$$

Dans la figure 2.12 est représenté un exemple typique de $q_p(t)$. Les courbes sont enregistrées par l'électromètre relié à la sonde à induction électrostatique, situé à l'entrée (zone A) et dans le centre (zone B) du tuyau de transport. Les résultats expérimentaux des mesures réalisées avec la cage de Faraday pour 11 essais avec des particules de HIPS en tube d'aluminium sont donnés dans le tableau 2.1. Avec ces données, les modèles mathématiques des réponses q et q/m obtenus avec le logiciel Modde 5.0 sont :

$$q[\text{nC}] = -358.79 - 66.74m^* - 38.01\phi^* - 3.18m^* \phi^* + 3.01m^{*2} + 13.73\phi^{*2} \quad (2.10)$$

$$q/m[\text{nC/g}] = -23.91 + 3.66m^* - 2.7\phi^* + 0.67m^* \phi^* - 0.98m^{*2} + 0.86\phi^{*2} \quad (2.11)$$

Tableau 2.1 : Charge mesurée q et charge massique q/m des particules de HIPS aspirées dans le tuyau d'aluminium, pour un plan d'expériences composite comportant 11 essais

Essai No. [-]	ϕ [dm ³ /s]	m [g/min]	q [nC]	q/m [nC/g]
1	21	50	-245.7	-24.57
2	33	50	-312.6	-31.26
3	21	100	-369.74	-18.487
4	33	100	-449.37	-22.468
5	21	75	-299.64	-19.976
6	33	75	-381.2	-25.51
7	27	50	-281.3	-28.13
8	27	100	-420.98	-21.049
9	27	75	-359.6	-23.97
10	27	75	-361.24	-24.08
11	27	75	-364.8	-24.32

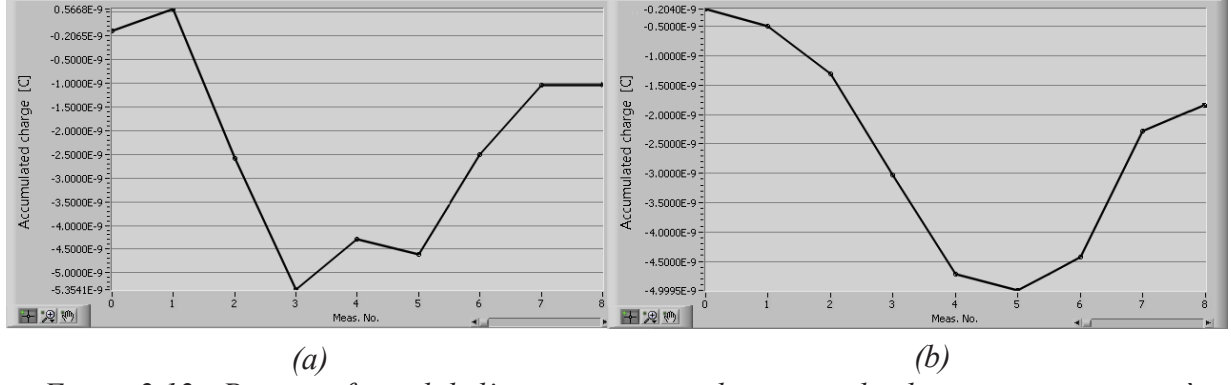


Figure 2.12 : Panneau frontal de l'instrument virtuel montrant la charge q_p par rapport à temps en utilisant deux probes électrostatiques par induction placées dans les points A et B du tuyau

Les deux modèles reproduisent bien les données expérimentales ($R^2 = 0,994$), et permettent une prédiction très précise de q et q/m ($Q^2 = 0,959$ et $0,963$, respectivement) dans toutes autres conditions de fonctionnement (figure 2.13, (a) et (b)). Tous les coefficients dans le modèle (2.11) sont statistiquement significatifs. Comme on peut le voir sur la figure 2.14.a, aussi, la valeur absolue de q/m augmente avec le débit d'air ϕ , dans les limites du domaine expérimental étudié. Au contraire, l'augmentation d'admission du matériau m , entraîne une diminution significative du q/m , comme le montre la figure 2.14.b. Il est probable que pour des débits massiques de granules transportés plus importants, une partie des particules ont une charge très faible ou inexistante, parce qu'ils ont moins d'impacts avec les parois du tuyau.

Ces résultats sont bien corrélés avec les mesures par sonde électrostatique (tableau 2.2). La charge induite q_p , ainsi que le rapport entre q_p et la masse des particules m sont modélisés par les polynômes quadratiques suivantes (figure 2.15):

$$q_p [nC] = 99.13 + 23.91m^* + 6.85\phi^* - 4.08m^*\phi^* - 1.57m^{*2} - 2.97\phi^{*2} \quad (2.12)$$

$$q_p / m [nC] = 6.58 - 0.65m^* + 0.49\phi^* - 0.38m^*\phi^* + 0.14m^{*2} - 0.13\phi^{*2} \quad (2.13)$$

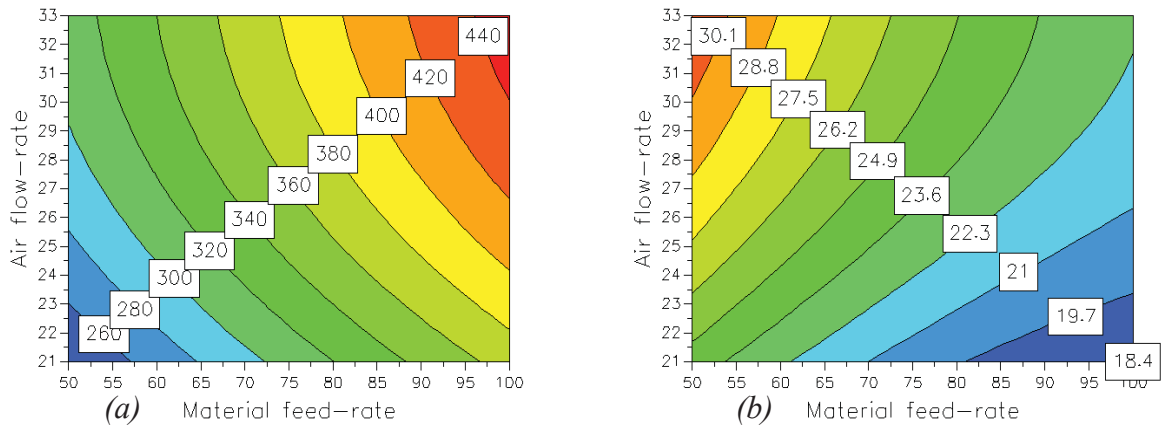


Figure 2.13 : Iso-contours de la charge q [nC] (a) et de la charge massique q/m [nC/g] (b) prédits par le logiciel MODDE 5.0 dans le cas des particules de HIPS convoyées par le tuyau d'aluminium ; le débit massique des granules transportées m et le débit volumique d'air ϕ sont exprimés en [g/min] et [dm^3/s]

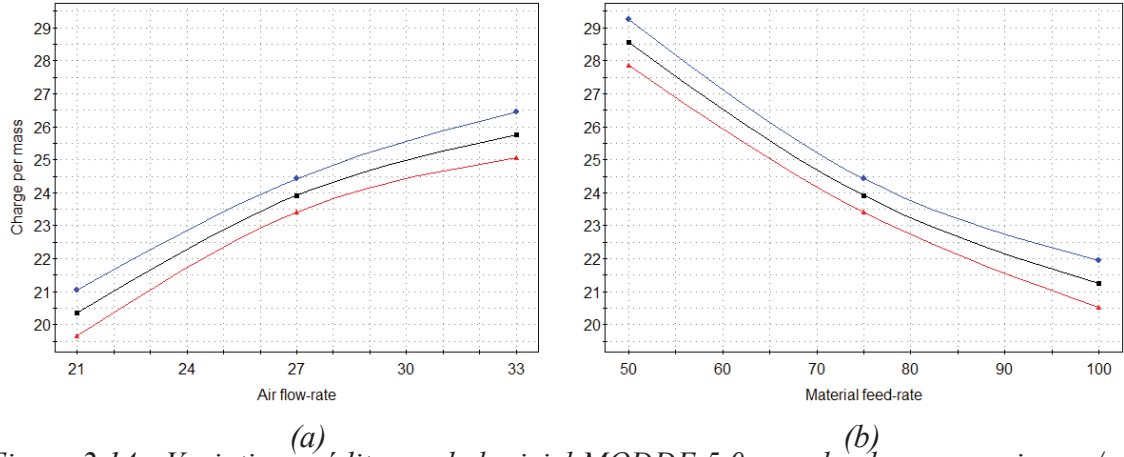


Figure 2.14 : Variation prédictive par le logiciel MODDE 5.0 pour la charge massique q/m [nC/g] des particules de HIPS convoyées dans le tuyau d'aluminium, en fonction du débit massique des granules transportées m (b) et du débit volumique d'air ϕ (a) exprimés en [g/min] et [dm³/s]

Le rapport q_p/m le plus élevé est obtenu pour un débit volumique d'air de $\phi = 33$ dm³/s, et un débit massique des granules transportées $m = 50$ g/min: $q_p/m = 8,22$ nC/g. Cette valeur représente environ 1/3 de celle enregistrée dans la cage de Faraday, à savoir $q/m = 28,08$ nC/g. Cette situation peut être expliquée comme suit : la charge générée dans le tuyau d'aluminium doit être de signe opposé, mais égale en valeur absolue à celle des particules accumulées dans la cage de Faraday ; en raison de la nature conductrice de la conduite, cette charge est partagée quasi également entre les trois sondes induction électrostatique qui enregistrent les phénomènes de charge triboélectrique dans le dispositif.

Les particules de HIPS se chargent moins dans les tuyaux en PVC (tableau 2.3). Les modèles mathématiques sont similaires à ceux obtenus pour le tube en aluminium:

$$q \text{ [nC]} = -320.88 - 58.06m^* - 35.18\phi^* - 9.93m^*\phi^* + 7.11\phi^{*2} \quad (2.14)$$

$$q/m \text{ [nC/g]} = -21.48 + 3.51m^* - 2.37\phi^* - 0.93m^{*2} + 0.39\phi^{*2} \quad (2.15)$$

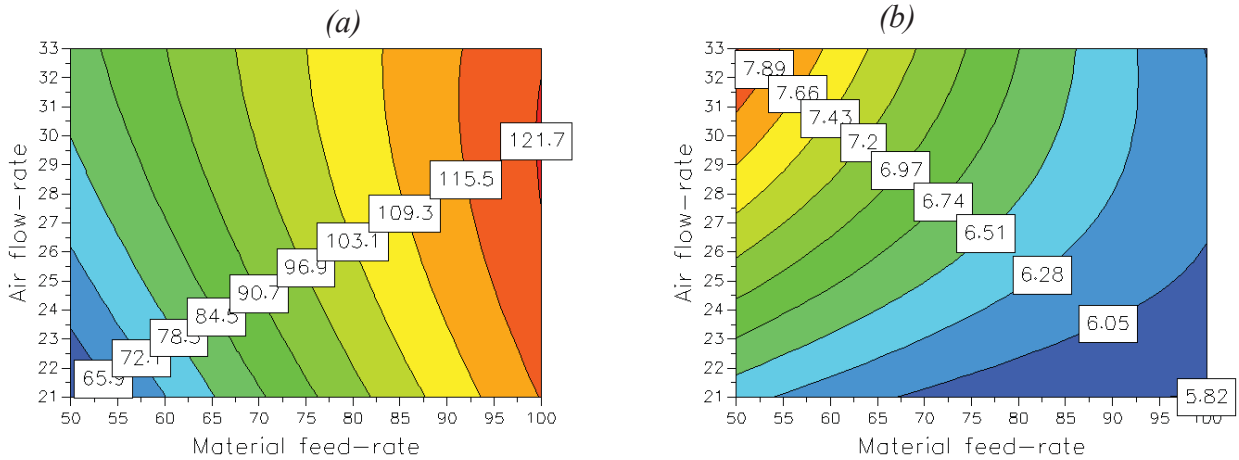


Figure 2.15 : Iso-contours de la charge q [nC] (a) et de la charge massique q/m [nC/g] (b) prédits par le logiciel MODDE 5.0 dans le cas des particules de HIPS en tuyau d'aluminium ; mesures réalisées avec la sonde d'induction électrostatique; le débit massique des granules transportés m et le débit volumique d'air ϕ sont exprimés en [g/min] et [dm³/s]

Tableau 2.2 : Charge q_p mesurée en utilisant la sonde d'induction électrostatique et charge massique q/m des particules du HIPS aspirées dans le tuyau d'aluminium, pour un plan expérimental composite comportant 11 essais.

Essai No. [-]	ϕ [dm ³ /s]	m [g/min]	q_p [nC]	q_p/m [nC/g]
1	21	50	74.21	7.421
2	33	50	82.27	8.22
3	21	100	114.12	5.706
4	33	100	120.34	6.017
5	21	75	90.9	6.06
6	33	75	103.27	6.884
7	27	50	72.97	7.297
8	27	100	124	6.2
9	27	75	96.02	6.4013
10	27	75	98.7	6.58
11	27	75	100.81	6.72

Il est intéressant de noter que les premiers coefficients des modèles (2.14) et (2.15) sont à peu près 9/10 de leurs homologues dans les modèles (2.10) et (2.11), obtenus pour les conduites en aluminium, ce qui signifie que les mécanismes sont similaires dans les deux situations. Par conséquent, les meilleures conditions de charge sont similaires : $\phi = 33$ dm³/s, $m = 50$ g/min (figure 2.16).

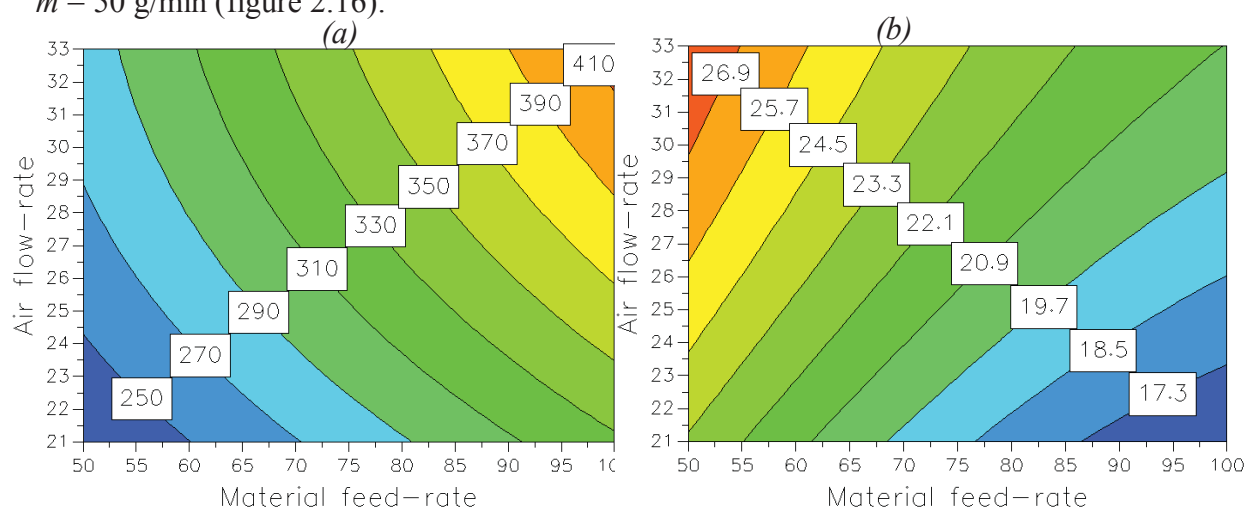


Figure 2.16 : Iso-contours de la charge q [nC] (a) et de la charge massique q/m [nC/g] (b) prédits par le logiciel MODDE 5.0, dans le cas des particules de HIPS convoyées par le tuyau en PVC ; le débit massique des granules transportés m et le débit volumique d'air ϕ sont exprimés en [g/min] et [dm³/s]

Tableau 2.3 : Charge q mesurée par la cage de Faraday et charge massique q/m des particules de HIPS aspirées dans le tuyau en PVC, pour un plan d'expériences composite comportant 11 essais

Essai No. [-]	ϕ [mm]	m [g/min]	q [nC]	q/m [nC/g]
1	21	50	-232,74	23,274
2	33	50	-280,89	28,089
3	21	100	-327,8	16,39
4	33	100	-415,67	20,7835
5	21	75	-275,21	18,3473
6	33	75	-350,29	23,3527
7	27	50	-256,09	25,609
8	27	100	-374,64	18,732
9	27	75	-316,81	21,1207
10	27	75	-325,61	21,7073
11	27	75	-331,23	22,082

Les valeurs mesurées par la sonde à induction électrostatique sont beaucoup plus faibles dans le cas du tuyau en PVC (tableau 2.4). La q_p maximum = 8,361 nC, ne représente que 1/50 de la charge totale mesurée dans la cage de Faraday dans les mêmes expériences.

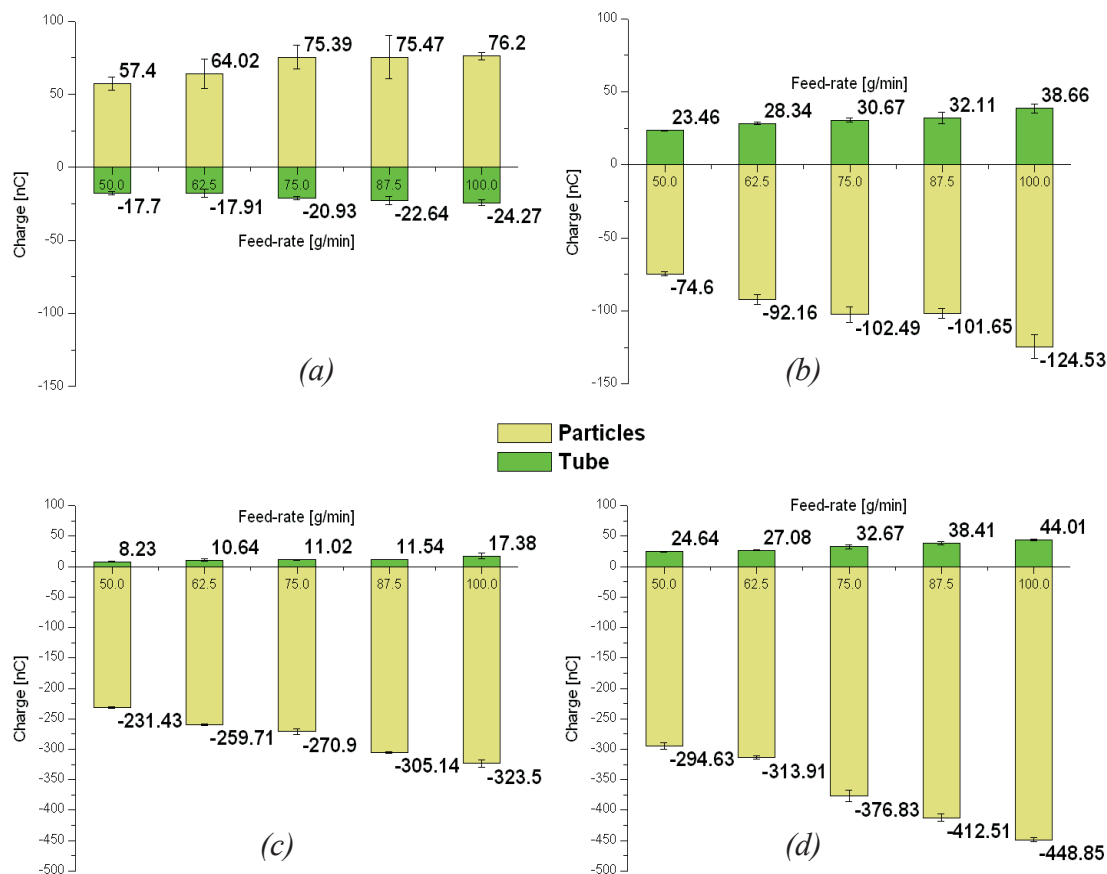


Figure 2.17 : Charge q vs débit massique m pour les particules d'ABS en tuyau de PVC (a) ; ABS en tuyau d'aluminium (b) ; HIPS en tuyau de PVC (c) ; HIPS en tuyau d'aluminium (d)

Tableau 2.4 : Charge q_p mesurée en utilisant la sonde d'induction électrostatique et charge massique q/m des particules du HIPS dans le tuyau en PVC, pour un plan d'expériences composite comportant 11 essais

Essai No [-]	ϕ dm ³ /s	m [g/min]	q_p [nC]	q_p/m [nC/g]
1	21	50	2,752	0,2752
2	33	50	-2,311	-0,2311
3	21	100	5,587	0,27935
4	33	100	8,361	0,41805
5	21	75	3,601	0,240067
6	33	75	-0,163	-0,0108667
7	27	50	3,078	0,3078
8	27	100	3,177	0,15885
9	27	75	4,946	0,329733
10	27	75	4,245	0,283
11	27	75	5,888	0,392533

Cette observation peut s'expliquer par le fait que dans le cas du tuyau en PVC la sonde d'induction électrostatique «voit» que les charges générés dans la zone de 60 mm tuyau couverte par un élément de mesure (la bague en aluminium), ce qui représente 1/25 de la longueur du tuyau total (1,5 m). Une deuxième raison pour les valeurs de q_p plus faibles que prévues est liée à l'apparition des décharges [7,70] glissantes le long des parois internes, dû à la non-uniformité de la charge générée par effet triboélectrique.

Comme les débits volumiques d'air plus élevés ont la tendance de favoriser les rapports charge/masse, une série d'expériences ont été effectuées à la valeur maximale du ϕ , fournie par l'unité d'aspiration, soit 33 dm³/s, pour les deux types de tuyaux et les deux matériaux granulaires: ABS et HIPS. Les valeurs de q et q_p à différents débits massiques m sont données sur la figure 2.17. L'ABS acquiert moins de charge, en valeur absolue, que le HIPS dans le tube en aluminium et PVC. Le signe de leur charge est le même dans les tuyaux d'aluminium, mais différent dans le cas de tuyau en PVC. Cela signifie que le tuyau en PVC peut être employé comme dispositif de tribocharge en liaison avec un séparateur électrostatique pour la séparation des ABS et des HIPS.

Les expériences ont été réalisées à des taux de mélange de très faible (masse de la poudre/masse de l'air <0,1), dans un tuyau assez court (1,5 m), pendant une courte période de temps (12 s). Bien que le processus de charge triboélectrique ne puisse pas être négligé, les rapports charge/masse mesurés sont au moins un ordre de grandeur inférieur à ce qui est obtenu avec les dispositifs vibrants ou les dispositifs à lit fluidisé. [9,60].

2.3. Charge triboélectrique dans les dispositifs annulaires

L'objectif de ce sous chapitre est d'évaluer les phénomènes de charge triboélectrique qui pourraient se produire dans les conduits annulaires spécifiques à l'installation utilisée pour l'étude du processus d'aspiration [37]. Les expériences ont été effectuées avec deux types de poudres, sur deux modèles de conduits, ayant les mêmes caractéristiques géométriques, mais étant construits avec des matériaux différents. Les deux matériaux qui ont servi dans les expériences sont couramment utilisés pour les essais d'aspiration et de filtration: A. White corindon, F1200, qui est un oxyde d'aluminium(Al_2O_3), la température de fusion: 2000°C , densité: $3,9\text{ g/cm}^3$, masse spécifique (densité non compacté, selon FEPA standard 44-F de diamètre-1986): $1,04$ à $1,02\text{ }\mu\text{g/cm}^3$, la médiane (selon la norme FEPA 42-F-1984): $3\text{ }\mu\text{m}$; B. DMT 8, qui est une poussière d'essai, composée de: poudre minérale de dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$, particules de cellulose (BE 600-30), fibres de coton[26] (longueur maximale: 4 mm).



Figure 2.18 : Matériaux utilisés dans les essais (a) F1200, (b) DMT8

Les expériences ont été réalisées sur un aspirateur commercial sans sac modifié de type cyclone, modèle R07165, SEB Rowenta, France. À un débit d'air nominal de $34\text{ dm}^3/\text{s}$, la vitesse moyenne de l'air dans la section annulaire a été supérieure à 30 m/s . Une quantité de 20 g de poussière d'essai (F1200, DMT8) a été dispersée uniformément sur une longueur de 60 cm et une largeur de 3 cm . Ensuite, le tube d'aspiration a été déplacé à une vitesse constante de 5 cm/s au-dessus de l'échantillon. De cette façon, le débit d'aspiration est gardé à peu près constant dans tous les tests. La plupart des particules ont été mises en mouvement par la force centrifuge créée par l'aspirateur de type cyclone et se sont accumulées dans une boîte collectrice qui a été modifiée pour être utilisée en tant que cage de

Faraday (figure 2.19) [54]. Les particules très fines, entraînées par l'écoulement de l'air, ont été capturées par les filtres situés à la sortie du dispositif.

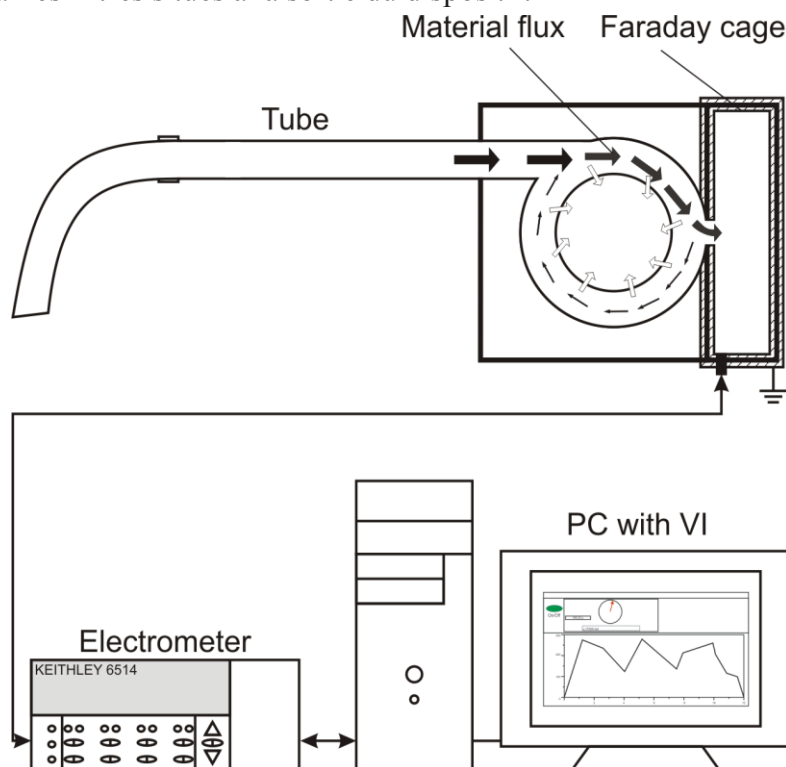


Figure 2.19 : Dispositif expérimental pour la mesure de la charge portée par les poudres de teste à la sortie de l'unité d'aspiration

A. Mesure de la charge

La charge des particules collectées a été mesurée avec un électromètre (modèle 6514, Keithley Instruments), relié à la cage de Faraday (figure 2.19). L'électromètre est également connecté à un ordinateur muni d'une instrumentation virtuelle (VI). L'instrument virtuel enregistre les charges accumulées toutes les deux secondes dans la cage de Faraday. La charge totale a été calculée comme la somme des valeurs enregistrée au cours du processus d'aspiration.

B. Mesure de déclin du potentiel de surface

Après l'aspiration de 20 g de poussière, le couvercle de l'unité d'aspiration a été ouvert et la sonde d'un voltmètre électrostatique [98] a été placée à une distance de 3 mm de la surface intérieure des conduits annulaires (figure 2.20). Le délai entre la fin de l'aspiration et le début du chaque mesure du déclin de potentiel a été maintenue à 30 secondes dans tous les cas. Avant chaque nouvelle expérience, la partie annulaire de l'aspirateur a été déchargé en la

connectant à la terre dans plusieurs points pendant un temps suffisamment long, pour que le potentiel de surface décroisse à moins de 10% de sa valeur initiale.

Dans une première série d'expériences, la charge de 20 g de F1200 et DTM8 a été mesurée après aspiration à travers de tubes en polyamide (PA) et ABS (tableau 2.5).

DMT8 se charge mieux en contact avec les deux tubes. L'objectif d'une deuxième série d'expériences a été d'évaluer l'effet du débit d'alimentation sur l'efficacité de charge des particules (figure 2.21).

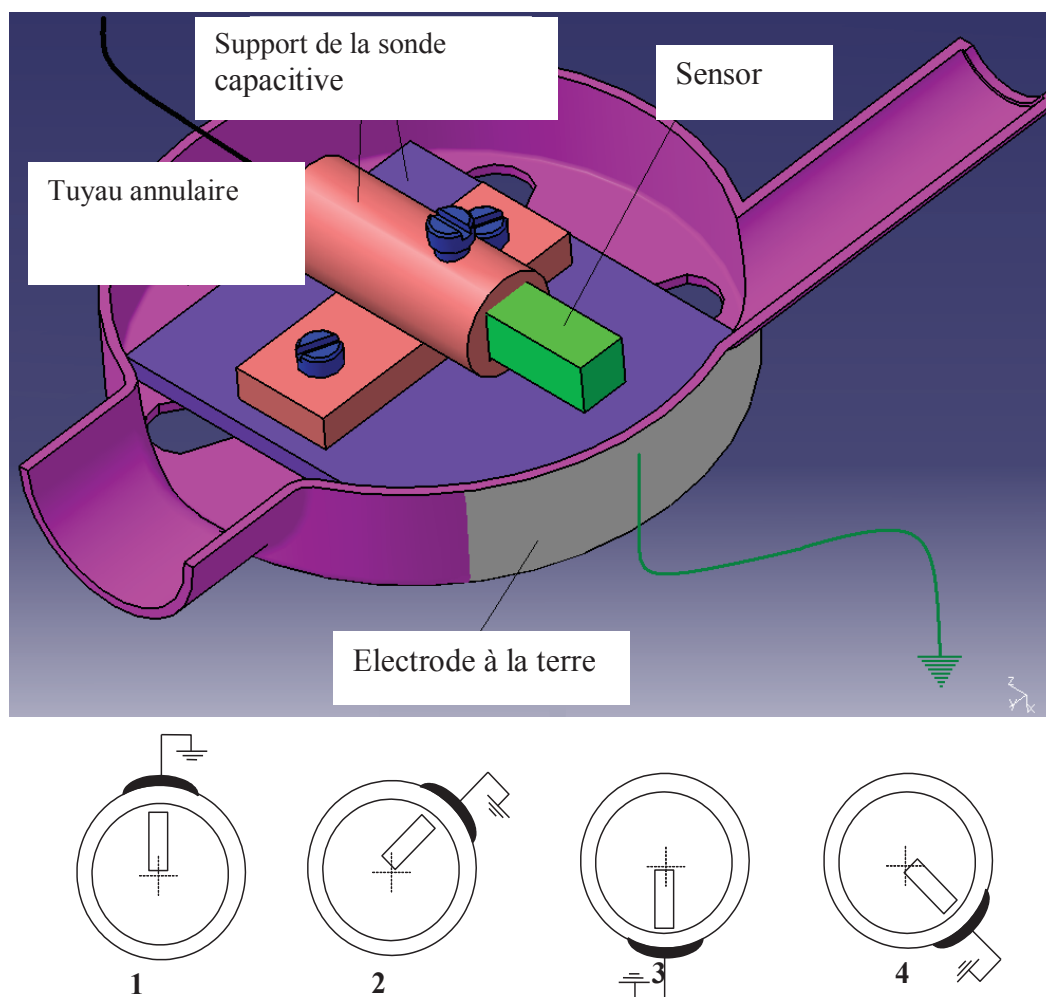


Figure 2.20 : Dispositif expérimental (a) et représentation schématique des quatre positions de la sonde capacitive (b) utilisés pour la mesure du déclin de potentiel à la surface du canal annulaire du dispositif d'aspiration

Le rapport charge/masse des poudres DMT8 diminue progressivement avec la quantité de matières traitée par unité de temps dans les deux cas, PA et ABS. Les particules ont de meilleures chances à se charger lorsqu'elles sont plus dispersées dans l'air d'alimentation. Des résultats similaires ont été obtenus avec la poudre de F1200.

Tableau 2.5 : Rapport charge/masse pour F1200 et DMT8

Material du tuyau	PA		ABS	
Type de poudre	F1200	DMT8	F1200	DMT8
Charge/masse [$\mu\text{C/g}$]	- 0.53	- 1.12	- 0.86	- 2.09

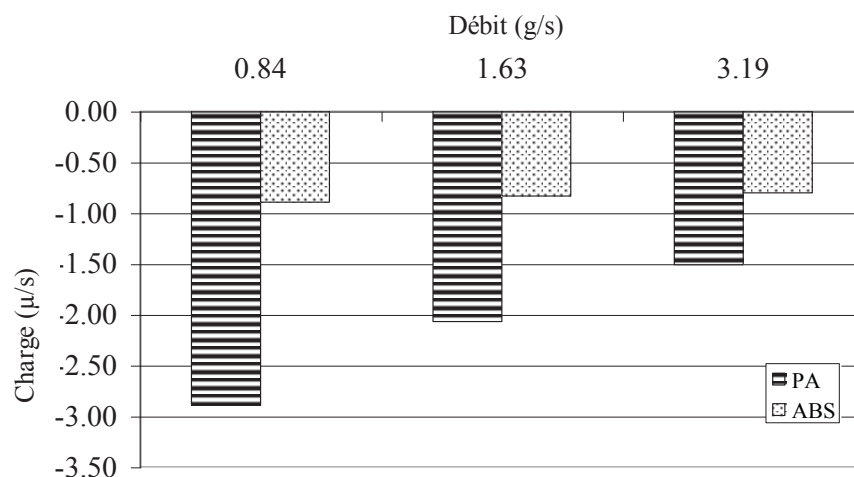


Figure 2.21 : Rapport charge/masse du DMT8 en utilisant les tubes ABS et PA, en fonction du débit d'alimentation

La troisième série d'expériences a été effectuée à débit constant (1,63 g/l), avec une quantité beaucoup plus grande (130 g) de poudre F1200. Avec les conduits PA, les poudres F1200 obtiennent toujours des charges négatives. Toutefois, il convient de noter que la charge acquise lors des premières 12 s est toujours plus élevée que celle accumulée dans la cage de Faraday pendant plusieurs secondes 13 à 24, 25 à 36, et ainsi de suite. Il semble que l'échange de charge entre la PA et F1200 se stabilise à une valeur qui est à peu près la moitié de celle mesurée au cours des premières 12 s de l'aspiration.

La situation est beaucoup plus compliquée avec l'ABS. L'enregistrement de la charge accumulée toutes les 2 secondes dans la cage de Faraday montre une tendance étrange, qui a été confirmée par un grand nombre d'expériences (figure 2.22).

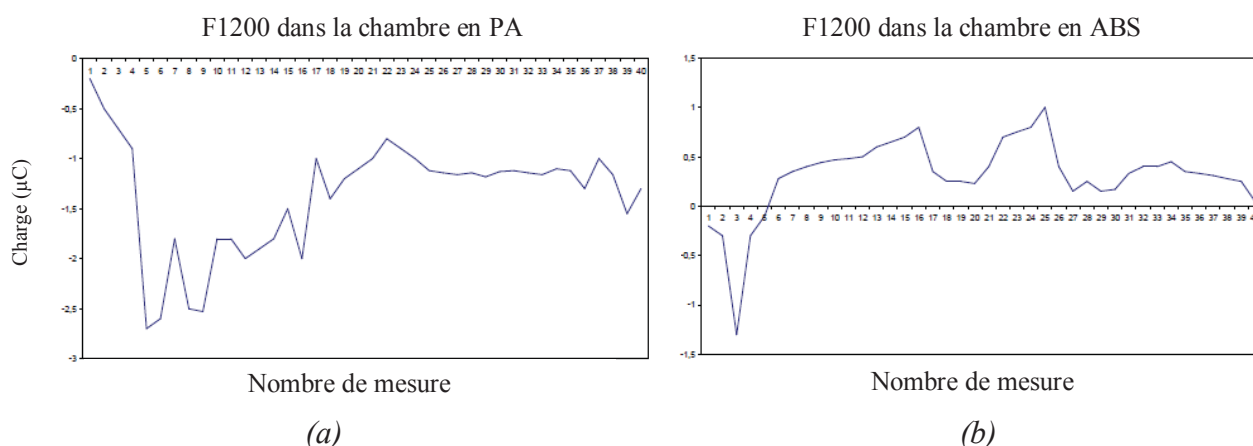


Figure 2.22 : Charge de F1200 aspiré pendant 80 s par PA (a) et ABS (b) tubes, à un débit de 1,63 g/s (une mesure toutes les 2 s)

Dans un premier temps, les particules F1200 se chargent négativement, mais après moins de 10 secondes, le nouveau matériel aspiré dans la cage de Faraday est chargé positivement. Une explication possible est que l'ABS est un très bon isolant.

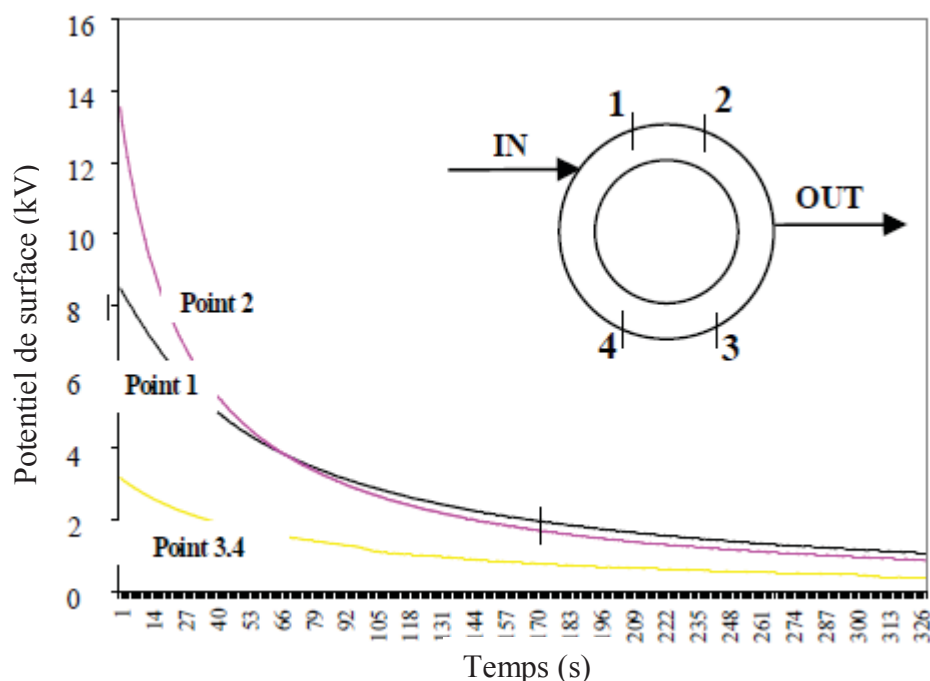


Figure 2.23 : Courbes de déclin de potentiel enregistrées aux points 1 à 4 à la surface de la section annulaire de PA, après le passage échantillons de 20 g de poudre de F1200

La paroi en ABS se charge positivement au cours du premières 10 secondes, mais après cela, elle accepte de préférence des charges négatives prises de F1200, avec qu'elle vient en contact, une grande majorité qui ont déjà été chargées négativement au cours de leur de transit à travers le tube d'aspiration. Cette hypothèse doit être validée par des expériences effectuées sur de plus grandes quantités de poudres F1200 et / ou sur d'autres matériaux pulvérulents.

Le potentiel mesuré dans les quatre points à la surface des conduits de PA après l'aspiration de la poudre F1200 a été positif et son déclin avec le temps a été plutôt rapide (figure 2.23). Ces résultats sont en bon accord avec le fait que la charge de la poudre F1200 a toujours été négative, lorsqu'elle est transportée dans le tuyau en PA. Le potentiel le plus élevé a été enregistré en point 2, qui est le plus exposé à l'impact des particules.

Les potentiels de surface mesurés en 3 et 4 ont été significativement inférieurs à ceux de 2 ou 1. Ceci peut être facilement expliqué par le fait que seule une petite quantité de la poudre traverse les zones 3 et 4, la plupart des particules prennent la sortie de la zone annulaire après la zone 1. Avec un beaucoup plus petit nombre de particules qui touchent la paroi, la charge

échangée est moins importante que dans les zones 1 et 2. Le polyamide n'est pas un très bon isolant: le potentiel à sa surface, qui est à peu près proportionnel à la charge de surface, décroît à 50% de sa valeur initiale en $T_{50\%}=40$ s, dans les points 1 et 2, et $T_{50\%} = 60$ s, dans les points 3 et 4, pour les deux poudres, F1200 et DMT8 (tableau 2.6). En moins de 8 min, le potentiel de surface du tube en PA était inférieur à 10%.

Tableau 2.6 : Durée du déclin de potentiel pour PA à 50% ($T_{50\%}$) et 10% ($T_{10\%}$) de la valeur initiale

Poudre de test	Point de mesure	T50% (s)	T10% (s)
DMT8	1	39	292
DMT8	2	32	200
DMT8	3	57	480
DMT8	4	58	396
F1200	1	43	322
F1200	2	39	298
F1200	3	62	487
F1200	4	59	414

Le déclin du potentiel de surface a été plus rapide dans les points 1 et 3, où il avait une valeur initiale plus élevée. Cette observation est similaire aux résultats d'autres chercheurs qui ont étudié le déclin de potentiel à la surface des matériaux isolants et décrit ce qu'on appelle le phénomène « cross-over » [102].

Le potentiel mesuré dans les quatre points à la surface du tuyau en ABS après l'aspiration de la poudre F1200 a été négatif (tableau 2.7) et sa valeur absolue a très peu varié avec le temps. Ces résultats confirment les caractéristiques de bon isolant de l'ABS et sont en bon accord avec les mesures de la charge du F1200 effectués pendant la troisième série d'expériences décrites avant. Des résultats similaires ont été obtenus avec le DMT8. Avec les deux poudres d'essai, le potentiel a été plus élevé dans les points 1 et 2, que dans les 3 et 4, qui sont moins exposées à l'impact des particules.

Tableau 2.7 : Potentiel de surface pour le tuyau ABS en quatre points de mesure après l'aspiration du F1200 et DMT8

Poudre de test	Point de mesure	Potentiel de surface (kV) (négatif)
DMT8	1	8,64
DMT8	2	8,6
DMT8	3	7,15
DMT8	4	7,19
F1200	1	8,49
F1200	2	8,69
F1200	3	7,7
F1200	4	7,37

Conclusions

1. L'utilisation de la méthode des plans d'expériences facilite la formulation d'un modèle comportemental du processus de charge triboélectrique dans les dispositifs de transport pneumatique.
2. En augmentant le débit volumique d'air et en diminuant le débit d'alimentation de matière il est possible d'augmenter le rapport charge/masse pour les particules d'ABS et HIPS.
3. La réduction du diamètre des tuyaux, la modification de leur longueur et de leur forme pourraient augmenter le nombre d'impacts de particules-paroi et améliorer les conditions de charge de matériaux granulaires, en vue de la séparation électrostatique.
4. Le bon choix du matériau plastique du tuyau pourrait favoriser le processus de charge des particules d'un mélange granulaire, en vue de leur séparation électrostatique.
5. Les matériaux isolants granulaires ou pulvérulents [48] peuvent être bien chargés dans les dispositifs pneumatiques annulaires.

3. CHARGE TRIBOELECTRIQUE DE MELANGES DE MATERIAUX GRANULAIRES DANS LES LITS FLUIDISES

Le résultat de tout processus de séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules [2]. 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 [1], en présence d'un champ électrique, orthogonale à la direction d'écoulement de l'air de fluidisation, afin de valider un nouveau concept de séparateur tribo-aéro-électrostatique.

3.1. Installations expérimentales

Deux dispositifs à lit fluidisé [17] 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. La particularité commune de ces lits fluidisés à section transversale rectangulaire : deux parois opposées de la chambre de fluidisation sont métalliques et reliées à des alimentations haute tension, afin de créer un champ électrique nécessaire à la séparation des particules chargées [10].

3.1.1. Dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales

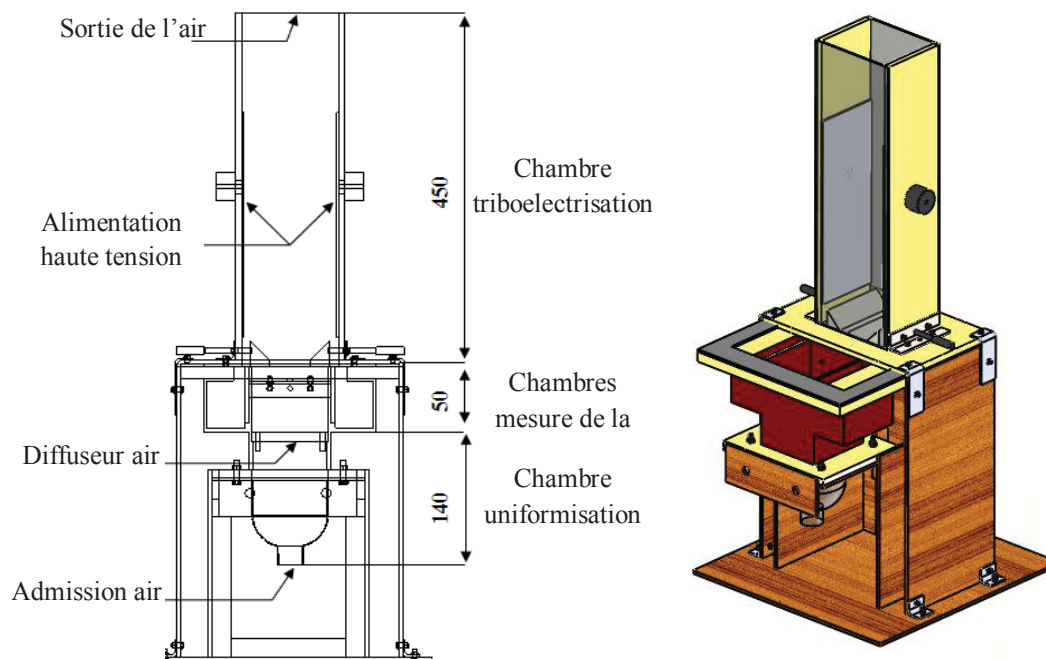


Figure 3.1 : Dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales

Le dispositif représenté sur la figure 3.1 est destiné aux études préliminaires de faisabilité, sur des petites quantités de matériaux. Il est composé de deux parties détachables – la chambre de fluidisation et la partie d'alimentation et de mesure. La chambre de fluidisation de section rectangulaire est prévue avec deux parois transparentes pour permettre l'observation du mouvement des granules. Les autres deux parois ont à l'intérieur des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces. Les électrodes sont connectées à deux sources haute tension continue de polarités différentes, afin de créer un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules et faire la séparation entre les composants du mélange. A l'extrémité supérieure, la chambre est prévue d'un filtre qui empêche les granules de sortir à l'extérieur. La chambre est fixée sur un support plastique (figure 3.1) qui lui-même est fixé sur un support en bois, afin d'assurer la verticalité du dispositif entier. L'autre partie détachable est composée d'une enceinte d'alimentation, où le matériau est posé et de deux cages de Faraday. Cette enceinte est séparée de la chambre d'alimentation d'air par un diffuseur, qui a le rôle d'assurer une distribution uniforme d'air. Les cages de Faraday sont prévues avec un orifice à l'extrémité supérieure pour permettre l'entrée des granules et mesurer leur charge électrique à l'aide d'un électromètre Keithley 6415.

3.1.2. 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, afin de pouvoir mieux étudier aussi les aspects aérodynamiques. Il a été construit en PMMA transparent pour faciliter l'observation des processus de fluidisation et de séparation électrostatique [30].

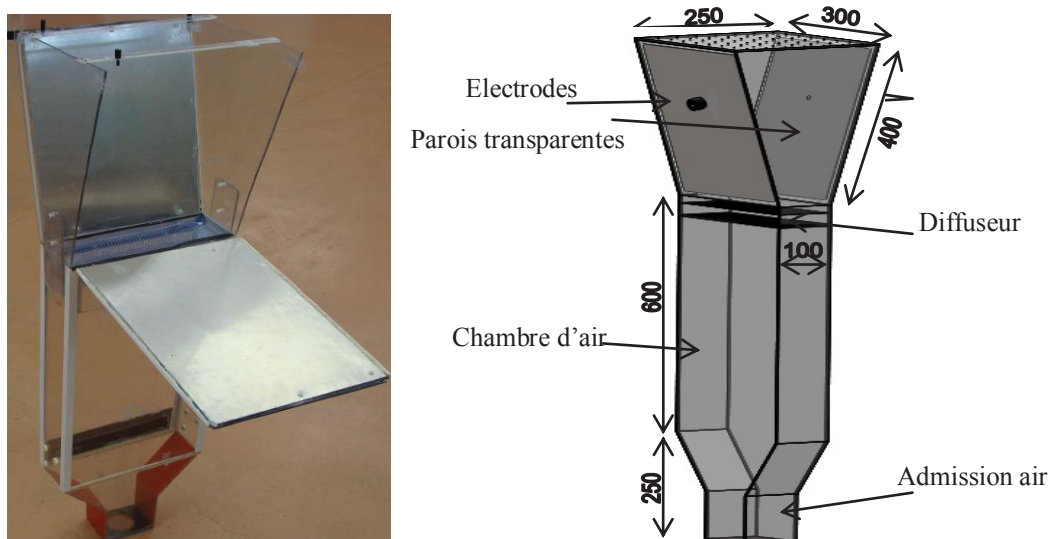


Figure 3.2 : Dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées

Le dispositif est composé de deux modules : 1) une chambre parallélépipédique pour l'uniformisation du jet de l'air, équipée à la partie supérieure d'un diffuseur d'air ; 2) une chambre de triboélectrisation, en forme de tronque de pyramide. Ses parois verticales opposées sont en PMMA transparent, les deux autres, dont les angles par rapport à la verticale peuvent varier, représentent les électrodes et sont plaquées en aluminium.

3.1.3. Procédure expérimentale

A. Dispositif à débit faible et électrodes verticales

L'alimentation du dispositif avec des granules de plastique se fait par la partie supérieure, en s'assurant que les deux obturateurs des cages Faraday sont bien fermés. Le système d'électrodes est alimenté par deux sources à haute tension de courant continu (Gamma High Voltage Research Inc.), qui fournissent des tensions de polarité opposée. L'air de fluidisation provient d'un compresseur sur lequel était monté un régulateur de l'air pour assurer un flux d'air de pression constante. La couche compacte de granules, deviendra un lit fluidisé sous l'action du flux d'air. La charge triboélectrique [36,43] est produite par des contacts répétés entre les particules ou entre les particules et les parois de la chambre de fluidisation.

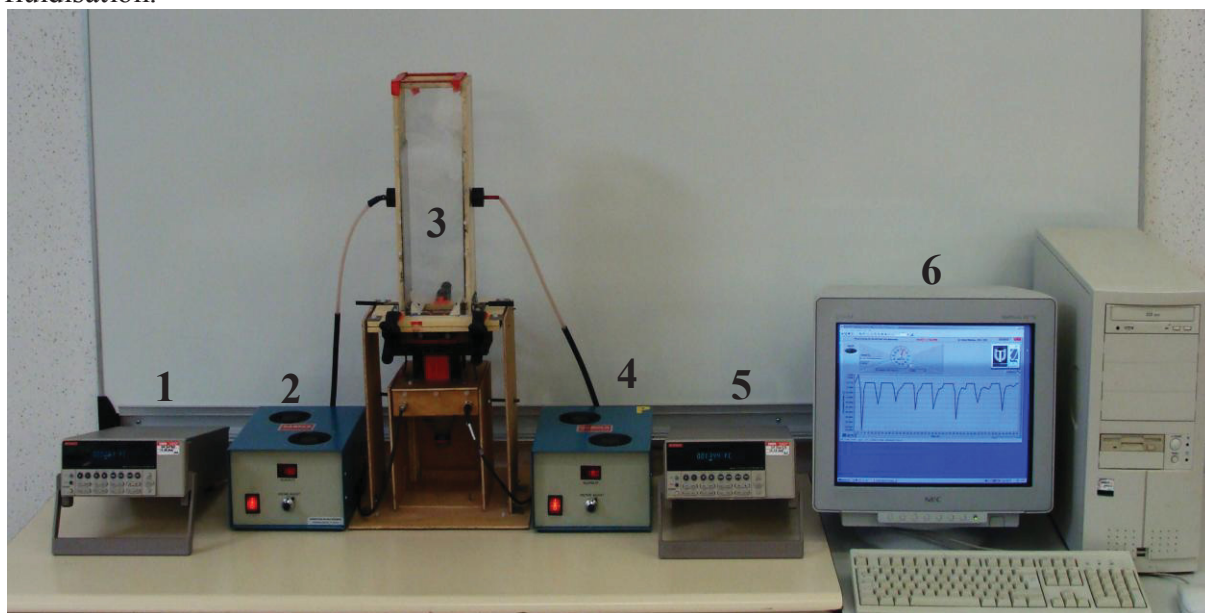


Figure 3.3 : Banc expérimental pour l'étude de la charge des mélanges binaires des matériaux plastiques dans un dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales ; 1,5- électromètres Keithley, 2,4- sources haute tension, 3- dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales, 6- PC équipé d'un instrument virtuel.

Sous l'action d'un champ électrique perpendiculaire à la direction du déplacement du jet d'air, les granules sont attirées par les deux électrodes alimentées à haute tension, de polarités différents, et sont collectés dans les cages de Faraday, connectées chacune à un électromètre. L'instrument virtuel, créé en Labview, assure l'acquisition et le traitement des données. Il permet aussi de fixer la durée des cycles de mesure. La quantité de matériau collectée est mesurée à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de 0,01g.

La particularité fonctionnelle de ce dispositif est que, une fois les granules ont accumulé une charge suffisamment grande, elles vont être attirés par des forces électriques à une électrode de polarité opposée et ne participeront plus au processus de charge triboélectrique.

B. Dispositif à débit moyen et électrodes inclinées

Dans le cas du dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées, le matériau granulaire est introduit dans la chambre de triboélectrisation et mis sur le diffuseur d'air. Sous l'action du courant d'air ascendant fourni par une soufflante équipé d'un moteur de 3 kW triphasé, la couche compacte de matériau sera dispersée dans le volume de la chambre de fluidisation.



Figure 3.4 : Banc expérimental pour l'étude de la charge des mélanges binaires des matériaux plastiques dans un dispositif de triboélectrisation à débit moyen et électrodes inclinées ; 1- dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées, 2- soufflante, 3- variateur de fréquence, 4- sources haute tension, 5- électromètre Keithley.

La vitesse de l'air de fluidisation est modifiée via le variateur de fréquence (modèle Digidrive 5,5kW, Leroy Sommer) assurant alimentation du moteur électrique qui entraîne la soufflante. Les particules sont fluidisées environ 30 secondes, l'intervalle déterminé après plusieurs essais. Le temps est suffisant pour que l'effet triboélectrique lié aux collisions particule-particule se manifeste. Le système d'électrodes destiné à créer le champ électrostatique [99] est alimenté par deux sources haute tension de courant continu, qui fournissent des tensions de polarités opposées (Gamma High Voltage Research Inc.). La différence de potentiel entre les deux électrodes peut atteindre jusqu'à 36 kV. Les granules chargés, placés dans ce champ électrostatique seront attirés vers les électrodes par l'action des forces électriques, et resteront collés à celles-ci grâce à la force d'image électrique.

Après la séparation, les granules collés à la surface des électrodes seront collectés par aspiration. Leur charge est déterminée en les versant dans une cage de Faraday, reliée à un instrument de mesure (électromètre Keithley 6514). La quantité de matière récupérée sera déterminée en utilisant une balance électronique, dont la résolution est 0.01g.

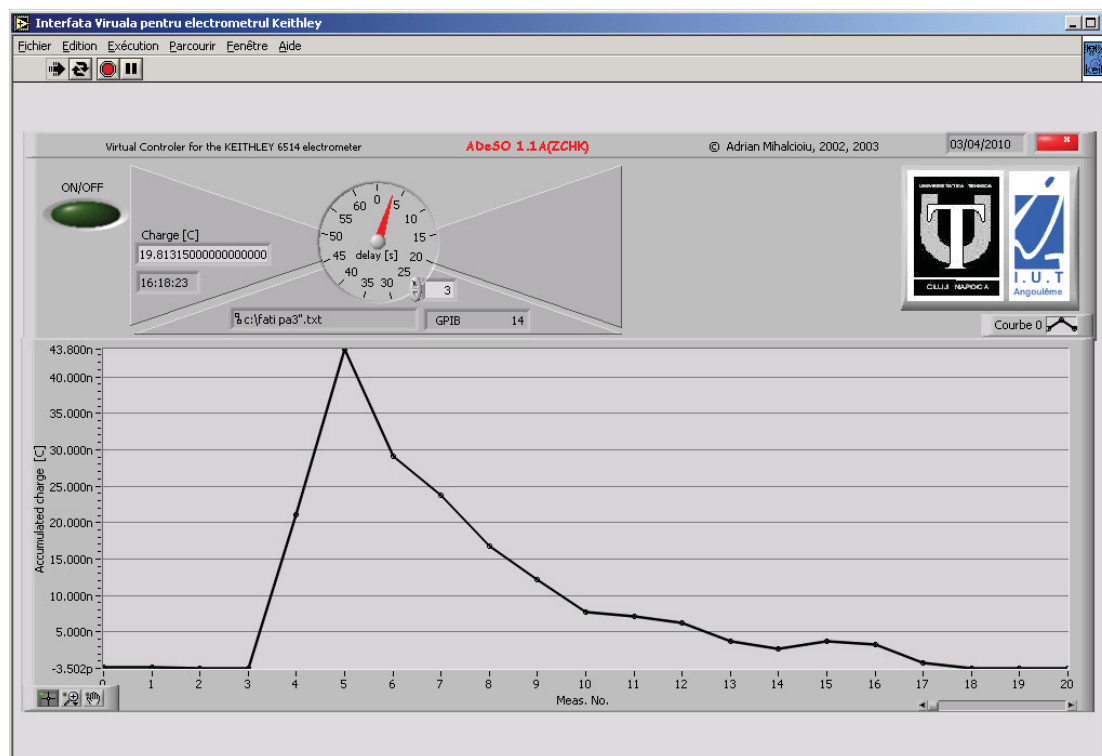


Figure 3.5 : Panneau frontal de l'instrument virtuel pour la mesure de la charge acquise par effet tribo électrique

3.2. Charge d'un mélange binaire de matériaux plastiques granulaires dans un dispositif à lit fluidisé à faible débit et électrodes verticales

L'étude porte sur le comportement des mélanges binaires de plusieurs matériaux plastiques granulaires dans le lit fluidisé parallélépipédique. Dans ce cas, la hauteur du lit est à peu près deux fois la longueur ou la largeur de la chambre de fluidisation, de sorte que les collisions entre les granules deviennent le mécanisme principal de charge. Une caractéristique particulière de ce lit fluidisé étant que deux des parois opposées de la chambre de fluidisation sont couvertes de plaques métalliques reliées à deux sources à haute tension de polarités opposées, les particules chargées par effet triboélectrique seront attirées par ces électrodes et séparées, étant encore en état fluidisée. Le but de cette étude est d'évaluer les facteurs qui influencent l'efficacité du processus de charge triboélectrique [43,51] en vue de l'application éventuelle d'un tel dispositif à la séparation électrostatique des mélanges granulaires [56].

3.2.1. Etude de la faisabilité du processus de charge tribo électrique

Les expériences de charge triboélectrique [57] ont été effectuées sur des mélanges de matériaux plastiques granulés utilisés dans la fabrication industrielle: polyamide (PA), polycarbonate (PC), poly-oxyde-méthylène (POM). La masse moyenne d'une granule a été déterminée en divisant la masse d'un échantillon de 5 g par le nombre de granules le composant.

Le tri sélectif de ces matériaux est difficile à réaliser par les méthodes classiques de séparation gravitationnelle ou par flottation, car ils ont des densités massiques semblables (tableau 3.1). L'analyse des résultats de séparation a été facilitée par l'utilisation des particules qui diffèrent par leur couleur.

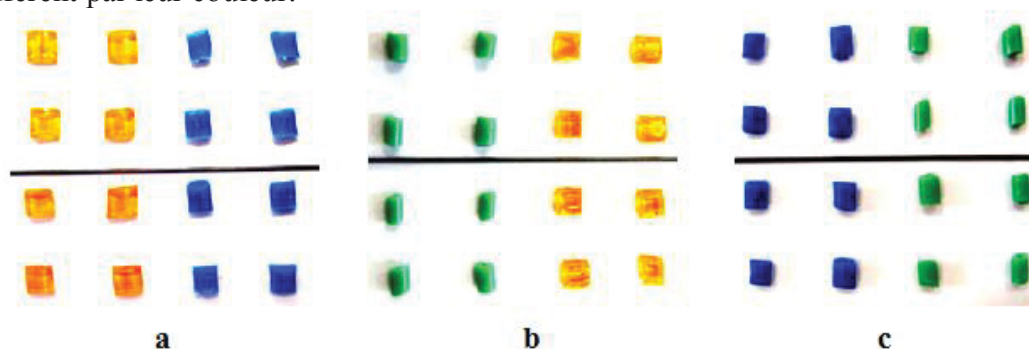


Figure 3.6 : Mélanges granulaires a) PC-PA, b) POM-PC, c) PA-POM utilisés dans les expériences de charge triboélectrique; les lignes centrales ont la longueur de 20 mm et l'épaisseur de 0.5 mm.

Tableau 3.1 : Caractéristiques des matériaux plastiques granulaires vierges utilisés dans les expériences de charge par effet tribo électrique

Granule	PA	PC	POM
Couleur	Bleu	Orange	Vert
Forme	Cylindrique	Cylindrique	Cylindrique
Taille [mm]	Ø 2.5 x 3.4	Ø 3 x 3.6	Ø 2 x 3.4
Masse [mg]	20	25	11
Densité [kg/m ³]	≈1100	≈1200	≈1500

Trois types d'échantillons (masse de l'échantillon: 100 g) ont été préparés sous forme de mélanges binaires avec des compositions différentes (figure 3.6). Toutes les expériences ont été effectuées dans les mêmes conditions ambiantes qui ont été relativement stables : température $T = 17\text{-}22^{\circ}\text{C}$, humidité relative $HR = 44\text{-}60\%$, et à une vitesse de l'air $v = 6\text{ m/s}$.

La procédure expérimentale a trois étapes principales :

- 1) préparation des échantillons et leur introduction dans le dispositif à lit fluidisé ;
- 2) triboélectrisation et séparation électrostatique des granulés ;
- 3) analyse des résultats.

La première étape comporte les opérations préliminaires à la réalisation de l'essai de séparation électrostatique : - faire la tare de la balance électronique et mesurer les quantités prescrites de chaque type de matériau utilisé ; - mélanger doucement les matériaux dans un récipient, en essayant de limiter la charge triboélectrique due aux manipulations ; - introduire le mélange dans le dispositif à lit fluidisé. La deuxième étape, qui constitue l'essai de séparation proprement-dit, est composée d'une succession d'opérations : - allumer les sources à haute tension et les ajuster aux valeurs établies à priori ; - alimenter le dispositif en air comprimé, à partir d'un compresseur ; - chronométrer la durée de triboélectrisation et observer les phénomènes ; - arrêter l'alimentation en air ; - éteindre des sources haute tension. Pour la troisième étape, l'analyse des résultats, il faut réaliser les opérations suivantes : - sortir le module collecte-mesure ; - mesurer les quantités collectées dans chaque cage de Faraday ; -

évaluer la pureté des produits. L'efficacité du processus de triboélectrisation sera ensuite jugée en rapport avec la quantité des granules séparé et leur pureté.

L'objectif de la première série d'essais était d'évaluer la faisabilité du processus de charge triboélectrique pour trois classes de mélanges granulaires binaires: 50% PA – 50% PC; 50% PA – 50% POM; 50% PC – 50% POM. Les tests sur le mélange granulaire 50% PA - 50% PC ont été effectués pour la durée $t = 18$ s, avec deux électrodes connectées à 12 kV et l'autre à -12 kV, de sorte que la différence de potentiel entre les électrodes soit $U = 24$ kV. Pour les autre classes de matériaux, les essais ont été effectuées a $t = 45$ s et pour deux valeurs de la haute tension appliquée, $U = 24$ kV et 32 kV.

En règle générale, la charge affichée par le coulomb mètre varié avec le temps comme sur la figure 3.7. La pureté des matériaux collectés (tableau 3.2) a été plutôt bonne (environ 75%), et ne dépend pas de la durée du processus de tribocharge. La présence d'impuretés de PC dans le produit PA était due au fait que certains granules ont été chassés vers le collecteur par les forces aérodynamiques, vu la vitesse de l'air de fluidisation assez grande : $v = 6$ m/s. Le rapport charge/masse de PA et PC a été de 2,65 PC nC/g et 2,65 nC/g, même si dans les produits collectés il y a eu des particules non chargées ou portant une charge de signe contraire. À des tensions plus élevées, les forces du champ électrique sont plus fortes et la proportion des granules qui arrivent dans la boîte collectrice opposée peut être nettement inférieure, comme il sera montré dans une section suivante de l'étude.

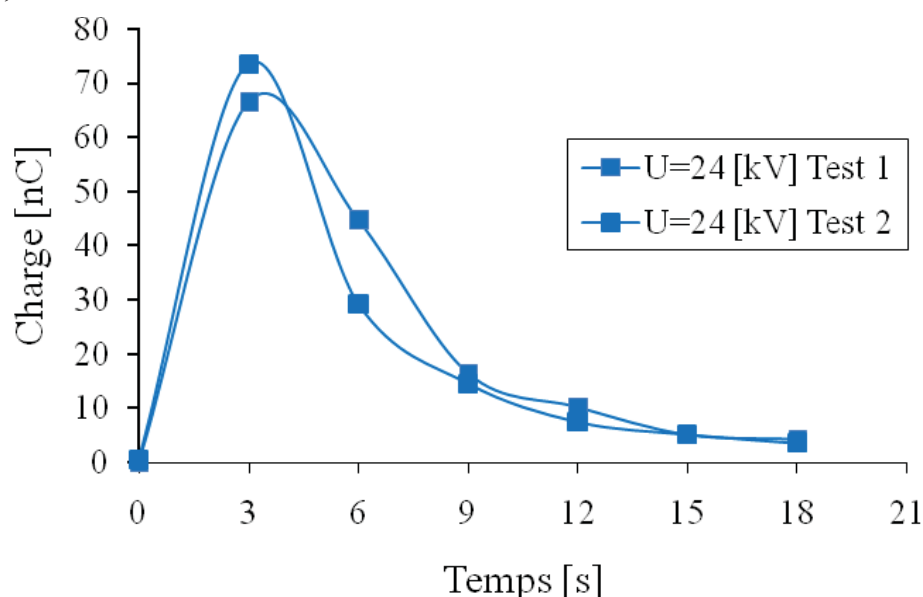


Figure 3.7 : Charge des granules de PA collectée lors de deux essais effectués à la même tension appliquée $U = 24$ kV.

Tableau 3.2 : Résultats préliminaires de la tribocharge d'un mélange granulaire 50%PA+50% PC

Temps	Masse		Pureté		Extraction	
t	m_{PA}	m_{PC}	p_{PA}	p_{PC}	r_{PA}	r_{PC}
[s]	[g]	[g]	[%]	[%]	[%]	[%]
6	46.5	16.6	78.9	74.9	73.4	24.9
18	53.8	24.2	73.5	79.5	79.3	38.5

La durée du processus de triboélectrisation dans le cas des mélanges binaires granulaires 50% PA – 50% POM et 50% PC – 50% POM, a été allongée à $t = 45$ s et la haute tension appliquée aux électrodes a été montée à $U = 32$ kV. Une durée plus longue et une tension plus élevée ont été imposées par l'efficacité beaucoup plus faible du processus de tribocharge, dans le cas de ces combinaisons de matériaux qui sont plus proches les uns des autres dans la série triboélectrique.

Dans le cas de l'expérience portant sur le mélange 50% PA - 50% POM, les valeurs moyennes de la charge massique des deux produits collectés dans les cages de Faraday ont été respectivement de 1,22 nC/g et 0,02 nC/g (tableau 3.3). POM se charge positivement en contact avec le PC (tableau 3.4), mais la valeur moyenne de la charge massique des produits collectés était également faible: - 1,26 nC/g et 1,43 nC/g, respectivement. Dans tous les cas, la pureté des produits collectés a été inférieure à 65%.

Tableau 3.3 : Résultats de deux essais visant la charge triboélectrique d'un mélange granulaire binaire 50%PA+50%POM

50% PA 50% POM	Masse	Charge	Masse	Charge
	PA [g]	POM [nC]	PA [g]	POM [nC]
Essai No.1	50.5	42.1	63	-0.64
Essai No.2	49	45	58.06	-1.18

Tableau 3.4 : Résultats de deux essais visant la charge triboélectrique d'un mélange granulaire binaire 50%PC+50%POM

	Masse	Charge	FEED	Masse
	PC [g]	POM [nC]	PC [g]	POM [g]
Essai No.1	47.40	43.3	70	-50.71
Essai No.2	49.60	42	68.4	-57.04

La charge triboélectrique de ces deux catégories de mélanges granulaires étant si faible, les prochaines étapes de l'étude n'ont porté que sur le mélange granulaire PA - PC.

3.2.2. Etude des facteurs influents

A. Effet de la durée du processus de tribocharge

Au moins deux essais ont été effectuées sur des échantillons 50% PA - 50% PC, à une haute tension appliquée $U = 24$ kV, pour chaque valeur du temps $t = 6$ s, 12 s, 18 s, 24 s.

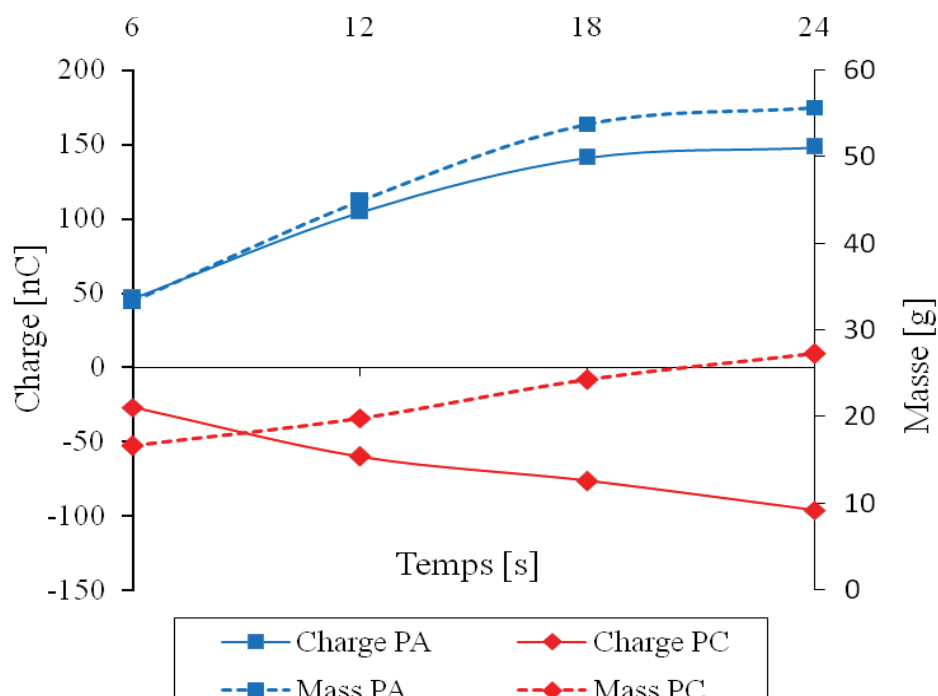


Figure 3.8 : Charge (a) et masse (b) des granules de PA et PC collectés pendant les essais effectués à $U = 24$ kV et à différentes durées du processus de charge $t = 6$ s, 12 s, 18 s, 24 s.

Sur les graphiques de la figure 3.8 sont représentées les moyennes des sommes des valeurs de la charge enregistrées pour chaque t , et des masses collectées dans les cages de Faraday. Il peut être vu qu'à partir de $t \geq 18$ s, presque toutes les particules ont déjà été collectées dans les deux cages de Faraday de l'installation expérimentale.

B. Effet de la haute tension appliquée

Les expériences de charge triboélectrique ont été effectuées sur des échantillons de mélanges granulaires 50% PA - 50% PC, pour une durée $t = 45$ s. Il faut noter que la séparation peut être obtenue même à des tensions appliquées aussi basses que $U = 12$ kV (figure 3.9). A des faibles niveaux de la haute tension appliquée, le champ électrique est faible et les particules ont besoin d'accumuler une quantité de charge plus importante, afin d'être conduites par les forces électriques vers les électrodes de polarités opposées. Par conséquent, le plus haut niveau du rapport charge/masse devrait être obtenu aux valeurs les plus basses de la tension appliquée. Étonnamment, le rapport charge/masse des particules collectées à différentes tensions appliquées U , dans la gamme de 12 à 40 kV est resté constant. L'explication est simple: à des petites valeurs de la haute tension U , les forces de champ électrique sont plus faibles et les particules peuvent être recueillies dans les mauvaises cages de Faraday, sous l'action des forces aérodynamiques.

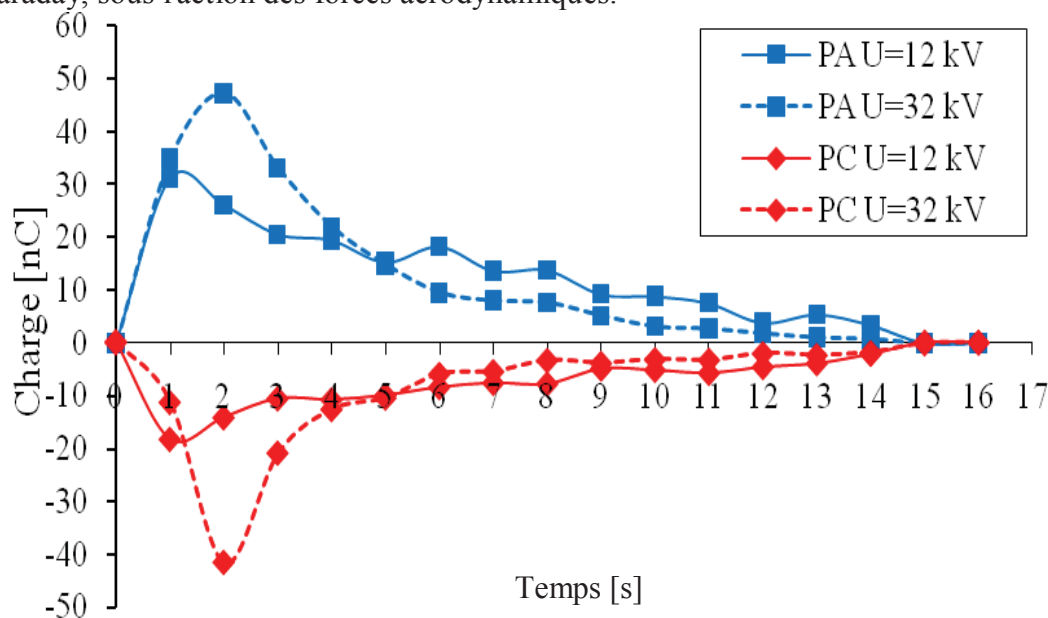


Figure 3.9 : Charge des concentrés de PA et de PC (mélange granulaire 50% PA et 50% PC, $U = 24$ kV), mesures prises en ligne, 1 mesure/seconde

Tableau 3.5 : Résultats des expériences réalisées sur un mélange granulaire 50%PC+50%POM à différentes valeurs de la haute tension appliquée U

Voltage	Masse		Charge		Charge/Masse	
U [kV]	PA [g]	PC [g]	PA [nC]	PC [nC]	PA/PA [nC/g]	PC/PC [nC/g]
8	40	54.7	133	-67	3.3	-1.23
12	41.5	54.5	197	-113	4.7	-2.07
20	45.0	47.8	174	-104	3.8	-2.18
24	49	45.1	170	-108	3.4	-2.39
28	49.7	45.2	187	-112	3.7	-2.48
32	50.5	46.4	193	-127	3.8	-2.74
36	50.8	46.7	171	-114	3.3	-2.44
40	50.9	49.5	172	-108	3.3	-2.18

De ce fait, la charge massique plus élevée des particules qui sont entraînées dans les cages de Faraday par les forces électriques est contrebalancée par le plus grand nombre de particules qui sont collectées par erreur, à cause du mouvement turbulent du lit fluidisé.

3.2.3. Effet de la composition du mélange

Les résultats des expériences effectuées sur des échantillons de mélanges granulaires 75% PA - 25% PC, sont indiqués dans les tableaux 3.6 et 3.7 et représentés sur les figures 3.10 et 3.11.

Tableau 3.6: Résultats des expériences réalisées sur des mélanges granulaires 75% PA + PC 25%, à $U = 24 \text{ kV}$

Temps	Masse		Pureté		Extraction	
t [s]	M_{PA} [g]	M_{PC} [g]	c_{PA} [%]	b_{PC} [%]	m_{PA} [%]	m_{PC} [%]
6	45.6	12.7	88.3	59.5	60.8	50.8
18	60.6	20.6	90.9	69.7	80.8	82.6

Tableau 3.7: Résultats des expériences réalisées sur des mélanges granulaires
75% PA + PC 25%, à $U = 24 \text{ kV}$

Temps	Masse		Pureté		Extraction	
t	M_{PA}	M_{PC}	c_{PA}	b_{PC}	m_{PA}	m_{PC}
[s]	[g]	[g]	[%]	[%]	[%]	[%]
6	53.5	18.05	89.94	66.59	71.33	72.2
18	56.8	24.4	93.71	63.52	75.73	97.6

La durée du processus de tribocharge a été de $t = 24 \text{ s}$, à deux valeurs de la tension appliquée $U = 24 \text{ kV}$ et $U = 36 \text{ kV}$. La masse ainsi que la valeur absolue de la charge des granules de PA et PC augmentent avec la durée du processus de tribocharge. En conséquence, le rapport Q/m ne varie pas significativement avec le temps (figure 3.10). L'augmentation de la tension aurait dû s'accompagner de la collecte d'un nombre plus important de particules dans les deux cages de Faraday. Étonnamment, la masse du concentré de PA à $t = 18 \text{ s}$ et $t = 24 \text{ s}$ a diminué lorsque la tension U est montée de 24 kV à 36 kV (figure 3.10 et 3.11).

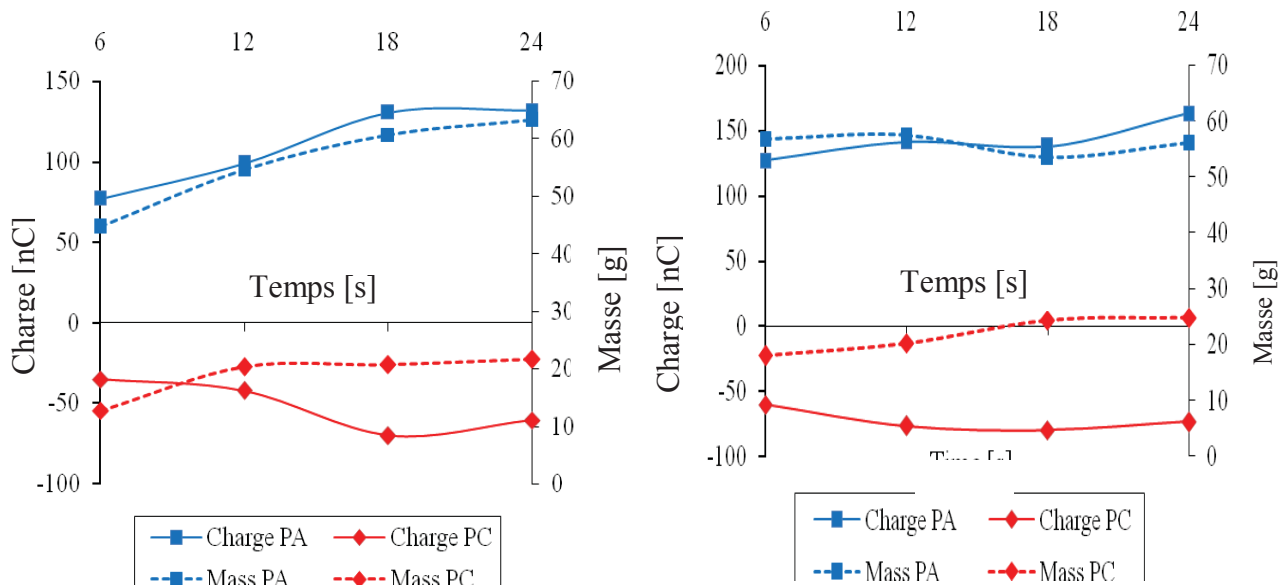


Figure 3.10 : Charge et masse des concentrés de PA et PC (essais effectués sur un mélange granulaire 75% PA - 25% PC, à $U = 24 \text{ kV}$ (a) et $U = 36 \text{ kV}$ (b) et à de diverses durées de charge $t = 6 \text{ s}$, 12 s , 18 s ; 24 s)

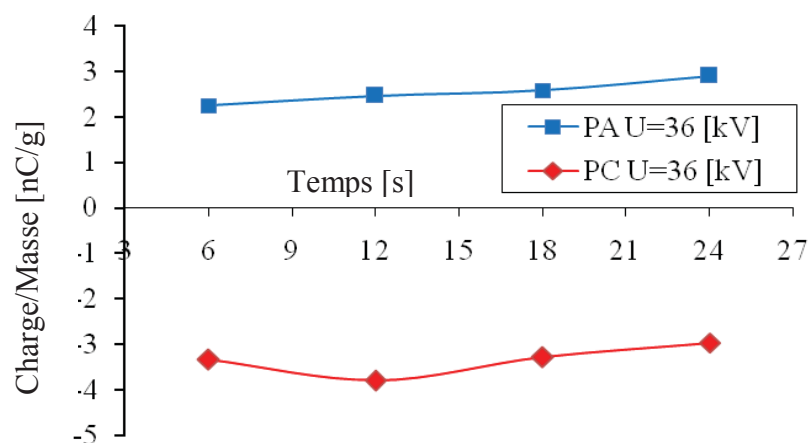


Figure 3.11 : Charge massique des concentrés de PA et de PC (essais effectués sur un mélange granulaire 75% PA - 25% PC, à $U = 36$ kV, et $t = 6$ s, 12 s, 18 s, 24 s).

Cela peut s'expliquer par le fait que le champ électrique exerce une action plus forte, et même les particules faiblement chargées ne pourront pas être dirigées dans la mauvaise case Faraday par les forces aérodynamiques. En effet, la très grande pureté du concentré de PA (93,71%) est accompagnée d'une reprise très forte du PC dans le concentré collecté au niveau des électrodes négatives (97,6%).

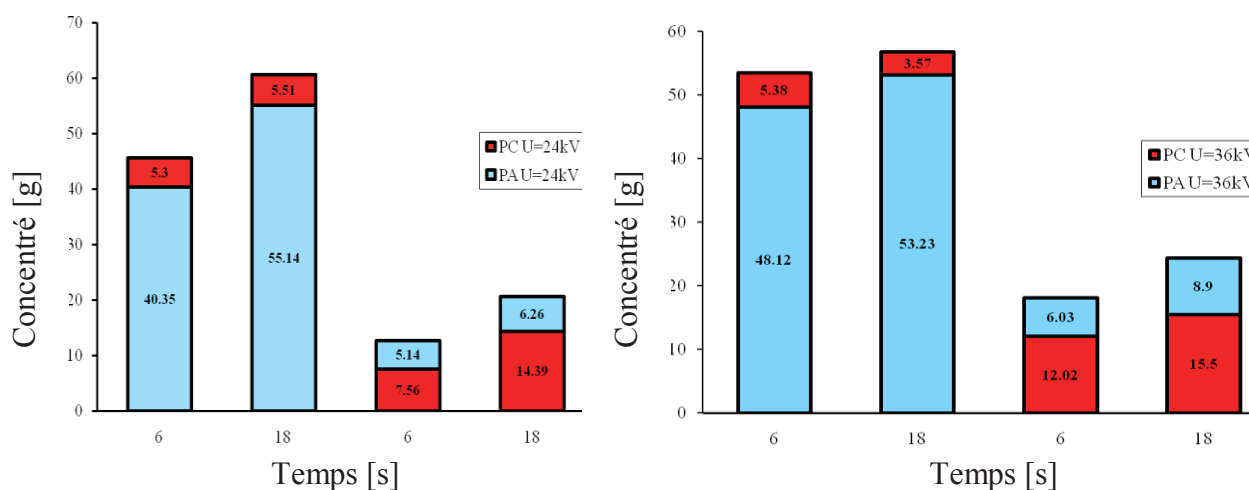


Figure 3.12 : Composition des concentrés de PA et de PC, pour des essais effectués sur un mélange granulaire 75% PA - 25% PC, à $U = 24$ kV, $U = 36$ kV et à deux durées de charge $t = 6$ s; 18 s.

3.3. Charge d'un mélange binaire de matériaux plastiques granulaires dans un dispositif à lit fluidisé à débit moyen et électrodes inclinées

Les expériences de triboélectrisation ont été effectuées sur des mélanges de matériaux granulaires composés d'ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène) et d'ABS-PC (acrylonitrile-butadiène-styrène/polycarbonate) (figure 3.13) fournis par une entreprise de recyclage (APR2, Bonnières-sur-Seine, France). Le tri sélectif de ces matériaux est difficile à réaliser avec les méthodes traditionnelles (gravitationnelle et par flottation), car l'ABS et l'ABS-PC ont des densités similaires (tableau 3.8).

3.3.1. Etude de la faisabilité du processus de charge par effet triboélectrique

A. Essais réalisés à vitesse réduite de l'air de fluidisation

Les granules de taille micrométrique s'électrisent après un temps relativement court, de quelques secondes environ [112]. Ils collent ensuite aux parois intérieures de la chambre de triboélectrisation en PMMA, ou sur les autres granules, plus grandes, de taille millimétrique. La taille des granules influence le processus de tribocharge, qui implique d'importants mouvements de granules, à la fois en direction horizontale, sous l'action des forces électriques, et en direction verticale, sous l'action de la force gravitationnelle. Afin que les résultats ne soient pas affectés par la non-homogénéité de taille des particules, les matériaux granulaires utilisés ont été tamisés (figure 3.12) et les essais ont été réalisés sur des granules ayant une taille supérieure au millimètre.

Tableau 3.8: Caractéristiques des matériaux utilisés dans les expériences

Matériau	Densité [kg/m ³]	Absorption en eau [% in 24 h]	Permittivité relative
ABS	1020 - 1280	0.1 – 0.15	3.1 – 3.4
ABS-PC	1100 - 1200	0.2 – 0.25	3.0 – 3.3

La procédure expérimentale comporte quatre étapes principales : 1) préparation des échantillons et leur introduction dans le dispositif à lit fluidisé ; 2) triboélectrisation du mélange ; 3) séparation électrostatique ; 4) analyse des résultats. La première étape est constituée des actions suivantes : - faire la tare de la balance électronique et mesurer les

quantités prescrites de chaque type de matériau utilisé ; - mélanger doucement les matériaux dans un récipient, en essayant de limiter la charge triboélectrique due aux manipulations ; - introduire le mélange dans le dispositif à lit fluidisé.

Pour la deuxième étape (charge triboélectrique), la soufflante doit être mise en marche en alimentant le moteur électrique d'entraînement par le variateur de fréquence. La vitesse de la turbine de la soufflante doit être ajustée à des valeurs capables de mettre le mélange granulaire dans l'état de lit fluidisé. Les valeurs des fréquences seront comprises entre 32,5 et 40 Hz. La durée de chaque essai a été établie à 30 secondes, mesurée à partir du moment où la valeur de la fréquence désirée est atteinte.

A l'étape suivante (séparation électrostatique), les sources haute tension sont allumées. Les valeurs de la haute tension utilisées sont comprises entre 8 et 18 kV. Après 3 s, temps jugé nécessaire pour collecter les particules chargées sur les deux électrodes de l'installation, les deux sources haute tension sont éteintes et l'air de fluidisation est arrêté.

La quatrième étape implique la réalisation des opérations suivantes : - déplacer les deux électrodes en position horizontale ; - collecter les particules colées sur la surface de chacune des électrodes à l'aide d'un aspirateur (figure 3.13) ; - déverser les granules aspirées dans une cage de Faraday connectée à un électromètre Keithley 6514, afin de mesurer leur charge (Par aspiration, le matériau acquit une charge supplémentaire d'environ 50 nC, valeur insignifiante par rapport à la charge finale accumulée par les particules) ; - peser les produits de la séparation.



Figure 3.13 : Équipements auxiliaires utilisés dans les expériences de triboélectrisation : 1) tamiseuse, 2-balance électronique (précision 0.01 g), 3-aspirateur

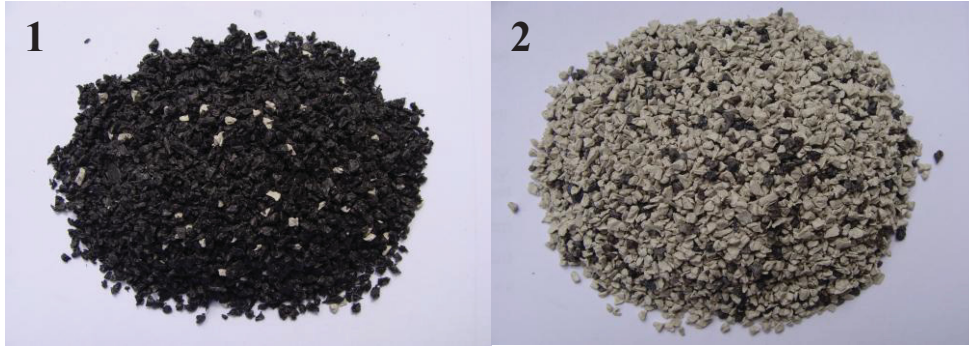


Figure 3.14 : Matériaux utilisés dans les expériences de triboélectrisation : 1) ABS-PC, 2-ABS, taille des particules entre 1 et 2 mm

L'efficacité du processus de triboélectrisation a été caractérisée par la masse et la charge des deux concentrés collectés par le système d'électrodes du dispositif expérimental.

Pendant le processus d'accumulation de charge par effet tribo, les granules d'ABS-PC acquièrent une charge positive et sont attirés par l'électrode de polarité négative. L'ABS se charge négativement et a été attiré par l'électrode de polarité positive. L'analyse du processus de tribocharge a été facilitée par les couleurs différentes des deux matériaux (figure 3.14).

Si on a comme objectif l'optimisation du processus de tribocharge, la méthodologie expérimentale recommande l'adoption d'un modèle quadratique :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{12} x_1 x_2 \quad (3.1)$$

où y est la réponse du processus et x_i est la valeur centrale normalisée pour chaque facteur u_i .

$$x_i = (u_i - u_{ic}) / \Delta u_i = u_i^* \quad (3.2)$$

$$u_{ic} = (u_{imax} + u_{imin}) / 2; \Delta u_i = (u_{imax} - u_{imin}) / 2 \quad (3.3)$$

Pour ce modèle, la fréquence f et la tension d'alimentation U ont été prises comme facteurs. La réponse q peut s'exprimer comme une fonction quadratique de ces facteurs:

$$q = a_0 + a_1 f^* + a_2 U^* + a_{12} f^* U^* + a_{11} f^{*2} + a_{22} U^{*2} \quad (3.4)$$

L'interprétation de ce modèle doit se faire en tenant compte de la corrélation qui existe entre la fréquence f d'alimentation du moteur d'entraînement de la soufflante et la vitesse v de l'air de fluidisation (tableau 3.9).

Tableau 3.9 : Corrélation entre la fréquence d'alimentation du moteur électrique de la soufflante et la vitesse de l'air de fluidisation

Fréquence f [Hz]	32.5	35	37.5	40
Vitesse d'air v [m/s]	5,55	5,95	6,38	6,66

La vitesse de l'air de fluidisation a été mesurée à l'aide d'un anémomètre. Les valeurs données dans le tableau 3.9 représentent la moyenne de trois mesures prises pour chaque fréquence. L'anémomètre a été placé à une distance $d = 20$ mm du diffuseur d'air.

Les données expérimentales obtenues ont été analysées avec le logiciel MODDE 5.0 (Umetrics, Suède) [107]. Celui-ci calcule les coefficients du modèle mathématique. La validation du modèle mathématique se fait à l'aide de deux indicateurs statistiques R^2 et Q^2 . Le premier indique la mesure dans laquelle les données calculées à l'aide du polynôme (3.1) correspondent aux résultats de mesures, tandis que le second évalue le modèle par rapport à sa capacité de prédire le résultat d'une expérience menée dans un autre point du domaine expérimental.

Pour l'étude de la faisabilité du dispositif de triboélectrisation, un plan d'expériences composite a été réalisé. Les domaines de variations des facteurs ont été : $f_{min} = 32.5$ Hz, $f_{max} = 40$ Hz, $U_{min} = 16$ kV, $U_{max} = 24$ kV. Les essais ont été réalisés sur des échantillons d'un mélange granulaire binaire 50%ABS-PC – 50% ABS. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.10. Les modèles mathématiques des réponses ont été obtenus avec le logiciel MODDE 5.0 en supprimant la ligne 9 de ce tableau, dont les valeurs sont hétérogènes par rapport à l'ensemble des données. Le logiciel calcule les coefficients polynomiaux (3.4) et évalue leur signification statistique en utilisant le test Student. Chaque coefficient exprime l'effet d'un facteur ou d'une interaction entre eux. L'effet est négligeable lorsque la valeur absolue de l'erreur expérimentale est proche de la valeur du coefficient.

Les indicateurs statistiques des modèles donnés par les relations (3.5) à (3.8) sont excellents : pour m_{ABS-PC} : $R^2 = 0.992$; $Q^2 = 0.952$; pour m_{ABS} $R^2=0.986$; $Q^2=0.933$; pour Q_{ABS-PC} $R^2=0.984$; $Q^2=0.917$; pour Q_{ABS} $R^2=0.971$; $Q^2=0.715$.

Tableau 3.10 : Charge et masse des produits de la séparation d'un mélange binaire granulaire 50%ABC-PC – 50%ABS, à $t = 30$ s ; premier plan composite.

Nr.ctr	f [Hz]	U [kV]	m_{ABC} [g]	m_{ABC-PC} [g]	Q_{ABC} [nC]	Q_{ABC-PC} [nC]
1	32.5	16	14.2	17.4	-317	267
2	32.5	24	18.2	21.9	-555	296
3	37.5	16	25.2	29.4	-684	379
4	37.5	24	27.9	38.8	-705	458
5	35	16	14.8	18.9	-490	259
6	35	24	18.6	27.2	-534	327
7	32.5	20	14.4	17.1	-507	326
8	37.5	20	25.6	33.1	-724	469
9	35	20	23.3	29	-556	441
10	35	20	15.9	19.5	-540	330
11	35	20	17.7	21.7	-520	303

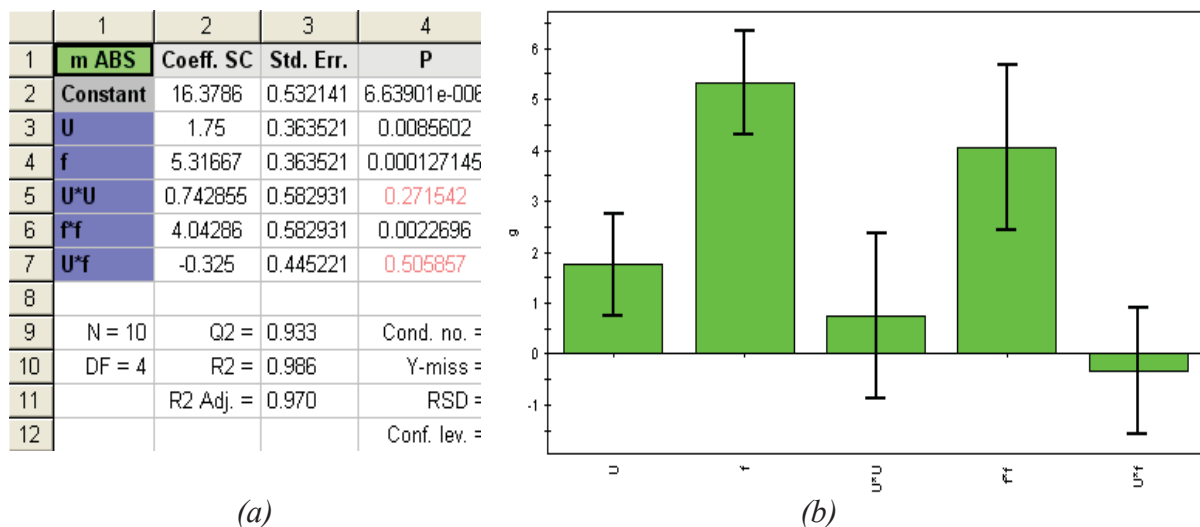
$$m_{ABS} [g] = 16.4 + 5.3f^* + 1.75U^* + 4.0f^{*2} \quad (3.5)$$

$$m_{ABS-PC} [g] = 20.8 + 7.5f^* + 3.7U^* + 4.1f^{*2} + 2.0U^{*2} \quad (3.6)$$

$$Q_{ABS} [nC] = -539 - 122f^* - 50.5U^* - 67f^{*2} + 54f^*U^* \quad (3.7)$$

$$Q_{ABS-PC} [nC] = 323 + 69.5f^* + 29.3U^* + 67f^{*2} - 37U^{*2} \quad (3.8)$$

Selon ces modèles, la masse et la charge atteignent leur valeurs maximales dans l'extrémité du domaine expérimental ($f = 37,5$ Hz et $U = 24$ kV, figure 3.15.). Les points optimaux du processus de tribocharge devraient être à des valeurs plus élevées de la fréquence f , qui se traduit par des valeurs plus élevées de la vitesse v de l'air de fluidisation. La quantité des granules d'ABS est inférieure à celle de l'ABS-PC d'une façon significative. Cela peut s'expliquer par le fait que les granules d'ABS-PC se chargent positivement en contact avec des granules d'ABS mais aussi avec les parois en PMMA du dispositif de triboélectrisation.



(a) (b)
Figure 3.15 : Effets des facteurs f , U , sur la masse ABS: a) les valeurs des coefficients et l'incertitude ; b) représentation graphique des coefficients. (Calculs réalisés par le logiciel MODDE 5.0)

Le rapport entre la charge et la masse des granules d'ABS a été $Q_{ABS}/m_{ABS} \cong -28,88$ [nC/g], deux fois plus que la charge massique des granules d'ABS-PC ($Q_{ABS-PC}/m_{ABS-PC} \cong 14,41$ [nC/g]). Ceci s'explique par le fait que la charge accumulée par les granules ABS-PC se dissipe rapidement en contact avec l'électrode sous l'action de la force image.

Les valeurs plus élevées de la haute tension appliquée intensifient le champ électrique entre les deux électrodes. Dans ce cas, les forces électriques sont plus puissantes et vont attirer des particules faiblement chargées. Le résultat est l'augmentation de la masse collectée.

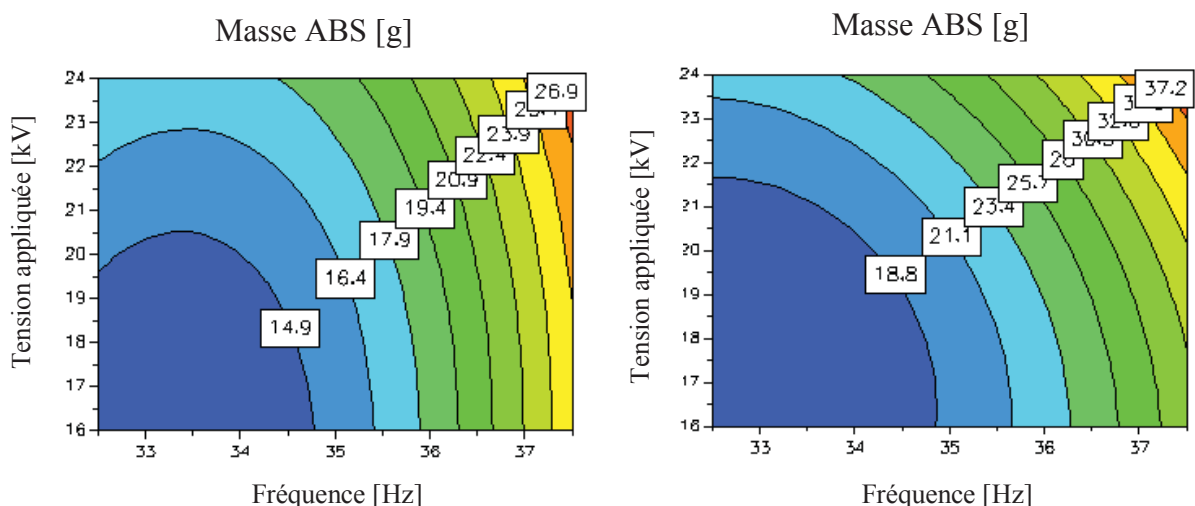


Figure 3.16 : Iso-contours de la masse d'ABS-PC et d'ABS prédits par le logiciel MODDE 5.0

B. Essais réalisés à vitesse élevée de l'air de fluidisation

Cet ensemble d'expériences a confirmé le fait que l'augmentation de la vitesse de l'air de fluidisation est accompagnée d'une plus grande efficacité du processus de charge triboélectrique (tableau 3.11 et figure 3.17). Des quantités plus importantes d'ABS et d'ABS-PC concentrés ont été obtenues à des vitesses élevées de l'air de fluidisation. Toutefois, la charge de deux produits n'a pas évolué de la même manière. Ainsi, la valeur moyenne du rapport Q/m du concentré ABS, $Q_{\text{ABS}}/m_{\text{ABS}} \cong -15$ [nC/g], ne représentait que la moitié de celle obtenue dans la première série d'expériences.

Tableau 3.11 : Charge et masse d'un mélange binaire granulaire 50%ABC-PC – 50%ABS, à $t = 30$ s ; deuxième plan composite.

Nr.ctr	f [Hz]	U [kV]	m_{ABC} [g]	$m_{\text{ABC-PC}}$ [g]	Q_{ABC} [nC]	$Q_{\text{ABC-PC}}$ [nC]
1	35	28	24	28.5	-272	439
2	35	36	21.9	29.4	-474	476
3	40	28	27.3	29.2	-400	536
4	40	36	27.3	33.7	-397	468
5	37.5	28	29.6	29.6	-410	431
6	37.5	36	26.6	30.1	-359	430
7	35	32	21.9	24.1	-479	416
8	40	32	27.7	33.7	-371	507
9	37.5	32	27.3	26	-384	441
10	37.5	32	22.4	27.8	-328	486
11	37.5	32	30.9	31.9	-379	550

En même temps, $Q_{\text{ABS-PC}}/m_{\text{ABS-PC}} \cong 16$ [nC/g], une valeur qui est légèrement supérieure à celle enregistrée à des vitesses d'air réduites. Cette observation peut être expliquée par l'influence croissante des impacts avec les parois du dispositif sur la charge acquise par les particules à des vitesses plus élevées de l'air de fluidisation. Une nouvelle augmentation de vitesse de l'air de fluidisation n'est pas possible, pour ne pas convertir le dispositif à lit

fluidisé dans un convoyeur pneumatique. La valeur optimale de la fréquence f est située dans la plage 35-40 Hz.

Aucun des coefficients du modèle $m_{ABS}(f^*, U^*)$, $m_{ABS-PC}(f^*, U^*)$, $Q_{ABS}(f^*, U^*)$, $Q_{ABS-PC}(f^*, U^*)$ n'étant pas significatif du point de vue statistique, le processus de tribocharge est robuste. Les prédictions faites par le logiciel MODDE 5.0 (figure 3.16) montre que le processus n'est pas sensible à des variations de la vitesse de fluidisation v dans la plage 5.95 – 6.66 m/s.

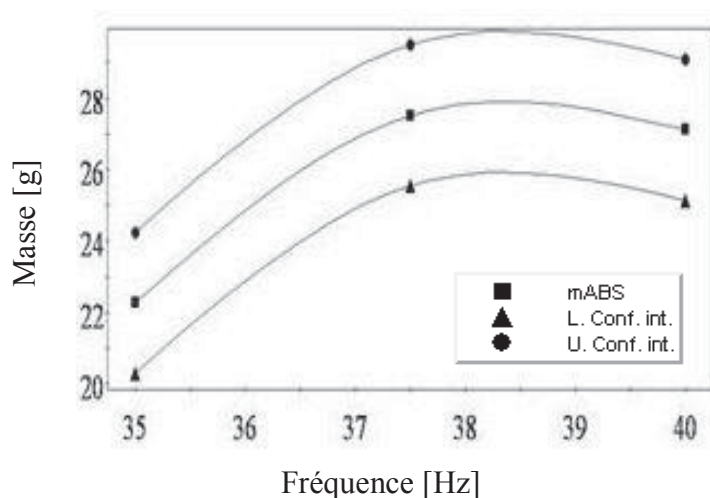


Figure 3.17 : Masse du concentré d'ABS prédite par le logiciel Modde 5.0, dans le cas d'un mélange 50% ABS – 50% ABS-PC à des valeurs plus grandes de la vitesse de l'air de fluidisation (deuxième plan composite)

3.3.2. L'étude des facteurs influents

A. L'influence des parois en PMMA de la chambre de triboélectrisation

Des expériences préliminaires ont été effectuées avec les matériaux ABS-PC et ABS, afin d'évaluer les collisions des granules avec la paroi en PMMA de la chambre de triboélectrisation. Le processus consiste à mesurer la charge électrique et la masse de chaque type de granules après 30 secondes. Les expériences ont été effectuées en utilisant le banc d'essai présenté sur la figure 3.4. Cinquante grammes de chaque type de granules ont été utilisés. La température ambiante et l'humidité relative ont eu les valeurs suivantes: $T = 22^\circ\text{C}$, $HR = 41\%$. Les résultats vus dans le tableau 3.12 montrent que les deux matériaux plastiques se chargent positivement en contact avec les parois en PMMA du dispositif et sont collectés à

Tableau 3.12 : Charge et masse des granules d'ABS-PC et d'ABS collectés aux électrodes en 30 s. (chambre de fluidisation en PMMA)

Matériau granulaire	f [Hz]	U [kV]	m ⁺ [g]	m ⁻ [g]	Q ⁺ [nC]	Q ⁻ [nC]
ABS	45	16	0.4	11.2	-34	219.5
ABS-PC	37.5	16	2.4	14.6	-52	155.4

l'électrode négative du dispositif. L'effet de ces impacts est plus fort dans le cas d'ABS-PC. La quantité de granules collectées est plus grande que dans le cas d'ABS.

La quantité collectée à l'électrode positive est représenté par les granules chargées par de collisions granule-granule. En augmentant la vitesse de l'air, cette partie diminue et la plupart des granules sont chargées par leurs impacts avec la paroi du dispositif à lit fluidisé.

B. L'effet de l'inclinaison de l'angle des électrodes

L'installation a été conçue avec un positionnement réglable des électrodes, permettant de modifier l'angle α d'inclinaison par rapport à la verticale. Les expériences ont été effectuées pour deux angles différents. Les paramètres constants étaient la tension $U = 28$ kV et la fréquence $f = 37,5$ Hz. La température ambiante et l'humidité relative ont eu les valeurs les suivantes: $T = 23^\circ\text{C}$, $HR = 30\%$.

Les résultats présentés dans le tableau 3.13, 3.14 ne montrent aucune différence significative entre les situations dans lesquelles $\alpha = 10^\circ$ et 15° .

Tableau 3.13 : Masse, charge et charge massique des concentrés d'ABS et d'ABS-PC obtenus d'un mélange granulaire 50% ABS- 50% ABS-PC pour des durées différentes de charge triboélectrique ($f = 37.5$ Hz ; $U = 28$ kV; $\alpha = 10^\circ$)

t [s]	m _{ABS} [g]	m _{ABS-PC} [g]	Q _{ABS} [nC]	Q _{ABS-PC} [nC]	Q _{ABS} /m _{ABS} [nC/g]	Q _{ABS-PC} /m _{ABS-PC} [nC/g]
5	34.5	34.7	-403.5	501.5	-11.70	14.45
10	36.86	36.13	-450.4	492.9	-12.22	13.64
15	34.96	37.36	-445.2	472.7	-12.73	12.65
20	37	37.03	-487	498.87	-13.16	13.47
25	36.83	37.5	-517	493.5	-14.04	13.16
30	36.6	35.7	-537	503.6	-14.67	14.11

Tableau 3.14 : Masse, charge et charge massique des concentrés d'ABS et d'ABS-PC obtenus d'un mélange granulaire 50% ABS- 50% ABS-PC pour des durées différentes de charge triboélectrique. ($f = 37.5 \text{ Hz}$; $U = 28 \text{ kV}$; $\alpha = 15^\circ$)

$t \text{ [s]}$	m_{ABS} [g]	$m_{\text{ABS-PC}}$ [g]	Q_{ABS} [nC]	$Q_{\text{ABS-PC}}$ [nC]	$Q_{\text{ABS}}/m_{\text{ABS}}$ [nC/g]	$Q_{\text{ABS-PC}}/m_{\text{ABS-PC}}$ [nC/g]
5	30.2	35.05	-461	397	-15.26	11.33
10	34.6	37.3	-486	454	-14.05	12.17
15	36	37.9	-476	436	-13.22	11.50
20	34.2	37.55	-462	469	-13.51	12.49
25	34.6	38.15	-488	482	-14.10	12.63
30	30.8	35.8	-473	363	-15.36	10.14

A un angle $\alpha < 10^\circ$, les composantes tangentielles des forces gravitationnelles surpassent les forces de frottement et font glisser les granules collées sur les électrodes. Pour un angle $\alpha > 15^\circ$, la dynamique du lit fluidisée est altérée et le processus de tribocharge est susceptible d'être moins efficace.

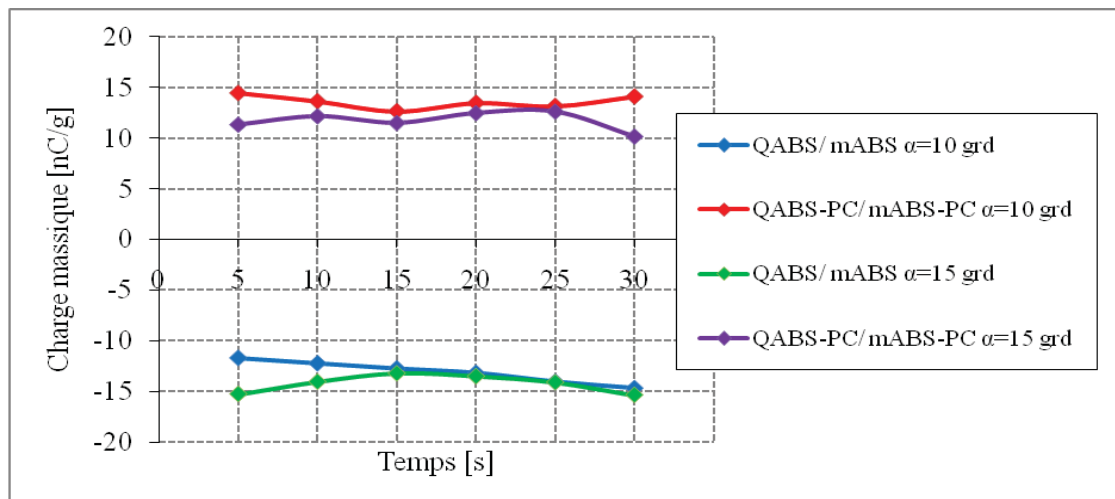


Figure 3.18 : Charge massique des concentrés d'ABS et d'ABS-PC obtenus d'un mélange granulaire 50%ABS-PC -50% ABS ; $f = 37,5 \text{ Hz}$, $U = 14 \text{ kV}$, $t = 30 \text{ s}$; l'angle des électrodes $\alpha = 10^\circ, 15^\circ$

3.3.3. Effet de la composition du mélange

Cet ensemble d'expériences a comme but d'observer la manière de charger les particules constitutives dans les mélanges granulaires en proportions différents.

A. Tribocharge d'un mélange granulaire 75% ABS – 25% ABS-PC

Les modèles mathématiques de la réponse du m_{ABS} ($R^2 = 0,997$, $Q^2 = 0,957$), et m_{ABS-PC} ($R^2 = 0,998$, $Q^2 = 0,908$) ont été obtenus avec MODDE 5.0 en utilisant les données dans le tableau 3.15, après la suppression des lignes 9 et 10, qui étaient non-homogènes avec les autres mesures:

$$m_{ABS} [g] = 17 + 2.87f^* - 1.56U^* - 2.78f^*U^* \quad (3.9)$$

$$m_{ABS-PC} [g] = 22.4 + 0.42f^* - 1.72U^* + 0.48U^{*2} - 1.45f^*U^* \quad (3.10)$$

Tableau 3.15 : Masse et charge des concentrés d'ABS et d'ABS-PC obtenus d'un mélange granulaire 75%ABS - 25% ABS-PC, en l'utilisant le plan d'expériences composite (durée des essais $t = 30$ s)

Essai	f [Hz]	U [kV]	m_{ABS} [g]	m_{ABS-PC} [g]	Q_{ABS} [nC]	Q_{ABS-PC} [nC]
1	35.0	28	13	22.7	-257	241
2	35.0	36	15.4	22.2	-325	238
3	40.0	28	14.7	20.1	-296	229
4	40.0	36	15.5	20.2	-337	181
5	37.5	28	18.5	24.7	-365	282
6	37.5	36	22	22.5	-458	213
7	35.0	32	14.2	22.1	-266	268
8	40.0	32	20.1	22.8	-437	237
9	37.5	32	18.3	24.3	-336	258
10	37.5	32	12.5	19.2	-243	168
11	37.5	32	16.8	22.4	-341	225

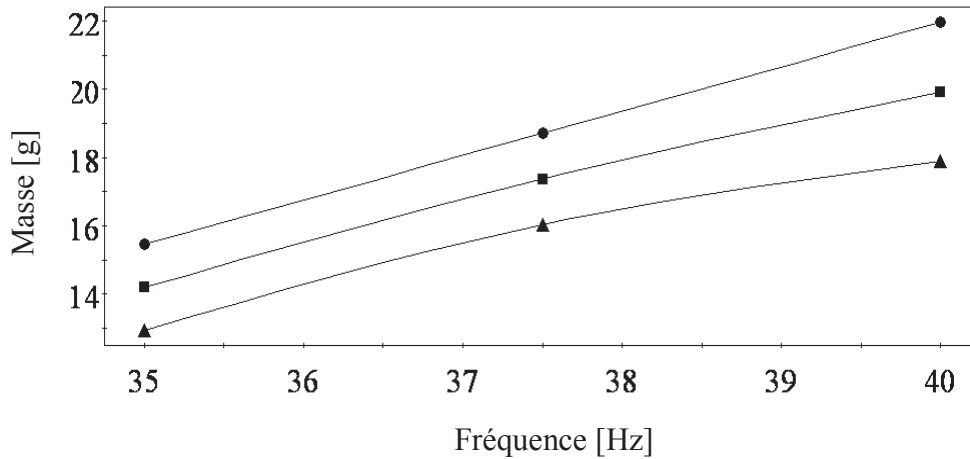


Figure 3.19 : Masse du concentré d'ABS (m_{ABS}) en fonction de la fréquence f . Prédiction faite par le logiciel MODDE5.0, dans le cas d'un mélange 75% ABS - 25% ABS-PC

La masse moyenne du concentré d'ABS est plus petite que celle la d'ABS-PC ($m_{ABS-PC}/m_{ABS} \cong 1.4$), en dépit du fait qu'ils sont majoritaires dans la composition du mélange granulaire. En effet, un granule d'ABS a une probabilité plus faible qu'un granule d'ABS-PC d'entrer en collision avec un granule de polarité opposée. Le processus de tribocharge est plus efficace pour les granulés d'ABS-PC, qui acquièrent une charge positive également en contact avec les parois du lit fluidisé. Comme aucun des coefficients des modèles $Q_{ABS}(f^*, U^*)$, $Q_{ABS-PC}(f^*, U^*)$ ne sont statistiquement significatifs, la conclusion qui s'impose est que le processus de tribocharge n'est pas très affectée par la variation de la vitesse de l'air de fluidisation dans la gamme de 5,95 m/s et 6,66 m/s, en dépit du fait que les masses m_{ABS-PC} et m_{ABS} augmentent avec la fréquence f , comme le montre la figure 3.19.

B. Tribocharge d'un mélange granulaire 25% ABS – 75% ABS-PC

Les données présentées dans le tableau 3.16 ont été utilisées pour obtenir le modèle mathématique de la masse du concentré d'ABS-PC :

$$m_{ABS-PC}[g] = 34.5 + 4.6f^* + 3.45U^* + 2.2f^*U^* \quad (3.11)$$

Selon ce modèle caractérisé par des indicateurs statistiques satisfaisants $R^2 = 0.927$; $Q^2 = 0.862$, la masse de granulés d'ABS-PC collectés à l'électrode négative augmente avec la fréquence f et les tensions appliquées U (figure 3.20). Une tendance similaire a été observée pour la masse de granules d'ABS, mais ni l'effet de la fréquence f , ni celle de la tension appliquée U ne sont statistiquement significatifs. Aucun des coefficients des modèles $Q_{ABS}(f^*, U^*)$, $Q_{ABS-PC}(f^*, U^*)$ n'étant statistiquement significatifs, il serait difficile de conclure que le processus est plus efficace à des fréquences plus élevées.

Tableau 3.16 : Masse et charge des concentrés d'ABS et d'ABS-PC obtenus d'un mélange granulaire 25%ABS - 75% ABS-PC, en l'utilisant le plan d'expériences complet (durée des essais $t = 30$ s)

Essai	f [Hz]	U [kV]	m_{ABS} [g]	m_{ABS-PC} [g]	Q_{ABS} [nC]	Q_{ABS-PC} [nC]
1	35.0	28	12.4	28.8	-133	145
2	35.0	36	12.3	31.3	-196	302
3	40.0	28	13.4	33.6	-208	252
4	40.0	36	19.5	44.9	-275	364
5	37.5	32	18.1	35.2	-245	291
6	37.5	32	15.8	36.2	-209	209
7	37.5	32	12.1	31.6	-242	235

En augmentant la vitesse de l'air v , plus de particules sont collectées sur chaque électrode, mais la pureté des concentrés diminue. En raison de la turbulence du lit fluidisé, quelques granules chargés peuvent se rapprocher et être attirés par la couche granulaire de polarité opposée déjà déposée sur une des électrodes. De cette façon, la masse de concentré collectée sur les électrodes augmente, mais la présence d'impuretés chargées de signe opposé peut réduire la charge globale mesurée dans la cage de Faraday. Une conclusion définitive sur les conditions optimales du processus de tribocharge ne peut pas être formulée sans tenir compte de la pureté des concentrés obtenus sur les électrodes du dispositif à lit fluidisé.

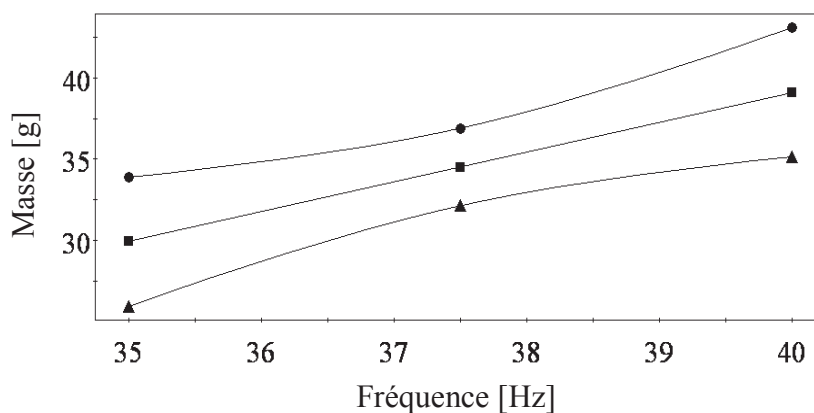


Figure 3.20 : Masse du concentré d'ABS-PC obtenu à partir d'un mélange 25% ABS - 75% ABS-PC, en fonction de la fréquence f

Conclusions

1. La charge par effet triboélectrique des mélanges de matériaux plastiques granulés dans les dispositifs à lit fluidisé est un processus multifactoriel. Son efficacité dépend fortement de la vitesse de l'air de fluidisation.
2. À des vitesses plus élevées, la quantité de charge échangée dans les collisions de type granule-granule est plus grande, mais la fréquence des collisions granule-paroi augmente aussi. La charge globale des granules dépend de l'équilibre entre ces deux mécanismes physiques. Par conséquent, selon la configuration de l'appareil de charge par effet tribo, l'augmentation de la vitesse de l'air ne conduit nécessairement à des niveaux plus élevés de la charge.
3. Le temps nécessaire de charge par effet tribo doit être déterminé expérimentalement pour chaque mélange granulaire et chaque dispositif à lit fluidisé.
4. La géométrie du lit fluidisé affecte à la fois les conditions aérodynamiques du processus de charge par effet tribo et l'efficacité de la collecte des granules chargés au niveau des électrodes.
5. La composition du mélange granulaire dans le lit fluidisé peut varier dans le temps, un constituant se chargeant plus rapidement que l'autre et quittant la zone active du dispositif. L'étude de cet aspect doit être approfondie, parce qu'il pourrait imposer de sévères contraintes à l'intégration des dispositifs à lit fluidisé dans un processus industriel continu.

4. SEPARATION TRIBO-AERO-ELECTROSTATIQUE DE MELANGES DE MATERIAUX GRANULAIRES

L'objectif de ce chapitre est de préciser les solutions techniques essentielles à la conception et à la réalisation d'un séparateur tribo aéro électrostatique, dont le principe de fonctionnement a été validé par quelques essais. Ce travail, financé par la société APR2 [25], porte sur les électrodes et l'alimentation haute tension, le lit fluidisé et l'alimentation en air comprimé, ainsi que sur le système de contrôle du flux de matière.

4.1. Conception et réalisation d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique

Un modèle de laboratoire du séparateur à lit fluidisé est en construction sur le site de l'IUT d'Angoulême de l'Institut Pprime, Université de Poitiers. Il devrait permettre de trouver les facteurs d'échelle à adopter pour créer le régime de charge optimal dans un lit fluidisé de dimensions industrielles.

Deux problèmes particuliers concernant la conception de cette installation seront abordés en concentration avec les partenaires du LCEI (Laboratoire des Champs Electriques Intenses) de l'Université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie : la construction optimale des électrodes haute tension et la mise au point d'un système de contrôle capable de corrélérer le débit de matière à l'entrée avec les quantités de produits obtenues après la séparation.

4.1.1. Principe de fonctionnement

Les procédés de séparation électrostatique [22,62,90] sont déjà utilisés pour le tri des matériaux isolants granulaires mélangés, provenant du broyage des déchets industriels [21]. Le plus souvent, les matériaux broyés sont chargés par effet triboélectrique [61] dans des dispositifs à vibrations, rotatifs ou à lit fluidisé (chapitre 1). La charge acquise par les particules dans les dispositifs utilisés actuellement n'est pas homogène: certaines particules arrivent à se charger convenablement et pourront donc être séparées dans un champ électrique assez intense, d'autres sortent des dispositifs de charge triboélectriques avec un niveau de charge insuffisant. L'état de charge des particules pourrait être amélioré en augmentant la durée du processus de charge, au détriment de la productivité du procédé [49]. Pour une durée de charge fixée, la quantité de charge effectivement acquise par les particules peut varier

d'une façon significative avec la température et l'humidité ambiantes, ainsi qu'avec l'état de surface des matériaux.

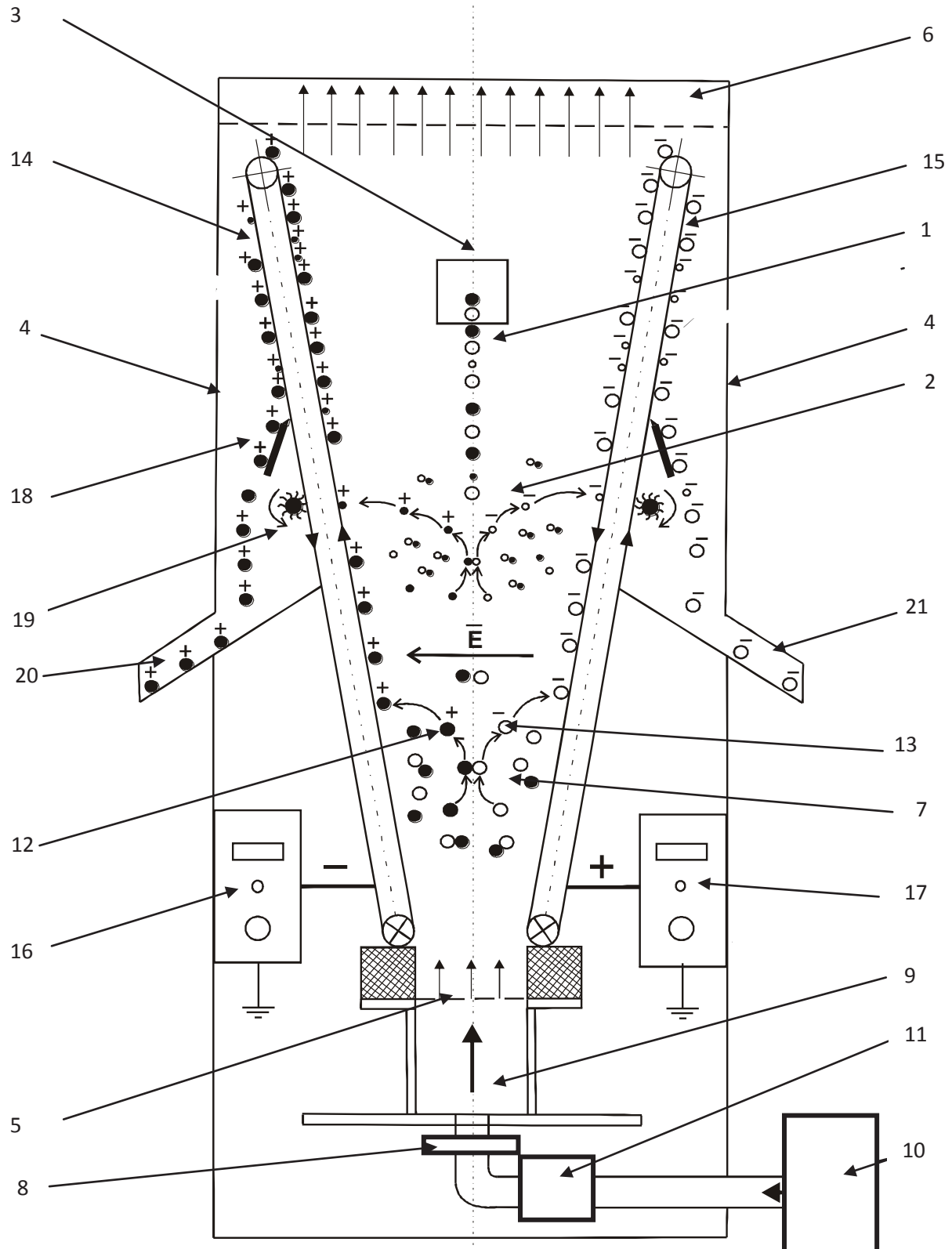


Figure 4.1 : Représentation schématique de l'installation de séparation tribo-aéro-électrostatique

L'efficacité du processus de charge pourrait être améliorée en introduisant des opérations de conditionnement thermique des matériaux et en contrôlant l'atmosphère ambiante, mais ces opérations augmenteraient le coût du procédé. Dans tous les cas, les granules chargés sont ensuite séparés dans le champ électrique d'une installation de tri électrostatique dite « à chute libre », comportant deux électrodes parallèles en position verticale. La productivité des installations utilisées pour la séparation des matériaux isolants granulaires est assez faible et la qualité des produits obtenus ne répond pas toujours aux exigences des clients. Les procédés actuels sont très peu robustes aux variations aléatoires des conditions ambiantes et des propriétés physico-chimiques des matériaux à séparer [52,66].

Le procédé original mis au point au laboratoire, en collaboration avec l'Université Technique de Cluj, permet de remédier ces inconvénients, en utilisant en même temps l'effet triboélectrique, la force de Coulomb et la force image électrique. Ainsi, l'effet triboélectrique assure l'homogénéité de la charge électrique acquise par les matériaux isolants granulaires [52] dans le lit fluidisé en ébullition générée par un gradient négatif de pression en direction verticale, dans une chambre de séparation ayant la forme d'un tronc de pyramide renversé.

Les granules ayant des charges électriques de polarités opposées se déplacent sous l'action de la force de Coulomb dans le champ électrique horizontal créé entre deux électrodes de type tapis roulant métallique, parallèles aux parois de la chambre de séparation, et sont soumis ensuite à la force d'image électrique qui les attache à la surface des électrodes ; ceux-ci assurent aussi l'évacuation des granules chargés de la zone de charge et de séparation, vers le collecteur de produits. Le débit des matériaux granulaires introduits dans la chambre de séparation est régulé à une valeur égale à la somme des quantités de granules collectés par unité de temps. Les granules non-chargés ne peuvent pas quitter la zone de charge, ce qui garantit la pureté absolue des produits collectés. D'autre part, chaque granule ne reste dans la zone de charge que le temps minimum nécessaire pour accueillir une charge suffisante pour qu'il soit attiré par l'une des électrodes, ce qui assure aussi l'optimisation du débit des matériaux traités. Si les conditions environnantes et l'état de surface des matériaux granulaires sont favorables au processus de charge triboélectrique, les granules sont rapidement dirigés vers les électrodes et récupérés dans le collecteur de produits, ce qui permet le fonctionnement à des débits de matière élevés. Dans le cas contraire, le débit des matériaux granulaires introduits dans l'installation sera réduit, afin de s'adapter au temps plus long que les granules

doivent passer dans la zone de charge. La figure 4.1 représente en coupe, l'installation de séparation électrostatique.

En référence à ce dessin, le mélange de matériaux isolants granulaires (1) est introduit dans une chambre de séparation tribo-aéro-électrostatique (2) par un dispositif d'alimentation à débit variable (3). Le diamètre caractéristique des granules du mélange (1) se situe entre 0.5 et 5 mm. La chambre de séparation (2) a quatre parois latérales (4) en matériaux compacts et étanches, un diffuseur d'air (5), à l'extrémité inférieure, et un filtre (6), à l'extrémité supérieure. Le diffuseur (5) et le filtre (6) sont en matériaux poreux, permettant respectivement l'admission et l'évacuation de l'air comprimé utilisé pour créer un gradient négatif de pression en direction verticale. La sortie du dispositif d'alimentation (3) est située à la partie supérieure de la chambre de séparation (2), afin d'introduire les granules par chute libre, en contre-courant par rapport à l'air de fluidisation. Soumis à l'action de la pesanteur et des forces aérolifiques, les granules admis dans la chambre de séparation (2) forment un lit fluidisé (7). Le débit de l'air de fluidisation est ajusté par un régulateur de pression (8) à une valeur assurant le fonctionnement du lit fluidisé (7) en régime d'ébullition, favorisant ainsi les impacts entre les granules et leur électrisation par effet tribo-électrique. Le gradient négatif de pression en direction verticale permet de distribuer les granules à des hauteurs différentes, en rapport avec leurs dimensions : les plus grandes ou plus lourdes restent en bas, tandis que les plus petites ou plus légères montent plus dans le lit fluidisé. La limite supérieure du lit fluidisé est établie par les granules les plus fines, mais ne dépasse pas 2/3 de l'hauteur de la chambre de séparation (2). L'homogénéité dimensionnelle des granules qui viennent en contact les uns avec les autres assure les meilleures conditions de tribo-électrisation.

Afin d'assurer une pression uniforme dans chaque section horizontale de la chambre de séparation, l'installation est équipée d'une chambre d'air (9), remplie de billes en verre, connectée à un compresseur (10) à son extrémité inférieure, et limitée à son extrémité supérieure par le diffuseur d'air (5). Un dispositif de chauffage (11), situé en amont de la chambre d'air (9), permet d'ajuster la température de l'air de fluidisation à 35-45°C afin de réduire l'humidité superficielle des granules améliorer les conditions d'électrisation par effet tribo-électrique. Chaque granule chargée positivement (12) ou négativement (13) est soumise à la force de Coulomb, dans le champ électrique horizontal créé entre deux électrodes de type tapis roulants métalliques (14) et (15), alimentées des générateurs de haute tension continue

ajustable (16) et (17). Les électrodes (14) et (15) sont situées à l'intérieur de la chambre de séparation (2).

Les granules chargés positivement (12) se déplacent dans le sens du champ électrique, vers l'électrode négative (14) et les granules chargés négativement (13) sont dirigés vers l'électrode positive (15). Soumis à l'action de la force d'image électrique, les granules chargés (12) et (13) adhèrent aux électrodes de polarités opposées (14) et (15), qui les entraînent en dehors de la zone occupée par le lit fluidisé. Détachés par des racleurs (18) et brosses rotatives (19) de la surface des électrodes (14) et (15), les deux sortes de granules (12) et (13) sont récupérés dans deux collecteurs de produits (20) et (21), dotés de dispositifs de mesure du poids. Le débit d'alimentation du séparateur est maintenu égal à la somme des quantités de granules collectés par unité de temps soit en ajustant manuellement la tension d'alimentation du dispositif (3), soit en utilisant un régulateur électronique de débit.

La composition des DEEE peut varier en termes de nature (deux ou plusieurs matières différentes) et des pourcentages des plastiques composant les mélanges. L'installation doit être capable de traiter $M_h = 1000$ kg DEEE par heure, dans le cas le plus favorable, où les deux constituants se trouvent en proportions égales dans le mélange (50%A + 50%B). Le débit de matière pourrait diminuer jusqu'à 500 kg/h, dans le cas des mélanges ayant des compositions moins équilibrées.

Les déchets granulaires sont conditionnés en « big-bags » de 1 m² ou 2 m². Les produits de la séparation sont collectés dans des sacs similaires. Des dispositifs appropriés doivent permettre l'alimentation continue en matière et la récupération des produits sans arrêt de l'installation. Cependant, l'installation doit être arrêtée avant de passer au traitement d'un déchet dont la nature des constituants est différente : passage d'un mélange A + B à un mélange A + C ou C + D ; passage d'un mélange binaire à un mélange comportant trois constituants ou plus.

4.1.2. Génération du champ électrique intense

A. Systèmes d'électrodes

L'une des particularités de ce séparateur consiste dans le fait que les électrodes sont constituées de deux bandes transporteuses métalliques. Le problème le plus délicat posé par l'utilisation de ce type d'électrodes est lié au risque d'apparition de décharges électriques à partir des bords des bandes métalliques.

Deux solutions existent pour limiter ce risque :

- (1) réduire le niveau de la haute tension qui peut être appliquée aux électrodes, mais ceci s'accompagnerait d'une diminution du champ électrique qui pourrait compromettre l'efficacité du processus de séparation ;
- (2) augmenter l'épaisseur des bandes métalliques, mais ceci imposerait l'utilisation de rouleaux d'entraînement de diamètre plus grand, donc plus encombrants.

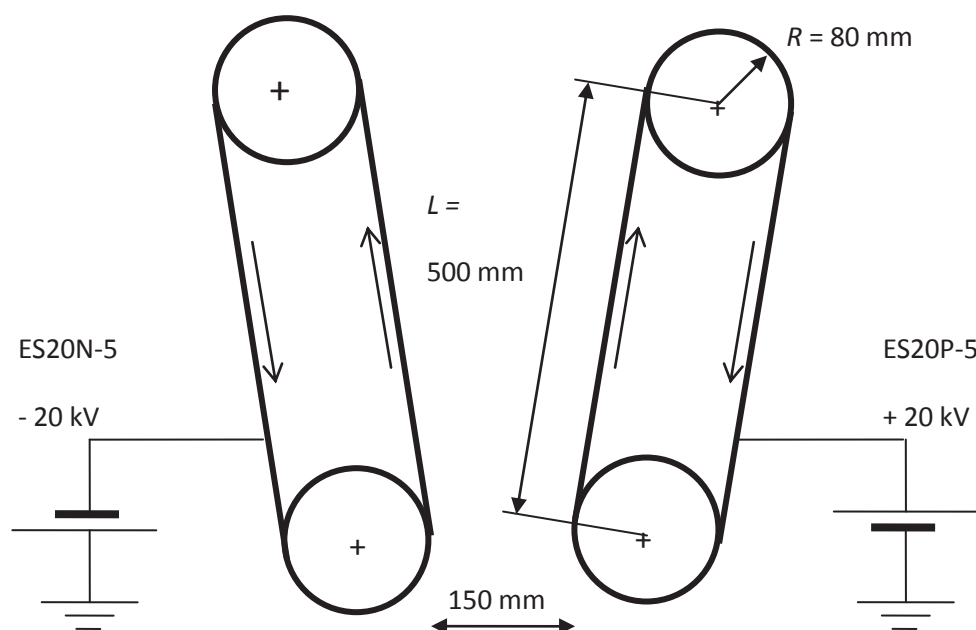


Figure 4.2 : Représentation schématique du système d'électrodes

L'utilisation des bandes métalliques d'épaisseur 0.25 mm, entraînées par des rouleaux de diamètre 160 mm semble représenter un bon compromis. Des essais réalisés sur des modèles de laboratoire suggèrent qu'une tension d'au moins 15 kV peut être appliquée à ces

électrodes, à condition que toute partie métallique de l'installation soit située à plus de 40 mm des bords des électrodes. Afin de disposer d'un champ électrique d'intensité supérieure à 2 kV/cm, la distance entre les électrodes alimentées à ± 15 kV ne devrait pas dépasser 15 cm.

Cette distance limite le volume du lit fluidisé et, par conséquent, le débit de matière qui peut être traité dans une installation. Il est fort probable que des études plus approfondies de la configuration du système d'électrode tant sur l'aspect aérodynamique que du point de vue des conditions d'apparition des décharges électrique permettraient d'augmenter encore plus cette distance, mais une telle démarche expérimentale, très lourde, dépasse le cadre de cette thèse.

B. Alimentation haute tension

Le séparateur fonctionnant en régime électrostatique (c'est-à-dire à très faible courant), il n'y a pas d'exigences particulières de puissance électrique concernant les alimentations haute tension. Les modèles ES20P-5 (+20 kV ; 5 W) et ES20N-5 (-20 kV ; 5 W), fabriqués par la société Gamma High Voltage Research Inc, Ormond Beach, FL, satisferont largement les besoins de cette application (figure. 4.3). Dans l'hypothèse d'une installation composée de plusieurs modules de séparation, il serait possible d'alimenter in parallèle les systèmes d'électrodes à partir de deux générateurs haute tension de polarités différentes, ES20P-20 (+20 kV ; 20 W) et ES20N-20 (-20 kV ; 20 W), selon le schéma montré sur la figure 3.3.

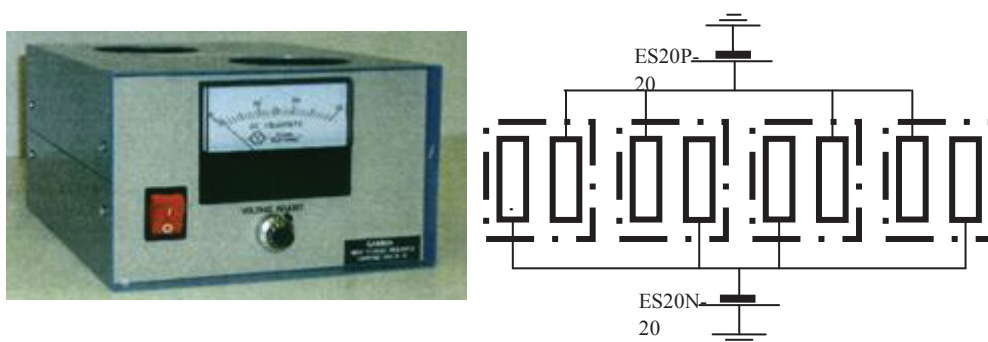


Figure 4.3. Alimentation haute tension modèle ES20P-5 (+20 kV ; 5 W), fabriquée par la société Gamma High Voltage Research Inc, FL, USA

4.2. Fluidisation des matériaux plastiques granulaires

4.2.1. Dimensionnement du lit fluidisé

La quantité de matière M se trouvant à un moment donné dans le lit fluidisé est imposée par le débit horaire à traiter $M_h = 1000$ kg/h. La durée « standard » du processus de charge, suggérée par des essais réalisés à Angoulême ne devrait pas dépasser 20 s. Dans ces conditions :

$$M = \{1000 \text{ [kg/h]} / 3600 \text{ [s]}\} \times 20 \text{ [s]} = 5,5 \text{ kg} \quad (4.1)$$

La densité des matériaux à séparer étant de l'ordre de $\rho = 1100$ kg/m³, et admettant que les granules ne représentent que $\varepsilon_{mf} = 0,5$ du volume V du lit fluidisé (hypothèse confirmée par des mesures réalisées à Angoulême) :

$$V = M / (0,5 \rho) = 5,5 \text{ [kg]} / 550 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 10 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (4.2)$$

Les dimensions de la section transversale du lit fluidisé sont : $d = 0,15$ m (distance entre les électrodes, imposée par la rigidité diélectrique de l'air) et $l = 0,4$ m (largeur de l'électrode, choisie parmi les valeurs normalisées communiquées par les constructeurs de bandes transporteuses métalliques, afin de respecter aussi des critères de similitude géométrique avec des dispositifs testés au laboratoire). La hauteur du lit fluidisé :

$$h = V/(d \times l) = 10 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]} / \{0,15 \text{ [m]} \times 0,4 \text{ [m]}\} = 166 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (4.3)$$

Dans les sections suivantes, les calculs seront faits pour $h = 200 \times 10^{-3} \text{ m} = 20 \text{ cm}$.

La longueur des électrodes doit assurer un volume libre suffisamment grand en dessus de la surface du lit fluidisé, afin de permettre le développement normal de celui-ci :

$$L \geq 500 \times 10^{-3} \text{ m} = 50 \text{ cm} \quad (4.4)$$

4.2.2. Choix de la soufflante

La soufflante doit être capable d'alimenter le lit fluidisé ayant les caractéristiques suivantes :

- particules (quasi-sphériques) : $d_p = 2$ mm ; densité : $\rho = 1100$ kg/m³ ;
- hauteur du lit : 0,2 m

- section du lit : $A = 0,4 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$

La perte de pression se calcule avec la relation suivante :

$$\Delta P = h (\rho - \rho_g) (1 - \varepsilon_{mf}) g = 0,2 \times 1100 \times 0,5 \times 10 = 1100 \text{ Pa} \quad (4.5)$$

les notations étant celles usuelles. Le nombre d'Archimède :

$$Ar = d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g / \mu^2 = 2^3 \cdot 10^{-9} \times 1,2 \times 1100 \times 10 / (18 \times 10^{-6})^2 = 326000 \quad (4.6)$$

Le nombre de Reynolds pour le diamètre moyen de la particule :

$$Re_{mf} = (25^2 + 0,0651 \times 326000)^{1/2} - 25 = 122 \quad (4.7)$$

La vitesse minimale de fluidisation :

$$U_{mf} = \mu Re_{mf} / (d_p \rho_g) = 18 \times 10^{-6} \times 122 / (2 \times 10^{-3} \times 1,2) = 0,915 \text{ m/s} \quad (4.8)$$

Avec $U_f = 1 \text{ m/s}$, le débit d'air nécessaire à la fluidisation :

$$Q_f = A \times U_f = 0,4 \times 0,15 \times 1 = 0,06 \text{ m}^3/\text{s} = 3,6 \text{ m}^3/\text{min} = 216 \text{ m}^3/\text{h} \quad (4.9)$$

A partir de ce calcul, le choix porte sur une soufflante caractérisée par un $Q_f = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ et $\Delta P > 10000 \text{ Pa}$, pour tenir compte des autres pertes de pression possibles. Le modèle SCL K06, 3 kW, fabriquée par la société FPZ SpA, Concorezzo, Italie, satisfait ces critères.

(figure. 4.4). Ses caractéristiques $\Delta P = f(Q)$ sont données sur la figure 4.5.

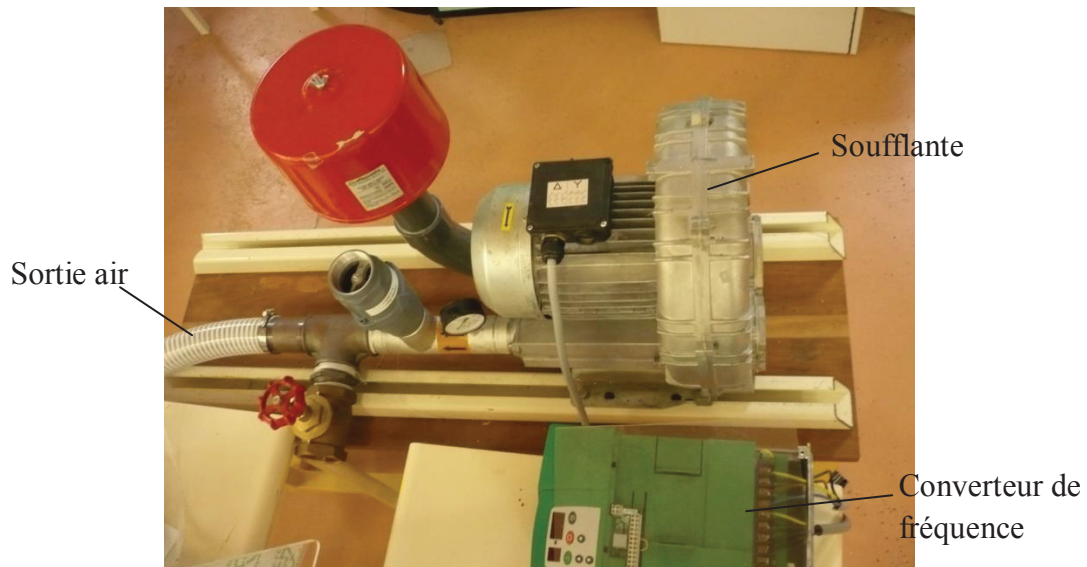


Figure 4.4 : La soufflante SCL K06, 3 kW, fabriquée par la société FPZ SpA, Concorezzo, Italie

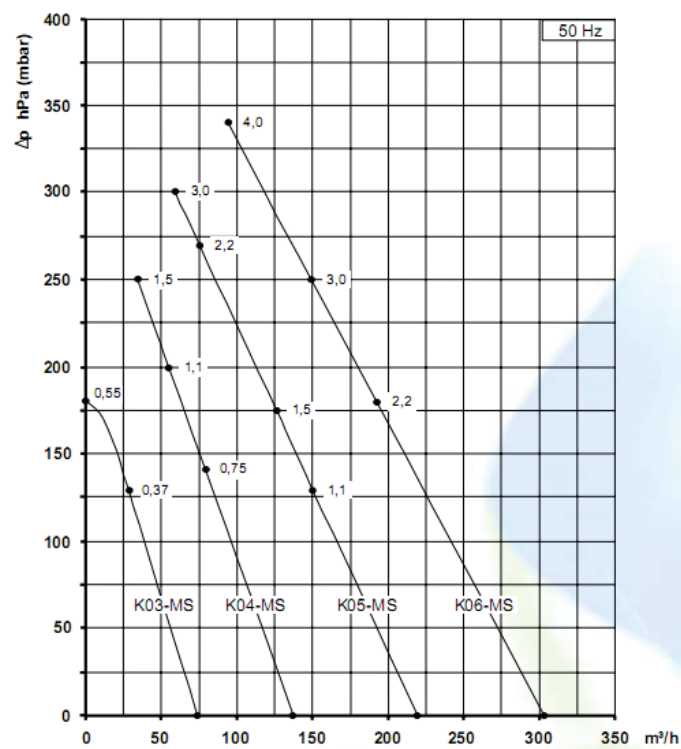


Figure 4.5 : Caractéristiques de fonctionnement des soufflantes SCL fabriquées par la société FPZ SpA, Italie[25]

4.3. Flux de matière

4.3.1. Alimentation en matière

Les déchets granulaires d'équipements électriques et électroniques étant conditionnés en « big-bag »s de 2 m³, l'installation doit être équipée d'un déchargeur (figure. 4.6).



Figure 4.6 : Déchargeur « big-bag » avec trémie tampon[25]

Celui-ci devra faciliter le transfert de la matière vers la chambre de séparation, à travers les canalisations d'un système de transport pneumatique. L'air nécessaire sera prélevé à la sortie de la soufflante qui assure aussi le fonctionnement du lit fluidisé.

Le débit d'air permettant le transport de $M_h = 1000$ kg/h est calculé en respectant les recommandations concernant la conception des convoyeurs pneumatiques. Ainsi, le rapport entre la masse des particules transportées M_h et la masse de l'air qui assure le transport M_a , par unité de temps, doit être inférieur à 20. Afin de satisfaire cette condition et en considérant que la densité de l'air $\rho_a = 1$ kg/m³, le débit total Q_t de l'air de transport doit être :

$$Q_t = M_a / \rho_a = (M_h / 20) / \rho_a = 50 \text{ m}^3/\text{h} \quad (4.10)$$

La vitesse de l'air pour le transport des granules de DEEE est de l'ordre de $v_t = 20$ m/s. Chacune des deux conduites de transport doit avoir une section :

$$A_t = (Q_t / 2) / v_t = \{50 [\text{m}^3/\text{h}] / 2\} / \{3600 [\text{s/h}] \times 20 [\text{m/s}] = 2,77 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (4.11)$$

4.3.2. Calcul et mesure du débit de matière à la sortie

Des essais préliminaires, réalisées sur modèle expérimental construit au Laboratoire de Champs Electriques Intenses de l'Université Technique de Cluj-Napoca après un modèle proposé par Laur CALIN [17], ont montré que les bandes transporteuses peuvent évacuer $m/S = 1$ kg/m². Avec des bandes transporteuses de largeur $l = 0,400$ m, ayant une vitesse maximum $v = 8$ m/min (figure 4.7, dispositif réalisé par la société Trasmodul, Etampes, pour l'IUT d'Angoulême), le débit de matière en sortie M_s ne pourra pas dépasser, pour un produit :

$$M_s^{(\text{cas 1})} = m/S \cdot l \cdot v = 1 \times 0,4 \times 8 = 3,2 \text{ kg/min} = 192 \text{ kg/h} \quad (4.12)$$

Avec une bande transporteuse ayant une vitesse de $v = 25$ m/min (cas 2, installation à réaliser pour APR2),

$$M_s^{(\text{cas 2})} = m/S \cdot l \cdot v = 1 \times 0,4 \times 25 = 10 \text{ kg/min} = 600 \text{ kg/h} \quad (4.13)$$

Dans le cas d'un mélange de deux produits présents en proportions égales à l'entrée de l'installation, les deux électrodes pourraient évacuer une quantité $M_{\text{tot}}^{(\text{cas 2})} = 1200$ kg/h.

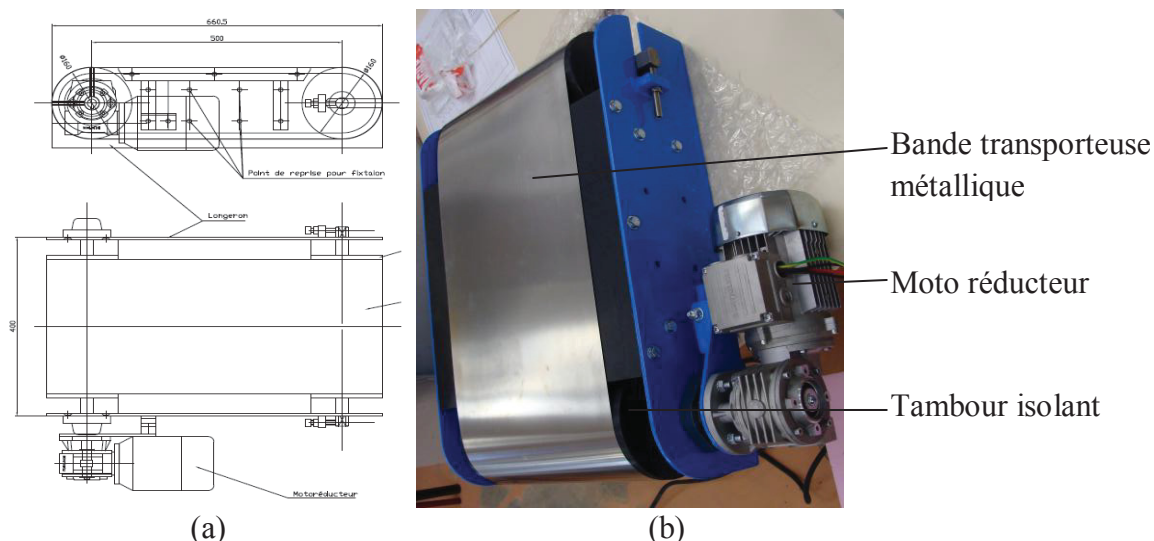


Figure 4.7: Convoyeur à bande métallique, fabriqué par Transmodul, Etampes ;
(a) schéma ; (b) photo

La vitesse maximale des bandes transporteuses offertes sur catalogues par les constructeurs est de 30 m/min. Les conditions spéciales de cette application, notamment la nécessité d'assurer l'étanchéité de la chambre d'air du lit fluidisé, pourraient limiter la vitesse disponible et les débits de matière en sortie. Si une diminution du débit de matière à l'entrée n'est pas envisageable, il va falloir augmenter la largeur de la bande, jusqu'à la limite maximum fournie par les constructeurs, $l = 0,6$ m. Cet agrandissement de 33% la section transversale du lit fluidisé imposerait une augmentation proportionnelle du débit d'air assuré par la soufflante.

La mesure du débit de matière en sortie pourra se faire en pesant les produits collectés soit avant soit après leur récupération dans le « big-bag »s collecteurs (le constructeur et le modèle restent à préciser). Le débit d'entrée devrait diminuer/rester constante/augmenter si le débit total de matière en sortie (la somme des produits collectés dans les deux « big-bag »s) diminue/reste constante/augmente.

4.3.3. Analyse du fonctionnement de l'installation

Le débit de matière à l'entrée de l'installation est :

$$m_e = dM_e/dt = m = dM/dt \quad (4.14)$$

il doit être égal au débit à la sortie de l'installation :

$$m_s = dM_s/dt = m \quad (4.15)$$

La composition du mélange binaire ($A + B$) à l'entrée de l'installation est :

$$m_{eA} = cm \text{ et } m_{eB} = (1 - c)m \quad (4.16)$$

avec $c \leq 0,5$; ainsi :

$$m_{eA} + m_{eB} = m \quad (4.17)$$

Le lit fluidisé doit contenir initialement la quantité $M_0 = 5,5$ kg jugée nécessaire au bon fonctionnement de l'installation, dans les conditions où le débit d'air de fluidisation ne peut pas être modifié. Les deux bandes transporteuses démarrent à la même vitesse (valeur maximale). L'alimentation en air de fluidisation étant mise en marche en même temps que les générateurs hautes tensions auxquels sont connectées les deux électrodes du séparateur, les particules vont commencer à se charger par effet triboélectrique. Attirées par les électrodes – bandes transporteuses, elles seront évacuées dans les collecteurs de produits (« big-bag »-s) et seront pesées en continu. Les débits instantanés des deux produits ($m_{sA} = dM_{sA}/dt$ et $m_{sB} = dM_{sB}/dt$) sont les variables de sortie par rapport auxquelles sera réalisé le contrôle du processus.

Les particules se chargent par impact avec les particules de nature différente. Dans un lit fluidisé de caractéristiques données, chaque particule subit en moyenne N collisions dans l'unité de temps (écart-type σ). Une particule de type A subira $N_{AA} = cN$ collisions avec des particules de même nature, et $N_{AB} = (1 - c)N$ collisions avec des particules de type B , ces derniers s'accompagnant d'un échange de charge. Une particule de type B subira $N_{BB} = (1 - c)N$ collisions avec des particules de même nature, et $N_{BA} = cN$ collisions avec des particules de type A , ces derniers s'accompagnant d'un échange de charge. Les probabilités pour des particules de type A et B de subir des collisions entraînant une modification de la charge sont respectivement :

$$P_A = (1 - c)N/N = 1 - c \quad (4.18)$$

$$P_B = cN/N = c \quad (4.19)$$

Après X collisions de ce type, la charge acquise est suffisante pour qu'une particule soit collectée à l'électrode qui va l'évacuer de la zone de séparation. La probabilité pour une particule de type A de subir dans l'unité de temps $N_{AB} \geq X$ collisions, afin de pouvoir être collectée à l'électrode de polarité opposé, s'exprime comme :

$$P(N_{AB} \geq X) = 0,5 - \Phi((X - N_{AB})/\sigma_{AB}) \quad (4.20)$$

Φ étant la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite. De la même façon, la probabilité pour une particule de type B de subir dans l'unité de temps $N_{BA} \geq X$ collisions, afin de pouvoir être collectée à l'électrode de polarité opposé, s'exprime comme :

$$P(N_{BA} \geq X) = 0,5 - \Phi((X - N_{BA})/\sigma_{BA}) \quad (4.21)$$

Les quantités de particules de type A et B collectées aux électrodes pendant l'unité de temps s'expriment respectivement en fonction des masses M_A et M_B des deux produits présents dans le lit fluidisé à un moment donné :

$$dM_{As}/dt = P(N_{AB} \geq X) M_A = [0,5 - \Phi((X - N_{AB})/\sigma_{AB})] cM \quad (4.22)$$

$$dM_{Bs}/dt = P(N_{BA} \geq X) M_B = [0,5 - \Phi((X - N_{BA})/\sigma_{BA})] (1 - c) M \quad (4.23)$$

Les particules minoritaires A se chargeant plus rapidement que les particules majoritaires, qui ont moins de collisions avec des particules de signe opposé, la composition du mélange granulaire présent dans le lit fluidisé ne restera pas constante sans qu'une régulation des débits de sortie ne soit faite. Ainsi, il conviendra de réduire la vitesse v_A de la bande transporteuse qui collecte et évacue les particules minoritaires à une valeur $v'_A = k v_A$, avec $k < 1$, de façon que la condition suivante soit respectée :

$$k (dM_{As}/dt)/(dM_{Bs}/dt) = c/(1 - c) \quad (4.24)$$

Compte tenu des relations (5.13) et (5.16), la constante k peut s'exprimer comme suit :

$$k = [0,5 - \Phi((X - N_{BA})/\sigma_{BA})]/[0,5 - \Phi((X - N_{AB})/\sigma_{AB})] \quad (4.25)$$

Les valeurs de $\Phi((X - N_{BA})/\sigma_{BA})$ et de $\Phi((X - N_{AB})/\sigma_{AB})$ n'étant pas connues pour deux matériaux A et B quelconques, la réduction de la vitesse v_A ne pourra se faire que

progressivement, grâce à un système de commande en boucle fermée, illustré sur la figure 4.8. Les convoyeurs étant typiquement équipés des moteurs asynchrones triphasés, le contrôle de vitesse pourra se faire avec des variateurs UMV 4301, fabriqués par Leroy Sommer, Angoulême. La solution a déjà été testée sur le pilote construit à Angoulême. Ainsi, la vitesse v_A devra diminuer jusqu'au moment où le rapport entre les débits des produits A et B mesurés à la sortie des deux bandes transporteuses reste constant :

$$m_{sA}/m_{sB} = \text{constant} \quad (4.26)$$

A chaque moment, le débit d'entrée m_e doit être égal à la somme des deux débits de sortie :

$$m_e = m_{sA} + m_{sB} \quad (4.27)$$

L'installation doit donc être équipée d'un système de dosage de matière capable d'assurer la corrélation entre les quantités de produits qui sortent de l'installation et celles qui y entrent.

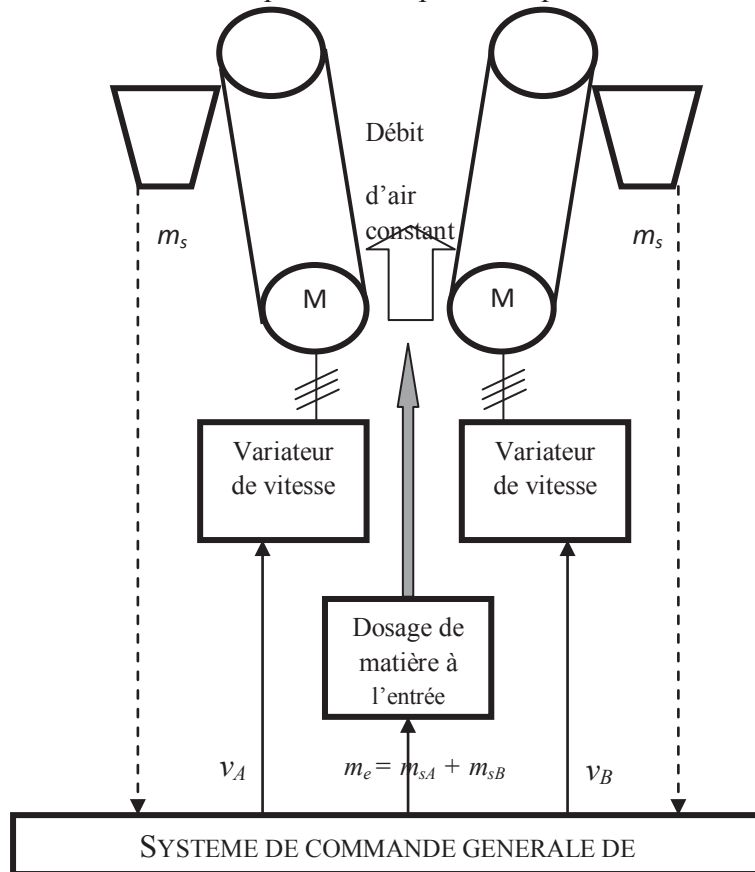


Figure 4.8: Schéma de principe de la commande de l'installation ;

m_{sA} et m_{sB} : valeurs mesurées du débit des produits A et B à la sortie de l'installation ;

v_A et v_B : valeurs imposées des vitesses des deux convoyeurs – électrodes ;

$m_e = m_{sA} + m_{sB}$: valeur imposée du débit de matière à l'entrée de l'installation.

4.4. Etude des facteurs influents du processus de séparation

Le but de cette étude expérimentale est l'analyse du fonctionnement du modèle expérimental de séparateur tribo-aéro-électrostatique du Laboratoire des Champs Electriques Intenses de Cluj-Napoca et la réalisation de modifications constructives afin de répondre aux exigences d'une application industrielle. Ce travail a été réalisé pendant un stage de 8 mois effectué à l'Université Technique de Cluj-Napoca, sous la direction des professeurs Adrian SAMUILA et Alexandru IUGA [60,94], et en bénéficiant des conseils du Dr. Ing. Laur CALIN [17].

4.4.1. Effet de la composition du mélange

Les essais ont été réalisés sur l'installation de séparation tribo-aéro-électrostatique montrée sur la figure 4.9.



Figure 4.9: Banc d'essai pour l'étude du processus de séparation tribo aéro électrostatique : 1-soufflante, 2-variateur de fréquence, 3-sources haute tension, 4-séparateur tribo-aéro-électrostatique.

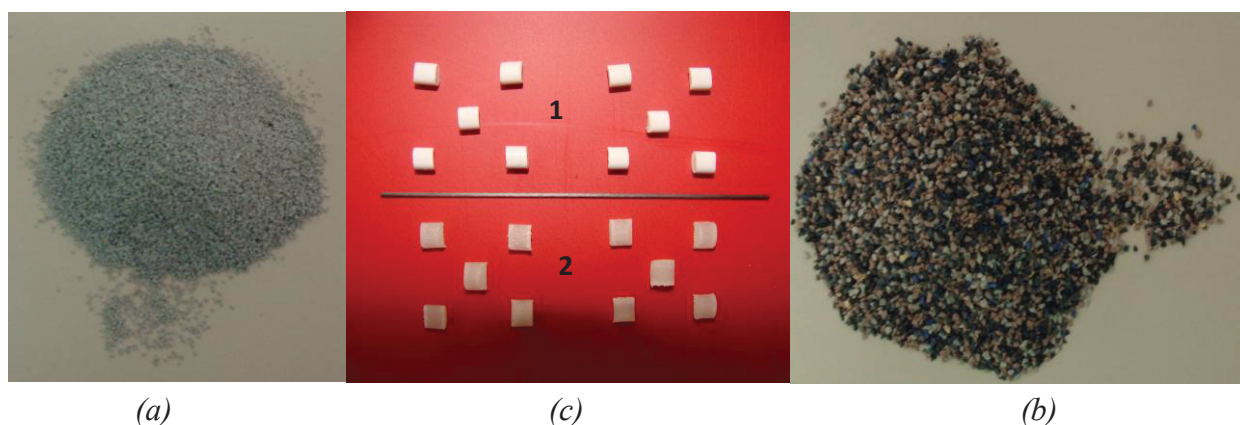


Figure 4.10: Aspect de trois échantillons de granules broyés : (a) ABS broyé ; (b) ABS-PC broyé ; c(1), c(2) – ABS, PA

L'étude du nouveau procédé de séparation tribo-électrostatique a été rendue possible par la préparation de plusieurs échantillons d'ABS, d'ABS-PC purs, provenant de déchets préalablement triés par nature du plastique et par couleur et ABS et PA vierges (figure 4.10). Ceci a facilité : (1) l'étude de l'aptitude de ce matériaux à se charger par effet tribo-électrique ; (2) l'analyse de la faisabilité de la séparation des mélanges de plastiques.

L'analyse granulométrique des échantillons mis à disposition dans un premier temps par la société APR2 a montré que plus de 75% des granules ont des dimensions comprises entre 1 et 2 mm (figure 4.11). Dans les sections suivantes du rapport, la taille moyenne des particules sera considérée égale à 1.5 mm. La densité des matériaux plastiques traités se situe dans la plage 1 à 1,2 g/cm³.

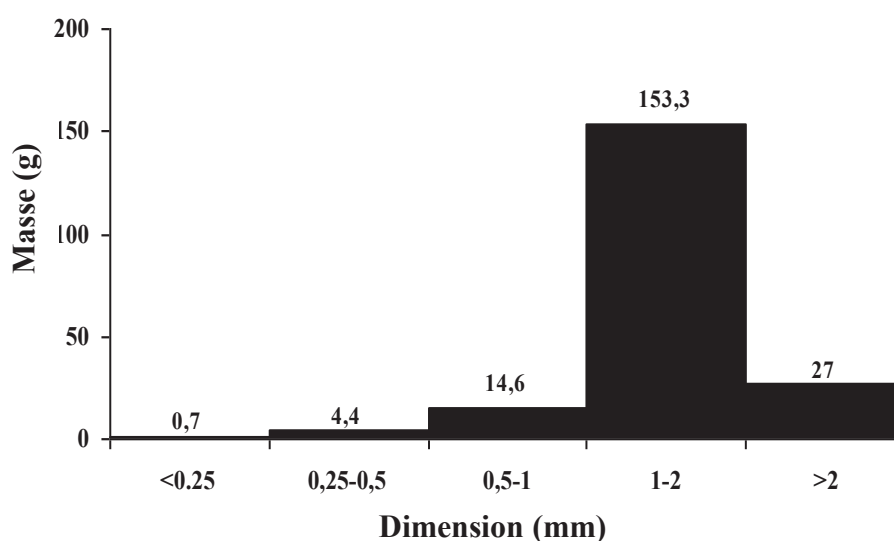


Figure 4.11: Distribution granulométrique d'un échantillon de 200 g d'ABS noir

La préparation des échantillons implique le calibrage de la balance électronique (OHAUS LS200, capacité de 200 g, lisibilité de 0,1 g) et le mesurage de chaque type de matériel plastique granulaire.

Les quantités mesurées de chaque assortiment de granules sont introduites séparément dans le dispositif à l'aide d'un petit plateau en métal (acier inoxydable poids 60 g), à travers la partie supérieure de la chambre du séparateur.

La configuration du modèle expérimental STAES (séparateur tribo-aéro-électrostatique figure 4.12) est établie en tenant compte des paramètres suivants :

- La température ambiante T [°C]
- l'humidité relative de l'air RH [%]
- Le potentiel de l'électrode extérieur de droite V_1 [V]
- Le potentiel de l'électrode extérieur de gauche V_2 [V]
- La vitesse de bandes transporteuses (corrélée avec la tension d'alimentation du motoréducteur) v [m/s]
- Le matériau des parois
- La fréquence de sortie du convertisseur qui alimente le moteur de la turbosoufflante corrélée avec le débit de l'air de fluidisation f [Hz]
- Les configurations d'électrodes utilisées.

Tableau 4.1: Corrélation de la vitesse de fluidisation mesurée à l'aide d'un anémomètre à coupelles et le débit de l'air de fluidisation

f [Hz]	5	10	15	20	25
v [m/s]	5	10	15	20	25
Q [m ³ /s]	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$12 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$

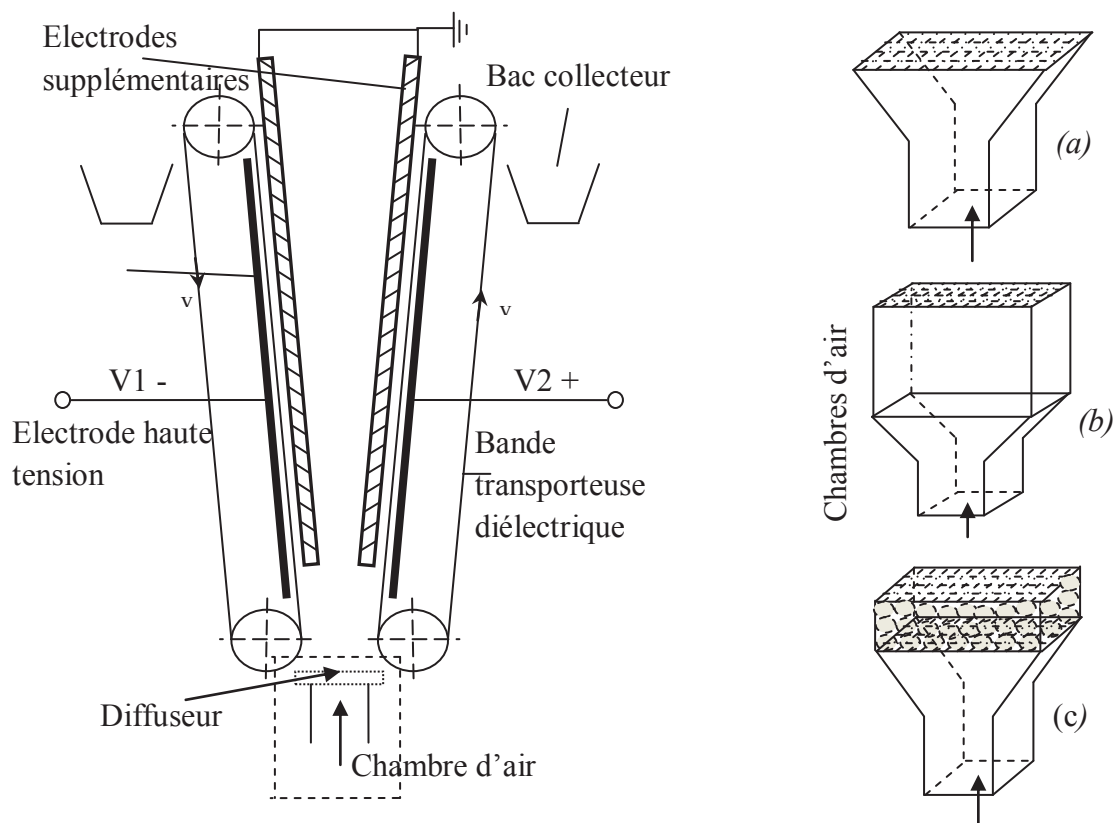


Figure 4.12: Dispositif de séparation tribo-aéro-électrostatique, équipé avec plusieurs chambres d'air (a) : simple ; (b) composée ; (c) avec billes de verre

La mise en marche du séparateur tribo-aéro-électrostatique comporte les opérations suivantes :

- 1) alimentation du convertisseur de fréquence du tableau électrique triphasé et ajustement de la vitesse du moteur électrique d'entraînement de la soufflante en modifiant la fréquence, pour que l'air sous pression fourni à l'installation apporte le mélange granulaire en régime de lit fluidisé.
- 2) mise en fonction des deux bandes transporteuses (figure 4.13) entraînées par un motoréducteur à tension continue. La vitesse des bandes est corrélée avec le processus de séparation tout en modifiant la tension du redresseur à travers un autotransformateur réglable.

3) allumage des sources haute tension. La tension, réglable dans la plage de 10-20 kV, est limitée par la rigidité diélectrique de l'espace entre les deux électrodes, situées à 5 mm derrière les bandes transporteuses diélectriques.

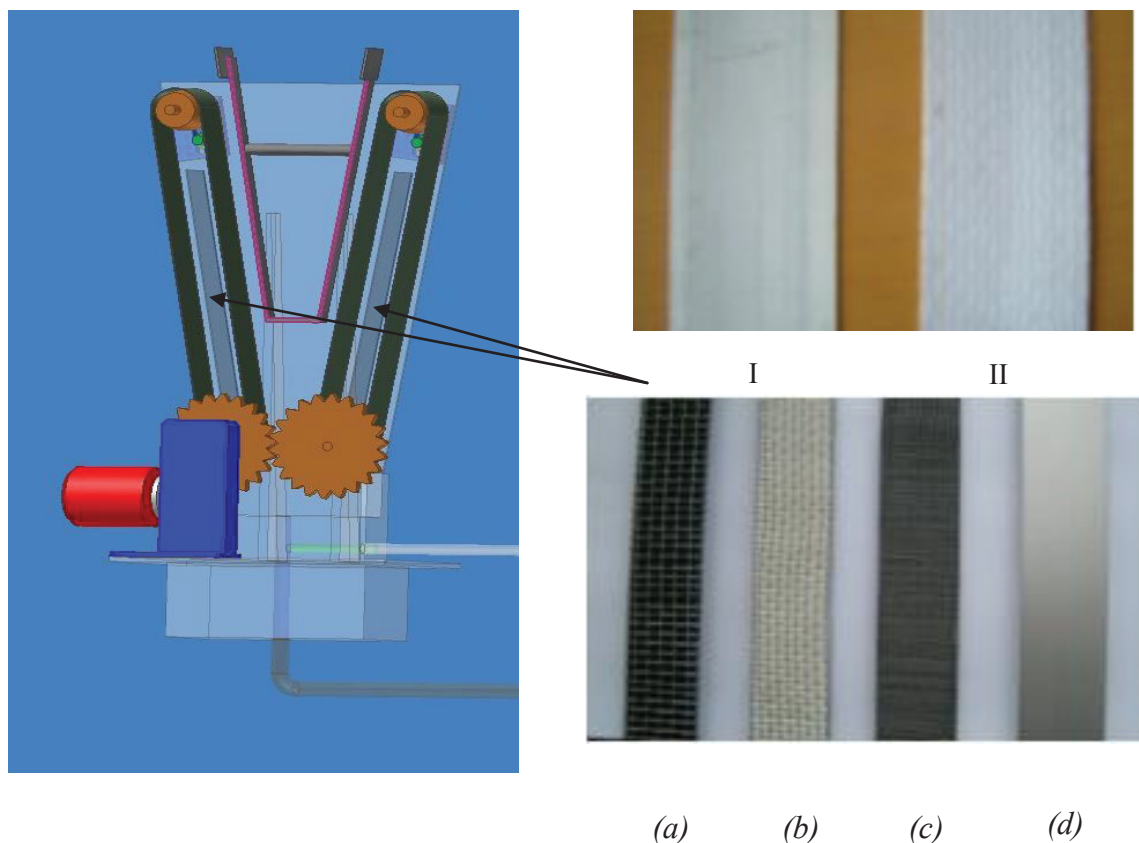


Figure 4.13: Différentes configurations d'électrodes haute tension et de bandes transporteuses utilisées dans les essais : (a), (b)-électrodes type grille, (c), (d) – électrodes planes ; (I) bande diélectrique ; (II) bande diélectrique à insertion métallique

Les particules chargées par effet triboélectrique sont dirigées par les forces du champ électrique vers les deux bandes transporteuses, auxquelles elles adhèrent sous l'action des forces d'image électrique. Les bandes transporteuses conduisent les particules vers les 2 compartiments de collection. Le processus est visualisé à travers les parois frontales du séparateur, confectionnées en PMMA transparent.

Afin de pouvoir être intégrée dans un flux industriel, l'installation de séparation doit fonctionner en régime continu. C'est ainsi que nous avons imaginé plusieurs expériences qui simulent en laboratoire ce flux continu industriel. La procédure expérimentale et quelques résultats sont présentés ensuite.

L'échantillon de 200 g de mélange granulaire à séparer est déposé sous la forme d'un lit compact sur le diffuseur du dispositif. Les électrodes sont alimentées à ± 20 kV. Les électrodes supplémentaires (figure 4.12) sont connectées à la masse ; elles sont positionnées à 100 mm du diffuseur et à 270 mm de l'axe des rouleaux inférieurs. La distance entre la bande et l'électrode intérieure est de 20 mm.

Dans le but de simuler le fonctionnement en flux continu, le dispositif est alimenté toutes les 30 secondes, pendant 5 min, avec 100 g de mélange granulaire. Le récipient est vidé graduellement pendant les 30 secondes à un débit de 3,3 g/s. Le mélange granulaire qui se trouve dans la chambre de fluidisation se charge électriquement, adhère aux bandes transporteuses diélectriques et il est collecté dans les boîtes collectrices afférentes. Il est possible de constater visuellement que les granules ABS sont concentrés dans la boîte collectrice affectée à la bande diélectrique de polarité positive, tandis que la deuxième boîte qui collecte les granules accumulés sur la bande à insertion métallique à polarité négative contient les granules de polyamide PA. Après les 5 minutes, dans le dispositif reste une quantité d'environ 100 g granules où le matériau majoritaire est le polyamide (85 % PA, 15% ABS). L'efficacité du processus de séparation est jugée par rapport à la masse et à la pureté des produits collectés dans les deux compartiments. (figure 4.14)

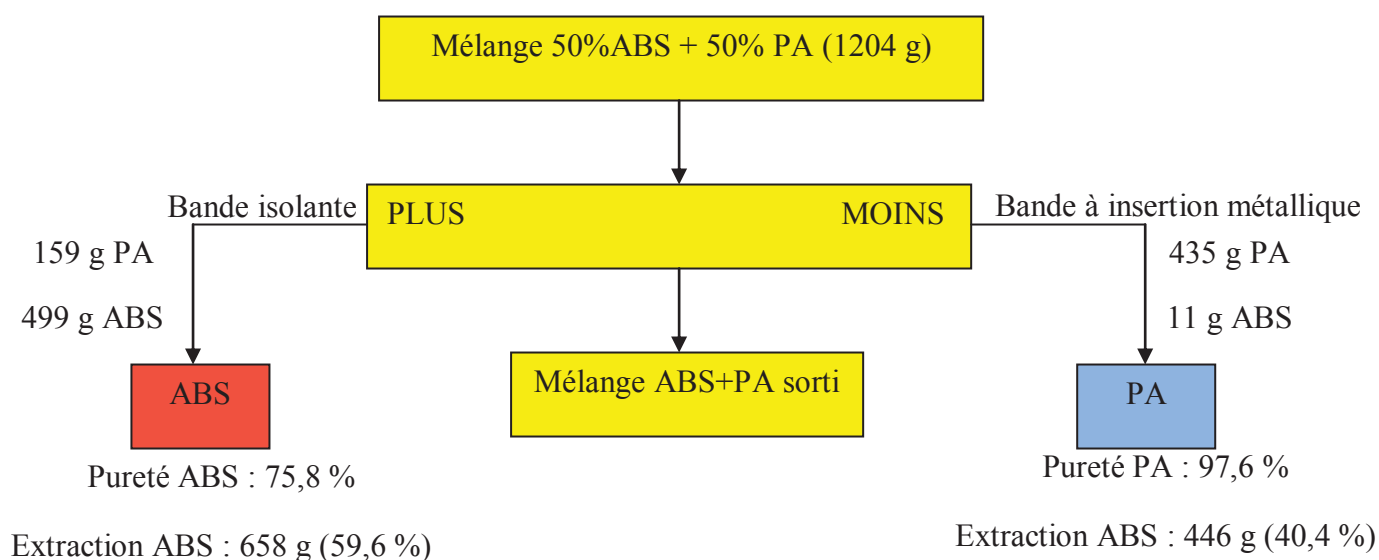


Figure 4.14: Résultat expérimental d'une séparation électrostatique mélange binaire ABS+PA, 50%-50%

La concentration des granules de PA dans le lit fluidisé augmente dans le temps, parce que les granules d'ABS se chargent très rapidement et quittent la chambre de séparation électrostatique. Dans ces conditions, le polyamide reste dans le lit et n'a plus de partenaire pour l'échange de charge que les parois en PMMA de la chambre de triboélectrisation. D'ici l'idée d'entraîner à de vitesses différentes les deux bandes transporteuses afin de conserver aussi longtemps que possible dans la chambre de triboélectrisation le matériel qui se charge plus facilement (l'ABS, dans ce cas).

Dans un processus continu, l'équilibre du processus (50-50%) est difficile à garder. Afin de simuler des conditions de fonctionnement différentes, des expériences ont été conduites avec des mélanges ayant d'autres compositions (25-75 %, 10-90%), en gardant les mêmes valeurs des variables de contrôle du processus. Pendant une durée d'une minute, à chaque 15 secondes, des échantillons collectés sur les bandes transporteuses ont été prélevés et mesurés. Les résultats sont présentés sur les figures 4.15 et 4.16. Les mesures ont commencées dès que les premières particules sont arrivées dans les bacs collecteurs du dispositif (figure 4.11).

L'ABS s'électrise très rapidement et quitte la chambre de fluidisation. Dans la chambre restent les particules de PA, qui commencent à se charger entre eux, processus qui affecte négativement la pureté du produit collecté.

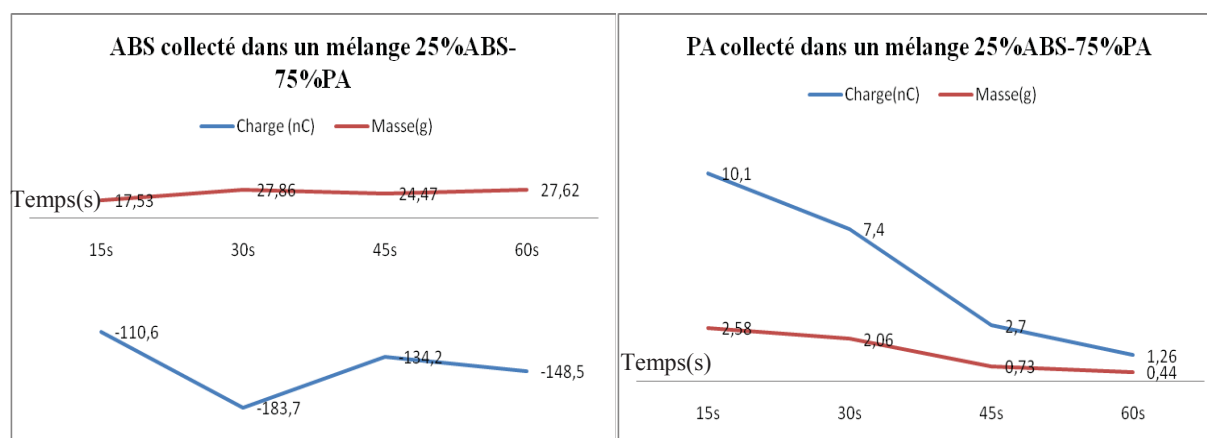


Figure 4.15: Résultat expérimental d'la séparation électrostatique d'un mélange binaire ABS+PA, 25%-75%

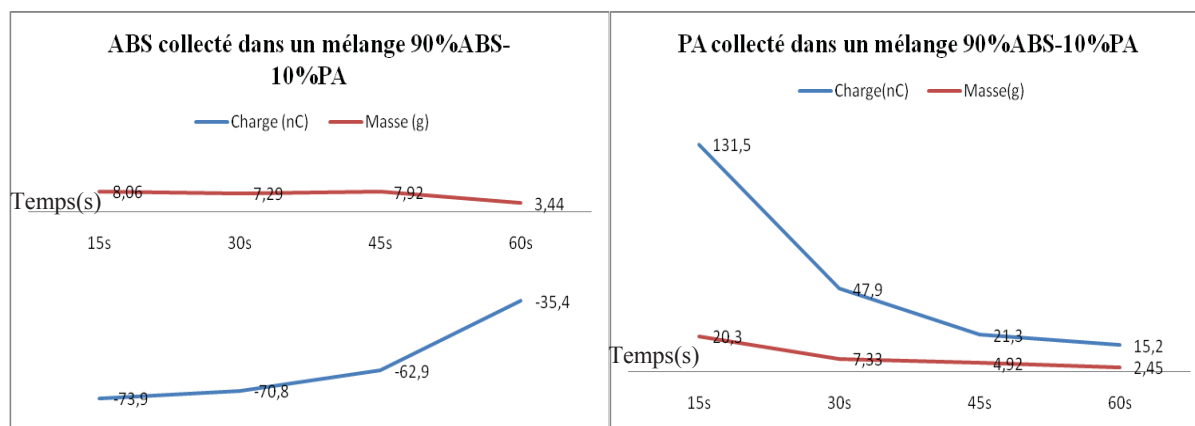


Figure 4.16: Résultat expérimental de la séparation électrostatique d'un mélange binaire ABS+PA, 90%-10%

4.4.2. Effet de la paroi en PMMA sur l'électrisation des granules d'ABS et de PA

Le but de cette expérience a été d'observer si les granules d'ABS s'électrisent au contact avec les parois en PMMA. Selon la série triboélectrique de la figure 4.17, les granules d'ABS devraient s'électriser négativement et être collectés à l'électrode positive.

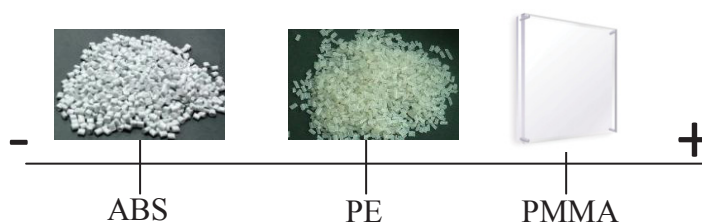


Figure 4.17: Série triboélectrique montrant la position de l'ABS et PE par rapport au PMMA

Les expériences se sont déroulées sur le dispositif de séparation tribo-aéro-électrostatique schématisé sur la figure 4.11. Le premier test a été réalisé avec des échantillons de 100 g de granules d'ABS parallélépipédiques avec les dimensions de 3x3x2 mm. Les électrodes du dispositif placées derrière les bandes transporteuses à insertion métallique ont été alimentées avec une tension de +/- 16 kV. La vitesse des bandes transporteuses a été établie à 3 m/s. La fréquence d'alimentation de la soufflante qui fournit l'air de fluidisation a été de 19 Hz. Deux électrodes avec une longueur $d=100$ mm et une largeur $\delta=20$ mm, connectées à la masse, ont été utilisées pour intensifier le champ électrique

En contact avec les parois en PMMA de la chambre de triboélectrisation, les granules d'ABS s'électrisent négativement. Aucune granule ne se dépose sur la bande transporteuses correspondant à l'électrode négative. Toutes les granules d'ABS sont extraites dans la boîte collectrice afférente à l'électrode positive. C'est ainsi qu'après 15 minutes 97 g de granules d'ABS ont été collectées, la différence de 3 grammes restant dans la chambre de triboélectrisation. Au fur et à la mesure que le nombre de granules d'ABS diminue dans le lit fluidisé, la densité de granules d'ABS sur la bande transporteuse se réduit aussi.

Une autre expérience a été effectuée dans les mêmes conditions mais en utilisant un autre matériau plastique, le polyéthylène PE. Les particules de PE s'électrisent négativement en contact avec la paroi en PMMA, mais elles restent, en majorité, dans la chambre de triboélectrisation. Après 15 minutes, seulement 18 g de PE ont été collectées à l'électrode positive du dispositif à lit fluidisé. Ce faible rendement peut être expliqué comme suit : Les granules de PE, à forme sphérique, arrivés à la partie supérieure de la bande transporteuse qui les a collectés, glissent par rapport à celle-ci. Ils entraînent dans leur chute les autres granules qui se trouvent plus bas sur la bande transporteuse. Une seule granule peut entraîner dans sa chute 5, 10, ou même 20 granules. De cette manière on a observé une densité de 1 granule sur une surface de 25 cm² de la bande transporteuse. Ces observations faites sur l'installation de laboratoire doivent être prise en compte dans la conception du séparateur tribo-aéro-électrostatique industriel (figure 4.18).

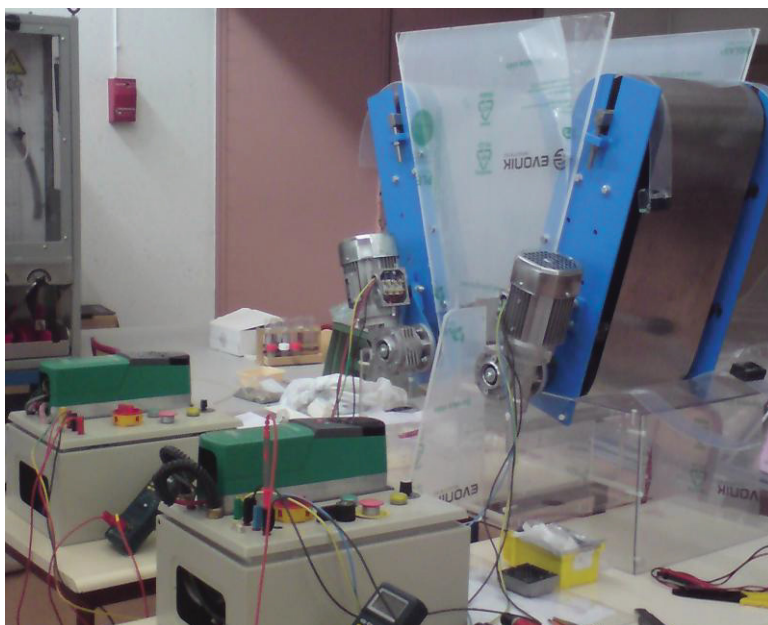


Figure 4.18 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique, Laboratoire d'Electrostatique Appliquée, Angoulême

Conclusions

1. La construction de l'installation industrielle (figure 4.18) devrait être confiée à une entreprise spécialisée dans la fabrication d'outillages pour le recyclage des déchets. La société allemande Hamos Gmbh, Penzberg, Bavière, avec laquelle le laboratoire a déjà collaboré dans le passé, semble être la meilleure placée pour devenir un tel partenaire pour la conception et la réalisation du séparateur.

2. Plusieurs problèmes restent à résoudre après cette étude :

- A. Valider la valeur limite de la tension d'alimentation du système d'électrodes, par des essais réalisés sur l'installation pilote de l'IUT d'Angoulême ;
- B. Questionner les constructeurs des convoyeurs à bande métallique sur les vitesses maximales qui peuvent être obtenues dans les conditions de cette application ;
- C. Tester sur une installation de laboratoire les conditions d'alimentation en matière par voie pneumatique ;
- D. Détailler l'algorithme de contrôle de l'installation, en partant de l'analyse de diverses solutions de mesure et de régulation du débit de matière à l'entrée et à la sortie.

CONCLUSION GENERALE

Les déchets d'équipements informatiques sont composés d'une grande diversité de matériaux plastiques dont la récupération et le recyclage nécessite la recherche et le développement de nouvelles technologies de séparation physique. La thèse de doctorat présente une synthèse sur l'état de l'art dans ce domaine, les équipements de laboratoire que nous avons conçus et mis au point, ainsi que les résultats des recherches que nous avons réalisées sur le transport pneumatique des matériaux plastiques, la triboélectrisation en lit fluidisé 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 en lit fluidisé, réalisée après la phase de pré-charge dans les dispositifs de transport pneumatique et simultanément avec la séparation en champ électrostatique est un procédé efficace de récupération des principaux matériaux thermoplastes provenant des équipements électriques et électroniques en fin de cycle de vie.

a. Les principaux contributions originals

1. Identification des problèmes scientifiques et techniques à résoudre dans le domaine de la séparation tribo électrostatique des mélanges des matériaux plastiques provenant d'équipements informatiques.
2. Description du processus de triboélectrisation des matériaux plastiques granulaires en utilisant les concepts de la physique du corps solide.
3. Evaluation des facteurs influents du processus de charge triboélectrique des matériaux granulaires dans des installations de transport pneumatique.
4. Etude des phénomènes tribo-électriques liés au déplacement des matériaux pulvérulents dans des installations de transport pneumatique annulaires.
5. Analyse des phénomènes physiques en lit fluidisé et adaptation de certains concepts (vitesse minimale de fluidisation, vitesse du transport pneumatique et chute de pression) à la fluidisation des matériaux plastiques granulaires.
6. Réalisation de deux stands expérimentaux pour étudier les effets de plusieurs facteurs qui pourraient influencer sur l'efficacité d'un processus de charge en lit fluidisé, en présence d'un champ électrique, orthogonale à la direction d'écoulement de l'air de fluidisation, afin de valider un nouveau concept de séparateur tribo-aéro-électrostatique.

7. Modélisation de la triboélectrisation des granules de matériaux plastiques vierges de polyamide (PA), polycarbonate (PC), poly oxyde méthylène (POM), en lit fluidisé, par la méthode des plans d'expériences, en utilisant le logiciel MODDE 5.0.
8. Modélisation de la triboélectrisation des granules de matériaux plastiques provenant des déchets d'ABS et d'ABS-PC, en lit fluidisé, par la méthode des plans d'expériences, en utilisant le logiciel MODDE 5.0.
9. Analyse de la reproductibilité du signe et de la valeur de la charge triboélectrique des granules de matériaux plastiques à diverses durées d'électrisation.
10. Recherche et développement au sein du Laboratoire des Champs Electriques Intenses de l'Université Technique de Cluj-Napoca d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique de petites dimensions.
11. Etude de l'effet des parois du séparateur tribo-aéro-électrostatique sur la charge triboélectrique des matériaux plastiques.
12. Etude expérimentale de la séparation tribo-aéro-électrostatique des deux mélanges binaires (ABS et PA), à de diverses concertations des constituants : 50%-50%, 75%-25%, 90%-10%.
13. Recherche et construction au sein de l'Institut PPRIME de Poitiers, sur le site de l'IUT d'Angoulême, d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique pilote industriel.

c. Perspectives en recherché

La thèse ouvre des perspectives sur des nouveaux problèmes de recherche dans le domaine de la séparation électrostatique des matériaux plastiques provenant d'équipements informatiques, en utilisant la triboélectrisation en lit fluidisé :

1. Elaboration d'un modèle physique du processus de charge triboélectrique des matériaux granulaires en lit fluidisé, en tenant compte à la fois de l'aspect aérodynamique et des forces de nature électrique qui s'exercent entre les particules.
2. Amélioration de l'installation pilote de séparation tribo-aéro-électrostatique, en tenant compte de la valeur limite de la tension d'alimentation du système d'électrodes et de la vitesse maximale des convoyeurs à bande métallique atteignable dans les conditions de cette application.
3. Validation de l'algorithme de contrôle 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] Ali, F.S., Inculet, I.I., Tedoldi, A. "Charging of polymer powder inside a metallic fluidized bed". In: *Journal of Electrostatics*. 45, 199-211 (1999).
- [2] 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).
- [3] Ali, F.S., Adnan Ali, M., Castle, G.S.P., Inculet, I.I., "Charge exchange model of a disperse system of spherical powder particles". In: *Transactions on Industry Applications*, 3 (10), 1884-1891, (1998).
- [4] *** American Plastics Council. "Plastics from residential electronics recycling". In: *The report analyzes the types of plastics found in consumer electronics and the current technologies available to recycle these plastics*. (2000).
- [5] Artana, G., Touchard G., and Morin, M.F., "Contribution to the analysis of the flow electrification process of powders in pneumatic conveyers,". In: *Journal of Electrostatics*, vol. 40-41, pp. 277-282, (1997)
- [6] *** Association of Plastics Manufactures in Europe. "*Insight into consumption and recovery in Western Europe 2000*".
- [7] Atten, P., Denat, A. (Editors). 2nd International Workshop on Electrical Conduction, Convection and Breakdown in fluids. Grenoble France, 4-5 May 2000. Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques-CNRS and Université Joseph Fourier.
- [8] Bailey, A.G. "The charging of insulator surfaces". In: *Journal of Electrostatics*. 51-52, 82-90 (2001).
- [9] 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". In: *Proceedings of ESA/IEJ/IEEE-IAS/SFE Joint Conference on Electrostatics, June 6-9, 2006, University of California, Berkeley, California*. 538-543 (2006). ISBN-0-7803-9209-4.
- [10] Brown, J.D. "An industrial electrostatic separation process". *TECH talk*. 2 (1), 1998.
- [11] *** Carpco Inc., Jacksonville, USA. "Carpco application sheet. Rejection of PVC from PET flake using the Carpco V-STAT separator". In: *Bulletin No. 97713*.
- [12] *** Carpco Inc., Jacksonville, USA. "The Solution to Separation". *Tehcnical Information Bulletin*, 1997.

- [13] Castle, G.S.P., Schein, L.B. "General model of sphere–sphere insulator contact electrification". In: *Journal of Electrostatics*. 36(2), 165-173 (1995).
- [14] Castle, G.S.P. "Contact charging between insulators". In: *Journal of Electrostatics*. 40-41, 13-20 (1997).
- [15] Calin, L., Mihalcioiu, A., Iuga, A., Dascalescu, L. "Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification". In: *Proceedings of the 4th International Workshop Materials for Electrotehnics, Bucuresti, Romania*. 203-208 (2004).
- [16] Calin, L., Caliap, L., Neamtu, V., Morar, R., Iuga, A., Samuila, A., Dascalescu, L. "Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation". In: *IEEE Industry Applications Society 40th Annual Meeting, 2-6 Oct. 2005 Hong Kong. Conference Record*. 2, 1435 - 1441 (2005).
- [17] Calin, L., Mihalcioiu, A., Iuga, A., Dascalescu, L. "Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification". In: *Particulate Science and Technology* 25(2), 205-211 (2007).
- [18] Calin, L., Caliap, L., Neamtu, V., Morar, R., Iuga, A., Samuila, A., Dascalescu, L. "Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation". In: *IEEE Transactions on Industries Applications*. 44 (4) (In press 2008).
- [19] Calin, L., Mihalcioiu, A., Das, S., Neamtu, V., **Dragan, C.**, Dascalescu, L., Iuga, A., "Controlling particle trajectories in free-fall separators". In: *IEEE Transactions on Industries Applications*. 44 (4) (In press 2008).
- [20] 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.
- [21] Crawford, R.J. *Plastic Engineering*. London, Butterworth Heinemann, 1998.
- [22] Crowley, J.M. *Fundamentals of Applied Electrostatics*. Morgan Hill, California, Laplacian Press, 1999.
- [23] Cundall, P.A., Strack, O.D.L., "A discrete numerical model for granular assemblies". In: *Geotechnique*, 29, 47–65, (1979).
- [24] Das, S., Samuila, A., **Dragan, C.**, Dascalescu, L. "Behaviour of charges insulating particles in contact with a rotating roll electrode". In: *Journal of Electrostatics*, 69, 189-192, (2009).

- [25] Dascalescu, L., Samuila, A., Das, S., **Dragan, C.**, Medles, K., Gauthier., M., “Etude expérimentale des procédés de séparation électrostatiques en vue de leur utilisation au recyclage des matières plastiques présentes dans les déchets électriques et électroniques”, *Contrat WKO 730/2006*, Bénéficiaire : APR2
- [26] Dascalescu, L., **Dragan, C.**, Bilici, M., Beleca, R., Hemery, Y., Rouau, X., “Electrostatic Bases for Separation of Wheat Bran Tissues”. In: *IEEE Transactions and Industry Applications*, 46, 659 – 665, (2010).
- [27] Dascalescu, L., **Dragan, C.**, Bilici, M., Chereches, R., “Triboelectric Phenomena in Suction-Type Dilute-Phase Pneumatic Transportation Systems for Granular Plastics”. In: *IEEE Transactions and Industry Applications*, 46, 1570-1577, (2010).
- [28] Ergun, S., “Fluid flow through packed columns”, In: *Chemical engineering program*, 48, 89-94, (1952).
- [29] Dascalescu, L., Urs, A., Bente, S., Huzau, M., Samuila, A. “Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices”. In: *Journal of Electrostatics*, 63 (6-10), 705-710 (2005).
- [30] Dascalescu, L., Samuila, A., Mihalcioiu, A., Bente, S., Tilmatine, A. ”Robust design of electrostatic separation processes”, In: *IEEE Transaction on Industry Applications*, 41 (3), 715-720 (2005).
- [31] Delavelle C., Fayolle D., Eyssen, R. “Caractérisation des plastiques contenus dans les DEEE et état des lieux de la valorisation déchets plastiques”. In: *Rapport final. Etude réalisée par AJI-EUROPE pour le compte de l'ADEME No 0302C008, Juillet 2005*.
- [32] Diaz, A.F., “Contact electrification of materials: The chemistry of ions on polymer surfaces”. In: *The Journal of Adhesion*, 67, 111 (1998)
- [33] Diaz, A.F., Guay, J., “Contact charging of organic materials: Ion vs. electron transfer”. In: *IBM Journal of Research and Development*, 37, 249 (1993)
- [34] *** Directive 2002/96/EC of The European Parliament and of The Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE).
- [35] Dodbiba, G., Shibayama, A., Miyazaki, T., Fujita, T. “Electrostatic separation of the shredded plastic mixtures using a tribo-cyclone”. In: *Magnetic and Electrical Separation*. 11 (1-2), 63-92 (2002).
- [36] Dodbiba, G., Shibayama, A., Miyazaki, T., Fujita, T. “Triboelectrostatic separation of ABS, PS and PP plastic mixture”. In: *Materials Transactions*. 44 (1), 161-166 (2003).

- [37] **Dragan, C.**, Bilici, M., Das, S., Samuila, A., Dascalescu, L. “Tribocharging of Insulating Powders in the Annular Ducts of Pneumatic Devices”. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46, 1238 – 1243, (2010)
- [38] **Dragan, C.**, Bilici, M., Das, S., Dascalescu, L., “Triboelectrostatic phenomena in suction-type dilute-phase pneumatic transport system”. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulators*, 16, 661-667, (2009).
- [39] Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wikstöm, C., Wold, S. *Design of Experiments. Principles and Applications*. Umeaa, Sweden, Umetrics, (2000).
- [40] Escalante, S.L., Touchard, G., Dominguez, G. “Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes”. In: 2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 694-697 (2002).
- [41] *** European Commission DG Environment. “Gather, process, and summarise information for the review of The Waste Electric and Electronic Equipment Directive 2002/96/EC”. In: *Synthesis Report No.2. August 29, 2006*.
- [42] Frigon, N.L., and Mathews, D., *Practical Guide to Experimental Design*. New York: Wiley, 1996.
- [43] Greason, W.D., Oltean, I.M., Kucеровski, Z., Ieta, A.C. “Triboelectric charging between polytetrafluoroethylene and metals”. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*. 40(2), 442-449 (2004).
- [44] *** HG 448/2005 *on Waste Electric and Electronic Equipment*. Romanian Government Decision.
- [45] Haga, K. “Applications of the electrostatic separation technique”. In: *Handbook of Electrostatic Processes*. Chang, J.S., Kelly, A.J., Crowley, J.M. (Editors). New York, Marcel Dekker, 365-386, (1995).
- [46] *** Hamos GmbH, Penzberg, Germany. *Bulletin KWS-D-1 10/98*, 1998.
- [47] Harper, W.R. *Contact and Frictional Electrification*. Morgan Hill, California, Laplacian Press, 1998.
- [48] Hemery, Y., Rouau, X., **Dragan, C.**, Bilici, M., Beleca, R., Dascalescu, L., “Electrostatic properties of wheat bran and its constitutive layers: Influence of particle size, composition, and moisture content”. In: *Journal of Food Engineering*, 93, 114-124, (2009).

- [49] Higashiyama, Y., Asano, K. "Recent progress in electrostatic separation technology". In: *Particulate Science and Technology*, 16 (1), 77-90, (1998).
- [50] Higashiyama, Y., Ujiie, Y., Asano, K. "Triboelectrification of plastic particles on vibrating feeder laminated with a plastic film". In: *Journal of Electrostatics*. 42 (1-2), 63-68 (1997).
- [51] Hogue, M.D., Buhler, C.R., Calle, C.I., Matsuyama, T., Luo, W., Groop, E.E. "Insulator-insulator contact charging and its relationship to atmospheric pressure". In: *Journal of Electrostatics* 61, 259-268, (2004).
- [52] Hughes, J.F. *Electrostatic Particle Charging*. New York, Wiley, 1997.
- [53] Geldart, D., "Types of gas fluidization", In: *Powder Technology*, 7,19, 285,133, (1978)
- [54] *** IEC Electrostatics. Measurement methods. "Faraday pail measurement".
- [55] Inculet, I.I., Castle, G.S.P., Brown, J.D. "Electrostatic separation of plastics for recycling". In: *Particulate Science and Technology*, 16(1), 91-100, (1998).
- [56] Inculet, I.I., Castle, G.S.P., Brown, J.D. "Electrostatic separation of mixed plastic waste". *US Patent No. 5 289 922*, 1994.
- [57] Inculet, I.I., Castle, G.S.P. "Triboelectrification of comercial plastic in air". In: *Institut Physics Conferince Series*. 118, 217-222, (1991).
- [58] *** International Process Systems. "Free fall electrostatic separator". USA.
- [59] Iuga, A., Morar, R., Samuila, A., Dascalescu, L. "Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes". In: *Conference Record IAS Annual Meeting, Oct 12-15 1998, St.Louis, USA*. 3, 1953-1960, (1998).
- [60] Iuga, A., Calin, L., Neamtu, V., Mihalcioiu, A., Dascalescu, L. "Tribocharging of plastics granulates in fluidized bed device". In: *Journal of Electrostatics*, 63 (6-10), 937-942 (2005).
- [61] Jones, T.B., and King, J.L., *Powder Handling and Electrostatics*, Lewis Publishers, Chelsea, MI, 1991.
- [62] Kama, H., Kiyomura, Y., Seki, N. "Method and aparatus for feeding and carrying ground plastic and electrostatic separator for ground plastic". Matsushita Electric Co Ltd. *Patent No: JP 2002 177 820*, 2002.
- [63] Kama, H., Kiyomura Y., Seki N. "Electrostatic Separator". Matsushita Electric Co Ltd. *Patent No: JP 2002 204 980*, 2002.

- [64] Klinzing, G.E., Marcus, R. F., Rizk and Leung, L.S. *Pneumatic Conveying of Solids* (2nd edition), Chapman and Hall, London, 1997.
- [65] Knoblauch, O., *Physical Chemistry*, 39, 225, 1902.
- [66] *** *Encyclopedia of Chemical Technology*. Fourth Edition. A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, 1998.
- [67] Köhnlechner, R. "Automatic electrostatic separation of nonconductive material mixtures, use of process, process plant and electrostatic separating unit". *Patent DE 19829200*, 2000.
- [68] Köhnlechner, R. "Electrostatic separation of mixed plastics". *Hamos GmbH*, Penzberg, Germany. www.hamos.com.
- [69] Kohnlechner, R., Dascalescu, L. "New applications for standard electrostatic separators". In: *IEEE Industry Applications Society 40th Annual Meeting, 2-6 Oct. 2005 Hong Kong. Conference Record*. 4, 2569-2572 (2005).
- [70] Kwetkus, B.A., Gellert, B., Sattler, K. "Discharge phenomena in contact electrification". In: *Institute of Physics Conference Series*. 118, 229-234 (1991).
- [71] Kwetkus, B.A. "Particle triboelectrification and its use in the electrostatic separation process". In: *Particulate Science and Technology*, 16(1), 55-67 (1998).
- [72] Lawver, J.E., Dyrenforth, W.P. "Electrostatic separation". In: *Electrostatics and Its Applications*. A.D. Moore (Editor). New York, John Wiley&Sons, 221-249, 1973.
- [73] Laurentie, J.C., Traoré, P., **Dragan, C.**, Dascalescu, L. "Elaboration d'un modèle de charge électrostatique de matériaux granulaires dans des lits vibrants". In: *Proceedings of the 7th Conference of French Society of Electrostatics*. Montpellier, France, August 30-31, September 1, 2010.
- [74] Lee, L.H. "Dual mechanism for metal polymer contact electrification". In: *Journal of Electrostatics*. 32(1), 1-29 (1994).
- [75] Liu, C., Bard, A.J. "Electrons on dielectrics and contact electrification". In: *Chemical Physics Letter*, volume 480, issues 4-6, pp 145-156 (2009)
- [76] Lowell, J., Rose-Innes, A.C. "Contact electrification". In: *Advances in Physics*. 29, 947-1023 (1980).
- [77] Lungu, M. "Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect". In: *Minerals Engineering*. 17 (1), 69-75 (2004).

- [78] Matsushita, Y., Mori, N, Sometani, T. "Electrostatic separation of plastics by a friction mixer with rotary blades". In: *Electrical Engineering in Japan* 127 (3), 33-40 (1999).
- [79] Matsusyama, T., Yamamoto, H. "Impact charging of particulate materials". In: *Chemical Engineering Science*. 61, 2230-2238 (2006).
- [80] Mazumder, K., M. "Electrostatic Processes". In: *Wiley Encyclopedia of Electrical Electronics Engineering. Volume 7*. John Wiley&Sons, Inc, 15-39, (1999).
- [81] McCarty, L.S., Whitesides, G.M., "Electrostatic charge due to separation of ions at interfaces: Contact electrification of ionic electrets". In: *Angewandte Chemie International Edition*, 47, 2188 (2008).
- [82] Medley, J.A., "Fractional Electrification of Polar Polymers". In: *Nature*, 171, 1077 (1953).
- [83] Mihalcioiu, A., Dascalescu, L., Das, S., Medles, K., Munteanu, R. "Virtual instrument for statistic control of powder tribocharging processes". In: *Journal of Electrostatics*. 63 (6-10), 565-570 (2005).
- [84] Molodsof, Y., "Equations générales probabilistes des écoulements polyphasiques et applications aux mélanges gaz-solide, *Thèse de Doctorat, UTC*, 1985.
- [85] Mountain, J.R., Mazumder, M.K., Sims, R.A., Wankum, T.C., Pettit, P.H. Jr. "Triboelectric charging of polymer powders in fluidization and transport processes". In: *IEEE Transactions on Industry Applications*. 37 (3), 778-783 (2001).
- [86] *** National Instruments, *LabVIEW. Measurements Manual*, National Instruments, Austin, Tx, 2000.
- [87] Nicoara, Simona, Calin, L., Iuga, A., Serban, N. "Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose". In: *Environment and Progress*. 6, 341-346, (2006).
- [88] *** Outokumpu. "Electrostatic selection guide for industrial separators"
www.outokumpu.com.
- [89] *** Outokumpu. "The V-STAT free-fall electrostatic separator".
www.outokumputechnology.com
- [90] Project founded by the European Community under the Industrial & Materials Technologies Programme."Electrostatic recovery of paper and plastic packaging wastes". *Synthesis report. Project No. BE96 – 3243, 2001*.

- [91] Ralston, O.C. *Electrostatic Separation of Mixt Granular Solids*. Amsterdam, Elsevier, pp.162-172, (1961).
- [92] Saleh, K., Steinmetz, D., Hemati, M., “Experimental study and modelling of fluidised bed coating and agglomeration”. In: *Powder Technol.* 130, 116–123 (2003).
- [93] Saleh, K., Guigon, P., Pezron, I., Komunjer, L., “Etude des parametres de mouillage sur le procedé d’enrobage en lit fluidisé”. In : *Congrès Science et Technologie des poudres, Compiègne, 4-6 mai 2004*.
- [94] Samuilă, A., Dăscălescu, L. *Comportarea materialelor granulare în câmp electric*. Cluj-Napoca, Editura Mediamira, 1999.
- [95] Schein, L.B., Castle, G.S.P. “Triboelectricity”. In: *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. John G. Webster (Editor). 22, 574-585.
- [96] Schmoutziguer, W.S., McGovern, J.J. “Tribocharging in separating apparatus”. Outokumpu, *Patent No: GB 2 351 928, 2001*.
- [97] Stencel, J.M., Schaefer, J.L., Neathery, J.K., Ban, H., Finseth, D. “Electrostatic particle separation system, apparatus, and related method”. *US Patent No: 6 498 313, 2002*.
- [98] Taylor, D.M., Secker, P.E. *Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements*. New York, John Wiley&Sons, pp. 82-104, (1994).
- [99] Tennal, M., Mazumder, K., Lindquist, D., Zhang, J., Tendeku, F. “Triboelectric separation of granular materials”. In: *Conference Record IEEE/IAS Annual Meeting*. 3, 1724-1729 (1997).
- [100] Touchard, G., “Computation of charge and field in a metallic sphere-dielectric flat plate configuration”. In: *Journal of Electrostatics*, 40, 41, (1997).
- [101] Touchard, G., Benmadda, M, Humeau, P., Borzeix, J., “Static electrification by dusty gas flowing through polyethylene pipes.” In: *Inst. Phys. Conf.*, 85, 97-102, (1987)
- [102] Touchard, G., Benmadda, M, Saunière, J., Borzeix, J., Gilles, D., “High potential generated by dusty gas hydrogen flowing through metallic pipes” In: *Proceedings of the 5th world hydrogen energy conference*, 3, 1213-1224, (1984)
- [103] Touchard, G., Humeau, P., Borzeix, J., Saunière, J., Nolleau, Y., “Static electricity generated by gas flows generated in polyethylene pipes”, In: *Proceedings of Eight plastic fuel gas pipe symposium AGA*, 173-175, (1984)

- [104] Touchard, G., Wu, Z.H., Wang, W.Q., Nasani, A., Watanabe, S., “Electrostatic charge generated in pneumatic conveyers.” In: *Material science*, 16(4), 5-10, (1990).
- [105] Touchard, G., Zergouni, A., Watanabe, S., Borzeix, J., “Evolution de la charge électrique d’une particule heurtant une paroi solide” In : *Journal of Physics III, France*, 1, 1233-1241, (1991).
- [106] Traoré, P., Eynaud, F., Herbreteau, C., and Bouard, R., "An Eulerian-Lagrangian approach for the numerical simulation and visualization of two-dimensional fluidized beds," In: *Proceedings of ASME*, (2002)
- [107] *** Umetrics AB, *MODDE 5.0. User Guide and Tutorial*, Umetrics, Umea, Sweden, 1999.
- [108] Vosteen, W.E., *A Review of Current Electrostatic Measurement Techniques and Their Limitations* presented at the Electrical Overstress Exposition, April 24-26, (1984).
- [109] Wei, J., Realff, M.J. “Design and optimization of free-fall electrostatic separators for plastic recycle”. In: *American Institute of Chemical Engineers Journal*. 49 (12), 3138-3149 (2003).
- [110] Wei, J., Realff, M.J. “Design and optimization of drum-type electrostatic separators for plastics recycle”. In: *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 44 (10), 3503-3509 (2005).
- [111] Wu, I., Castle, G.S.P., Inculet, I.I.,” Particle size analysis in the study of induction charging of granular materials“. In: *Journal of Electrostatics*, 63, 189–202, (2005).
- [112] Zhao, H., Castle, G.S., Inculet, I.I., Bailey, A.G. “Bipolar charging of poly-disperse polymer powders in fluidized beds”. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*. 39 (3), 612-617 (2003).

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX

FIGURES

Chapitre 1

Figure 1.1 : L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux surfaces: (a) :1.Surface A neutre, particule B est neutre ; 2. La surface A et la particule B sont en contact ; 3.Après la séparation, la surface A a la tendance de se charger négativement, et la particule B positivement ;(b) :1.Deux particules neutres de même taille en contact ; 2.Les particules grandes ont la tendance de se charger positivement et les petites négativement.

Figure 1.2 : Effets de la localisation et de la délocalisation des électrons.

Figure 1.3 : Mécanismes possibles de transfert de charge : a)Transfert d'électrons ; b) Transfert d'ions.

Figure1.4 : Modèle Kelvin-Voigt [73].

Figure 1.5 : Dispositif à cylindre rotatif.

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 [9].

Figure 1.7 : Les régimes de lit fluidise 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 1.8 : Variation de la perte de pression Δp en fonction de la vitesse d'air u pendant les différentes étapes de la fluidisation des matériaux plastiques granulaires [53].

Figure 1.9 : Diagramme Geldart pour les régimes de fluidisation des granules en fonction de leur densité et diamètre [53].

Figure 1.10 : Profil longitudinal de pression dans une colonne à lit fluidisé.

Figure 1.11 : Profils radiaux de la vitesse des particules (a) et du taux de vide (b) dans une colonne.

Figure 1.12 : Le phénomène physique derrière la force Van der Waals : polarisation électrique des atomes ou molécules neutres.

Figure 1.13 : Représentation de différentes forces intervenant dans l'interaction particule-parois.

Figure 1.14 : Dispositif de triboélectrisation avec lit fluidisé développé au sein du Laboratoire des Champs Electriques Intenses pour l'étude des matériaux plastiques recyclables: a- pièces composantes, dimensions et principe de triboélectrisation; b- l'aspect constructif du dispositif équipé d'une chambre de triboélectrisation en PMMA [16].

Figure 1.15 : Séparateur tribo électrostatique à chute libre développé au sein du Laboratoire d'Electrostatique d'Angoulême, pour l'étude de la séparation des matériaux plastiques granulaires [16].

Figure 1.16 : 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[68].

Figure 1.17 : Séparateur tribo électrostatique à chute libre Carpc [11].

Chapitre 2

Figure 2.1: Installation expérimentale pour la charge triboélectrique des granules d'ABS et de HIPS.

Figure 2.2 : Représentation schématique de l'installation expérimentale pour l'étude du processus de charge des matériaux granulaires.

Figure 2.3 : Le processus d'aspiration des matériaux granulaires : photo (a) et schéma (b).

Figure 2.4 : Points de mesure de la charge électrique : photo (a) et schéma (b).

Figure 2.5 : L'instrument virtuel: le panneau frontal (a) et le fichier contenant les données de mesure (b).

Figure 2.6 : Dispositif de mesure de la charge électrique induite dans la paroi d'un tuyau isolant.

Figure 2.7 : Le principe de la mesure de charge triboélectrique induite par des particules millimétriques dans la paroi d'un tube isolant.

Figure 2.8 : L'aspect de la cage de Faraday utilisé pour mesurer la charge des particules : Représentation schématique (a) et photo du dispositif (b).

Figure 2.9 : La représentation schématique d'un processus quelconque.

Figure 2.10 : Représentation graphique des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences composite pour un domaine défini par 3 facteurs (a) ou 2 facteurs (b).

Figure 2.11 : Aspect des granules d'ABS (a) et de HIPS (b) appartenant à la classe granulométrique 1..2 mm.

Figure 2.12 : Panneau frontal de l'instrument virtuel montrant la charge q_p par rapport à temps en utilisant deux probes électrostatiques par induction placées dans les points A et B du tuyau.

Figure 2.13 : Iso-contours de la charge q [nC] (a) et de la charge massique q/m [nC/g] (b) prédits par le logiciel MODDE 5.0 dans le cas des particules de HIPS convoyées par le tuyau d'aluminium ; le débit massique des granules transportées m et le débit volumique d'air ϕ sont exprimés en [g/min] et [dm³/s].

Figure 2.14 : Variation prédite par le logiciel MODDE 5.0 pour la charge massique q/m [nC/g] des particules de HIPS convoyées dans le tuyau d'aluminium, en fonction du débit massique des granules transportées m (b) et du débit volumique d'air ϕ (a) exprimés en [g/min] et [dm³/s].

Figure 2.15 : Iso-contours de la charge q [nC] (a) et de la charge massique q/m [nC/g] (b) prédits par le logiciel MODDE 5.0 dans le cas des particules de HIPS en tuyau d'aluminium ; mesures réalisées avec la sonde d'induction électrostatique; le débit massique des granules transportés m et le débit volumique d'air ϕ sont exprimés en [g/min] et [dm³/s].

Figure 2.16 : Iso-contours de la charge q [nC] (a) et de la charge massique q/m [nC/g] (b) prédits par le logiciel MODDE 5.0, dans le cas des particules de HIPS convoyées par le tuyau

en PVC ; le débit massique des granules transportés m et le débit volumique d'air ϕ sont exprimés en [g/min] et [dm³/s].

Figure 2.17 : Charge q vs débit massique m pour les particules d'ABS en tuyau de PVC (a) ; ABS en tuyau d'aluminium (b) ; HIPS en tuyau de PVC (c) ; HIPS en tuyau d'aluminium (d)

Figure 2.18 : Matériaux utilisés dans les essais (a) F1200, (b) DMT8.

Figure 2.19: Dispositif expérimental pour la mesure de la charge portée par les poudres de teste à la sortie de l'unité d'aspiration.

Figure 2.20: Dispositif expérimental (a) et représentation schématique des quatre positions de la sonde capacitive (b) utilisés pour la mesure du déclin de potentiel à la surface du canal annulaire du dispositif d'aspiration.

Figure 2.21 : Rapport charge/masse du DMT8 en utilisant les tubes ABS et PA, en fonction du débit d'alimentation.

Figure 2.22 : Charge de F1200 aspiré pendant 80 s par PA (a) et ABS (b) tubes, à un débit de 1,63 g/s (une mesure toutes les 2 s).

Figure 2.23 : Courbes de déclin de potentiel enregistrées aux points 1 à 4 à la surface de la section annulaire de PA, après le passage échantillons de 20 g de poudre de F1200.

Figure 3.1 : Dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales.

Figure 3.2 : Dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées.

Figure 3.3 : Banc expérimental pour l'étude de la charge des mélanges binaires des matériaux plastiques dans un dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales ; 1,5- électromètres Keithley, 2,4- sources haute tension, 3- dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales, 6- PC équipé d'un instrument virtuel.

Figure 3.4 : Banc expérimental pour l'étude de la charge des mélanges binaires des matériaux plastiques dans un dispositif de triboélectrisation à débit moyen et électrodes inclinées ; 1- dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées, 2- soufflante, 3- variateur de fréquence, 4- sources haute tension, 5- électromètre Keithley.

Figure 3.5 : Panneau frontal de l'instrument virtuel pour la mesure de la charge acquise par effet tribo électrique.

Figure 3.6 : Mélanges granulaires a) PC-PA, b) POM-PC, c)PA-POM utilisés dans les expériences de charge triboélectrique; les lignes centrales ont la longueur de 20 mm et l'épaisseur de 0.5 mm.

Figure 3.7 : Charge des granules de PA collectée lors de deux essais effectués à la même tension appliquée $U = 24$ kV.

Figure 3.8 : Charge (a) et masse (b) des granules de PA et PC collectés pendant les essais effectués à $U = 24$ kV et à différentes durées du processus de charge $t = 6$ s, 12 s, 18 s, 24 s.

Figure 3.9 : Charge des concentrés de PA et de PC (mélange granulaire 50% PA et 50% PC, $U = 24$ kV), mesures prises en ligne, 1 mesure/seconde.

Figure 3.10 : Charge et masse des concentrés de PA et PC (essais effectués sur un mélange granulaire 75% PA - 25% PC, à $U = 24$ kV (a) et $U = 36$ kV(b) et à de diverses durées de charge $t = 6$ s, 12 s, 18 s; 24 s).

Figure 3.11 : Charge massique des concentrés de PA et PC (essais effectués sur un mélange granulaire 75% PA - 25% PC, à $U = 36$ kV, et $t = 6$ s, 12 s, 18 s, 24 s).

Figure 3.12 : Composition des concentrés de PA et de PC, pour des essais effectués sur un mélange granulaire 75% PA - 25% PC, à $U = 24$ kV, $U = 36$ kV et à deux durées de charge $t = 6$ s; 18 s.

Figure 3.13 : Equipements auxiliaires utilisés dans les expériences de triboélectrisation : 1) tamiseuse, 2-balance électronique (précision 0.01 g), 3-aspirateur à pile.

Figure 3.14 : Matériaux utilisés dans les expériences de triboélectrisation :1) ABS-PC, 2-ABS, taille des particules entre 1 et 2 mm.

Figure 3.15 : Effets des facteurs f , U , sur la masse ABS: a) les valeurs des coefficients et l'incertitude ; b) représentation graphique des coefficients. (Calculs réalisés par le logiciel MODDE 5.0).

Figure 3.16 : Iso-contours de la masse d'ABS-PC et d'ABS prédits par le logiciel MODDE 5.0.

Figure 3.17 : Masse du concentré d'ABS prédite par le logiciel Modde 5.0, dans le cas d'un mélange 50% ABS – 50% ABS-PC à des valeurs plus grandes de la vitesse de l'air de fluidisation (deuxième plan composite).

Figure 3.18 : Charge massique des concentrés d'ABS et d'ABS-PC obtenus d'un mélange granulaire 50%ABS-PC -50% ABS ; $f = 37,5$ Hz, $U = 14$ kV, $t = 30$ s ; l'angle des électrodes $\alpha = 10^\circ, 15^\circ$.

Figure 3.19 : Masse du concentré d'ABS (m_{ABS}) en fonction de la fréquence f . Prédiction faite par le logiciel MODDE5.0, dans le cas d'un mélange 75% ABS - 25% ABS-PC.

Figure 3.20 : Masse du concentré d'ABS-PC obtenu à partir d'un mélange 25% ABS - 75% ABS-PC, en fonction de la fréquence f .

Chapitre 4

Figure 4.1 : Représentation schématique de l'installation de séparation tribo-aéro-électrostatique.

Figure 4.2 : Représentation schématique du système d'électrodes.

Figure 4.3 : Alimentation haute tension modèle ES20P-5 (+20 kV ; 5 W), fabriquée par la société Gamma High Voltage Research Inc, Fl, USA.

Figure 4.4 : La soufflante SCL K06, 3 kW, fabriquée par la société FPZ SpA, Concorezzo, Italie.

Figure 4.5 : Caractéristiques de fonctionnement des soufflantes SCL, fabriquées par la société FPZ SpA, Italie [25].

Figure 4.6 : Déchargeur « big-bag » avec trémie tampon [25].

Figure 4.7: Convoyeur à bande métallique, fabriqué par Transmodul, Etampes ; (a)schéma ; (b) photo.

Figure 4.8 : Schéma de principe de la commande de l'installation m_{sA} et m_{sB} : valeurs mesurées du débit des produits A et B à la sortie de l'installation v_A et v_B : valeurs imposées des vitesses des deux convoyeurs – électrodes $m_e = m_{sA} + m_{sB}$: valeur imposée du débit de matière à l'entrée de l'installation.

Figure 4.9 : Banc d'essai pour l'étude du processus de séparation tribo aéro électrostatique : 1-soufflante, 2-variateur de fréquence, 3-sources haute tension, 4-séparateur tribo-aéro-électrostatique.

Figure 4.10 : Aspect de trois échantillons de granules broyés : (a) ABS broyé ; (b) ABS-PC broyé ; c(1), c(2) – ABS, PA

Figure 4.11 : Distribution granulométrique d'un échantillon de 200 g d'ABS noir.

Figure 4.12 : Dispositif de séparation tribo-aéro-électrostatique, équipé avec plusieurs chambres d'air (a) : simple ; (b) composée ; (c) avec billes de verre.

Figure 4.13 : Différentes configurations d'électrodes haute tension et de bandes transporteuses utilisées dans les essais : (a), (b)-électrodes type grille, (c), (d) – électrodes planes ; (I) bande diélectrique ; (II) bande diélectrique à insertion métallique.

Figure 4.14 : Résultat expérimental d'une séparation électrostatique mélange binaire ABS+PA, 50%-50%.

Figure 4.15 : Résultat expérimental d'une séparation électrostatique d'un mélange binaire ABS+PA, 25%-75%.

Figure 4.16 : Résultat expérimental de la séparation électrostatique d'un mélange binaire ABS+PA, 90%-10%.

Figure 4.17 : Série triboélectrique montrant la position de l'ABS et PE par rapport au PMMA.

Figure 4.18 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique.

TABLEAUX

Chapitre 1

Tableau 1.1 : Forces de Van der Waals et de pesanteur en fonction de la taille des particules, d'après Higuchi.

Tableau 1.2 : Forces d'interaction électrostatique entre deux sphères chargées.

Chapitre 2

Tableau 2.1 : Charge mesurée q et charge massique q/m des particules de HIPS aspirées dans le tuyau d'aluminium, pour un plan d'expériences composite comportant 11 essais.

Tableau 2.2 : Charge q_p mesurée en utilisant la sonde d'induction électrostatique et charge massique q/m des particules du HIPS aspirées dans le tuyau d'aluminium, pour un plan expérimental composite comportant 11 essais.

Tableau 2.3 : Charge q mesurée par la cage de Faraday et charge massique q/m des particules de HIPS aspirées dans le tuyau en PVC, pour un plan d'expériences composite comportant 11 essais.

Tableau 2.4 : Charge q_p mesurée en utilisant la sonde d'induction électrostatique et charge massique q/m des particules du HIPS dans le tuyau en PVC, pour un plan d'expériences composite comportant 11 essais.

Tableau 2.5 : Rapport charge/masse pour F1200 et DMT8.

Tableau 2.6 : Durée du déclin de potentiel pour PA à 50% ($T_{50\%}$) et 10% ($T_{10\%}$) de la valeur initiale.

Tableau 2.7 : Potentiel de surface pour le tuyau ABS en quatre points de mesure après l'aspiration du F1200 et DMT8.

Chapitre 3

Tableau 3.1 : Caractéristiques des matériaux plastiques granulaires vierges utilisés dans les expériences de charge par effet triboélectrique.

Tableau 3.2 : Résultats préliminaires de la tribocharge d'un mélange granulaire 50%PA+50%PC.

Tableau 3.3 : Résultats de deux essais visant la charge triboélectrique d'un mélange granulaire binaire 50%PA+50%POM.

Tableau 3.4 : Résultats de deux essais visant la charge triboélectrique d'un mélange granulaire binaire 50%PC+50%POM.

Tableau 3.5 : Résultats des expériences réalisées sur un mélange granulaire 50%PC+50%POM à différentes valeurs de la haute tension appliquée U .

Tableau 3.6 : Résultats des expériences réalisées sur des mélanges granulaires 75% PA + PC 25%, à $U = 24$ kV.

Tableau 3.7 : Résultats des expériences réalisées sur des mélanges granulaires 75% PA + PC 25%, à $U = 24$ kV.

Tableau 3.8 : Caractéristiques des matériaux utilisés dans les expériences.

Tableau 3.9 : Corrélation entre la fréquence d'alimentation du moteur électrique de la soufflante et la vitesse de l'air de fluidisation.

Tableau 3.10 : Charge et masse des produits de la séparation d'un mélange binaire granulaire 50%ABC-PC – 50%ABS, à $t = 30$ s ; premier plan composite.

Tableau 3.11 : Charge et masse d'un mélange binaire granulaire 50%ABC-PC – 50%ABS, à $t = 30$ s ; deuxième plan composite.

Tableau 3.12 : Charge et masse des granules d'ABS-PC et d'ABS collectés aux électrodes en 30 s. (chambre de fluidisation en PMMA).

Tableau 3.13 : Masse, charge et charge massique des concentrés d'ABS et d'ABC-PC obtenus d'un mélange granulaire 50% ABS- 50% ABS-PC pour des durées différentes de charge triboélectrique ($f = 37.5$ Hz ; $U = 28$ kV; $\alpha = 10^\circ$).

Tableau 3.14 : Masse, charge et charge massique des concentrés d'ABS et d'ABC-PC obtenus d'un mélange granulaire 50% ABS- 50% ABS-PC pour des durées différentes de charge triboélectrique. ($f = 37.5$ Hz ; $U = 28$ kV; $\alpha = 15^\circ$).

Tableau 3.15 : Masse et charge des concentrés d'ABS et d'ABS-PC obtenus d'un mélange granulaire 75%ABS - 25% ABS-PC, en l'utilisant le plan d'expériences composite (durée des essais $t = 30$ s).

Tableau 3.16 : Masse et charge des concentrés d'ABS et d'ABS-PC obtenus d'un mélange granulaire 25%ABS - 75% ABS-PC, en l'utilisant le plan d'expériences complet (durée des essais $t = 30$ s).

Chapitre 4

Tableau 4.1: Corrélation de la vitesse de fluidisation mesurée à l'aide d'un anémomètre à coupelles et le débit de l'air de fluidisation.

MODELISATION DU PROCESSUS DE CHARGE ET SEPARATION TRIBO-AERO-ELECTROSTATIQUE DE MATERIAUX PLASTIQUES GRANULAIRES

Les procédés de séparation électrostatique sont déjà utilisés pour le recyclage des déchets industriels broyés, chargés au préalable par effet triboélectrique dans des dispositifs à vibrations, à cylindre tournant ou à lit fluidisé. L'efficacité de ces dispositifs étant parfois limitée par la charge électrique accumulée pendant le transport pneumatique des matériaux à séparer, une étude a été réalisée en faisant appel la méthode des plans d'expériences afin d'identifier les facteurs influents et de proposer des solutions d'amélioration. Si les dispositifs actuels ne donnent pas satisfaction c'est aussi parce que certaines particules n'arrivent pas à se charger convenablement pour être séparées en champ électrique. Un procédé et une installation originaux permettent de remédier à ces inconvénients, en utilisant en même temps l'effet triboélectrique, la force de Coulomb et la force image électrique. Deux dispositifs à lit fluidisé ont été construits dans le but de faciliter la compréhension des phénomènes physiques à la base du nouveau procédé et de tester sa faisabilité. Les expériences réalisées sur ces dispositifs ont montré que l'efficacité du processus de charge dépend fortement de la vitesse de l'air de fluidisation et de la durée passée par les particules dans le dispositif. Ces études ont permis de préciser les solutions techniques essentielles à la réalisation d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique industriel. Les résultats expérimentaux confirment la charge triboélectrique en lit fluidisé associée à la séparation en champ électrostatique comme un procédé efficace de traitement des déchets granulaires d'équipements électriques et électroniques.

MODELLING OF TRIBO-AERO-ELECTROSTATIC CHARGING AND SEPARATION OF GRANULAR PLASTIC MATERIALS

The electrostatic separation processes are already used for the recycling of granular wastes, electrically charged in advance by the tribo-electric effect in vibratory-, rotating cylinder- or fluidized bed-devices. As the effectiveness of these devices is often limited by the electric charge accumulated during the pneumatic transport of materials to be separated; a study was conducted using the design of experiments methodology in order to identify the influential factors and to propose solutions for improvement. The efficiency of these devices is in many cases rather poor, because some particles do not reach the necessary charge to be separated in the electric field. An original method and equipment have been designed to overcome these drawbacks by simultaneously using of the triboelectric effect, the Coulomb force and the electric image force. Two fluidized bed devices were constructed in order to facilitate the understanding of physical bases of the new process and test its feasibility. Experiments on these devices showed that the efficiency of the charging process depends significantly on the speed of the fluidization air and the time spent by particles in the device. These studies validated most of the technical solutions to be applied in order to build an industrial tribo-aero-electrostatic separator. The experimental results confirm simultaneous triboelectric charge in a fluidized bed and separation in a horizontal electrostatic field as an effective method of treatment for the granular wastes of electrical and electronic equipment.