

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBÈS
Faculté de Technologie
Département d'Électrotechnique

Thèse présentée par

Fatima Zohra RAHOU

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en-Sciences en Électrotechnique

Option : **ÉLECTROSTATIQUE**

Intitulé de la thèse

**MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT
D'UN SÉPARATEUR TRIBO-AERO-
ÉLECTROSTATIQUE POUR MATÉRIAUX
PLASTIQUES GRANULAIRES**

Présentée devant le jury composé de :

M. Abdelber BENDAOU	Professeur	Université de Sidi-Bel-Abbès	Président du jury
M. Amar TILMATINE	Professeur	Université de Sidi-Bel-Abbès	Encadreur
M. Lucien DASCALESCU	Professeur	Université de Poitiers	Co-encadreur
M. Ali HENNAD	Professeur	USTO-MB-Oran	Examineur
M. Rabah OUIDDIR	M. C. A	USTO-MB-Oran	Examineur
Mme. Khouira SENOUCI	M. C. A.	Université de Sidi-Bel-Abbès	Examineur

Soutenu le 22 Janvier 2015

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans cette thèse a été mené au sein du laboratoire de la haute tension, l'équipe (APELEC) de l'université de Djilali Liabès, Sidi Bel Abbès, Ces travaux sont en fait le résultat d'une collaboration entre l'équipe APELEC et le laboratoire Pprime, IUT d'Angoulême, université de Poitiers, France.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur le Professeur Lucian DESCALDESCU qui a assuré la direction de cette thèse le long de mon séjour de stage en France. Les nombreux conseils qu'il m'a donnés, sa disponibilité ainsi que son écoute ont constitué un soutien précieux pour moi. Au-delà du travail en lui-même, il a souvent su orienter mes réflexions au cours de discussions très enrichissantes me faisant profiter d'une partie de sa grande culture scientifique. Il a ainsi, durant les dix-huit mois de stage, contribué à mon initiation à la recherche et mon épanouissement scientifique. Qu'il trouve ici, pour cela, l'expression de toute ma gratitude et de mon plus profond respect.

L'encadrement de cette thèse au sein du laboratoire de la haute tension à l'université de Sidi Bel Abbès a été assuré par Monsieur le Professeur Amar TILMATINE chef de l'équipe APELEC. Son soutien tout au long de cette période m'a été d'une aide précieuse pour surmonter les moments difficiles et les moments de doutes. Par ses qualités humaines, il a su instaurer un milieu de travail agréable. Plus qu'un responsable, Amar est un ami. Je lui suis sincèrement reconnaissant pour toute la confiance qu'il m'a confirmée et l'autonomie qu'il m'a toujours accordée, je lui adresse donc mon amitié et ma plus profonde gratitude.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur Abdelber BENDAOUD de l'université de Sidi Bel Abbès de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur Ali HENNAD Professeur à l'université d'Oran et Monsieur Rabah OUIDDIR Maître de conférences à l'université d'Oran pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail et.

Mes remerciements vont également Madame Khouira SENOUCI Maître de conférences à l'université de Sidi Bel Abbès pour avoir bien voulu examiner ce travail et participer au jury.

J'ai apprécié, tout au long de ma formation en France, l'accueil qui m'a été fait au sein de l'IUT d'Angoulême, université de Poitiers, France.

J'associe également à mes remerciements tout les membres du laboratoire Pprime, en particulier Mihai .BILICI pour tous ses conseils et sa précieuse lors des manipulations expérimentales,

Enfin je ne saurais cette partie concernant les remerciements sans y associer mes proches. Tout d'abord ma mère, dont les encouragements et le soutien constant ont été d'une valeur inestimable durant des longues années d'études, mais également mes frères et ma sœur Farida. Il serait impossible de pouvoir exprimer toute ma reconnaissance, encore moins en quelques lignes, mais je tiens tout de même à les remercier chaleureusement.

Mes amis et ont également contribué à cette thèse, de près ou de loin. Ainsi que mes collègues de l'université de Mascara, particulièrement Professeur A.TAHOUB et Professeur Y. BENMIMOUN. Il m'est souvent arrivé de les ennuyer avec mes travaux et mes satisfactions. Ils ont su m'écouter et m'encourager, je les en remercie sincèrement.

Tables des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art	
1.1. Charge triboélectrique des matériaux granulaires	4
1.1.1. Modes d'électrisation :	
1.1.2. Bases physiques du phénomène de charge triboélectrique	8
1.1.3. Facteurs influents	9
1.1.4. Dispositifs de charge	11
1.1 Procédés et installations de séparation tribo-électrostatiques	12
1.2.1. Séparateurs « classiques » à chute libre	12
1.2.2. Nouveaux procédés de séparation	14
1.3 Modélisation des procédés de séparation tribo-électrostatique	19
1.3.1 Modélisation physique	19
1.3.2 Modélisation expérimentale	20
1.3.3 Modélisation numérique	21
Conclusion	23
Chapitre II : Modélisation expérimental	
2.1 Installations expérimentales	24
2.1.1 Séparateur tribo-aéro-électrostatique de laboratoire	24
2.1.2 Dispositif industriel	27
2.1.3 Techniques de mesure de charge	33
2.1 Etude du régime intermittent	36
2.2.1 Expériences pour l'évaluation de l'efficacité de la séparation	37
2.2.2 Estimation de la charge tribo-électrique acquise	40
2.2.3 Modélisation expérimentale de la séparation tribo-électrostatique	46

2.2.4 Fonctionnement du séparateur industriel	50
2.3. Etude du régime continu	52
2.3.1 Fonctionnement continu du dispositif à débit faible	52
2.3.2 Résultats expérimentaux obtenus avec le dispositif à débit faible en fonctionnement à boucle ouverte	55
2.3.3 Modélisation par la méthodologie des plans d'expériences	57
Conclusion	61
Chapitre III : Elaboration et validation d'un modèle numérique	
3.1. Modèle mathématique	62
3.1.1. Hypothèses	62
3.1.2. Equations du régime intermittent	65
3.1.1.1 Equations de base	65
3.1.1.2 Algorithmes de simulation	68
3.1.3. Equations du régime continu	69
3.1.3.1 Equations de base	70
3.1.3.2 Algorithmes de simulation	72
3.2 Code de calcul	74
3.2.1 Algorithme de base	76
3.2.2 Particularité du code pour la simulation du régime intermittent	77
3.2.2 Particularité du code pour la simulation du régime continu	79
3.3 Validation du code	81
3.3.1 Régime intermittent : Séparation d'un mélange 50%A+ 50%B	82
3.3.2 Régime intermittent : Séparation d'un mélange 40%A+60%B	83
3.3.3 Régime continu	84
Conclusion	86

**Chapitre IV : Simulation numérique du fonctionnement
d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique**

4.1 Simulation du régime de fonctionnement intermittent	87
4.1.1 Effet des parois	88
4.1.2 Nature des matières à séparer	90
4.1.3 Mélange de trois matériaux granulaires	92
4.2 Simulation du régime de fonctionnement continu en boucle ouverte	93
4.2.1 Effet de débit	94
4.2.2 Effet de la composition du mélange	95
4.2.3 Effet de la concentration et du débit non contrôlés	97
4.3 Simulation du régime de fonctionnement continu en boucle fermée	98
4.3.1 Effet de la composition du mélange dans le lit fluidisé	100
Conclusion	106
Conclusion Générale	107
Références Bibliographique	109
Annexes	116

NOMENCLATURE

A, B	matières à séparer.
C_A, C_B	Concentration des matériaux A and B
M	Masse totale à séparer
M_A, M_B	Masse de A et B dans le lit fluidisé
M_{As}, M_{Bs}	masse récupérée de A et B
N	nombre de collision par unité de temps
P	fonction de probabilité fonction de distribution normal standard
PA	Polyamide
PC	Polycarbonate
PMMA	poly méthacrylate de méthyle
X_{AB}	Nombre de collisions
x_{AB}	Nombre moyen de collisions de A - B
s_{xAB}	Ecart type moyen
σ_{xAB}	Ecart type standard
$t_{50\%}$	Temps de séparation de 50% des granules A
λ_A, λ_B	Charge échangée entre un granule A (ou B) et la paroi
Subscripts	
e	Valeur estimée
exp	Valeur expérimentale

INTRODUCTION GENERALE

Il y a vingt 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. 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. Dans ce contexte, les matériaux plastiques sont très présents dans notre environnement.

Les technologies électrostatiques se sont imposés comme la solution de choix pour le recyclage des matériaux plastiques contenus dans ces déchets. 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.

Incitées 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, japonais et algériens sur la séparation électrostatique des matériaux plastiques granulaires et sur les principaux mécanismes de charge impliqués.

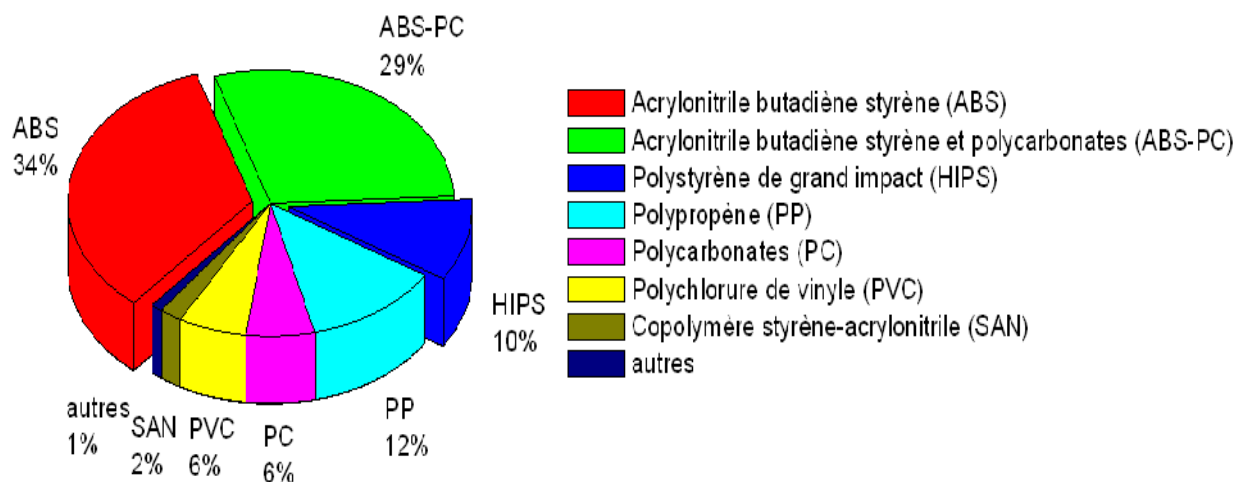


Figure i.1 : Classes des matériaux plastiques dans les composants informatiques

Par ailleurs, la modélisation numérique se développe de plus en plus pour l'étude des matériaux granulaires. Cela est dû notamment au coût des expériences et à l'évolution des techniques de calcul. Un avantage non négligeable des simulations numériques est la

possibilité de connaître l'ensemble des grandeurs physiques en tout point du domaine occupé par les grains et à tout instant. La méthode numérique étudiée dans ce manuscrit permet de calculer la masse de matière récupérée en fonction de la composition du mélange introduit dans le dispositif de séparation tribo-aéro-électrostatique à lit fluidisé.

L'analyse des problèmes présentés dans les paragraphes précédents a permis de dégager comme but de cette thèse la **modélisation du fonctionnement d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique pour matériaux plastiques granulaires**. L'objectif de cette thèse, était d'améliorer les méthodes de séparation électrostatique actuelles et de proposer des solutions viables à des nouvelles applications industrielles, ainsi qu'une modélisation numérique a été développée et vérifiée par des essais expérimentaux appropriés afin d'assurer une croissance rapide des quantités à traiter, et une augmentation progressive des exigences concernant la qualité des concentrés obtenus.

Le premier chapitre expose la problématique de la récupération des matériaux plastiques d'équipements informatiques, quelques concepts sur l'effet tribo-électrique sont passés en revue, ainsi que la construction et les principes de fonctionnement de certains dispositifs de tribo-électrisation et de séparation électrostatique. L'analyse de l'état de l'art dans le domaine de la tribo-électrisation des matériaux plastiques granulaires a permis de dégager plusieurs pistes d'investigation expérimentale et de structurer le modèle numérique de ce 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 mouvement dans des installations de séparation tribo-aéro-électrostatique. 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 réalisés au sein du laboratoire Pprime, à l'Institut Universitaire de Technologie d'Angoulême, Université de Poitiers, France, 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 ce chapitre ont été validées dans le **3^{ème} chapitre** par deux modèles numériques, le premier est la séparation des mélanges granulaires en régime

intermittent, et le deuxième pour assurer une séparation continue afin de pouvoir l'appliquer dans l'industrie.

L'objectif du **4^{ème} chapitre** a été de traiter les divers aspects de la modélisation par paliers de difficultés : élaborer d'abord un code de calcul intermittent en développant l'effet des parois, l'effet de natures des matières à séparer ainsi que la séparation de trois matériaux granulaires. Ensuite l'étude est concentrée sur le modèle numérique de l'alimentation en continu de la matière à séparer sans et avec boucle, en étudiant l'effet de concentration et de débit de matière à séparer où la démarche numérique et les résultats sont décrits.

Le manuscrit sera terminé par une **conclusion générale**, qui clôture la thèse, et présente une synthèse des principales **contributions** apportées dans les différents domaines étudiés, ainsi que de l'énoncé des **perspectives** ouvertes par ce travail

-1- ETAT DE L'ART

Les déchets électroniques, notamment les produits informatiques, télévisions et autres composants, créent des problèmes d'environnement et sanitaire graves, pour cela l'industrie de recyclage est intéressée par la valorisation de ces déchets. Des différentes méthodes de séparation ont été utilisées pour la récupération des déchets, parmi ces méthodes, les technologies électrostatiques sont considérées comme la solution la plus robuste, grâce à son faible coût d'exploitation et de consommation d'énergie, ainsi que la pollution réduite. La plupart des brevets sur les procédés électrostatiques sont assez récents et ont été initiés par des industriels en collaboration avec des laboratoires de recherche [1].

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique a été faite sur la triboélectricité, les différents séparateurs triboélectriques utilisés par les chercheurs, et la fin les méthodes appliquées à la séparation triboélectrique mise au traitement des déchets plastiques.

1.1. Charge triboélectrique des matériaux granulaires

La propriété, qu'ont certains corps frottés d'attirer des corps légers, est appelé électrisation. Les corps électrisés possèdent de l'électricité [2]. L'électrisation des corps a pu être observée grâce aux propriétés isolantes de l'air sec, qui empêche l'écoulement vers la terre des charges créées par frottement.

1.1.1 Modes d'électrisation :

Par la définition de l'électrisation donnée au § 1.1, il est question d'électrisation par frottement qui, historiquement, a été le premier mode connu. Il existe cependant d'autres modes d'électrisation propre soit aux isolants, soit aux conducteurs [3]:

1.1.1.1 Electrification par frottement (triboélectricité) :

L'électrification par frottement apparaît, lorsqu'on frotte un corps isolant contre un autre. Cette action provoque l'arrachement d'électrons dans l'un des corps qui s'électrifie positivement, tandis que les électrons arrachés du premier électrifient négativement le second.

1.1.1.2 Electrification par contact (transfert direct de charges) :

L'électrification par contact apparaît si l'on met en contact un corps B, isolé de la terre et primitivement neutre, avec un corps A chargé (Figure 1.1).

Le corps B se chargera de la même électricité que le corps A, par un déplacement

d'électrons ou d'ions positifs d'un corps à l'autre.

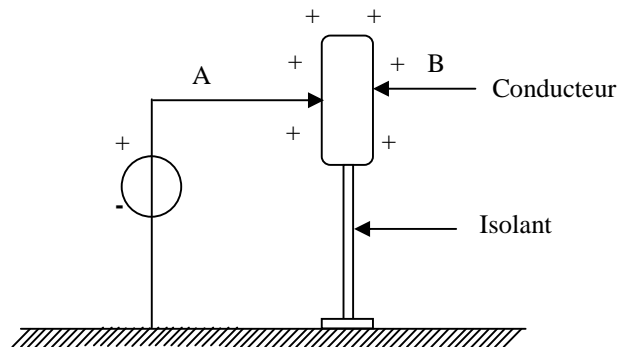


Figure 1.1 : Electrification par contact

1.1.1.3 Electrification par influence (à l'aide d'un champ électrique) :

L'électrification par influence se manifeste si, au voisinage d'un corps électrisé A, on approche un corps primitivement neutre B, les deux corps étant soutenus par des supports isolants (Figure 1.2). On peut constater que B lui-même acquiert la propriété d'attirer les corps légers, donc il s'électrise. Cette propriété se manifeste surtout sur les deux surfaces a et b qui sont l'une près de A, l'autre éloignée de A. en approchant de petits corps d'électrifications différentes, on peut constater que a et b sont électrisés différemment : a est d'électrification contraire à A, b est de même électrisation de A.

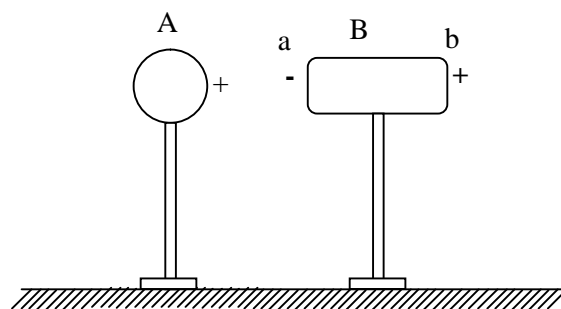


Figure 1.2 : Electrification par influence

L'électrification par influence consiste à déplacer des électrons d'un côté à l'autre du corps influencé.

1.1.1.4 Electrification par ionisation (émissions d'ions sous haute tension) :

L'électrification par ionisation consiste en un dépôt superficiel de charges sur un isolant lorsque celui-ci traverse une zone fortement ionisée (Figure 1.3).

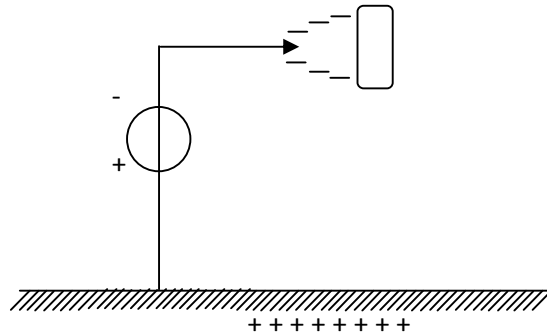


Figure 1.3 : Electrification par contact

1.1.1.5 Electrification par compression ou extension

L'électrification par compression ou extension apparaît lorsque certains cristaux tels que le quartz et la tourmaline, convenablement taillés, se chargent d'électricité de signe contraire sur deux faces opposées, quand on les soumet à des efforts de compression ou d'extension perpendiculaires à ces faces (Figure 1.4).

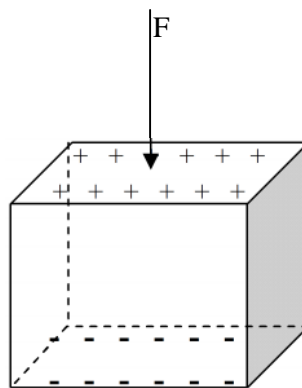


Figure 1.4 : Electrification par compression

Ce phénomène, connu sous le nom de piézo-électricité, ce mode d'électrification existe pour les isolants. Il donne lieu à des applications nombreuses telles que mini générateurs de haute tension, briquets, capteurs de mesure de pression, microphones, etc.

1.1.1.6 Electrification par clivage ou fragmentation

L'électrification par clivage ou fragmentation apparaît lors de la séparation de deux feuilles d'un minéral (par exemple le clivage du mica) ou la rupture d'un solide (fracture d'un morceau de sucre qui laisse les deux surfaces qui viennent d'être séparées, chargées). Des énergies de quelques eV ont été mesurées lors de tels processus. Le même mécanisme pourrait être responsable de l'apparition de charges lors du clivage, ainsi que lors de la rupture par fragmentation et il consisterait dans la cassure des liens interatomique qui libérerait des électrons.

1.1.1.7 Electrification par effet photo-électrique

L'électrification par effet photo-électrique est due à l'impact d'un ou de plusieurs photons sur un matériau solide qui communique une énergie suffisante aux électrons pour les éjecter. Cette énergie est égale à la différence entre l'énergie du photon et l'énergie d'extraction de l'électron :

$$W = h\nu - e V_s \text{ [J]} \quad (1.1)$$

Où h est la constante de *Planck*, ν la fréquence de l'onde lumineuse incidente, e la charge et V_s le potentiel d'extraction de l'électron dont la valeur varie suivant les métaux.

Le potentiel d'extraction d'un électron d'un métal représente le potentiel d'un électron ayant acquis l'énergie nécessaire lui permettant de quitter le métal. Cette énergie est égale à :

$$F \cdot dl = eV_s \text{ [eV]} \quad (1.2)$$

1.1.1.8 Electrification par émission thermoélectrique

Lorsqu'un matériau est chauffé, il se produit une agitation thermique des électrons libres, qui acquièrent de l'énergie. Le potentiel thermoélectrique correspondant à cette énergie appelé aussi tension thermodynamique est alors égal à :

$$V_T = K_B T/e \text{ [V]} \quad (1.3)$$

Où $K_B = 1.3804 \cdot 10^{-23} \text{ [J/K]}$ est la constante de Boltzmann, T est la température en K et e est la charge de l'électron.

1.1.1.9 Electrification par ballo-électricité

L'électrification par ballo-électricité ou (par agitation des particules dans un flux de gaz) naît lorsque la fragmentation en particules fines d'un liquide par des moyens mécaniques (atomiseur ou courants d'air dans l'atmosphère provoque l'électrification de ces particules).

Les phénomènes les plus répandus étant l'effet triboélectrique et l'électrification par influence. Dans le processus de la séparation électrostatique des mélanges de matériaux isolants, la plus importante source de charges électriques reste l'effet triboélectrique.

1.1.2. Bases physiques du phénomène de charge triboélectrique

Il s'agit d'un transfert de charges électriques entre différents matériaux : lorsque deux matériaux électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation et de nouveaux contacts auront pour effet de produire de nouveaux transferts de charges. L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux mais sa définition s'étend souvent aux transferts de charges par contact, le frottement étant l'équivalent de contacts suivi de séparations, mais s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse.

Au niveau le plus élémentaire, la charge par frottement est un phénomène simple. Lorsque deux matériaux différents, mais électriquement neutres, A et B dans la figure 1.5. a, entrent en contact, les charges doivent se transférer d'une surface à l'autre afin d'amener les matériaux en contact dans l'équilibre thermodynamique, (Figure 1.5.b). Si les surfaces sont séparées assez rapidement et les deux matériaux restent isolés l'un de l'autre, ils conservent leurs charge (Figure 1.5. c).

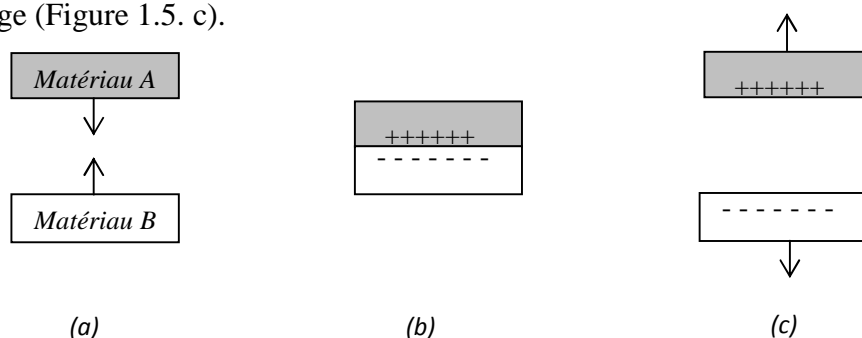


Figure 1.5 : Trois étapes de contact de charge, (a) Deux matériaux dissemblables en contact, (b) Transfert de charge à travers l'interface, (c) La séparation des surfaces chacune avec ses excès de charge

1.1.3. Facteurs influents

Dans la majeure partie des cas, l'électricité statique se forme suite au contact suivi de la séparation de deux corps ou du frottement entre ces deux corps. Les deux corps peuvent être des isolants ou bien l'un d'entre eux, un conducteur, qu'il soit ou non relié à la terre [4]. De nombreux facteurs jouent un rôle dans l'établissement de ces charges électriques : la nature des corps mis en jeu évidemment, mais aussi des facteurs externes tels que l'humidité de l'air environnant et la température. Dans ce paragraphe deux facteurs essentiels sont représentés : la surface de contact et la vitesse de frottement.

1.1.3.1 Surface de contact

Dans des conditions industrielles simples, les surfaces de contact se réunissent d'une manière qui rend certaine quantité de frottements inévitables. L'expérience montre que, quand une surface isolante est frottée, soit par un conducteur ou un autre isolant, un transfert de charge peut être de plusieurs ordres de grandeur supérieur à une simple touche de contact [5]. Cela peut être rationalisé en notant que le frottement augmente l'intimité des surfaces de contact. La preuve de ce point de vue a été fournie par Coste et Pechery[6], qui ont montré que la charge était plus grande lorsque la rugosité de surface est faible et Haenan [7] qui a montré que le transfert de charge a augmenté avec la pression de frottement.

1.1.3.2 Vitesse de frottement

En règle générale, augmenter la vitesse de frottement va augmenter la charge transférée, bien des cas ont été cités où la charge passe par un maximum [8] et peut même changer de signe [9], lorsque la vitesse de frottement est accrue. Ces effets sont liés aux gradients de température locale apparaissant à travers le contact, résultant de la diffusion progressée des électrons de la surface la plus chaude vers la plus froide. Le frottement peut aussi causer des couches de surface du matériau à être "agités" de sorte que les charges préalablement à la surface sont injectées dans la masse [10].

Malgré la présence de ces facteurs de complication, un nombre de physiciens ont élaboré la série triboélectrique à partir de laquelle il est possible, dans certaines limites, de prédire la polarité de la charge qui est transféré d'une surface à l'autre. Deux des nombreuses séries qui existent [5] sont donnés dans le tableau 1.1, plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée.

En réalité, on ne peut pas se fier complètement à l'ordre des matériaux dans ces listes car il diffère souvent d'un auteur à l'autre ; en effet une différence dans le frottement, des facteurs externes peuvent inverser les signes obtenus, il semble donc impossible de réaliser une liste avec un ordre fiable. Cette particularité de l'électricité statique, le fait que les signes peuvent s'inverser de manière si facile, est très surprenant et est un élément de plus qui peut permettre de comprendre les mécanismes électrostatiques.

Ce classement n'est donc que très approximatif et l'ordre des différents matériaux peut varier sous l'influence de facteurs tels que : la rugosité de la surface, les forces de contact, le travail de sortie... En définitive ce diagramme n'est qu'un outil de comparaisons relatives entre les différents corps plutôt qu'une référence absolue.

Tableau 1.1 : Série triboélectrique présentée par (a) Unger et (b) Hersh et Montgomery [5]. Les matériaux au sommet de la table se chargent positivement quand ils sont frottés contre ceux en bas de la série.

(a). Matière	(b). Matière
+ Amiante	+ Laine
Verre	Nylon
Mica	Viscose
Cheveux humain	Coton
Nylon	Soie
Laine	Rayonne d'acétate
Fourrure	Lucite, Perspex
Plomb	L'alcool de polyvinyle
Soie	Dacron
Aluminium	Orlon
Papier	PVC
Coton	Dynel
Acier	Velon
Bois	Polyéthylène
Caoutchouc dur	Téflon
Nickel, Cuivre	
Laiton, Argent	
Or, Platine	
Soufre	
Acétate de rayonne	
Polyester	
Saran	
Polyuréthane	
Polyéthylène	
Polypropylène	
PVC	
Silicone	

1.1.4. 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 [11].

La première installation présentée par le dispositif à vibrations. Une installation de ce type a été développée par BLAJAN [12, 13] (figure 1.6). Les éléments actifs du dispositif triboélectrique à vibration sont en forme de zigzag section carrée tuyaux obtenus par le montage de segments de droites constitués de tôle d'aluminium ou PVC [14]. sur une plaque métallique commune. Un moteur à courant continu à mécanisme de curseur manivelle [15] rend les plaques en mouvement dans des directions OY et OZ. Les particules à l'intérieur des tuyaux en forme de zigzag se déplacent également dans la direction OX. Avant les expériences, les matériaux granulaires ont été chargés dans le chargeur.

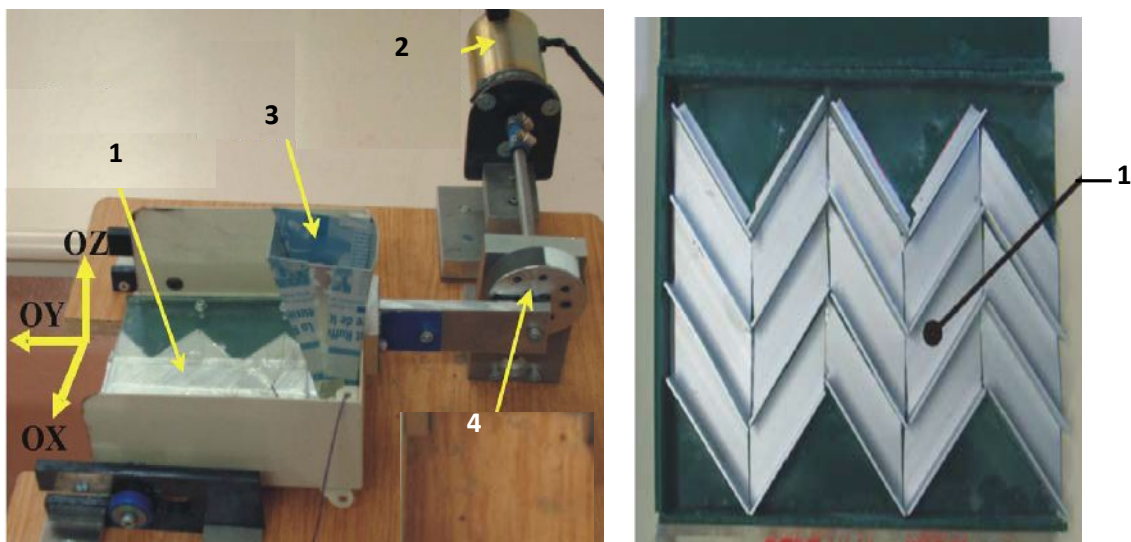


Figure 1.6 : Dispositif à Vibration, (1) Tuyaux zig-zag en Aluminium, (2) Moteur électrique, (3) Chargeur, (4) Curseur manivelle.

Une autre solution pour charger les particules est représentée, par le dispositif de charge à cylindre rotatif [16, 17, 18]. Le matériau granulaire est mis en mouvement à l'intérieur d'un cylindre, qui tourne autour d'un axe horizontal ou légèrement incliné (figure 1.7). Un flux de particules provenant d'un mélange de plastiques propres, secs et broyés est introduit dans un tambour qui provoque la culbute des particules qui se chargent par collisions entre elles (mécanisme principale) et avec la paroi du cylindre (mécanisme secondaire) : c'est le phénomène de triboélectricité.

Les particules chargées tombent ensuite dans un fort champ électrique horizontal produit entre deux électrodes situées dans une tour séparée. Elles sont alors déviées dans leur chute car elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge.

Les granules chargées positivement sont attirées vers l'électrode négative, et contrairement, les granules chargées négativement sont attirées vers l'électrode positive. Les produits chargés tombent près de l'électrode positive et de l'électrode négative.

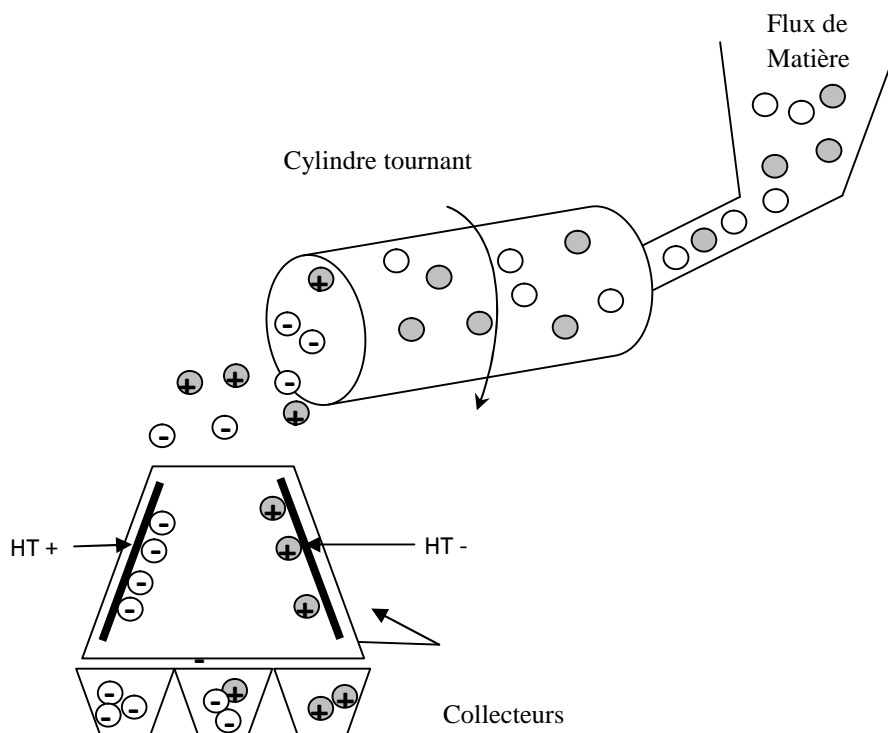


Figure 1.7 : dispositif à cylindre tournant

1.2 Procédés et installations de séparation tribo-électrostatiques

Les séparateurs triboélectriques qui reposent sur le principe du tri électrostatique permettent un tri entièrement automatisé d'un grand nombre de matériaux dont les plastiques en particulier. Les techniques de séparations des matières plastiques les plus courantes sont présentées dans ce paragraphe. Une description globale de la conception des séparateurs triboélectriques conçus à l'IUT d'Angoulême a été faite.

1. 2.1. Séparateurs « classiques » à chute libre

Le séparateur électrostatique à chute libre TESS (Tribo-ElectroStatic Separator) présenté sur la figure 1.8 a été conçu pour la recherche fondamentale et applicative dans le domaine de la triboélectricité, de la séparation des matériaux granulaires plastiques [19, 20,

21, 22] et de la purification des minerais [23]. Il est constitué de deux électrodes verticales surplombées par une trémie contenant les particules chargées. Lorsque les particules sont libérées et passent dans le champ électrique créé entre les électrodes, leur trajectoire est déviée sous l'action de la force de Coulomb [25].

Si Q_1 et Q_2 sont les charges des deux particules, r la distance entre leurs centres, la loi de Coulomb permet d'écrire :

$$F = Q_1 Q_2 \cdot \frac{k}{r^2} \quad (1.4)$$

Avec : $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, ϵ_0 étant la permittivité du vide.

On constate que cette force dépend de la taille des particules et les distances qui les séparent. Le phénomène d'adhésion peut être expliqué par les forces de Coulomb qui s'exercent, soit entre deux particules, soit entre particule et parois.

Ainsi les particules chargées se dirigent vers les électrodes des polarités opposées. En dessous du dispositif, des tiroirs sont disposés pour collecter les particules séparées.

Le développement du séparateur TESS satisfait plusieurs besoins techniques:

- construction modulaire : module de triboélectricité, 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 triboélectricité 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.

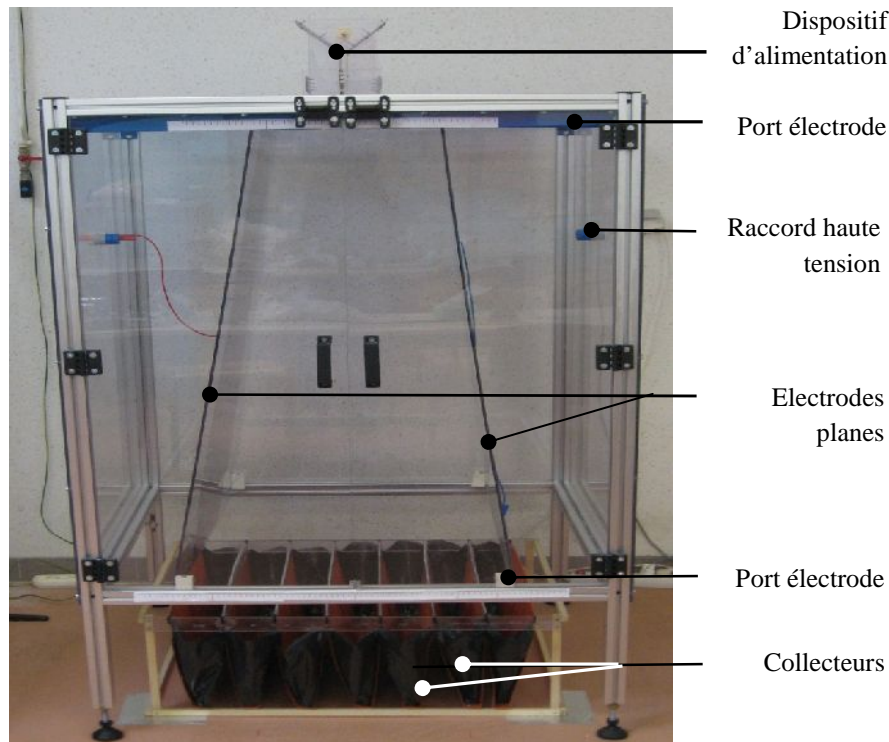


Figure 1.8 : Séparateur tribo-électrostatique à chute libre développé au sein du Laboratoire d'Electrostatique d'Angoulême, pour l'étude de la séparation des matériaux plastiques granulaires.

1.2.2. Nouveaux procédés de séparation

Trois procédés à lit fluidisés [26] ont été construits au Laboratoire Pprime, sur le site de l'IUT d'Angoulême, dans le but de faciliter la compréhension des phénomènes physiques en jeu et pour tester la faisabilité de la séparation tribo-aéro-électrostatique de certains mélanges de matériaux granulaires. Les deux parois opposées de la chambre de fluidisation sont métalliques et reliées à deux alimentations à haute tension afin de créer un champ électrique nécessaire à la séparation des particules chargées.

1.2.2.1 Dispositif de triboélectricité à faible débit et électrodes verticales

Ce dispositif est destiné aux études de laboratoire [11, 26, 27, 28], sur des petites quantités de matériaux. Il est composé de deux parties dissociables : 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 deux autres parois ont à l'intérieur des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces. Les électrodes

sont alimentées par deux sources haute tension continue de polarités différentes, afin de créer un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules et assurer la séparation entre les composants du mélange. A l'extrémité supérieure, la chambre est prévue d'un filtre qui prévient les granules de sortir à l'extérieur.

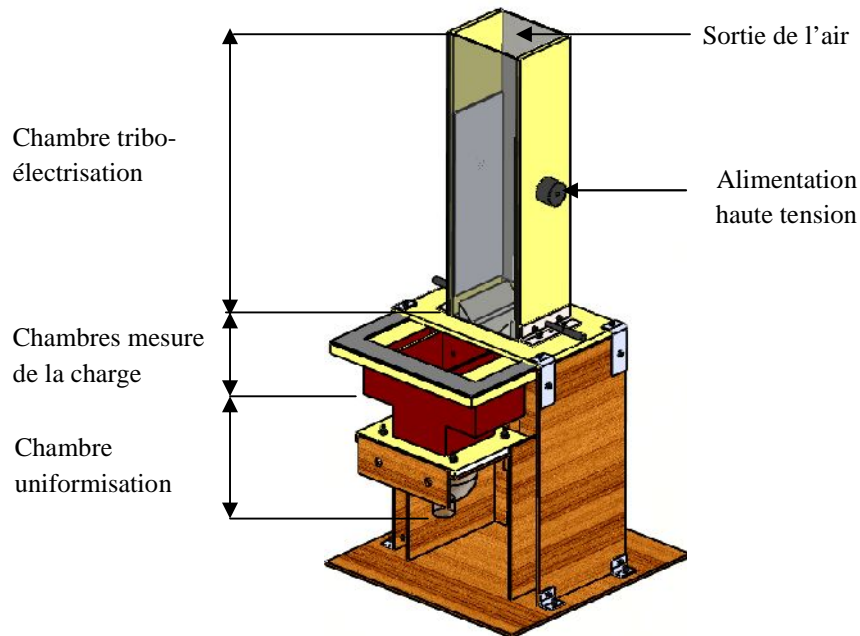


Figure 1.9 : Dispositif de tribo-électrisation à faible débit et électrodes verticales

La chambre est fixée sur un support plastique (figure 1.9) qui lui-même est fixé sur un support en bois, qui assure 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 une entrée au bout supérieur pour permettre l'entrée des granules et mesurer leur charge électrique à l'aide d'un électromètre.

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.

1.2.2.2. Dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées [11]

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 (Figure 1.10).

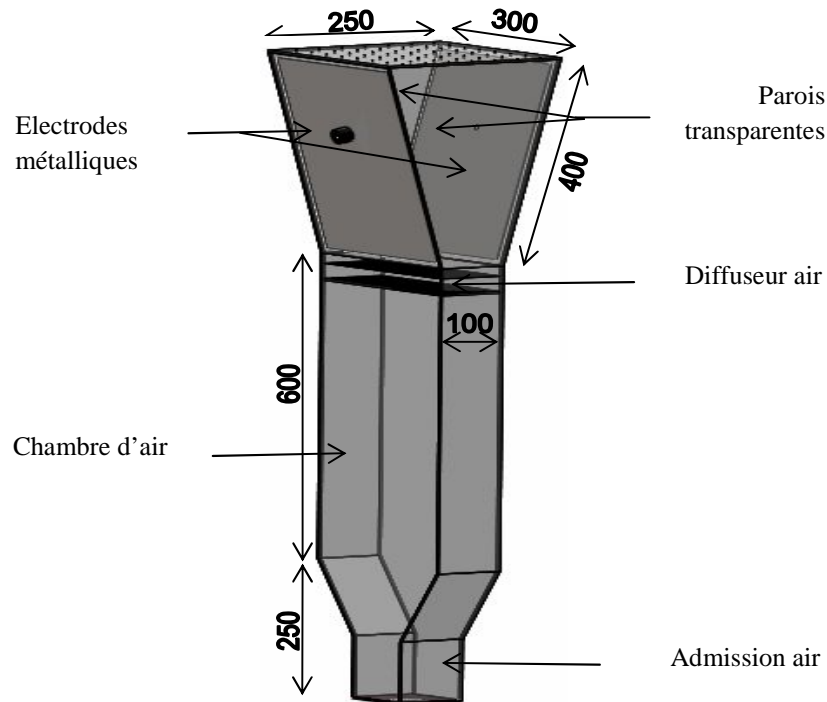


Figure 1.10. : Dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées

Il a été construit en PMMA transparent pour faciliter l'observation des processus de fluidisation et de séparation électrostatique. Le dispositif est composé de deux parties :

1/ chambre parallélépipédique pour l'uniformisation du jet de l'air, équipée à la partie supérieure d'un diffuseur d'air ;

2/ Chambre de triboélectricité, 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 et reliées à deux sources de haute tension continue.

Dans ce cas de dispositif, le matériau granulaire est introduit dans la chambre de triboélectricité 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.

Après la séparation, les granules se collent à la surface des électrodes et seront collectées par aspiration. Leur charge est déterminée en les versants dans une cage de Faraday, reliée à un instrument de mesure (électromètre).

1.2.2.3 Procédé et installation de séparation tribo-aéro-électrostatique

Un modèle de laboratoire du séparateur tribo-aéro-électrostatique a été construit sur le site de l'IUT d'Angoulême de l'Institut Pprime, Université de Poitiers. Il permet de trouver les facteurs d'échelle à adopter pour créer le régime de charge optimal dans un lit fluidisé de dimensions industrielles.

Les procédés de séparation électrostatique [29, 30, 31] sont déjà utilisés pour le tri des matériaux isolants granulaires mélangés, provenant du broyage des déchets industriels [32]. Le plus souvent, les matériaux broyés sont chargés par effet triboélectrique [33] dans des dispositifs à vibrations, rotatifs ou à lit fluidisé (§1.1.4). 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 [34]. 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.

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 [35, 36]. Le procédé original mis au point au laboratoire 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 [35] 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 réglé 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 1.11 représente en coupe, l'installation de séparation électrostatique.

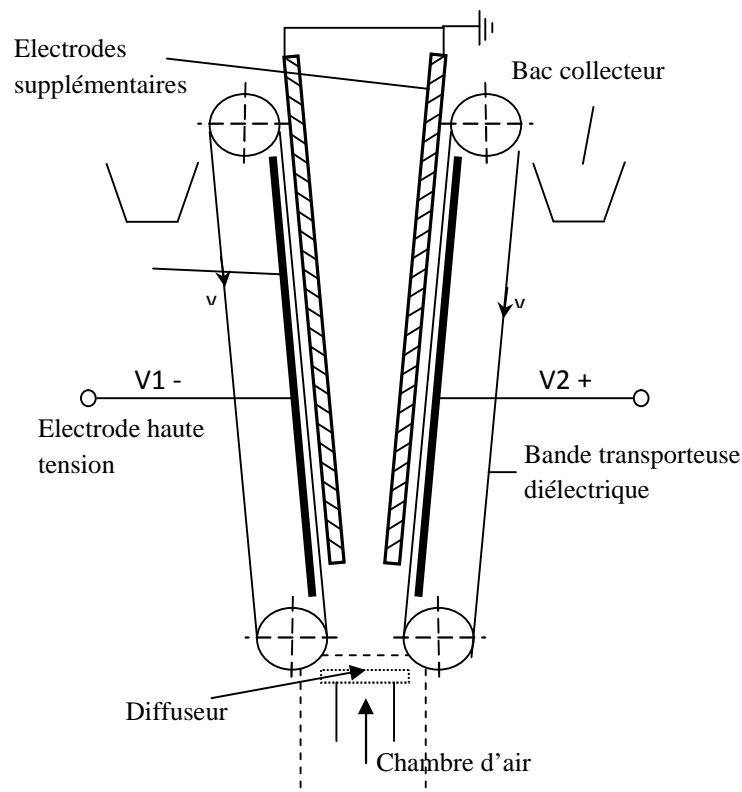


Figure 1.11: Dispositif de séparation tribo-aéro-électrostatique

1.3 Modélisation des procédés de séparation tribo-électrostatique

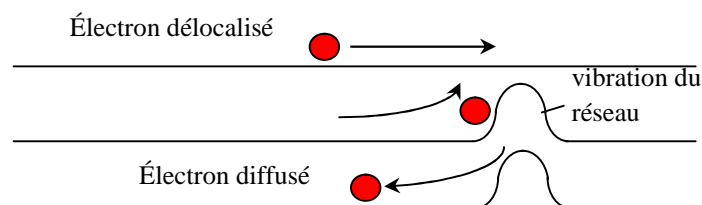
Les phénomènes tribo-électriques étant extrêmement complexes et mal expliqués, l'approche expérimentale et la modélisation numérique sont indispensables à l'étude des applications possibles dans le domaine de la séparation des matériaux granulaire.

1.3.1 Modélisation physique

Lorsque deux matériaux différents sont mis en contact ils acquièrent des charges électriques du au phénomène de tribo-électrisation.

Une explication de ce phénomène est fournie par le « modèle de conduction ionique ». Dans son travail, Touchard [37] s'est intéressé à ce modèle, qui considère la perte d'ions comme un mécanisme de transfert de charge normal pour les isolants, comme les polymères. Selon ce modèle, un ion ayant une énergie suffisante, à une température définie, peut sauter sur une des positions stables des voisins, de sorte que la charge est transférée d'un matériau à un autre (figure 1.12). Défauts du réseau cristallin, l'absorption de l'eau, des additifs dans les polymères, etc. peuvent être des sources d'ions, si ce mécanisme compte dans le processus d'échange de charge.

A : Conductivité métallique



B : conduction par sauts

Electron localisé par le désordre

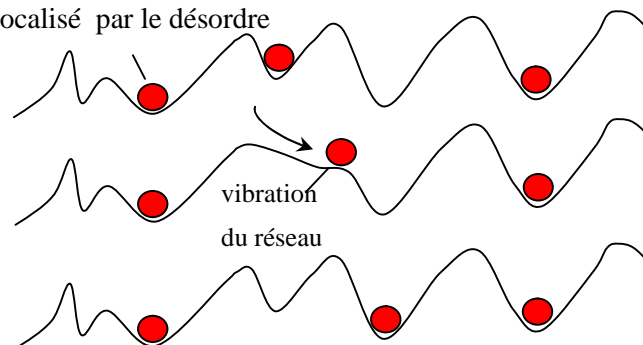


Figure 1.12 : Effets de la localisation et de la délocalisation des électrons

Les récents travaux de Liu et Bard [38] ont proposé un modèle de transfert d'électrons, validée par des expériences sur la charge de téflon. En revanche, Whitesides et McCarthy [39]

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 tribo-charge des matériaux isolants.

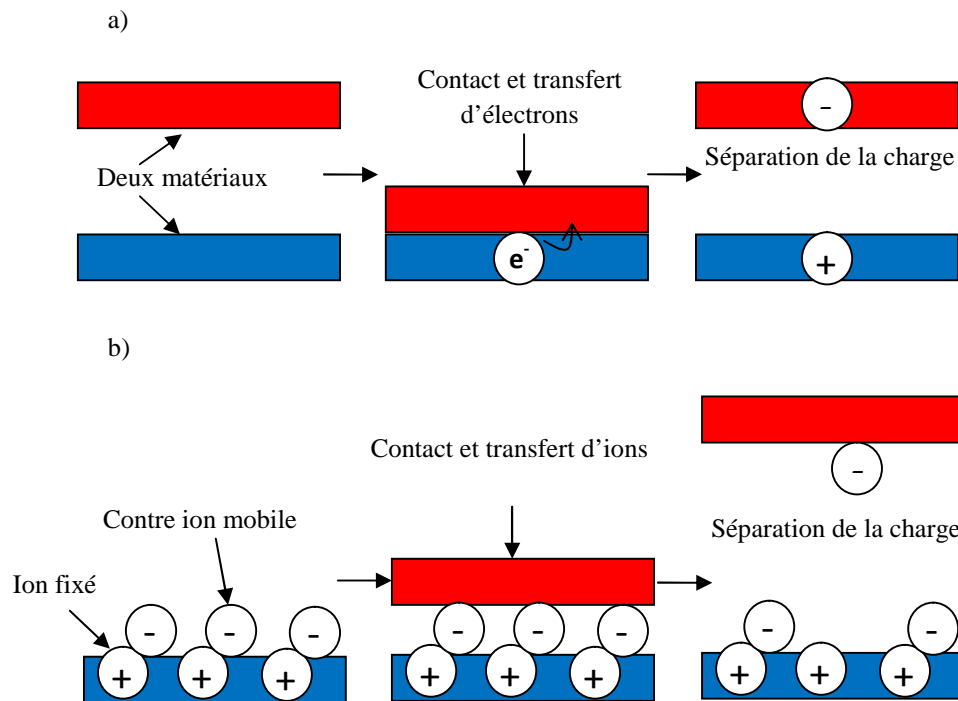


Figure 1.13 : Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ; b) Transfert d'ions

1.3.2 Modélisation expérimentale

La plupart des chercheurs ont supposé que la tribo-électrisation des isolants implique également le transfert d'électrons, [40-41], 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, l'affinité électronique, ou l'électronégativité [42,43]. 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 à se charger négativement, et les solides organiques bases tendent à se charger positivement ; Il a proposé un mécanisme de transfert

d'ion pour l'effet tribo. Medley a fait des observations similaires en 1953 [44], et Diaz a proposé qu'un mécanisme de transfert d'ion puisse expliquer la tribo électrisation d'un large éventail de matériaux isolants [45,46]. 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. Ses arguments contre le mécanisme de transfert d'électrons sont convaincants, bien que sa rationalisation mécaniste de 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 non pas d'électrons: l'article par Lowell et Rose-Innes atteint la conclusion inverse [47], 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.

1.3.3 Modélisation numérique

Depuis 1979 avec Cundall et Strack [48], 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 » (discreteelementmethod) 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. [49]

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

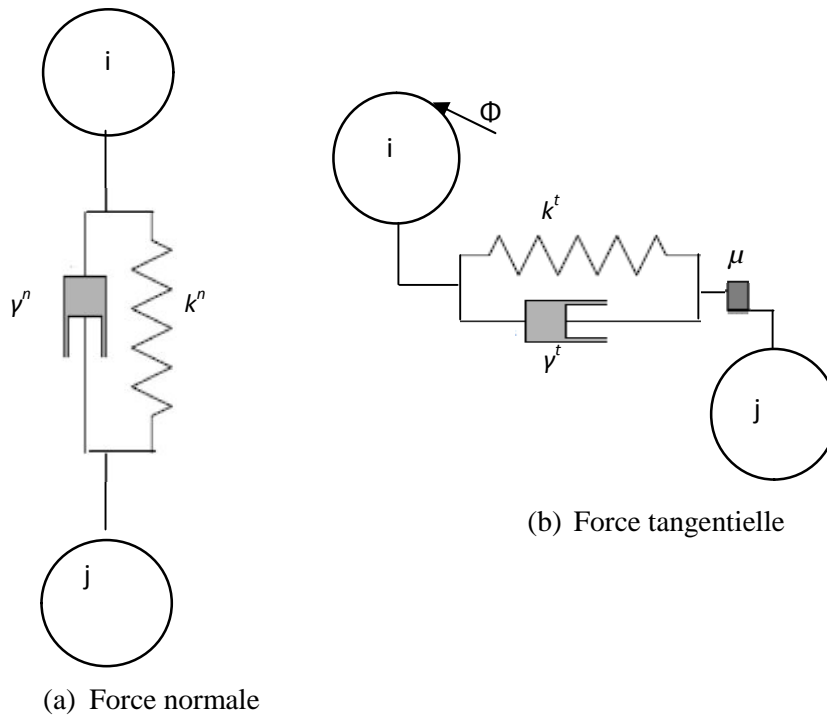


Figure 1.14: Représentation d'un contact viscoélastique par des éléments de type Kelvin-Voigt. k^n et k^t sont respectivement les coefficients de raideur normale et tangentielle. γ^n et γ^t sont les coefficients d'amortissement normaux et tangentiels, μ est le coefficient de frottement.

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 [50]. 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 [49,51] :

$$q = \frac{\epsilon_0}{\delta_e} (\Phi_i - \Phi_j - E\delta_e) \quad (1.5)$$

Où: ϵ_0 , la permittivité de l'espace libre; δ_e , la distance de coupure du transfert de charge [52] (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 [53] des deux particules.

Conclusions

Le problème du traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques, auxquels s'ajoutent des quantités de plus en plus importante de matériel informatique en fin de vie est une préoccupation actuelle pour l'industrie de recyclage. Les méthodes de récupération de matériaux isolants provenant de ces déchets sont variées. Les processus électrostatiques peuvent s'imposer comme solution de choix pour la séparation des mélanges de matériaux isolants obtenus après le broyage des déchets.

Ces processus utilisent une multitude de dispositifs de charge triboélectrique (rotatifs, à vibrations, à lit fluidisé) dont l'efficacité a déjà été prouvé pour des applications particulières. Les études réalisées sur des modèles de laboratoires montrent que les lits fluidisés pourraient représenter une solution viable pour la charge tribo-électrique des matériaux plastiques granulaires.

La modélisation numérique se développe de plus en plus pour l'étude du comportement des matériaux granulaires. Cela est dû notamment au coût des expériences et à l'évolution des techniques de calcul. Cela sera l'objectif d'un chapitre de cette thèse.

-2- Modélisation expérimentale

Le procédé de séparation tribo-aéro-électrostatique est un processus complexe et fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules. Il est contrôlé par plusieurs facteurs d'entrée (tension, concentration de matière à séparer...) et les réponses du système définissent la qualité des produits obtenus en sortie (rendement et pureté). Les études présentées dans le cadre de ce chapitre ont comme objectif la modélisation expérimentale et l'optimisation des processus de séparation. Les données expérimentales obtenues serviront aussi à la validation des résultats des simulations numériques présentés dans le chapitre 3. Dans un premier temps nous avons étudié la séparation tribo-aéro-électrostatique de diverses quantités de mélanges granulaires, afin de cerner les facteurs qui influent d'une façon significative la réponse du processus. Une deuxième série d'expériences a été réalisée ensuite pour caractériser le régime continu de fonctionnement du séparateur.

2.1 Installations expérimentales

Deux dispositifs à lit fluidisé ont été étudiés 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. Le premier de ces dispositifs est un séparateur à faible débit et le deuxième est un prototype pré industriel. La particularité commune de ces lits fluidisés est l'utilisation d'une chambre de fluidisation ayant deux parois métalliques opposées et reliées à des alimentations haute tension, afin de créer un champ électrique nécessaire à la séparation des particules chargées.

2.1.1 Séparateur tribo-aéro-électrostatique de laboratoire

Ce dispositif est à débit faible et électrodes verticales, il est destiné aux études de laboratoire, sur des petites quantités de matériaux (voir § 1.2.2.1).

L'alimentation du dispositif avec des granules de plastique se fait par la partie supérieure. Le système d'électrodes est alimenté par deux sources à haute tension à courant continu (Gamma High Voltage Research Inc.), qui fournissent des tensions de polarités opposées. 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 est produite par

des contacts répétés entre les particules ou entre les particules et les parois de la chambre de fluidisation [54, 55]. La figure (2.1) montre le banc expérimental pour l'étude de la charge des mélanges binaires des matériaux plastiques dans un dispositif de tribo-électrisation à faible débit et électrodes verticales

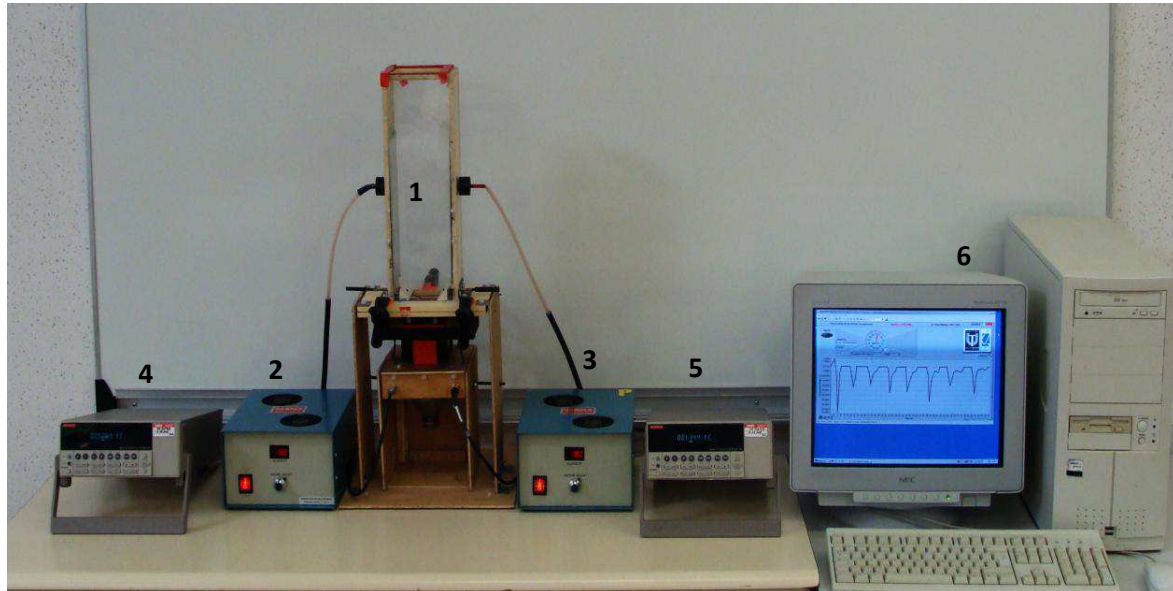


Figure 2.1 : Banc expérimental pour l'étude de la charge des mélanges binaires des matériaux plastiques dans un dispositif de triboélectrisation à faible débit et électrodes verticales ; 1- dispositif à faible débit et électrodes verticales, 2,3- électromètres Keithley, 4,5- sources haute tension, 6- PC équipé d'un instrument virtuel.

Sous l'action d'un champ électrique orienté orthogonal sur la direction du déplacement du jet d'air, les granules sont attirés par les deux électrodes haute tension à polarités opposées, et sont collectées 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.

2.1.1.1 Charge d'un mélange binaire de matériaux plastiques granulaires dans le dispositif de laboratoire

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 réside dans le fait que deux des parois opposées de la chambre de

fluidisation sont recouvertes 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 et l'application éventuelle d'un tel dispositif à la séparation électrostatique des mélangés granulaires [55 56 57].

2.1.1.2 Caractéristiques des granulés utilisés dans le dispositif de laboratoire

Les expériences de charge triboélectrique ont été effectuées sur des mélanges de matériaux plastiques granulaires [58]: polyamide (PA) et polycarbonate (PC), plastiques utilisés dans la fabrication industrielle (Figure 2.2). La masse moyenne d'une granule a été déterminée en divisant la masse d'un échantillon de 5 g par le nombre de granules du 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 2.1). L'analyse des résultats de séparation a été facilitée par l'utilisation des particules qui diffèrent par leur couleur.

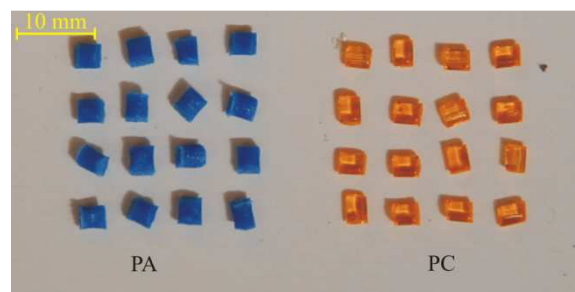


Figure 2.2 : Granules de Matières plastiques : polyamide (PA) et polycarbonate (PC)

Tableau 2.1 : Caractéristiques des matériaux plastiques granulaires vierges utilisés dans les expériences de charge par effet tribo-électrique

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

2.1.2 Dispositif industriel

Le séparateur électrostatique présenté précédemment a ses limites, en termes de quantité et le type de matériaux soumis à la séparation des mélanges granulaires. Pour ces raisons un autre séparateur a été réalisé fonctionnant avec des particules plus petites et des quantités de séparation plus élevées. Le principe de la nouvelle construction est basé sur le chargement des granulés dans un lit fluidisé et en présence d'un champ électrique.

2.1.2.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du séparateur tribo-aéro-électrostatique industriel est représenté schématiquement sur la figure 2.3. 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 se situe entre 0.5 et 5 mm. La chambre de séparation 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 et le filtre 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 aérauliques, les granules admis dans la chambre de séparation 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 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 fluidisée est établie par les granules les plus fines, mais ne dépasse pas 2/3 de la hauteur de la chambre de séparation. L'homogénéité dimensionnelle des granules qui viennent en contact les uns avec les autres assure les meilleures conditions de tribo-électrisation.

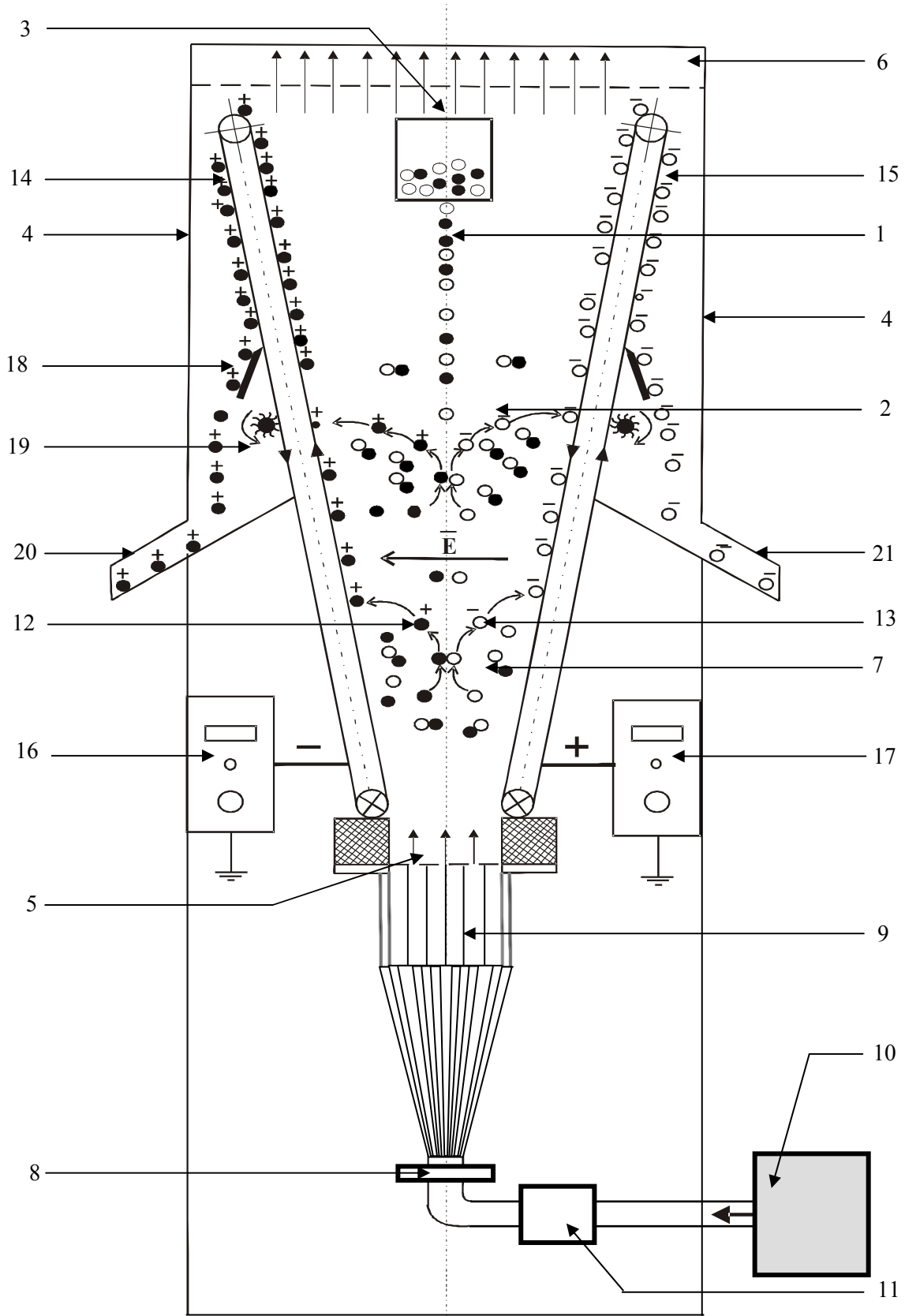


Figure 2.3 : Représentation schématique de l'installation de séparation tribo-aéro-électrostatique

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 et 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 par deux alimentations haute tension continue ajustable (16) et (17). Les électrodes sont situées à l'intérieur de la chambre de séparation.

Les granules chargés positivement se déplacent dans le sens du champ électrique, vers l'électrode négative et les granules chargés négativement sont dirigés vers l'électrode positive. Soumis à l'action de la force d'image électrique, les granules chargés adhèrent aux électrodes de polarités opposées, qui les entraînent en dehors de la zone lit fluidisé. Détachés par des racleurs (18) et des brosses rotatives (19) de la surface des électrodes, les deux sortes de granules sont récupérées 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.

2.1.2.2 Génération du champ électrique intense

A/ Système d'électrodes

L'une des particularités de ce séparateur consiste dans le fait que les électrodes sont constituées de deux bandes transporteuses métalliques (Figure 2.4). 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 :

- ✓ 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 ;

- ✓ augmenter l'épaisseur des bandes métalliques, mais ceci imposerait l'utilisation de rouleaux d'entraînement de diamètre plus grand, donc plus encombrants.

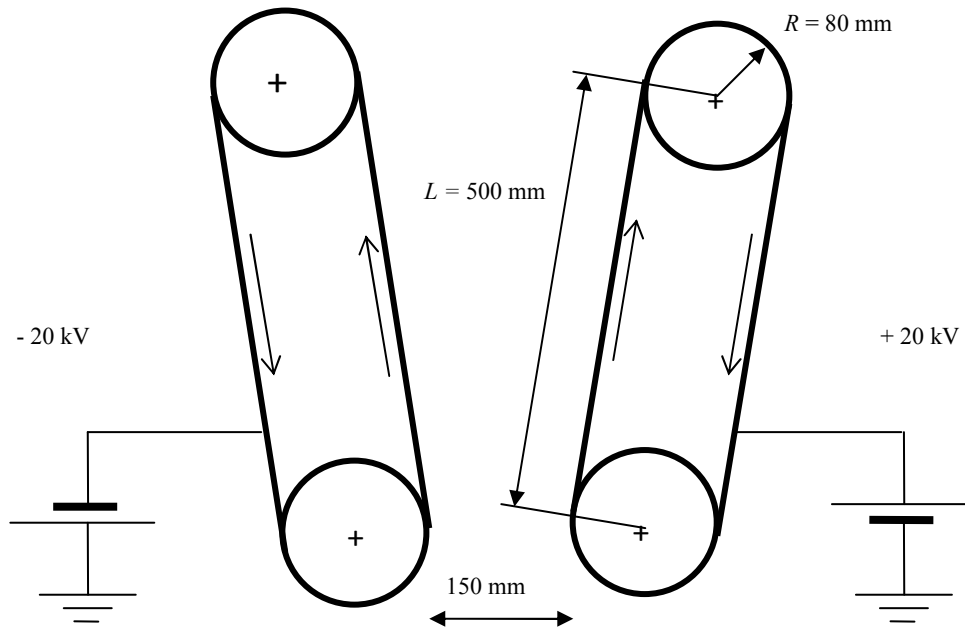


Figure 2.4 : Représentation schématique du système d'électrodes

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 électriques permettraient d'augmenter encore plus cette distance.

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. 2.5). Dans l'hypothèse d'une installation composée de plusieurs modules de séparation, il serait possible d'alimenter en 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 2.3.



Figure 2.5. Alimentation haute tension modèle ES20P-5 (+20 kV ; 5 W), fabriquée par la société Gamma High Voltage Research Inc, FL, USA

C/ Alimentation en air de fluidisation

C'est la pression d'air qui produit le mouvement des granules à l'intérieur de la chambre triboélectrique. Une turbosoufflante a été choisie pour assurer le débit d'air nécessaire à la fluidisation du lit de particules à séparer. Le débit d'air est ajusté par l'intermédiaire d'un variateur de fréquence. La sortie de la soufflante est divisée en plusieurs tubes à travers lesquels l'air se distribue d'une façon plus uniforme dans la chambre de fluidisation (Figure 2.6).

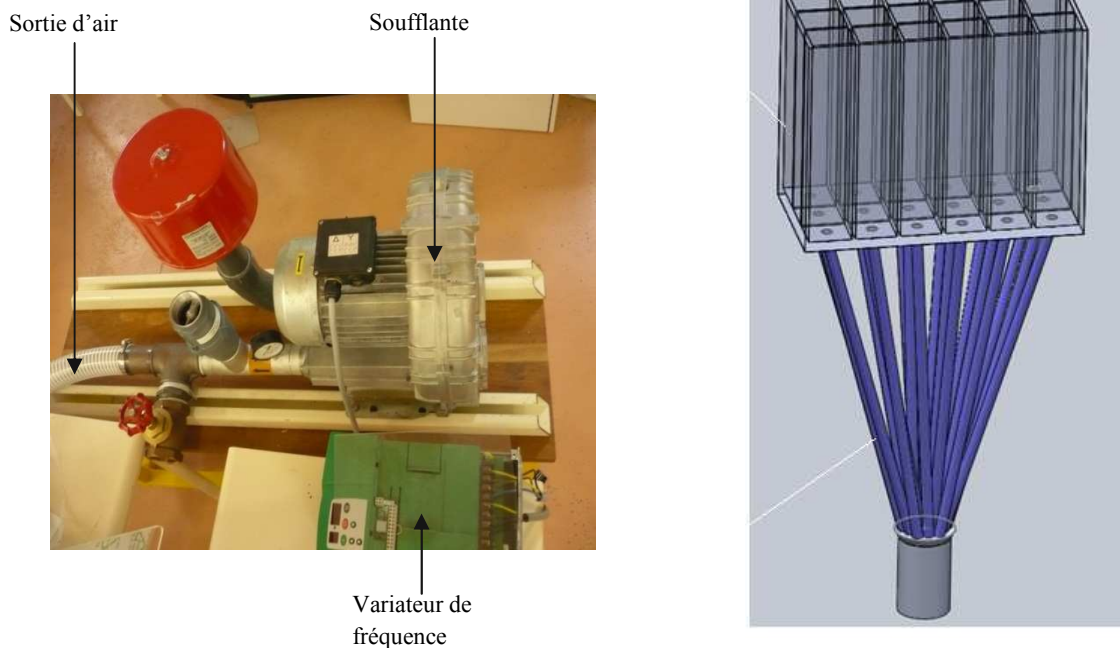


Figure 2.6 : Turbosoufflante et dispositif assurant la distribution uniforme de l'air de fluidisation.

2.1.2.3 Caractéristiques des granulés utilisés dans le dispositif Industriel

Les matériaux qui font l'objet de ces études [59] sont des plastiques utilisés couramment pour la fabrication d'équipements informatiques (imprimantes, claviers). Il s'agit de particules d'ABS et de HIPS provenant de déchets informatiques traités par l'entreprise APR2, Bonnières-sur-Seine, France.

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 2.7.

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 $\epsilon_r = 3,1 \div 3,4$. Ce matériau est utilisé pour la fabrication des carcasses d'ordinateurs et des claviers [17,60].



Figure 2.7 : Aspect des granules d'ABS (a) et de HIPS (b) appartenant à la classe granulométrique 1÷2 mm.

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 $\rho = 1020 \div 1060 \text{ kg/m}^3$ et la permittivité électrique relative $\epsilon_r = 2,5 \div 2,6$.

2.1.3 Techniques de mesure de charge

La charge électrostatique est l'un des principaux facteurs dans les processus électrostatiques. On peut distinguer deux types de mesures : les mesures directes où l'on essaie de déterminer la charge électrique d'un corps et les mesures indirectes où ce sont des propriétés particulières des corps vis-à-vis de l'électricité statique que l'on mesure (résistivité, temps de décharge.....) pour comprendre leur comportement électrostatique.

2.1.3.1 Mesures indirectes

Les mesures indirectes vont permettre de déterminer des paramètres physiques intervenant dans le comportement électrostatique des corps étudiés. Le fait que certains matériaux plus que d'autres posent problème d'un point de vue électrostatique est lié à la difficulté qu'ils ont à écouler les charges électriques. En effet, un risque de décharge électrique apparaît lorsque les charges ont le temps de s'accumuler en quantité suffisante pour atteindre le potentiel disruptif de l'air. La plupart des mesures faites sur les matériaux sont des

mesures permettant de déterminer la potentialité de ces matériaux à retenir les charges électriques, ce sont donc des mesures de résistances ou de résistivité électrique, au niveau de la surfaces ou du volume du matériau.

2.1.3.2 Mesures directes

Les mesures directes de la charge électrique sont établies sur un même principe de base : un capteur relié à un appareil de mesure dont la base est un voltmètre. L'impédance d'entrée de ce voltmètre doit être la plus grande possible, afin d'éviter toute consommation de la part de ce dernier.

Le cylindre de Faraday se présente comme un récipient métallique (d'ailleurs pas forcément cylindrique) à l'intérieur duquel on introduit les échantillons chargés (figure 2.8). Ce récipient est placé dans un autre, métallique lui aussi, mais isolé l'un de l'autre. Le récipient extérieur est relié à la terre et fait office de blindage contre les parasites extérieurs. Pour mesurer la charge électrique d'un échantillon, il suffit de l'introduire dans le cylindre intérieur, en évitant tout contact prématuré, celui-ci étant relié à un dispositif de mesure (voltmètre). On mesure alors une charge globale, somme algébrique de toutes celles que porte l'échantillon, donnée par la relation suivante

$$Q = C V \quad (2.1)$$

L'intérêt est que l'on obtient une estimation précise de la charge nette de l'échantillon puisque toutes ses lignes de champs se ferment dans le cylindre. Cependant, il est impossible de faire la distinction entre un échantillon ne portant pas de charges électriques d'un échantillon qui présenterait des zones chargées positivement et négativement mais qui se compenseraient exactement.

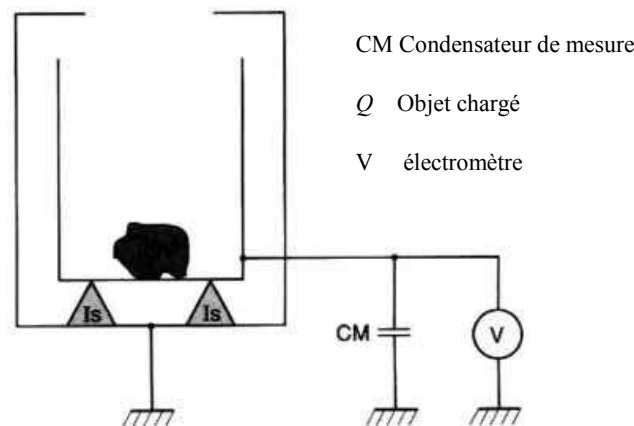


Figure 2.8 : Cylindre de Faraday

Une autre mesure directe consiste en un procédé qui tire avantage de l'effet de pointe pour décharger un échantillon et mesurer ces charges ainsi recueillies au niveau d'une capacité. L'utilisation d'une pointe métallique (aiguille) permet de réaliser cela, mais cette technique pose énormément de problèmes notamment de sécurité si on se trouve dans une zone à risque. Elle permet cependant d'évaluer le risque d'apparition d'une étincelle pour un échantillon donné, dans des conditions atmosphériques données et de déterminer l'énergie dégagée par cette étincelle.

En définitive les seules mesures qui restent pratiques et fiables sont les mesures utilisant le phénomène d'influence. Elles permettent soit de mesurer le champ électrique, soit le potentiel électrique, ces informations pouvant servir alors à calculer la densité de charge surfacique. Le principe porte sur l'utilisation d'un capteur (électrode) relié à un appareil de mesure, le plus souvent un voltmètre. Cependant il faut garder à l'esprit que ce sont des mesures très sensibles, avec de très faibles niveaux d'énergie, il faut donc que la mesure elle-même n'affecte pas les résultats. C'est pourquoi il est important que l'impédance d'entrée de l'appareil de mesure soit très élevée ($>10^{11} \Omega$) et que sa capacité soit faible ($<5 \text{ pF}$).

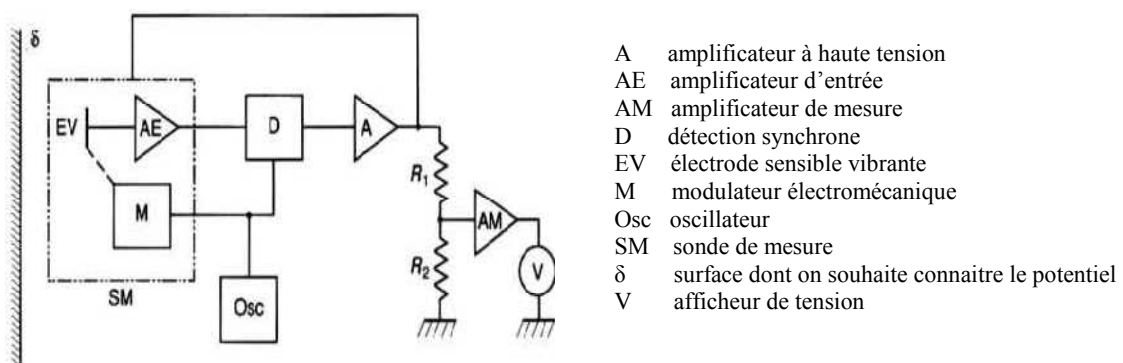


Figure 2.9 : Schéma de principe d'une sonde à induction

Il existe deux principaux types de mesureurs de champ électrostatique, la sonde à induction et le moulin à champ. Le plus simple est la sonde à induction où une plaque sensible est exposée au champ électrique créé par les charges proches, une charge image apparaît alors et est recueillie au niveau de la capacité, la tension aux bornes de cette capacité est ensuite amplifiée pour exploiter le signal. Les limitations de ces sondes sont principalement l'impossibilité de faire des mesures pendant un temps prolongé de manière continue et surtout la nécessité de refaire le « zéro » avant chaque mesure dans une région libre de tout champ électrique. La tension recueillie V est proportionnelle au champ électrique E à mesurer, selon

la relation :

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{\varepsilon_0 ES}{C} \quad (2.2)$$

Où ε_0 représente la permittivité du vide, S la surface de l'électrode et C la capacité de mesure.

Le moulin à champ fonctionne sur le même principe, seulement une hélice reliée à la terre permet de moduler le champ reçu en obstruant par intermittence la plaque (en forme d'hélice elle aussi). Cet appareil est plus performant, il permet une meilleure sensibilité (des champs de quelques Vm^{-1}) et il n'est pas nécessaire de refaire le « zéro » à chaque mesure. Les performances de quelques Vm^{-1} associés à des temps de réponse de quelques ms permettent des mesures très sensibles, de détecter des niveaux de charges électrostatiques très bas avec une précision de 1%.

2.2 Etude du régime intermittent

Le fonctionnement intermittent d'un séparateur électrostatique est basé sur la séparation de la matière granulaire pendant des périodes de temps bien déterminées. Un délai est nécessaire pour le rechargement des matières à séparer, une fois la matière à séparer est récupérée, un nouveau processus recommence. Les variables de sortie représentatives et leur mode de calcul sont présentés ci-dessous:

✓ *Efficacité de la collecte*

$$\rho (\%) = \frac{m_{tc}}{m_t} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Où m_{tc} : Quantité totale de matières recueillies dans les compartiments réservés aux produits i

m_t : Quantité totale de matière introduite dans le séparateur.

✓ *Pureté du produit collecté*

$$P (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

Où m_{ic} : Quantité de matière i recueillies dans le compartiment réservé au produit i

m_{tc} : Quantité totale de matières recueillies dans le compartiment réservé au produit i

✓ *Taux de récupération*

$$n (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Où m_{ic} : quantité de matière i recueillie dans le compartiment au produit i

m_{it} : Quantité totale de matière i introduite dans le séparateur.

2.2.1 Expériences pour l'évaluation de l'efficacité de la séparation

Le but de ces expériences est de déterminer les valeurs minimales et maximales de chaque facteur pour obtenir des résultats satisfaisants. Ces expériences ont été réalisées par le dispositif représenté sur la figure 2.1 qui a été construit au Laboratoire d'Electrostatique de l'IUT d'Angoulême, France. Le choix de la taille de la matière granulaire utilisée est de grande importance dans la séparation tribo-électrostatique. Pour commencer, une expérience de séparation des matériaux a été faite dont la granulométrie est comprise entre 1÷2 mm, mais les résultats n'étaient pas satisfaisants. En effet les particules de petite taille n'ont pas la masse nécessaire pour être recueillies dans les compartiments car la force électrique est prédominante. Cette conclusion a par conséquent conduit à une série d'expériences avec des particules plus grosses (3÷5 mm) présentées sur la figure 2.2. Leur séparation est satisfaisante, car elles ont une masse suffisante pour la collection dans les compartiments. Les résultats du processus de séparation tribo-électrostatique ont été obtenus avec ce type de particules.

La tension est un facteur important qui agit sur le processus de séparation tribo-électrostatique. Pour déterminer les limites maximales et minimales de la haute tension, des résultats satisfaisants sont obtenus d'un ensemble de mesures qui ont été faites sur les matériaux de PA-PC, avec le dispositif de séparation à débit faible au sein du laboratoire d'électrostatique à l'IUT d'Angoulême - France [11, 28]. La tension minimale à laquelle les mesures ont été effectuées a été considérée comme $U = 12 \text{ kV}$ ($V = \pm 6 \text{ kV}$) et la valeur de la tension maximale est $U = 36 \text{ kV}$ ($V = \pm 18 \text{ kV}$).

La limite supérieure a été définie comme la limite à laquelle se produit la décharge couronne. En effet, si la tension est suffisamment élevée, il se produit une décharge couronne faussant le procédé de la séparation à cause de la charge acquise par effet de couronne. Ce phénomène n'est pas souhaitable dans ce cas, car il produit une charge électrique de même polarité pour toutes les particules.

La masse de matériau à séparer doit être choisie de manière à avoir un lit fluidisé qui assure un rechargement triboélectrique suffisant des particules (masse minimale). Sa valeur maximale est imposée par les caractéristiques structurelles de l'appareil, (la pression est fixe et peut tout simplement rationaliser la quantité optimale de la matière, si la quantité de matière est supérieure à la limite maximale, le dispositif se bloque à cause de l'insuffisance

de pression en air comprimé). Le choix optimal de la masse introduite dans le séparateur est $m = 150$ g de matière totale à séparer.

Les expériences ont été effectuées sur des échantillons des mélanges granulaires de polyamide (PA) et polycarbonate (PC). Des échantillons de masse 150 g ont été préparés sous forme de mélanges binaires avec des compositions de 50% PA-50% PC, alors que la durée de chaque expérience est $\Delta t = 10$ s. Toutes les expériences ont été effectuées dans les mêmes conditions ambiantes qui ont été relativement stables : température $T = 17-23$ °C et une humidité relative $HR = 27-44\%$ à une vitesse d'air $v = 6$ m/s.

La procédure expérimentale comprend trois étapes principales :

- 1) préparation des échantillons et leur introduction dans le dispositif à lit fluidisé ;
- 2) tribo-électrisation 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 tribo-électrisation et observer les phénomènes ; - arrêter l'alimentation en air ; - éteindre des sources haute tension. Pour la troisième étape correspondant à 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 tribo-électrisation sera ensuite jugée en rapport avec la quantité des granules séparées et leur pureté.

Le tableau 2.2 présente les mesures de masses récupérées et de charge des deux types de particules PA et PC qui ont été effectuées pour différentes valeurs de la tension.

Tableau 2.2 : Résultats expérimentaux préliminaires du dispositif à débit faible

Tension U [kV]	Masse récupérée PA [g]	Masse récupérée PC [g]	Pureté PA [%]	Pureté PC [%]	Charge PA [μC]	Charge PC [μC]
12	14,9	27,7	87,2	85,3	0,198	-0,34
18	32,8	41,8	94	84,5	0,48	-0,56
24	41,7	48,9	97,6	93,75	0,6	-0,6
30	46,5	48,3	97,4	91,1	0,3	-0,4
36	48,6	41,9	92,3	90,5	0,22	-0,29

Une caractéristique principale de l'évolution de la masse récupérée en fonction de la tension est représentée par la figure 2.10.

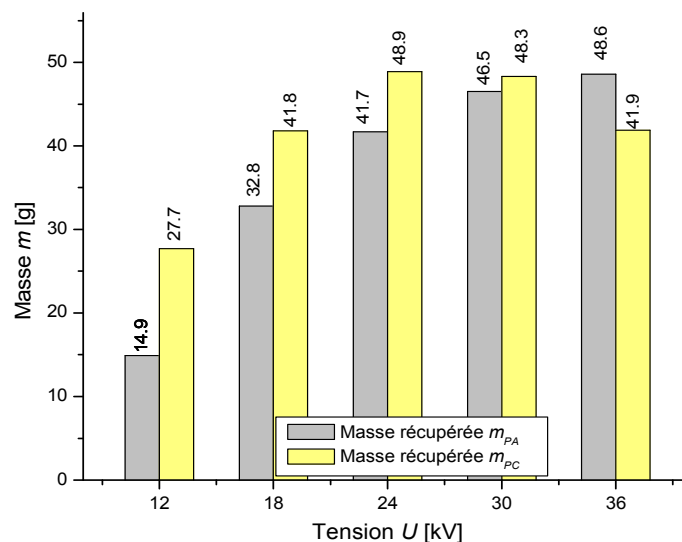


Figure 2.10 : Masses récupérées pour le cas de 50% de PA, 50% de PC, la masse introduite dans le séparateur $M=150\text{g}$

D'après le graphe de la figure 2.10, on observe qu'à 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. Il est noté également qu'à la valeur de la haute tension ($U = 36\text{ kV}$) une décharge couronne se produit conduisant à une mauvaise récupération des particules. Des valeurs satisfaisantes ont été obtenues sur la plage de tensions $U = 18\div 30\text{ kV}$ représentant les limites inférieure et supérieure de la tension U .

La pureté des matériaux séparés est influencée par la haute tension également, les résultats obtenus par la séparation électrostatique sont représentés par la figure 2.11.

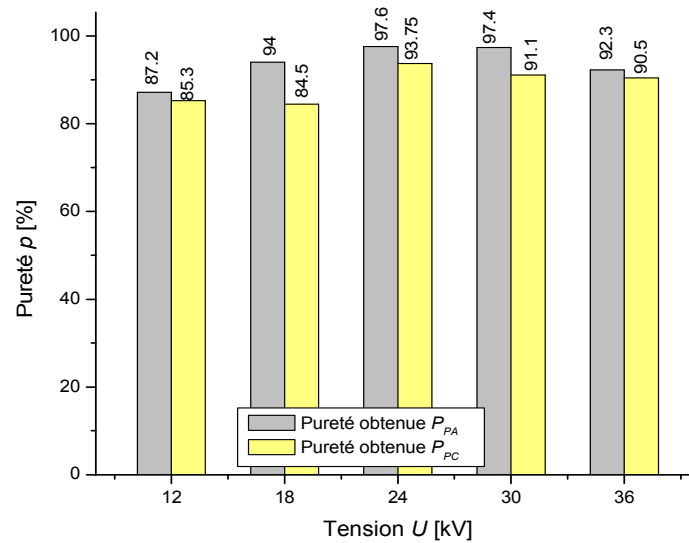


Figure 2.11 : Pureté de la masse récupérée pour le cas de 50% de PA, 50% de PC, la masse introduite dans le séparateur, $M=150g$

La pureté des matériaux collectés (tableau 2.2) a été plutôt acceptable, il est convenu d'avoir une valeur minimale de 85%. Le tableau ci-dessus montre qu'à des faibles valeurs de tension, la pureté de matière récupérée n'est pas satisfaisante. Pour des tensions qui conduisent à l'apparition de la décharge couronne dans le procédé tribo-électrique, les matières séparées perdent de leur pureté. Les meilleures valeurs de pureté sont obtenues sur la valeur de la tension U comprise entre 18 et 30 kV.

Grâce à ces expériences préliminaires qui ont permis de définir la tension U , celle-ci peut être modifiée de sorte que les masses et la pureté des matériaux récupérés soient appropriées. Les matériaux qui ont également été déterminés peuvent être séparés de ce dispositif et la valeur optimale de la masse pour la séparation est satisfaisante.

2.2.2 Estimation de la charge tribo-électrique acquise

Le Processus de séparation électrostatique dépend de nombreux facteurs, dont certains peuvent être contrôlés (tension d'alimentation et le temps de séparation), et d'autres ne peuvent pas être contrôlées (température, humidité). Les expériences ont été effectuées pour une température T comprise entre $20\div 25^{\circ}\text{C}$ et l'humidité entre $27\div 35\%$. L'utilisation des résultats préliminaires donnent une nouvelle analyse de l'opération intermittente de séparation électrostatique du dispositif.

L'un des facteurs d'entrée qui peut être modifié est le temps t . Une période plus longue de temps est un facteur majeur pour le degré de récupération, mais elle affecte aussi la pureté de particules séparées. Le facteur de sortie décrit le processus de la charge électrique des particules accumulées dans les cages de Faraday.

La tension d'alimentation des deux électrodes doit être conforme aux résultats obtenus dans des expériences préliminaires.

Dans le tableau 2.3 sont représentées les valeurs de variation de masse récupérée du matériau, sa pureté et la charge en fonction de la tension en fonction de la durée de fluidisation et ce pour trois valeurs différentes de la tension appliquée.

a) Echantillon de mélange PA-PC 50% /50%

Les expériences ont été effectuées sur des échantillons qui ont été préparés sous forme de mélanges binaires avec des compositions de 50% PA-50% PC. La masse de l'échantillon est de 150 g. La température $T= 23.4^{\circ}\text{C}$ et l'humidité $RH=34.5\%$.

Tableau 2. 3 : Les résultats expérimentaux obtenus en fonction du temps t pour 3 valeurs de la tension U pour 50% PA-50% PC

$U=18\text{ kV}$	Masse récupérée PC [g]	Masse récupérée PA [g]	Charge PC [μC]	Charge PA [μC]	rendement [%]	Q/m PC [nC/g]	Q/m PA [nC/g]
$t=10\text{ s}$	36,4	29,1	-0,559	0,453	48,53	-9,2918	7,03822
$t=20\text{ s}$	46,7	36,3	-0,761	0,652	55	-8,2159	5,51075
$t=30\text{ s}$	48,5	39	-0,725	0,74	58,3	-9,929	6,11374
$t=60\text{ s}$	58,2	43,7	-0,823	0,758	67,93	-9,0422	7,28857
U=24 kV							
$t=10\text{ s}$	39,1	29	-0,435	0,529	52,9	-11,125	18,2414
$t=20\text{ s}$	44,1	35,4	-0,506	0,489	56,73	-11,474	13,8136
$t=30\text{ s}$	52,1	41,6	-0,715	0,587	63,8	-13,724	14,1106
$t=60\text{ s}$	60,3	46,2	-0,791	0,712	74,26	-13,118	15,4113
U=30 kV							
$t=10\text{ s}$	35,3	31,4	-0,328	0,221	44,46	-15,357	15,567
$t=20\text{ s}$	45,4	37,2	-0,373	0,205	60,06	-16,296	17,9614
$t=30\text{ s}$	56,3	42,2	-0,559	0,258	65,66	-14,948	18,9744
$t=60\text{ s}$	61,6	50,49	-0,557	0,368	77,6	-14,141	17,3455

Les mesures ont été effectuées sur une durée de 60s à des tensions différentes et à chaque fois la masse et la charge de la matière récupérée ont été mesurées. Les résultats sont indiqués sur la figure 2.12.

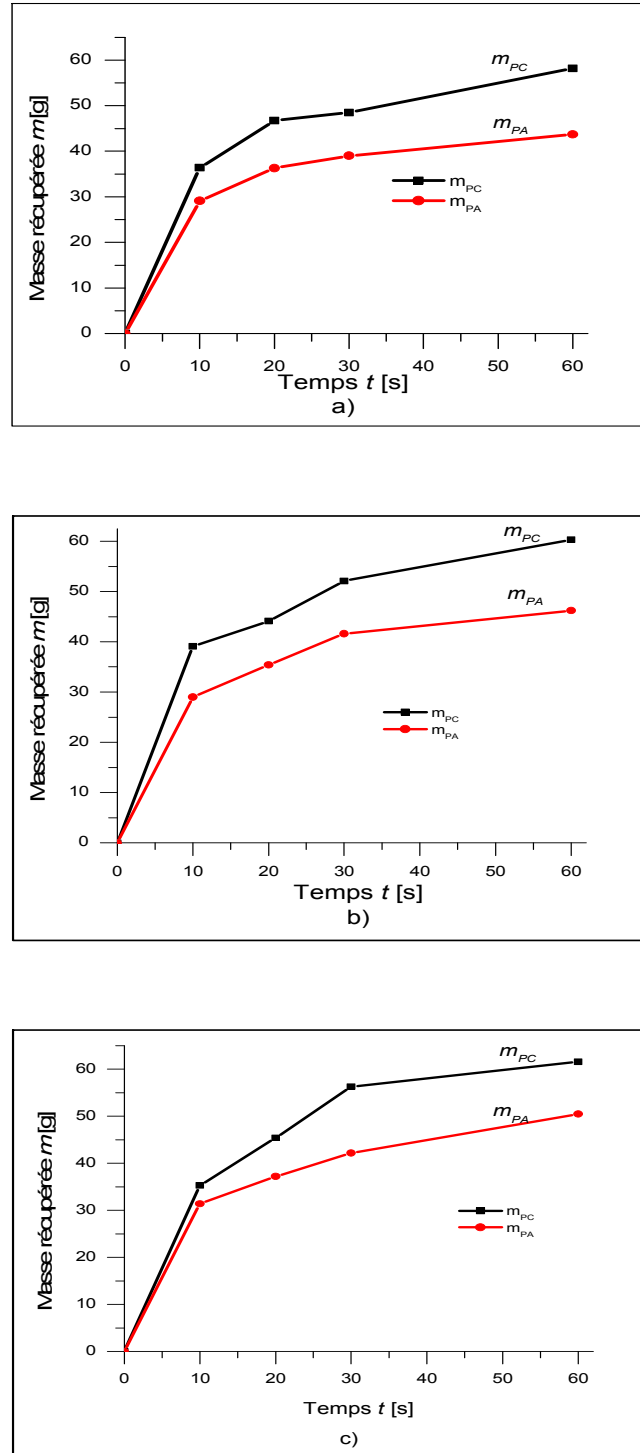


Figure 2.12 : Masses récupérées de PA et PC pour différentes valeurs de tensions, a) 18kV, b) 24kV, c) 30kV. M initiale M=150g pour 50% PA-50% PC

Dans une première étape, les graphes ci-dessus, montrent que les masses finales des matériaux récupérés sont différents en comparant le polyamide (PA) et le polycarbonate (PC). Ceci signifie que les particules ont subi des collisions entre particule / particule et le contact entre particule et les parois.

La matière dont elle est réalisée la chambre tribo-électrostatique (PVC + PMMA) a une influence sur le processus de charge électrique des particules. Ainsi les collisions avec les de la chambre permettent d'augmenter la charge électrique des particules de PC.

La tension d'alimentation U utilisée est conforme aux essais préliminaires, les limites inférieures et supérieures étant respectivement de 18 kV et 32 kV. La force électrique d'attraction est proportionnelle au champ électrique et à la charge des particules (équation 2.6)

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad (2.6)$$

La figure 2.12 montre que les masses récupérées augmentent avec l'augmentation de la tension.

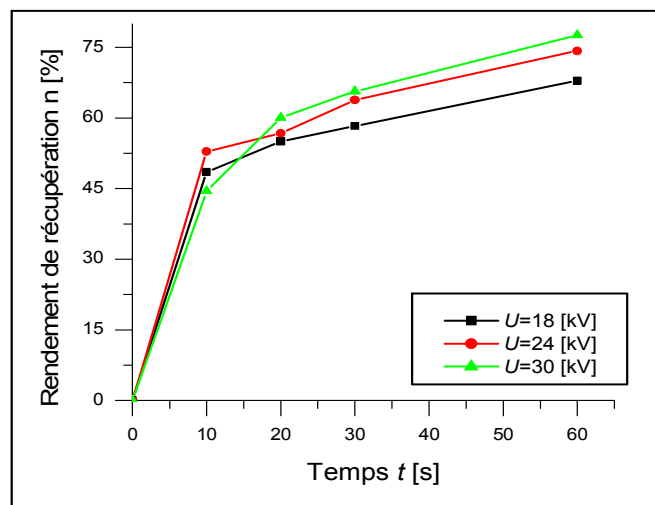
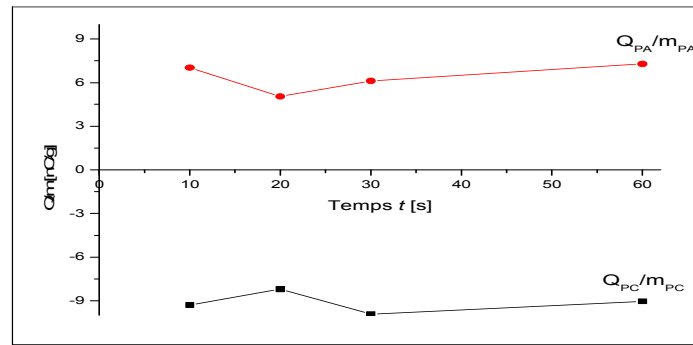


Figure 2.13 : Variation du rendement n par rapport au temps t et pour différentes valeurs de la tension d'alimentation pour 50% PA-50% PC

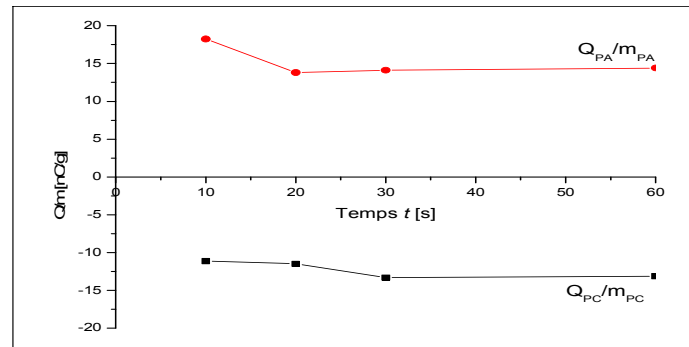
Pour chaque séparation effectuée, et pour différentes valeurs de tension d'alimentation est calculé le taux de récupération du processus. La figure 2.13, montre que le taux de récupération augmente dans le temps. Il augmente également avec la tension tout au long du processus.

Remarque : En augmentant le temps de séparation, le taux de récupération accroît, et la pureté des matières récupérées diminue.

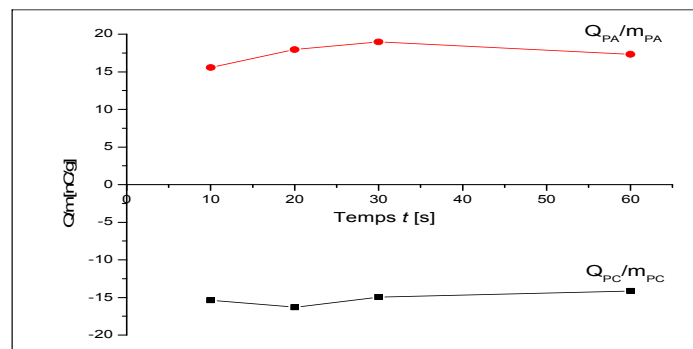
La mesure de la charge électrique pour les particules séparées nous permet d'observer si le chargement des particules s'est produit correctement. Le mode de variation de la charge (Figure 2.14) est exprimé par rapport à la masse de la matière récupérée et il décrit l'évolution de la charge accumulée au cours de la séparation tribo-électrostatique.



(a)



(b)



(c)

Figure 2.14 : Variation du rapport entre de la charge électrique q et la masse m en fonction de la tension: a) $U = 18 \text{ kV}$, b) $U = 24 \text{ kV}$, c) $U = 30 \text{ kV}$ pour 50% PA-50% PC

Pendant le processus d'accumulation de charge tribo-électrique, les granules *PA* acquièrent une charge positive et sont attirés par l'électrode de polarité négative, tandis que les granules *PC* se chargent négativement et sont attirés par l'électrode de polarité positive.

La charge acquise suite au rechargement des particules dans le lit fluidisé reste approximativement constante. Il est à noter que, en augmentant la tension d'alimentation, le rapport charge/masse des particules diminue à cause l'augmentation du champ électrique. Ainsi la charge des particules peut être plus petite et la force d'attraction qui assure la séparation des particules est la même.

b) Echantillon de mélange PA-PC 60%/40%

L'objectif des expériences réalisées auparavant était d'évaluer la faisabilité du processus de charge triboélectrique pour un mélange granulaire binaire: 50% PA – 50% PC. Une autre série d'expériences a été réalisée sur un mélange binaire de masse 150 g avec composition de 60% PA – 40% PC, pour une durée $t = 35$ s. Les deux électrodes sont connectées à une tension de 30 kV, la température $T = 23.4^\circ\text{C}$ et l'humidité $RH = 34.5\%$. La masse instantanée des produits collectés est mesurée chaque $\Delta t = 1$ s avec des balances électroniques (la résolution: 0,01 g) connectés à un ordinateur muni d'une instrumentation virtuelle. 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 masse totale a été calculée comme la somme des valeurs enregistrées au cours du processus de séparation. La figure 2.15 représente les masses récupérées d'un mélange de 60% PA – 40% PC.

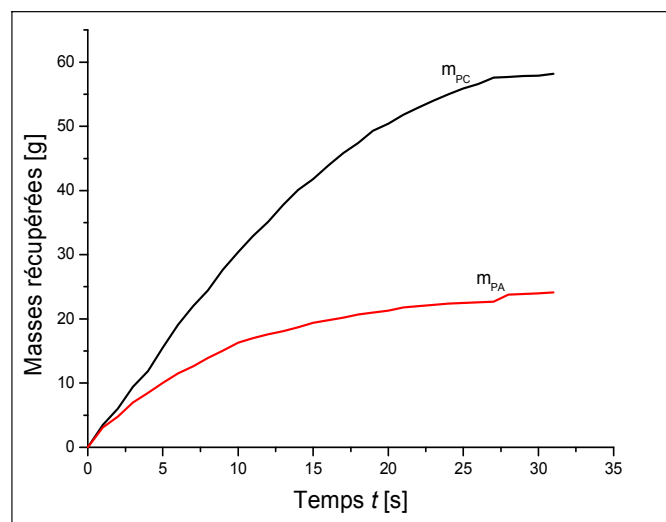


Figure 2.15 : Masses récupérées de PA et PC. Masse initiale $M = 150$ g pour 60% PA-40% PC

La masse récupérée du concentré de PA est plus petite que celle de PC, en dépit du fait qu'ils sont majoritaires dans la composition du mélange granulaire. En effet, un granulé de PA a une probabilité plus faible qu'un granulé de PC d'entrer en collision avec un granulé de

polarité opposée. Le processus de charge tribo-électrique est plus efficace pour les particules minoritaires qui acquièrent une charge suffisante pour qu'elles soient séparées.

Dans cette expérience, la composition du mélange granulaire était: 60% PA + 40% PC. La durée t de l'expérience était limitée à 35 s; à $t > 35$ s, les granulés de PA (particules majoritaires) commencent à polluer le produit PC (particules minoritaires). De plus en plus des particules de PA sont entraînées dans le compartiment de PC par les forces aérodynamiques. La pureté des produits collectés, qui était supérieur à 95% pour le cas de 50% PA + 50% PC, est réduit de façon sévère (moins de 80% pour le produit PC) après 35 s).

2.2.3 Modélisation expérimentale de la séparation tribo-électrostatique

La méthode des plans d'expériences est basée sur la modélisation du processus en utilisant un polynôme de deuxième degré (Equation 2-7) pour calculer les facteurs de sortie (réponse de processus) en fonction des variables d'entrée.

L'efficacité du processus de tribo-électrisation a été caractérisée par la masse et la pureté des deux concentrés collectés par le système d'électrodes du dispositif expérimental. Si on a comme objectif l'optimisation du processus de tribo-chargement, la méthodologie expérimentale recommande l'adoption d'un modèle quadratique :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{12} x_1 x_2 \quad (2.7)$$

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

$$x_i = (u_i - u_{ic}) / \Delta u_i = u_i^* \quad (2.8)$$

$$u_{ic} = (u_{imax} + u_{imin}) / 2; \Delta u_i = (u_{imax} - u_{imin}) / 2 \quad (2.9)$$

Pour ce modèle, le temps de séparation t [s] et la concentration C [%] ont été considérés comme les facteurs d'entrée du modèle quadratique, dont les réponses sont la masse récupérée et la pureté des deux types de granulés PA et PC :

$$f(PA, t) = a_0 + a_1 PA^* + a_2 t^* + a_{12} PA^* t^* + a_{11} PA^{*2} + a_{22} t^{*2} \quad (2.10)$$

$$f(PC, t) = a_0 + a_1 PC^* + a_2 t^* + a_{12} PC^* t^* + a_{11} PC^{*2} + a_{22} t^{*2} \quad (2.11)$$

Les données expérimentales obtenues ont été analysées avec le logiciel MODDE 5.0 (Umetrics, Suède). 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 (2-7)

correspondent aux données expérimentales, tandis que le second évalue le modèle par rapport à sa capacité du résultat d'une expérience menée dans un autre point du domaine expérimental.

Dans le cas de la présente étude, le mélange à séparer est de concentration 50% A +50% B. Ensuite, il est nécessaire de présenter les situations dans lesquelles on se trouve dans des concentrations différentes à savoir 60% A+40% B, 70% A +30% B, 80% A+20% B et vice versa en utilisant la méthodologie des plans d'expériences. La masse totale devant être séparé est $m = 150$ g.

Dans une première étape, il est nécessaire de définir les variables du processus de séparation électrostatique, les unités de mesure et les réponses prévues (Tableau 2.4). Les expériences ont été réalisées à une température de $T = 24,2$ ° C et une humidité $HR = 30,6\%$.

Tableau 2.4 : résultats des plans d'expériences : a) PA prédominant; b) PC prédominant.

(a)							(b)						
	PA[g]	T[s]	mPA[g]	pPA[%]	mPC[g]	pPC[%]		PC[g]	T[s]	mPA[g]	pPA[%]	mPC[g]	pPC[%]
1	90	10	38.1	98.7	23.9	97	1	90	10	24.5	98.3	33.8	68.9
2	120	10	40.8	99.6	22	84.8	2	120	10	30.8	99.6	21.1	63.15
3	90	50	63.1	99.2	49.9	90.2	3	90	50	60.4	99.4	43	84.6
4	120	50	68	99.4	31.5	75.5	4	120	50	59.2	99.4	45.1	50
5	90	30	57	99	37.9	97	5	90	30	41.2	99.5	46.8	80.3
6	120	30	64.9	99.2	27.8	83.7	6	120	30	32.3	99	42.8	65
7	105	10	36.3	98.9	23.9	91.2	7	105	10	24.3	99.1	33.5	64.3
8	105	50	69.6	99.5	34.4	93.6	8	105	50	59.8	99.6	45	66
9	105	30	53.3	99.4	40.8	83.1	9	105	30	41.1	98.5	38	66
10	105	30	59.2	99.6	32.7	94.4	10	105	30	48.6	99.2	45.2	66.6
11	105	30	59.5	99.1	35.5	96.6	11	105	30	54.4	99.1	41	57.6

Le traitement des données introduites dans les deux tableaux a permis la construction d'un polynôme d'ordre 2 représentant des modèles mathématiques pour les procédés de séparation tribo-électrostatique pour chaque concentration:

$$f(PA, t) = 45.59 + 0.0074PA^* + 12.84 t^* - 1.39PA^*t^* - 1.44PA^{*2} - 1.05t^{*2} \quad (2.12)$$

$$f(PC, t) = 59.69 + 1.75PC^* + 11.23t^* - 0.23PC^*t^* + 1.20PC^{*2} - 2.87 t^{*2} \quad (2.13)$$

Où: PC^* , PA^* , t^* sont les variables de centrées réduites. Grâce à ces polynômes d'ordre 2, la modélisation du processus électrostatique est établie en offrant à la fois des réponses de l'état actuel du système et de son évolution possible.

Le programme MODDE 5.0 teste le modèle mathématique de la séparation des particules PA et PC sous l'action des facteurs d'entrée (quantité de PA, PC et le temps t) et fournit des réponses du système (Figure 2.16). Rappelons que la masse totale du mélange est de 150 g.

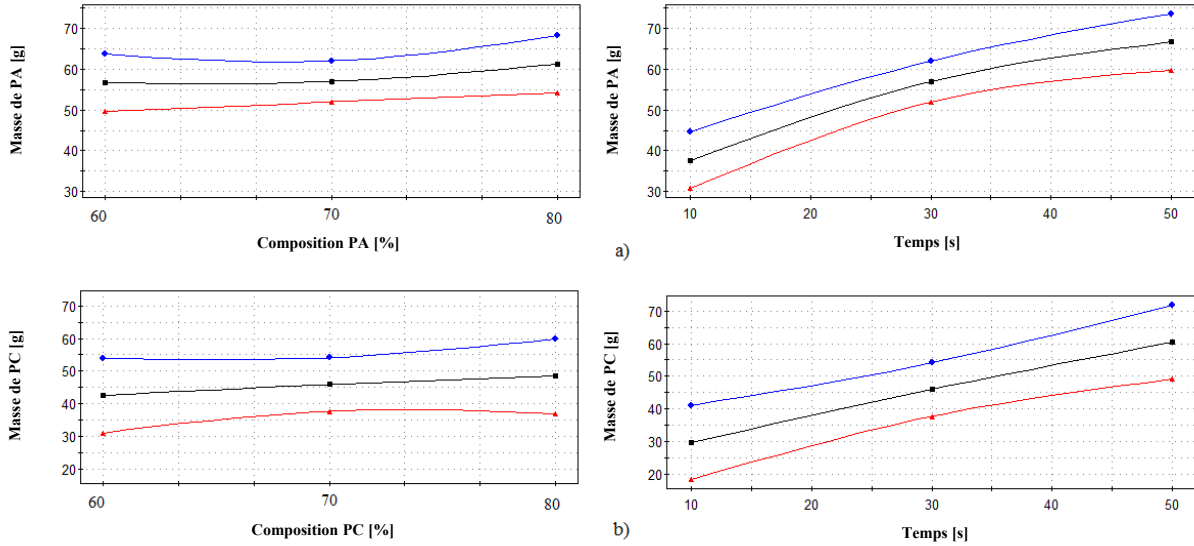


Figure 2.16 : Effets prévus par MODDE 5.0 sur la masse récupérée de PA et PC lorsque: a) PA majoritaires; b) PC majoritaires.

Les prédictions effectuées par MODDE 5.0 sont présentées sur les figures ci-dessus. La courbe du milieu (noir) indique les valeurs prédites par le modèle tandis que les deux autres courbes indiquent avec un niveau de confiance de 95% les limites entre lesquelles la masse de matière récupérée peut varier. La récupération des particules majoritaires reste approximativement constante avec une proportion croissante dans le mélange.

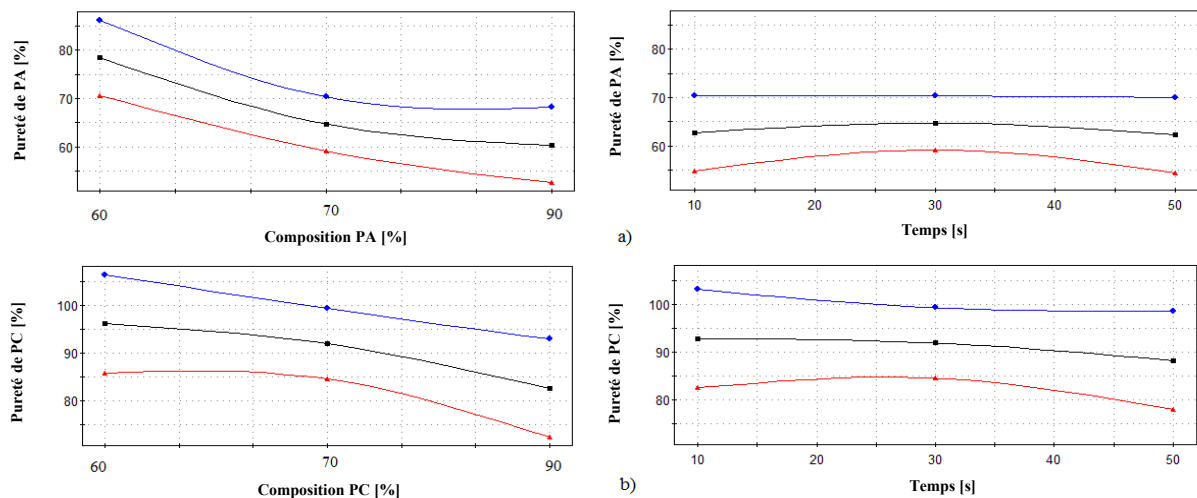


Figure 2.17 : Effets prévus par MODDE 5.0 sur la pureté de matière récupérée de PA et PC lorsque: a) PA majoritaires; b) PC majoritaires.

La variation de la pureté des matériaux séparés est représentée sur la figure 2.17. Elle montre que la pureté de matière minoritaire diminue avec la diminution relative de leur proportion dans le mélange introduit dans le séparateur. La pureté de matières majoritaire donne des valeurs allant jusqu'à 99%.

En augmentant le temps de séparation, une légère diminution de la pureté des matières récupérées est observée. L'origine des impuretés dans les matières séparées est due à l'écoulement de l'air qui affecte les trajectoires des particules, mais aussi au chargement défectueux de celle-ci (collision de deux particules de la même matière, l'une aura acquise une charge électrique positive et l'autre une charge électrique négative).

Remarque : les particules minoritaires subissent une charge électrique plus rapide parce qu'elles sont plus susceptibles d'avoir une probabilité plus grande d'entrer en collision avec les particules majoritaires et donc elles se séparent plus rapidement.

Le programme MODDE 5.0 peut générer des surfaces de réponse qui sont indicatives d'une plage de valeurs considérées comme efficace dans la séparation électrostatique. Les surfaces de réponse sont indiquées sur la figure 2.18.

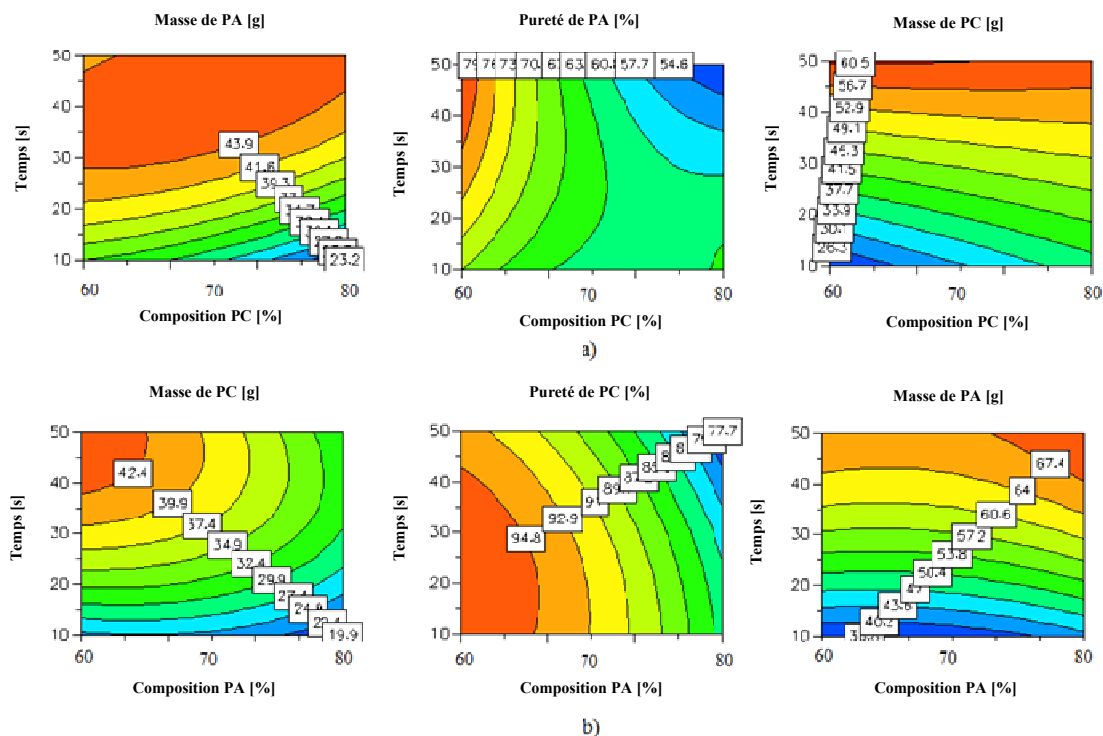


Figure 2.18 : Surfaces de réponse générés par MODDE 5.0 sur les masses récupérées et pureté obtenue lorsque: a) PA majoritaires; b) PC majoritaires.

D'après la figure 2.18 a) : Une augmentation de la masse de PC récupérée est observée. Les meilleures valeurs sont obtenues lorsque la durée de la séparation est élevée pour une concentration de PC d'environ 70%. La pureté PA est encore meilleure pour des valeurs de concentration proches de 50%.

Sur la figure 2.18 b) : L'augmentation de la quantité récupérée de PA est proportionnelle au temps et des valeurs élevées de masse sont obtenues à des concentrations élevées de celle-ci. Pour une récupération plus grande de la masse de PC, il est nécessaire d'utiliser une concentration équilibrée. La pureté de la matière minoritaire est satisfaisante et durée de séparation courte est également recommandée.

2.2.4 Fonctionnement du séparateur industriel

Le séparateur industriel assure le chargement électrique des particules dans un lit fluidisé (Figure 2.3) et pour le chargement optimal, il est nécessaire de déterminer la masse minimale de matière du lit dont le but d'assurer le bon fonctionnement de l'appareil. Pour déterminer la masse nécessaire qui forme le lit fluidisé, plusieurs mesures ont été faites à partir de 540 g jusqu'à 1740 g.

Tableau 2.5 Masses d'ABS et HIPS récupéré pour des masses d'entrée différentes

Masse de mélange [g]	Masse HIPS [g]	Masse ABS [g]	Masse HIPS [%]	Masse ABS [%]
540	121.7	167.3	45.07	61.96
640	156	225	48.75	70.31
740	176.4	253.1	47.68	68.41
840	210.2	298.9	50.05	71.17
940	232.6	329.2	49.49	70.04
1040	287.7	389.4	55.33	74.88
1140	313.9	422.9	55.07	74.19
1240	336.8	464	54.32	74.84
1340	396.9	511.4	59.24	76.33
1440	401.3	520.4	55.74	72.28
1540	422	532.6	54.81	69.17
1640	467.6	604.5	57.02	73.72
1740	496.2	628.7	57.03	72.26

Le tableau (2.5) représente les mesures, en grammes et en pourcentage, qui ont été effectuées avec un mélange d'ABS et HIPS (Figure. 2.7) pour une concentration de 50% \pm 50% pendant une durée de séparation de 60 s. La récupération en pourcentage montre l'évolution de la masse de la matière séparée par rapport à la masse initialement introduite dans le séparateur.

La figure 2.19 montre la variation de la masse récupérée (en pour-cent) par rapport à la masse introduite dans le séparateur. Par ailleurs, la figure 2.20 représente la quantité de matière récupérée dans le temps.

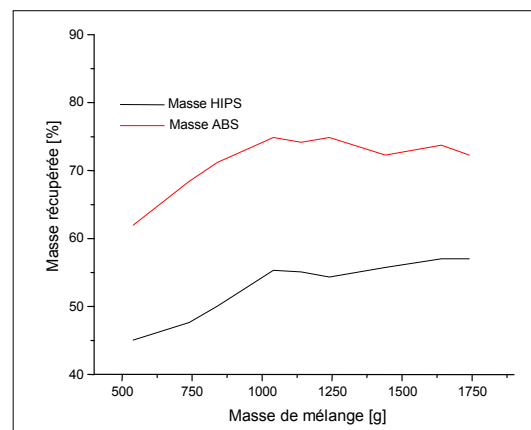


Figure 2.19 : Variation de la masse récupérée [%] par rapport à la masse introduite dans le séparateur.

Les résultats de la figure 2.19 ont été obtenus à une tension égale à 32 kV. La masse récupérée augmente avec la masse totale, jusque cette dernière est environ 1000 g, après, il se produit la stabilisation du processus.

Un système d'acquisition de données nous a permis d'enregistrer la masse récupérée à partir d'un mélange d'environ 3000 g. (Figure 2.20)

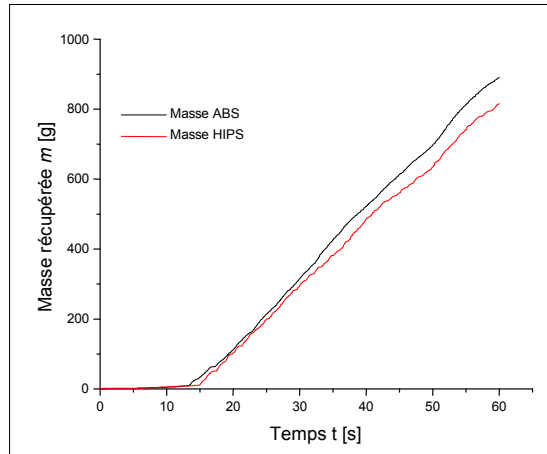


Figure 2.20 : Variation de la masse récupérée dans le séparateur industriel.

D'après le graphique de la figure 2.20 obtenu après une durée de fonctionnement de 60 s, on peut observer qu'il a fallu un temps d'environ 15 s pour que le mélange des deux matières commence à se séparer dans le lit fluidisé. Les particules ont besoin d'un certain temps jusqu'à ce qu'elles acquièrent une charge suffisante pour que les convoyeurs commencent à évacuer ces matières. Les matières séparées obtenues ont une pureté élevée (> 95%).

2.3. Etude du régime continu

A partir de l'étude du fonctionnement intermittent du dispositif, ont été remarqués certains problèmes qui peuvent être évités et améliorés en optant pour un fonctionnement du dispositif en régime continu. Une première constatation importante se réfère au fait que les matières séparées sont importantes dans les 5 à 10 premières secondes après le début du processus ; au delà, la séparation diminue. Une autre observation se rapporte à la quantité de matière séparée, le fonctionnement du dispositif en continu assure la séparation de plus grandes quantités de matière (20÷25 kg / h).

2.3.1 Fonctionnement continu du dispositif à débit faible

Pour un fonctionnement continu de l'appareil, l'alimentation en air comprimé et l'évacuation des particules séparées ont été modifiées. Le principe de séparation est le même ainsi que les limites de tension sont celles qui ont été utilisées dans le fonctionnement intermittent du dispositif (18÷30 kV). De même les matières sont en polyamide et polycarbonate illustrés dans la Figure 2.2.

Une différence se pose concernant l'alimentation en matière, par l'utilisation dans ce cas d'un convoyeur vibrant (Figure 2.21). Son débit varie en fonction des besoins des utilisateurs et il est nécessaire de diriger les granules vers la chambre inférieure de tribo-électrisation.

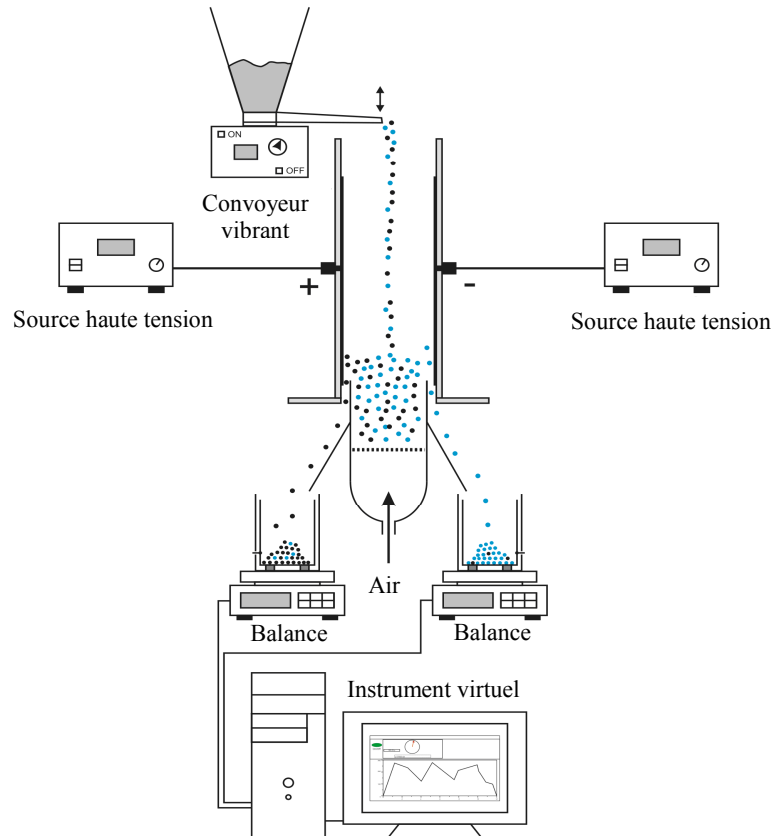


Figure 2.21 : Banc expérimental du dispositif à débit faible en régime continu.

Nous avons constaté qu'un débit minimal de 3 g/s est nécessaire pour former le lit fluidisé. La limite supérieure est donnée par les dimensions constructives du dispositif qui peut maintenir le lit fluidisé à savoir 9 g/s.

La séparation électrostatique à lit fluidisé est basée sur le chargement des granules de plastique par collisions qui se produisent entre eux par l'intermédiaire du processus de fluidisation. Le convoyeur vibrant effectue l'alimentation en matière à travers les vibrations ce qui peut provoquer le pré-charge des granules.

Également, la goulotte qui les dirige vers la chambre de tribo-électrisation provoque les collisions entre ses parois et les granules. Dans ce cas, ils accumulent une charge électrique, mais la charge globale cumulée provoquée par ces collisions ne représente qu'une petite partie de la charge nécessaire pour la séparation électrostatique.

Le tableau 2.6 présente la charge accumulée des particules par le convoyeur vibrant et la goulotte.

Une série de mesures a été faite pour déterminer la charge accumulée des particules et d'effectuer le rapport entre la charge électrique et la masse récupérée. Une certaine masse de matériau a été soumise au passage à travers les parois de convoyeur vibrant et la charge électrique accumulée a été mesurée à la sortie de la goulotte oscillante.

Sur la figure 2.22 est représenté le rapport entre la charge électrique accumulée et la masse séparée des particules de PA et PC à travers les parois du convoyeur, la goulotte et à la sortie des matières séparées.

Tableau 2.6 : Charge des particules acquise pendant le processus de transport assuré par le convoyeur et la goulotte pour un mélange de 50%PA+50%PC .

Polyamide (PA)						
	Convoyeur vibrant			Goulotte		
	mPA [g]	qPA [nC]	q/mPA [nC/g]	mPA [g]	qPA [nC]	q/mPA [C/g]
1	31.7	-5.1	-0.161	54.1	3.81	0.070
2	64	-13.1	-0.205	64.2	2.89	0.045
3	42	-7.8	-0.186	56	3.1	0.055
4	42.1	-6.2	-0.147	64.5	3.3	0.051
Polycarbonate (PC)						
	Convoyeur vibrant			Goulotte		
	mPA [g]	qPA [nC]	q/mPA [nC/g]	mPA [g]	qPA [nC]	q/mPA [C/g]
1	50.1	-9.7	-0.194	57.4	5.7	0.099
2	49.1	-4.6	-0.094	61.7	2.2	0.036
3	71.7	-12	-0.167	67.1	-6.8	-0.101
4	58.3	-16	-0.274	56	-2	-0.036
50% PC+50%PA						
	Convoyeur vibrant			Goulotte		
	mPA [g]	qPA [nC]	q/mPA [nC/g]	mPA [g]	qPA [nC]	q/mPA [C/g]
1	41.6	-10	-0.240	42.1	1.6	0.038
2	51.4	-11	-0.214	38	8.4	0.221
3	49.3	-9	-0.183	41.8	1.2	0.029
4	39.6	-11	-0.278	45.6	9	0.197

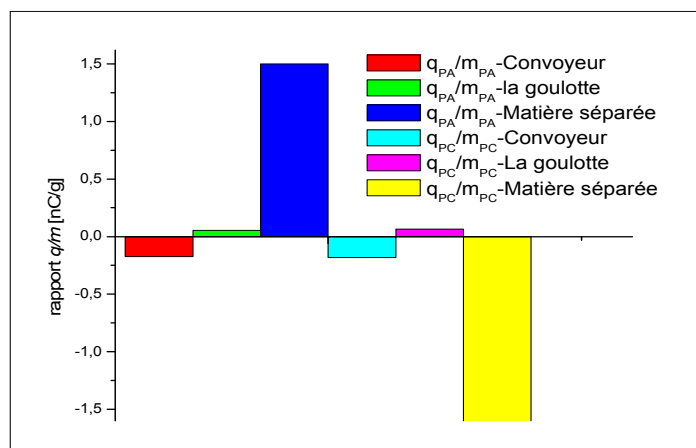


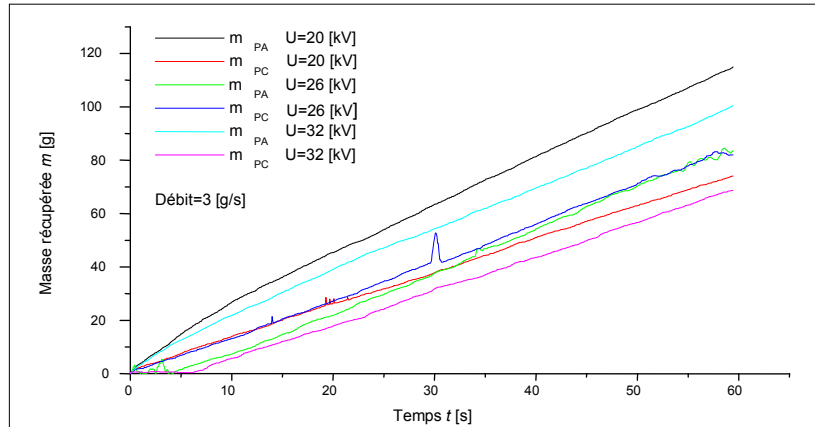
Figure 2.22 : Comparaison entre les particules chargées électriquement dans le lit fluidisé, le convoyeur vibrant et la goulotte.

D'après le graphe de la figure 2.22, il est observé que les particules de PA et PC acquièrent une charge négative en contact avec les parois du convoyeur vibrant. Après avoir traversées la goulotte, les particules se charge positivement. Le phénomène principal qui assure le chargement des granulés est bien dû au lit fluidisé, comme, le montre la figure ci-dessus.

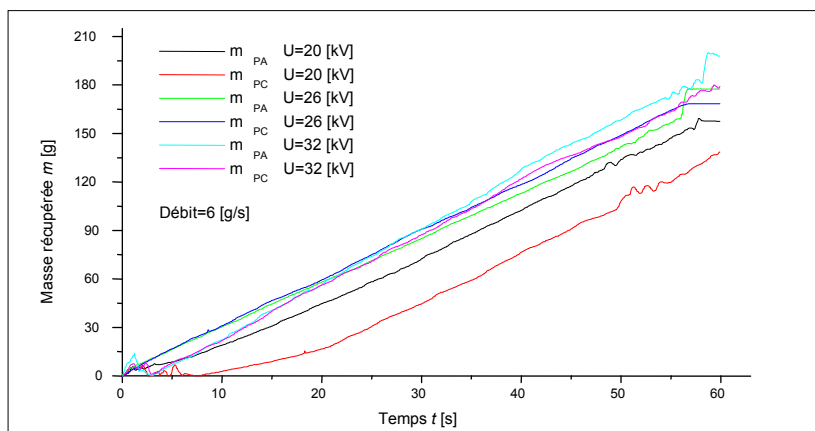
2.3.2 Résultats expérimentaux obtenus avec le dispositif à débit faible en fonctionnement à boucle ouverte

Le fonctionnement en boucle ouverte d'un processus se réfère au fait qu'il fonctionne d'une manière continue, mais sans contrôler les facteurs d'entrée. Dans cette configuration, la matière a été introduite dans le dispositif d'une manière continue, ceci définit que le flux de matière d'entrée reste constant quelle que soit la quantité de matériau évacuée par le dispositif. Si le débit est trop élevé, le dispositif ne parviendra pas à maintenir la formation du lit fluidisé, ce qui provoque le blocage du séparateur.

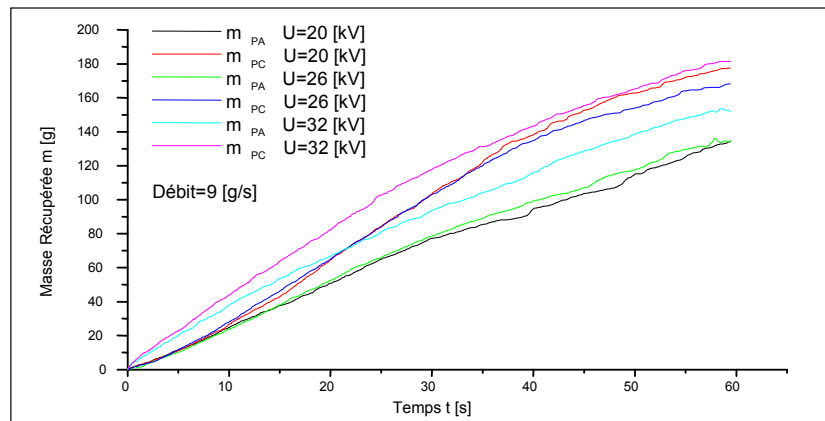
La figure 2.23 présente l'évolution de la masse évacuée par le séparateur tribo-électrique des deux matières, le polyamide et le polycarbonate, pour des concentrations granulaires 50 % PA+/50 % PC et à différentes valeurs de débit de matière introduite, pour une durée de plus de 60 secondes. Par ailleurs la tension d'alimentation des électrodes varie dans la gamme 20÷32 kV. Les expériences ont été réalisées à une température $T = 24,2^{\circ} \text{C}$ et une humidité $HR = 30,6\%$.



a)



b)



c)

Figure 2.23 : Récupération progressive des deux produits (PA et PC) pour différentes valeurs de débit : a) 3 [g/s]; b) 6 [g/s]; c) 9 [g/s].

Dans le cas a) le flux auquel les expériences ont été effectuées était de 3 g/s pour des valeurs de la tension de 20, 26 et 32 kV. A ce flux les particules subissent moins de collisions en raison de la petite masse de matière introduite dans la chambre tribo-électrique, affectant ainsi la pureté des matériaux récupérés.

Lorsque le flux de matière est de 6 g/s, les masses récupérées dépendent de la tension à laquelle le processus est réalisé. Avec la tension croissante il ya une légère augmentation de la masse de matière récupérée des deux matières, le polyamide et le polycarbonate.

Dans le cas d'un débit de 9 g/s, il est remarqué que la limite maximale de l'appareil a été atteinte car, après une certaine période de temps, le débit récupéré commence à diminuer bien que le flux d'entrée reste constant. La chambre de tribo-électrisation commence à être encombrée avec les matières granulaires et sous la pression d'air, maintenu constante, elle ne dispose pas d'assez de puissance pour maintenir le lit fluidisé. De cette façon, la limite de débit maximal que peut supporter le séparateur est atteinte.

2.3.3 Modélisation par la méthodologie des plans d'expériences

Une série de mesures ont été effectuées avec le séparateur électrostatique à lit fluidisé pour déterminer les valeurs optimales des facteurs d'entrée offrant une séparation efficace, à l'aide de la méthodologie des plans d'expériences. Les variables d'entrée qui ont été choisies, sont le flux de matière d'entrée et la tension appliquée aux électrodes pour un premier plan. Un autre plan d'expérience a été réalisé ayant comme variables d'entrée la tension d'alimentation et les concentrations des composants. Dans les conditions réelles il est difficile de maintenir une proportion constante, mais au laboratoire, le facteur de concentration peut être contrôlé. Le tableau 2.7 représente les résultats obtenus pour chaque plan.

Tableau 2.7 : Réponses pour les facteurs d'entrée : a) débit et tension; b) concentration et tension.

(a)

(b)

	D[g/s]	U[kV]	pPC[%]	pPA[%]	mPC[g]	mPA[g]
1	3	20	82.3	94.7	162	137
2	9	20	97.7	94	151	124
3	3	32	96.5	99.6	184	153
4	9	32	97.8	95.6	153	167
5	3	26	90.2	97.8	114	87
6	9	26	97.2	97	136	164
7	6	20	94.2	97.3	157	144
8	6	32	98.2	99.5	163	181
9	6	26	94.8	97.8	177	168
10	6	26	95.3	98.8	136	140
11	6	26	95.6	97.2	181	164

	C [%]	U[kV]	pPC[%]	pPA[%]	mPC[g]	mPA[g]
1	30	20	97.3	81.1	228.9	171.2
2	70	20	51.9	97.5	151.1	213
3	30	32	97.5	81.5	212.5	148.3
4	70	32	53.1	97.9	183.4	197.2
5	30	26	97.4	84.3	204.6	145.1
6	70	26	68.2	97.7	168	193.1
7	50	20	97.3	94.2	144.3	157.5
8	50	32	97.9	98.2	181.4	197.3
9	50	26	97.8	94.8	168.3	177.5
10	50	26	97.8	95.3	140.1	136.5
11	50	26	97.2	95.6	164.5	183.7

Deux polynômes du second degré ont été proposés par MODDE.05 :

$$f(PA, U) = 99.26 - 15.36PA^* + 0.20U^* - 0.21PA^*U^* - 2.5U^{*2} - 11.35PA^{*2} \quad (2.14)$$

$$f(D, U) = 98.42 - 0.68D^* + 1.08U^* - 0.45D^*U^* - 0.34U^{*2} - 0.99D^{*2} \quad (2.15)$$

Où: PA^* , U^* , D^* sont les variables centrées réduites des facteurs d'entrée PA , U , D , qui sont déterminées par la relation (2.7).

Sur la base de ces polynômes, certaines prédictions peuvent être faites sur le comportement du système (Fig. 2.24).

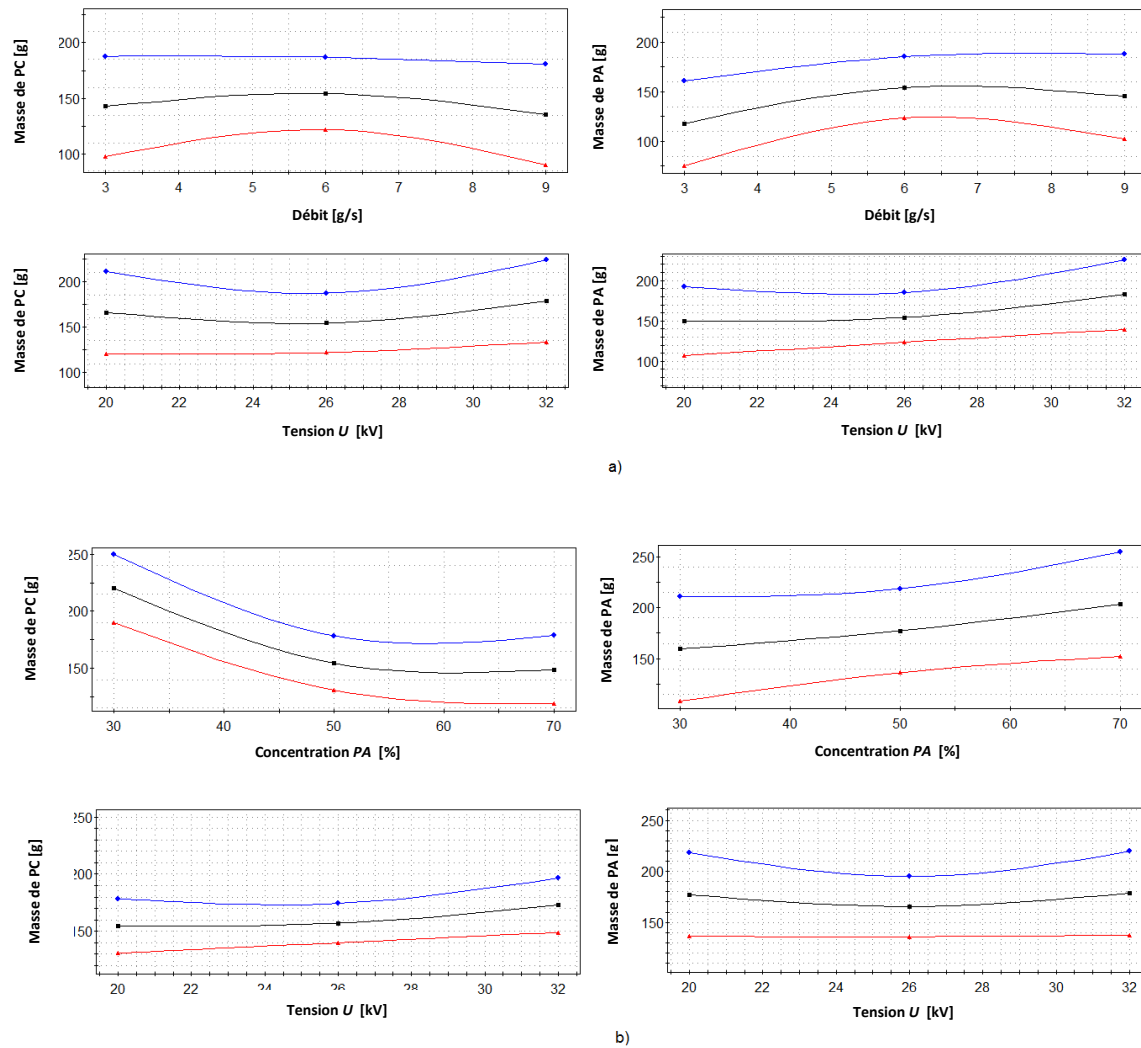


Figure 2.24 : Effets prévus par MODDE 5.0 sur la masse récupérée de PA et PC pour les facteurs d'entrée : a) débit et tension; b) concentration et tension.

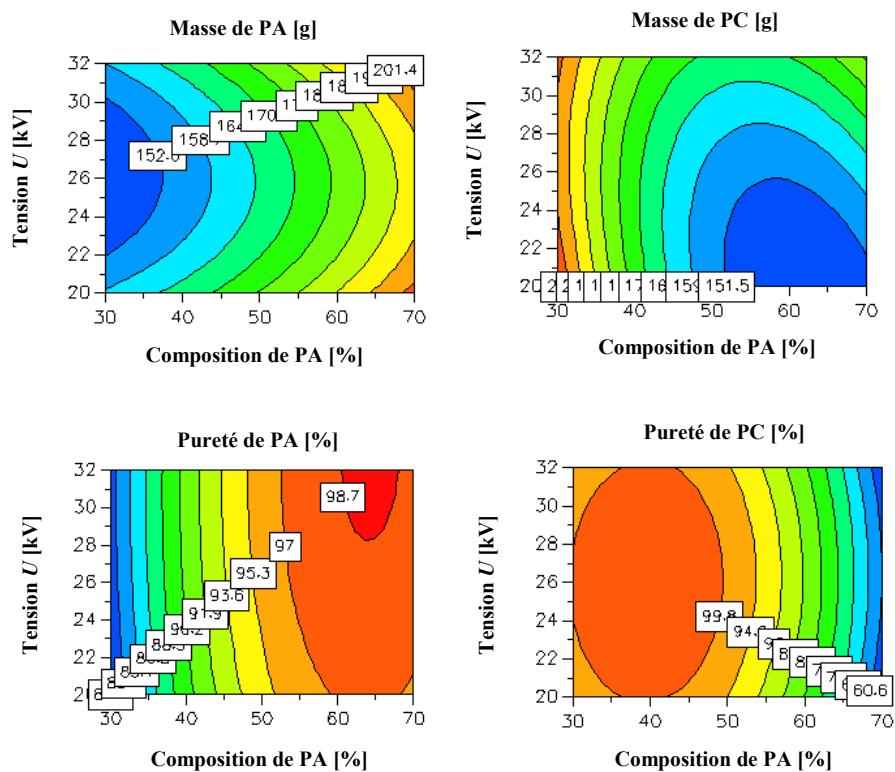
Sur la figure 2.24 a) est représentée la variation de la masse de matière récupérée lorsque les facteurs d'entrée sont la tension et le flux de matière introduite. Une augmentation progressive de la masse récupérée est observée jusqu'à une valeur de 150 g, après elle commence à diminuer. A partir de ce graphique, il peut être spécifié que le débit maximal d'entrée est 6 g/s pour un fonctionnement optimal du séparateur. En cas de dépassement de ces valeurs, la masse récupérée à chaque instant commence à diminuer en raison des matières

introduites et sous la pression d'air dans la chambre de tribo-électrisation qui ne dispose pas d'assez de puissance pour assurer la formation du lit fluidisé.

D'un autre côté, une augmentation de la masse des matières récupérées a été observée par rapport à l'augmentation de la tension d'alimentation.

Sur la figure 2.24 b) les facteurs d'entrée sont les proportions des mélanges des matériaux et la tension appliquée. La masse de matière PA récupérée est d'autant plus grande que la proportion de la matière PA est plus élevée dans le mélange (les mêmes observations sont valables pour le PC). Dans ce cas, il ya augmentation de la masse récupérée par rapport à la tension appliquée aux électrodes.

En outre, grâce au programme MODDE 5.0, nous avons remarqué une variation de la masse et de la pureté des matières récupérées pour différentes valeurs des facteurs d'entrée correspondants au processus (Figure 2.25).



a)

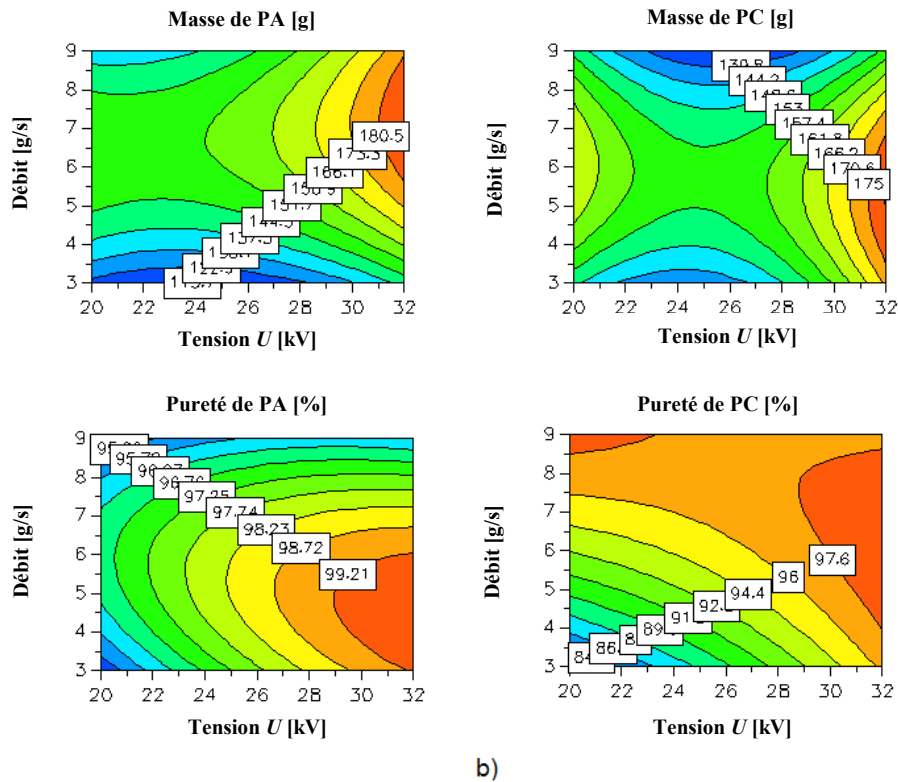


Figure 2.25 : Surfaces de réponse générés par MODDE 5.0 sur les masses récupérées et pureté obtenue pour les facteurs d'entrée : a) concentration et tension ; b) débit et tension.

Les courbes représentées sur la figure 2.25 a) montrent que la masse de la matière récupérée est d'autant plus grande que la proportion de matériau dans le mélange est élevée. La même chose se produit après l'augmentation de la tension d'alimentation, en remarquant également une bonne valeur de la pureté de la matière majoritaire.

Par ailleurs, les résultats représentés sur la figure 2.25 b) montrent que les masses de matières séparées obtenues sont élevées si le flux de matière introduite à chaque instant s'effectue à des valeurs proches de 6 g/s. L'augmentation de cette valeur a pour effet de bloquer le séparateur et en dessous de cette valeur le flux d'entrée est petit, et les masses finales récupérées seront faibles. La pureté des matières séparées se situent entre 84% et 99,2%. Les meilleurs résultats sont obtenus pour la tension la plus élevée appliquée et de plus faibles valeurs de débit d'alimentation.

Conclusion

Une étude par des expériences préliminaires réalisées dans le cas du fonctionnement intermittent ont permis de définir les limites de la tension de fonctionnement ($U = 18\div 36$ kV), des matières granulaires ($3\div 5$ mm) et de la masse optimale du lit fluidisé ($m = 150$ g).

A des proportions de 50% PC+50% PA, la pureté des matières séparées est supérieure à 95% et dans le cas des mélanges disproportionnés, la pureté obtenue atteignant plus de 99% pour la matière majoritaire.

Deux phénomènes sont à l'origine des impuretés : (1) l'écoulement d'air qui peut diriger certaines particules vers le mauvais collecteur ; (2) les collisions entre deux particules de la même matière peut les charger à des polarités différentes.

Par ailleurs, dans le cas d'un fonctionnement continu, il a été montré que la charge électrique des particules due au vibro-transporteur et la goulotte reste négligeable par rapport à la charge triboélectrique acquise dans le lit fluidisé.

Dans le cas du fonctionnement en boucle ouverte, les résultats obtenus ont montré que les quantités de matière à séparer peuvent être importantes ($20\div 25$) kg /h avec une excellente pureté.

En outre, le séparateur industriel à lit fluidisé permet la séparation de mélanges d'ABS et HIPS, les caractéristiques granulaires sont de $1\div 2$ mm avec une pureté élevée ($> 95\%$) et le flux de matière obtenue à la sortie du séparateur est d'environ 40 g/s (~ 150 kg/h).

-3- Elaboration et validation d'un modèle numérique

Le phénomène de charge des particules par effet triboélectrique a pu être mis en évidence et quantifié par des expériences réalisées avec un dispositif à lit fluidisé à faible débit et électrodes verticales, décrits dans le § 2.1.1. Les résultats expérimentaux présentés dans le § 2.2.2 montrent que la charge électrique acquise par les particules dépend de la durée pendant laquelle elles sont soumises en mouvement, ainsi que de la concentration du mélange à séparer. Les données expérimentales démontrent la multitude des facteurs qui rendent difficile l'étude de ce procédé, d'où une simulation numérique est nécessaire pour l'étude complète d'un procédé de séparation triboélectrique.

L'objectif du présent modèle est de prédire le fonctionnement d'un système de séparation triboélectrique des mélanges en utilisant le procédé à lit fluidisé, qui comporte une étude détaillée de calcul du nombre moyen de collisions échangées entre les différentes particules par intervalle de temps. Dans un système à lit fluidisé, les particules sont triboélectriquement chargées grâce principalement aux interactions entre les particules. En partant des hypothèses simplificatrices données au §3.1.1, ce chapitre décrit les équations de bases ainsi que l'algorithme de simulation du modèle numérique. Les calculs numériques seront validés par les données expérimentales dans le § 3.3

3.1. Modèle mathématique

Le modèle considère un intervalle de temps constant t par cycle, au cours duquel les particules subissent un nombre moyen de collision afin d'être séparées. Les particules suffisamment chargées sont attirées par les plaques tandis que celles qui sont moins chargées auront une autre chance dans la chambre de fluidisation. Dans ce chapitre, nous avons considéré le modèle intermittent étudié au § 3.1.2 et le modèle continu au § 3.1.3.

3.1.1. Hypothèses

Afin de bien poser le problème, il est utile d'effectuer un petit rappel concernant les hypothèses simplificatrices nécessaires pour se placer dans les conditions d'un contact entre particules utilisé dans notre modèle :

- ✓ L'utilisation de ce modèle suppose que l'on se place dans le cas de collisions parfaitement élastiques. D'une manière générale, cela signifie que les déformations des solides dues aux impacts seront suffisamment faibles et surtout qu'elles ne sont

pas durables au point d'être conservées après la collision. Les particules retrouveront donc leur forme initiale après la collision. Il est également nécessaire que les surfaces de contact soient très petites devant la taille caractéristique des corps étudiés. Ce qui sera toujours le cas puisque les matériaux étudiés seront assez rigides et donc, conformément à la première hypothèse, les déformations seront très faibles. Il faut également que les surfaces de contact soient continues. En plus de la continuité, la surface de contact ne doit se développer qu'à partir d'un seul point, pour s'étendre au fur et à mesure que la contrainte augmente.

- ✓ Toutes les particules utilisées sont supposées initialement électriquement neutres, ont une taille identique, et les mêmes formes et densités de masse, mais ont des caractéristiques triboélectriques différentes. Le modèle ne prendra pas non plus compte de la rugosité de surface.
- ✓ L'étude se concentre sur la séparation d'un mélange binaire de matériaux granulaires A et B, composés de particules isolantes de respectivement le Polyamide (*PA*) et le Polycarbonate (*PC*). Les simulations numériques ont été réalisées avec ces particules, dont leurs aspects et caractéristiques sont donnés dans le § 2.1.1.2.

Les masses des deux classes de granules à tout instant t étant $M_A(t)$ et $M_B(t)$, pour un total:

$$M(t) = M_A(t) + M_B(t) \quad (3.1)$$

Les concentrations respectives peuvent être exprimées comme :

$$c_A(t) = M_A(t)/M(t), \quad c_B(t) = M_B(t)/M(t) = 1 - c_A(t) \quad (3.2)$$

- ✓ Dans le cas des mélanges de deux matériaux différents, quatre types de collisions peuvent se produire. Le premier type est celui qui est utile à la séparation électrostatique, parce qu'il se produit entre une particule de matériau A et une particule de matériau B. Les autres collisions, considérées comme "parasites", se produisent entre les particules de matériau A ou B et la paroi, ainsi qu'entre deux particules de même matériau (voir figure 3.1).

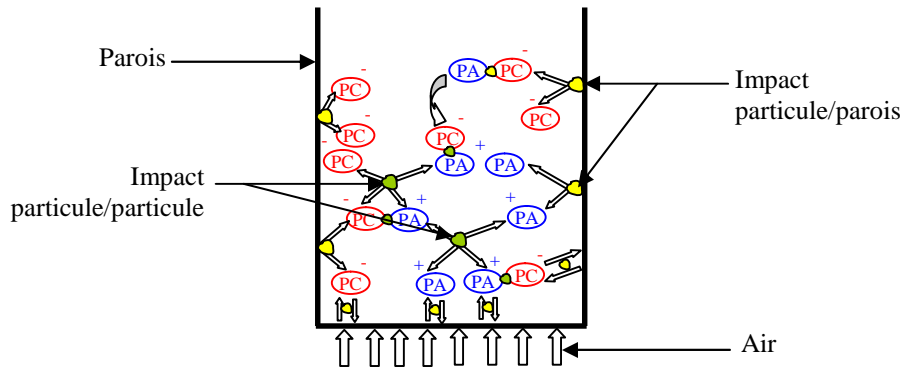


Figure 3.1 : Charge triboélectrique en lit fluidisé, mélange de PC et PA

- ✓ En règle générale, les collisions entre particules de même matériau ne sont pas génératrices de charge. D'autre part, les collisions entre les particules et la paroi ne concernent qu'un pourcentage infime de la masse des produits à séparer ; elles peuvent être négligées, au moins dans un premier temps. Dans ces conditions, le modèle préliminaire de simulation du processus de séparation tribo-aéro-électrostatique faisant l'objet de cette étude s'appuie sur l'hypothèse que seuls les impacts entre deux matériaux différents produisent des charges électriques.
- ✓ La deuxième hypothèse est que pour chaque mélange de matériaux granulaire il existe une masse limite inférieure M_{lim} au dessous de laquelle le séparateur ne fonctionne pas correctement. Ceci signifie que la séparation ne peut se produire que si la masse dans le lit $M(t) > M_{lim}$.
- ✓ Une troisième hypothèse essentielle pour établir le modèle est la suivante : la probabilité pour une particule d'être séparée après un nombre donné de collisions peut être exprimée par la loi de Gauss (équation (3-3)). De nombreuses distributions réellement observées s'en rapprochent de la fameuse forme de « cloche » de cette loi, dite « normale » (voir annexe). Dans la théorie des probabilités, on dit qu'une variable aléatoire réelle X suit une loi normale (ou loi normale gaussienne, loi de Laplace-Gauss) d'espérance μ et d'écart type strictement positif, si cette variable aléatoire réelle X admet pour densité de probabilité la fonction $p(x)$ définie, pour tout nombre réel x , par :

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (3.3)$$

Les valeurs de μ et σ utilisées dans le modèle peuvent être établies à partir des courbes des masses récupérées obtenues suite à des expériences comme celles décrites au § 2.2.2.

3.1.2. Equations du régime intermittent

Les particules minoritaires se chargent plus rapidement que les particules majoritaires qui subissent moins de collisions avec les particules de signe opposé. En régime dit « intermittent », une quantité de matériau est introduite dans le lit fluidisé en début du cycle et le processus de séparation finit au moment où la masse restante est inférieure à la masse limite M_{lim} définie au paragraphe précédent. Le principe de ce régime est montré sur la figure 3.2.

A $t=0$, (à savoir, le début du processus de charge triboélectrique) :

$$M_A(0) = M_{A1} \quad , \quad M_B(0) = M_{B1} \quad ;$$

$$M(0) = M_1 = M_{A1} + M_{B1} \quad ;$$

$$c_A(0) = M_{A1}/M_1 = c_{A1} \quad ;$$

$$c_B(0) = M_{B1}/M_1 = c_{B1} = 1 - c_{A1}.$$

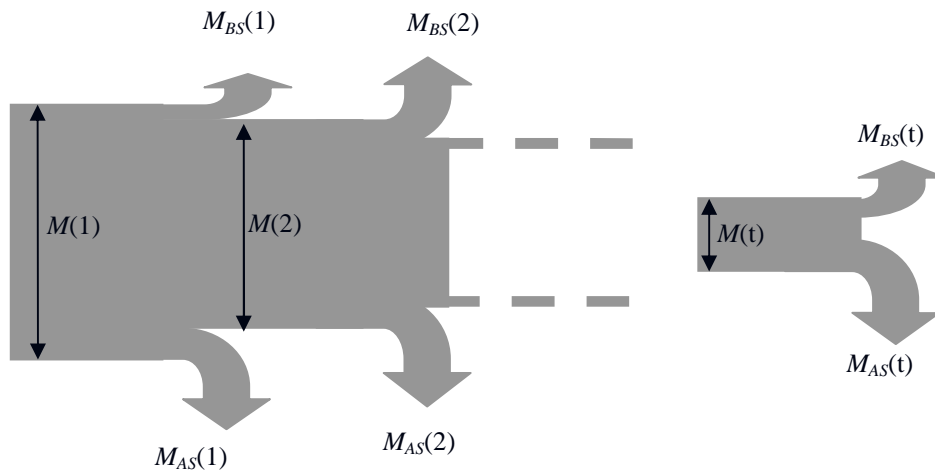


Figure 3.2 : Principe de fonctionnement en régime intermittent

3.1.1.1 Equations de base

Dans un lit fluidisé de caractéristiques données (géométrie et vitesse de l'air connues), chaque granule subit $N(t)$ collisions par unité de temps. A $t = 0$, $N(0) = N_1$.

Le nombre de collisions entre granules et parois est supposé être négligeable, aussi que la taille des particules est petite par rapport aux dimensions du lit fluidisé et la possibilité d'une particule d'entrer en collision avec une paroi est nettement inférieure à celle d'un impact avec une particule de l'autre matériau. En outre, avec toutes les particules ayant une taille similaire, l'échange de charge entre les particules de même nature peut être négligé aussi.

Selon ces hypothèses, les granules A n'acquièrent de charge triboélectrique que par des collisions avec des granules B , et vice-versa. Ainsi, durant une période de temps t , le nombre de collisions X_{AB} entre chaque granule A et les granules B dans le lit fluidisé est:

$$X_{AB}(t) = \int_0^t c_B(t) N(t) dt = \int_0^t [1 - c_A(t)] N(t) dt \quad (3.4a)$$

De même, le nombre de collisions X_{BA} entre chaque granule B et les granules A peut être exprimé comme suit:

$$X_{BA}(t) = \int_0^t c_A(t) N(t) dt = \int_0^t [1 - c_B(t)] N(t) dt \quad (3.4b)$$

Après X collisions de ce type, la charge acquise est suffisante pour qu'une particule soit collectée à l'électrode qui va l'évacuer en dehors de la zone de séparation.

Soit $P(X_{AB}) = p(x_{AB})$, avec $x_{AB} = X_{AB}/N_I$,

$P(X_{AB})$ est la probabilité pour qu'une particule de type A subisse dans l'unité de temps $X_{AB}(t)$ X collisions, afin de pouvoir être collectée à l'électrode de polarité opposée, dans des conditions de fonctionnement bien définies (nature et taille des deux classes de granules, géométrie du lit fluidisé, pression d'air fluidisé, haute tension appliquée aux électrodes, etc...). Elle peut être exprimée par la loi de Gauss (voir § 3.1.1):

$$P(X_{AB}) = ((X_{AB} - X_{ABav})/\sigma_{xAB}) \quad (3.5)$$

étant la fonction de répartition de la loi normale de centrée réduite. De la même façon, la probabilité pour qu'une particule de type B subisse dans l'unité de temps $X_{BA}(t)$ X collisions, afin de pouvoir être collectée à l'électrode de polarité opposée, s'exprime comme :

$$P(X_{BA}) = ((X_{BA} - X_{BAav})/\sigma_{xBA}) \quad (3.6)$$

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 :

$$M_{As}(t) = \int_0^t P(X_{AB}(t)) M_A(t) dt = \int_0^t p(x_{AB}(t)) M_A(t) dt \quad (3.7a)$$

$$M_{Bs}(t) = \int_0^t P(X_{BA}(t)) M_B(t) dt = \int_0^t p(x_{BA}(t)) M_B(t) dt \quad (3.7b)$$

$$P(X_{AB}) = ((x_{AB} - x_{ABav})/s_{xAB}) = p(x_{AB}) \quad (3.8)$$

où : $x_{AB} = X_{AB}/N_1$; $x_{ABav} = X_{ABav}/N_1$; $s_{xAB} = \sigma_{xAB}/N_1$.

En supposant qu'aucun granulé n'est retiré du lit fluidisé jusqu'à ce que chacun d'eux obtient suffisamment de charge pour être séparé, à savoir :

$$M_A(t) = M_{A1}, M_B(t) = M_{B1},$$

$$M(t) = M_1 = M_{A1} + M_{B1},$$

$$N(t) = N_1, c_A(t) = c_{A1},$$

$$c_B(t) = c_{B1} = 1 - c_{A1},$$

Puis (3.4 a) et (3.5) deviennent:

$$X_{AB}(t) = (1 - c_{A1}) N_1 t; \quad (3.9)$$

$$P(X_{AB}) = p(x_{AB}) = (((1 - c_{A1}) t - x_{ABav})/s_{xAB}) \quad (3.10)$$

Dans le cas où le temps $t_{50\%}$ correspondant à la séparation de 50% des granulés A est connu à partir des expériences décrites au § 2.2.2, la valeur de x_{ABav} peut être calculée à partir de l'équation:

$$(1 - c_{A1}) t_{50\%} - x_{ABav} = 0 \quad (3.11)$$

et l'écart-type s_{xAB} peut alors être estimé comme suit:

$$s_{xAB} = x_{ABav}/3 \quad (3.12)$$

pour tenir compte de la grande dispersion des conditions de charge de granules, en introduisant dans (3.8) les valeurs de x_{ABav} et $s_{x_{AB}}$ donnés respectivement par (3.11) et (3.12), il est possible d'avoir une estimation de $p(x_{AB}(t))$ qui servira à calculer la masse de granules A séparés au temps t à l'aide de l'équation (3.7a). Des équations similaires peuvent être obtenues pour le calcul de la valeur instantanée de la masse de granules B séparés.

3.1.1.2 Algorithmes de simulation

Un algorithme itératif peut être utilisé pour obtenir le nombre de collisions $X_{AB}(i)$ et la masse séparés $M_{As}(i)$, à l'instant $t = i \Delta t$, où i est un entier positif ($i \geq 1$) où Δt est considérée suffisamment petit pour que la masse $M_A(t)$, la concentration $c_A(t)$ et la fréquence des collisions $N(t)$ puissent être supposées constantes :

$$M_A(k) = M_A(k\Delta t),$$

$$c_A(k) = c_A(k\Delta t), \text{ et } N(k) = N(k\Delta t)$$

dans l'intervalle $k \Delta t \leq t < (k + 1) \Delta t$, $k = 1, 2, \dots, i$.

Etape 1: L'estimation du nombre de collisions $N_{AB}(1)$ de chaque granulé A avec les granules B dans le lit fluidisé peut être effectuée à partir de l'équation (3.4a) comme suit:

$$X_{ABe}(1) = X_{AB}(\Delta t) = [1 - c_{Ae}(1)]N(1)\Delta t = (1 - c_{A1})N_1\Delta t \quad (3.13)$$

Avec $x_{AB}(1) = X_{AB}(1)/N_1$, la masse $M_{As}(1)$ des granules A séparée à Δt est obtenue à partir de (3.7a):

$$M_{As}(1) = p(x_{AB}(1)) M_A(1) = p(x_{AB}(1)) M_{A1} \quad (3.14)$$

Etape i ($i \geq 2$): La concentration $c_A(i)$ des granules A au début de cet intervalle de temps peut être déterminée à partir de l'équation (3.2), en utilisant les estimations $M_A(i)$ et $M_B(i)$ et les masses des granules A et B dans le lit fluidisé calculées à la fin de l'étape $i - 1$:

$$c_A(i) = M_A(i) / (M_A(i) + M_B(i)) \quad (3.15)$$

$$\text{où: } M_A(i) = M_{A1} - M_{As}(i - 1) ; \quad M_B(i) = M_{B1} - M_{Bs}(i - 1).$$

La fréquence estimée $N(i)$ des collisions subies par les deux catégories de granulés est proportionnelle à la somme des masses estimées $M_A(i)$ et $M_B(i)$, à savoir :

$$N(i) = N_1 (M_A(i) + M_B(i)) / M_1 = N_1 M(i) / M_1. \quad (3.16)$$

Avec cette notation, le nombre de collisions $X_{AB}(i)$ de chaque granulé A avec les granules de B dans le lit fluidisé peut être exprimé comme suit:

$$X_{AB}(i) = \{[1 - c_A(1)]N(1) + [1 - c_A(2)]N(2) + \dots + [1 - c_A(i)] N(i)\} \Delta t \quad (3.17)$$

D'où le nombre de collisions $x_{AB}(i)$ peut s'exprimer comme suit :

$$x_{AB}(i) = X_{AB}(i)/N_1 = \{[1 - c_A(1)] + [1 - c_A(2)]N(2)/N_1 + \dots + [1 - c_A(i)] N(i)/N_1\} \Delta t$$

$$x_{AB}(i) = \{[1 - c_A(1)] + [1 - c_A(2)]M(2)/M_1 + \dots + [1 - c_A(i)]M(i)/M_1$$

$$x_{AB}(i) = [1 - c_A(i)]M(i)/M_1 \quad (3.18)$$

Par conséquent, la masse $M_{As}(i)$ des granules A séparées à $t = i \Delta t$ est obtenue à partir de l'équation (3.5a):

$$M_{As}(i) = p(x_{AB}(1)) M_A(1) + p(x_{AB}(2)) M_A(2) + \dots + p(x_{AB}(i)) M_A(i) \quad (3.19)$$

Dans le cas où la probabilité d'une séparation de granules après $X_{AB}(i)$ collisions est exprimée par la loi de distribution normale (3.8) des paramètres connus x_{ABav} and s_{xAB} , le terme général dans (3.19) est :

$$p(x_{AB}(i)) M_A(i) = ((x_{AB}(i) - x_{ABav})/s_{xAB}) M_A(i) \quad (3.20)$$

3.1.3. Equations du régime continu

Dans le § 3.1.2, nous avons commencé par l'étude du régime « intermittent », dont l'intérêt est limité à la modélisation des séparateurs de laboratoire. Dans le régime continu, spécifique au fonctionnement des installations industrielles, comporte une alimentation non-interrompue du lit fluidisé à débit constant ou variable. L'objectif de la modélisation numérique est de prédire l'évolution de la masse dans le lit fluidisé et de la composition de celle-ci.

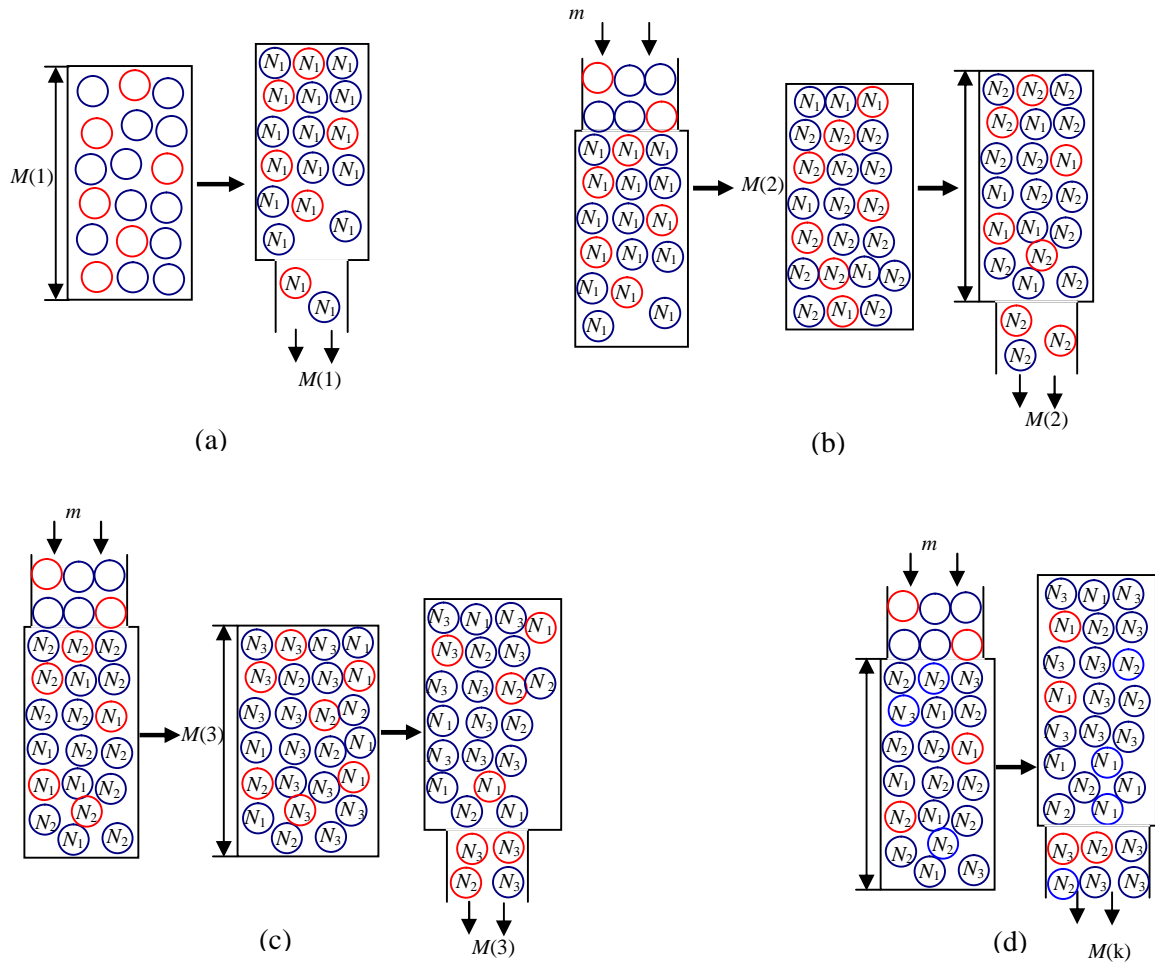


Figure 3-3 : Principe de fonctionnement en régime continu, (a) premier pas, (b) deuxième pas, (c) troisième pas, (d) dernier pas. Avec $1, 2, 3, \dots, k =$ nombre de pas. $N_1, N_2, N_3 =$ nombre de collisions.

En tenant compte des hypothèses discutées dans le § 3.1.1 et que les particules se chargent par impact avec les particules de nature différente, un mélange de masse m a été introduit par unité de temps par un vibro-transporteur à débit réglable. Le principe de ce régime est illustré par la figure 3-3, et expliqué dans le § 3.1.3.1

3.1.3.1 Equations de base

Dans un lit fluidisé de caractéristiques données (géométrie et vitesse de l'air connues), chaque granule subit $N(t_k)$ collisions par unité de temps : $t_k = k \cdot t$, avec $k=1, 2, 3, \dots, j$, où i est un nombre entier positif ($j \geq 1$).

Au moment initial $t = 0$, les masses des deux classes de granules sont $M_A(1)$ et $M_B(1)$, pour un total qui est donné par l'équation (3.1).

$$M(1) = M_A(1) + M_B(1),$$

Les concentrations respectives peuvent être exprimées comme :

$$c_A(1) = M_A(1)/M(1), \quad c_B(1) = M_B(1)/M(1) = 1 - c_A(1)$$

Partant de l'équation (3.10), la probabilité qu'une particule se charge est décrite comme suit :

$$P(X_{AB}) = p(x_{AB}) = (((1 - c_A) t - x_{ABav})/s_{x_{AB}})$$

✓ **Premier pas** : $t = t_1 = t$

Les quantités de particules de type *A* et *B* collectées aux électrodes pendant le premier pas s'expriment respectivement en fonction des masses M_A et M_B des deux produits présents initialement dans le lit fluidisé :

$$M_{A_s}(t_1) = p(x_{AB}(t_1)) M_A(0) \quad (3.21a)$$

$$M_{B_s}(t_1) = p(x_{BA}(t_1)) M_B(0) \quad (3.21b)$$

Le bilan du premier pas est fait en considérant qu'une masse m est introduite à chaque t . A cette phase préliminaire de l'étude, m est considérée constante avec une concentration constante :

$$m = m_A + m_B \quad (3.22)$$

Par conséquent, masse dans le lit fluidisé après le premier pas est donnée par :

$$M_A(t_2) = [M_A(t_1) - M_{A_s}(t_1)] + m_A$$

$$M_B(t_2) = [M_B(t_1) - M_{B_s}(t_1)] + m_B$$

$$M(t_2) = M_A(t_2) + M_B(t_2),$$

$$c_A(t_2) = M_A(t_2)/M(t_2), \quad c_B(t_2) = M_B(t_2)/M(t_2) = 1 - c_A(t_2)$$

✓ **Deuxième pas** : $t = t_2 = 2^* t$

Le terme $[M_A(t_1) - M_{A_s}(t_1)]$ représente les particules qui ont déjà subi un nombre N_1

de collisions ; elles ont beaucoup plus de chances pour être séparées, exprimées par la probabilité $((1 - c_A(t_2)) * 2 t - x_{ABav})/s_{xAB}$, tandis que les particules de la masse m_A qui vient d'être ajoutée subiront leurs premières collisions et leur probabilité de séparation est plus faible : $(1 - c_A(t_2)) t - x_{ABav})/s_{xAB}$. La masse séparée pendant ce pas de temps est alors exprimée par :

$$M_{As}(t_2) = [M_A(t_1) - M_{As}(t_1)] * [(1 - c_A(t_2)) * 2 t] + m_A * [(1 - c_A(t_2)) * t]$$

Le bilan de deuxième pas :

$$M_A(t_3) = [M_A(t_2) - M_{As}(t_2)] + m_A$$

3.1.3.2 Algorithmes de simulation

Un algorithme itératif peut être utilisé pour obtenir le nombre de collisions $X_{AB}(i,j)$ et la masse séparée $M_{As}(j)$, à l'instant $t = j \cdot t$, où i et j sont des entiers positifs (i,j) (1,1) et (t est suffisamment petit et considérée comme constante), pour la masse $M_A(t)$, la concentration $c_A(t)$ et la fréquence des collisions $N(t)$:

$$M_A(k \cdot t) = M_A(k \cdot t),$$

$$c_A(k \cdot t) = c_A(k \cdot t), \text{ et } N(k \cdot t) = N(k \cdot t)$$

dans l'intervalle $k \cdot t < (k + 1) \cdot t$, $k = 1, 2, \dots, j$.

Etape 1: L'estimation du nombre de collisions $N_{AB}(1)$ de chaque granulé A avec les granulés B dans le lit fluidisé peut être calculé à partir de (3.4a) comme suit:

$$X_{AB}(1,1) = [1 - c_A(1)]N(1) \quad (3.23)$$

Avec $x_{AB}(1,1) = X_{AB}(1,1)/N(1)$, la masse estimée $M_{As}(1)$ des granules A séparée à t est obtenue à partir de (3.7a):

$$M_{As}(1) = p(x_{AB}(1,1)) M_A(1) = p(x_{AB}(1,1)) m_A(1,1) \quad (3.24)$$

De la même façon, l'estimation du nombre de collisions $N_{BA}(1)$ de chaque granulé B avec les granulés A dans le lit fluidisé peut être calculé comme suit:

$$X_{BA}(1,1) = [1 - c_B(1)]N(1) \quad (3.25)$$

Avec $x_{BA}(1,1) = X_{BA}(1,1)/N(1)$, la masse estimée $M_{B_s}(1)$ des granules B séparée à t est calculée par

$$M_{B_s}(1) = p(x_{BA}(1,1)) M_B(1) = p(x_{BA}(1,1)) m_B(1,1) \quad (3.26)$$

avec $m_A(1,1)$ et $m_B(1,1)$ étant les masses initiales à l'instant $t=0$. Les masses restantes après le premier pas sont calculées à partir de la masse initiale :

$$m_A(1,2) = m_A(1,1) - p(x_{AB}(1,1)) m_A(1,1)$$

$$m_B(1,2) = m_B(1,1) - p(x_{BA}(1,1)) m_B(1,1)$$

Etape j ($j \geq 2$): Considérons une masse m ajoutée à chaque pas à partir du deuxième pas : $m(j,j) = m$; où $m_A(j,j) = m_A$; $m_B(j,j) = m_B$.

$$M_A(j) = \sum_{i=1}^j m_A(i,j)$$

Les masses $m_A(i,j)$ et $m_B(i,j)$ restantes après chaque pas sont calculées séparément selon l'instant de leur introduction :

$$m_A(i,j) = m_A(i,j-1) - m_A(i,j-1) * p(x_{AB}(i,j-1))$$

$$m_B(i,j) = m_B(i,j-1) - m_B(i,j-1) * p(x_{BA}(i,j-1))$$

La concentration $c_A(j)$ des granules A au début de cet intervalle de temps peut être déterminée à partir de l'équation (3.2), en utilisant les estimations $M_A(j)$ et $M_B(j)$ et les masses des granules A et B dans le lit fluidisé à la fin de l'étape $j-1$:

$$C_A(j) = M_A(j) / (M_A(j) + M_B(j)) \quad (3.27)$$

Le nombre des collisions rencontrées par les deux catégories de granules est proportionnel à la somme des masses estimées $M_A(j)$ et $M_B(j)$, et il est exprimé par le nombre:

$$x_{AB}(i,j) = X_{AB}(i,j)/N(1,1)$$

Avec cette notation, le nombre estimé de collisions $x_{AB}(i,j)$ de chaque granulé A avec les granulés de B de la masse initiale $m_A(1,1)$ dans le lit fluidisé après j t peut être exprimé comme suit:

$$x_{AB}(1,j) = \{ [1 - c_A(1)] + [1 - c_A(2)]M(2)/M(1) + \dots + [1 - c_A(j)]M(j)/M(1) \} t \quad (3.28)$$

Les nouvelles particules introduites à chaque période t , ont la probabilité de se charger dès leur introduction dans le lit, et elles subissent leurs premières collisions données par le nombre $x_{AB}(j,j)$:

$$x_{AB}(j,j) = \{ [1 - c_A(j)]M(j)/M(1) \} t$$

En général, le nombre de collisions $x_{AB}(i,j)$ de chaque particule A avec les particules de type B dépend de la masse $m_A(i,j)$, d'où il peut s'exprimer par :

$$x_{AB}(i,j) = \{ [1 - c_A(i)] + [1 - c_A(i+1)]M(i+1)/M(1) + \dots + [1 - c_A(j)] M(j)/M(1) \} \quad (3.29)$$

$$x_{AB}(i,j) = \sum_{k=i}^j \{ [1 - c_A(k)]M(k)/M(1) \} t \quad (3.30)$$

Par conséquent, la masse estimée $M_{As}(j)$ des granules A séparées à chaque pas et à $t = j$ t est obtenue à partir de (3.21a):

$$M_{As}(j) = p(x_{AB}(1,j)) m_A(1,j) + p(x_{AB}(2,j)) m_A(2,j) + \dots + p(x_{AB}(i,j)) m_A(i,j) \quad (3.31)$$

Dans le cas où la probabilité d'une séparation de granules après $X_{AB}(i,j)$ collisions est exprimée par la loi de distribution normale (3.8) des valeurs connues x_{ABav} et s_{xAB} , le terme général dans (3.30) est :

$$p(x_{AB}(i,j)) m_A(i,j) = ((x_{AB}(i,j) - x_{ABav})/s_{xAB}) m_A(i,j) \quad (3.32)$$

3.2 Code de calcul

Le modèle mathématique suppose que la probabilité d'un granulé à être séparé peut être exprimée en fonction du nombre de chocs avec des granulés appartenant à l'autre classe de matériaux. Le procédé est caractérisé par le fait que le chargement des granulés est réalisé dans un appareil à lit fluidisé, en présence d'un champ électrique. L'évolution dans le temps de

la masse de granules recueillis sur les électrodes a été calculée pour différentes compositions du mélange granulaire sans prendre en considération l'effet des parois du séparateur à débit faible.

Dans un premier programme, la probabilité $p(x_{ABe}(i))$ a été estimée par la loi de distribution normale de l'équation (3.8), avec le nombre de collisions moyen x_{ABav} par l'équation (3.11) pour $c_{A1} = 0.5$ et $t_{50\%} = 20$ s :

$$x_{ABav} = (1 - c_{A1}) t_{50\%} = 0.5 \times 20 = 10 \quad (3.33)$$

L'écart type s_{xAB} donné par (3.12)

$$s_{xAB} = x_{ABav} / 3 = 10/3 = 3.33 \quad (3.34)$$

La figure 3.4 montre l'évolution de la masse récupérée et la masse séparée à chaque instant $t = 1s$, pour un mélange de deux matière A et B de compositions 50%A+50%B. La masse optimale choisie introduite dans le séparateur est $m = 150$ g de matière totale à séparer (§ 2.2.1).

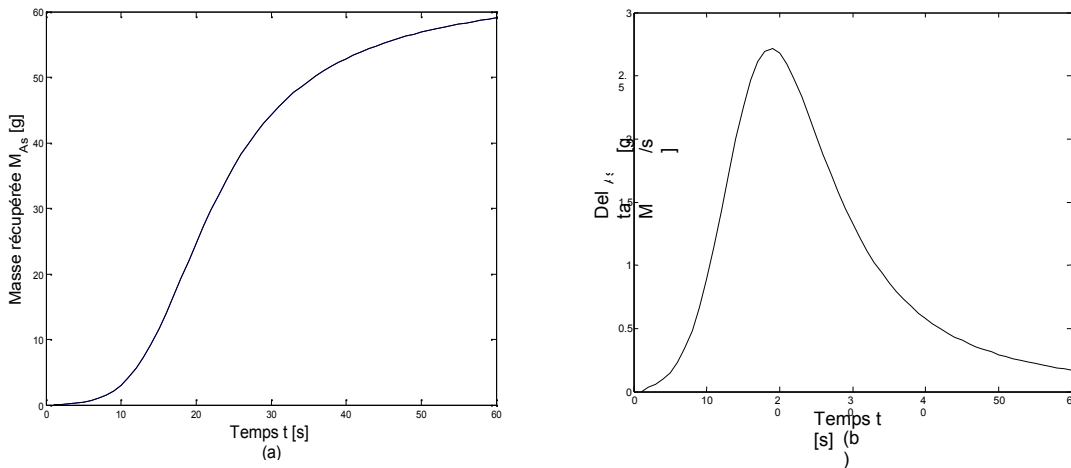


Figure 3-4 : Résultats estimés pour un mélange de 50% A + 50%B : a) Masse séparée, b) M_{As}

Dans ce cas les courbes des deux matières séparées M_{As} et M_{Bs} ont la même allure. La différence entre ces prédictions théoriques et les résultats des expériences présentées dans le § 2.2.2 s'explique par les hypothèses simplificatrices utilisées pour établir le modèle. L'effet des parois et la présence d'une troisième espèce de particules seront pris en compte pour le second programme.

3.2.1 Algorithme de base

L'étude vise la modélisation de la séparation d'un mélange binaire de matériaux granulaires, notés A et B . Les deux classes de granulés ont la même taille et la même densité de masse, mais des caractéristiques tribo-électriques différentes.

Le modèle mathématique est basé sur l'hypothèse que la probabilité d'un granulé à séparer peut être exprimée en fonction du nombre de chocs avec des granulés appartenant à l'autre classe de matériaux et avec les parois du lit fluidisé. Le nombre de collisions dépend de la concentration de chaque classe de matériaux dans le mélange granulaire.

L'effet de la collision des granulés aux parois est semblable à la présence d'un troisième type de granulé dans le lit fluidisé. Ainsi, afin de prendre en compte les deux types de collisions, la masse totale $M(t)$ des matériaux traités à un instant t est exprimé en tant que:

$$M(t) = M_A(t) + M_B(t) + M_P \quad (3.35)$$

où $M_A(t)$ et $M_B(t)$ sont les masses des deux catégories de granulés; M_P est la masse fictive des parois, qui est constante dans le temps. Dans ces circonstances, les concentrations respectives des matériaux A , B et P sont les suivantes:

$$c_A(t) = M_A(t)/M(t), \quad c_B(t) = M_B(t)/M(t), \quad c_P = M_P/M(t) \quad (3.36)$$

Dans un lit fluidisé de géométrie connue et une vitesse d'air déterminée, chaque granulé subit $N(t)$ nombre de collisions par unité de temps. Pour la composition initiale des matériaux dans le lit fluidisé, à l'instant $t = 0$, $N(0) = N_1$. L'échange de charge dans chaque collision granulé-parois est différent par rapport au cas d'un contact entre deux granulés, car il dépend de la position relative de la matière de paroi P et des deux matériaux A et B dans la série triboélectrique. La charge échangée entre un granule A (ou B) et les parois serait respectivement λ_A et λ_B .

Ainsi, au cours d'une période t , le nombre de charges élémentaires échangées par un granulé A est

$$X_A(t) = \int_0^t [c_B(t) + \lambda_A c_P(t)] N(t) dt \quad (3.37)$$

De même, le nombre de charges élémentaires échangées par chaque granulé B peut être exprimé comme suit:

$$X_B(t) = \int_0^t [c_A(t) + \lambda_B c_P(t)] N(t) dt \quad (3.38)$$

Soit $P(X_A) = p(x_A)$, avec $x_A = X_A/N_1$, la probabilité pour qu'un granulé de A soit collecté à l'électrode après un échange de charges unitaires $X_A(t)$, dans des conditions d'exploitation bien définies (nature et taille des deux classes de granulés, géométrie du lit fluidisé, pression d'air fluidisé et la haute tension appliquée aux électrodes, etc.), la probabilité $P(X_A)$ peut être supposée donnée par la loi de Gauss (3.5).

Les expressions des masses de matières séparées $M_{A_s}(t)$ et $M_{B_s}(t)$ à tout instant t sont données respectivement par les équations (3.7a) et (3.7b).

3.2.2 Particularité du code pour la simulation du régime intermittent

Un algorithme itératif peut être utilisé pour obtenir le nombre de collisions $X_{AB}(i)$ et la masse séparée $M_{A_s}(i)$, à l'instant $t = i \Delta t$, où i est un entier positif ($i \geq 1$) et Δt est suffisamment petit pour la masse $M_A(t)$, la concentration $c_A(t)$ et la fréquence des collisions $N(t)$ ont été considérées comme constantes :

$$M_{A_e}(k) = M_A(k\Delta t),$$

$$c_{A_e}(k) = c_A(k\Delta t), \text{ et } N_e(k) = N(k\Delta t)$$

Dans l'intervalle $k \Delta t \leq t < (k+1) \Delta t$, $k = 1, 2, \dots, i$.

Etape 1: Le nombre de collisions $N_{AB}(1)$ de chaque granulé A avec les granulés B dans le lit fluidisé peut être calculé à partir de (3.4a) comme suit:

$$X_{AB_e}(1) = X_{AB}(\Delta t) = [c_B(1) + \lambda_A c_P] N(1) \Delta t \quad (3.39)$$

Avec $x_{AB_e}(1) = X_{AB}(1)/N_1$, la masse estimée $M_{A_s}(1)$ des granules A séparée à Δt étant donnée par l'équation (3.14).

De la même façon:

$$X_{BA_e}(1,1) = [c_A(1) + \lambda_B c_P] N(1) \quad (3.40)$$

Etape i ($i \geq 2$): La concentration $c_A(i)$ des granulés A au début de cet intervalle de temps peut être déterminée à partir de l'équation (3.2), en utilisant les estimations $M_A(i)$ et $M_B(i)$, les masses des granulés A et B dans le lit fluidisé à la fin de l'étape $(i-1)$ ainsi que la masse fictive des parois:

$$c_A(i) = M_A(i) / (M_A(i) + M_B(i) + M_P) \quad (3.41)$$

$$\text{où: } M_A(i) = M_{A1} - M_{As}(i-1) ; \quad M_B(i) = M_{B1} - M_{Bs}(i-1).$$

La fréquence estimée $N(i)$ des collisions subies par les deux catégories de granulés est proportionnelle à la somme des masses estimées $M_A(i)$, $M_B(i)$ et la masse fictive des parois M_P , à savoir :

$$N(i) = N_1 (M_A(i) + M_B(i) + M_P) / M_1 = N_1 M(i) / M_1. \quad (3.42)$$

Avec cette notation, le nombre estimé de collisions $X_{AB}(i)$ de chaque granulé A avec les granulés de B dans le lit fluidisé peut être exprimé comme suit:

$$X_{AB}(i) = \{ [c_B(1) + c_{PA}(1)]N(1) + [c_B(2) + c_{PA}(2)]N(2) + \dots + [c_B(i) + c_{PA}(i)]N(i) \} \Delta t \quad (3.43)$$

D'où le nombre de collisions $x_{AB}(i)$ peut s'exprimer comme suit :

$$x_{AB}(i) = X_{AB}(i) / N_1 = \{ [c_B(1) + c_{PA}(1)] + [c_B(2) + c_{PA}(2)]N(2)/N_1 + \dots + [c_B(i) + c_{PA}(i)]N(i)/N_1 \} \Delta t$$

$$x_{AB}(i) = \{ [c_B(1) + c_{PA}(1)] + [c_B(2) + c_{PA}(2)]M(2)/M_1 + \dots + [c_B(i) + c_{PA}(i)]M(i)/M_1$$

$$x_{AB}(i) = [c_B(i) + c_{PA}(i)]M(i)/M_1 \quad (3.44)$$

Par conséquent, la masse estimée $M_{As}(i)$ des granulés A séparées à $t = i\Delta t$ est exprimée par l'équation (3.19).

3.2.2 Particularité du code pour la simulation du régime continu

Un algorithme itératif peut être utilisé pour obtenir l'estimation $X_{Ae}(i,j)$ du nombre de collisions élémentaires échangées à l'étape j par les granulés introduits dans le lit fluidisé à l'étape i , l'estimation $M_{Ase}(j)$ de la masse séparée $M_{As}(t)$, pour $t = t_j$, où i et j sont des nombres entiers positifs et t est suffisamment faible pour que la masse $M_A(t)$, la concentration $c_A(t)$ et la fréquence des collisions $N(t)$ devant être considérées comme constantes:

$$M_{Ae}(k) = M_A((k-1) \cdot t), \quad (3.45a)$$

$$c_{Ae}(k) = c_A((k-1) \cdot t), \quad (3.45b)$$

$$N_e(k) = N((k-1) \cdot t) \quad (3.45c)$$

dans un intervalle $(k-1)\Delta t < t < k \cdot t$, $k = 1, 2, \dots, j$.

Étape 1: Le nombre estimé de charges unitaires échangées par chaque granulé A peut être calculée à partir de (3-38), comme suit :

$$X_{Ae}(1,1) = [c_B(1) + c_A c_W]N(1) \quad (3.46)$$

Avec $x_{Ae}(1,1) = X_{Ae}(1,1)/N(1)$, la masse estimée $M_{Ase}(1)$ des granulés séparés A à t est obtenue à partir de (3.7a).

$$M_{Ase}(1) = p(x_{Ax}(1,1)) M_{Ae}(1) = p(x_{Ae}(1,1)) m_{Ae}(1,1) \quad (3.47)$$

De la même façon:

$$X_{Be}(1,1) = [c_A(1) + c_B c_W]N(1) \quad (3.48)$$

où $x_{Be}(1,1) = X_{Be}(1,1)/N(1)$, et la masse $M_{Bse}(1)$ de granulés séparés B à t est calculée comme suit:

$$M_{Bse}(1) = p(x_{Be}(1,1)) M_{Be}(1) = p(x_{Be}(1,1)) m_{Be}(1,1) \quad (3.49)$$

et $m_{Ae}(1,1) = M_A(1)$ et $m_{Be}(1,1) = M_B(1)$ sont les masses initiales à $t = 0$. Les masses restantes après la première étape sont calculées à partir de la masse initiale:

$$m_{Ae}(1,2)=m_{Ae}(1,1)-p(x_{Ae}(1,1)) m_{Ae}(1,1) \quad (3.50a)$$

$$m_{Be}(1,2)=m_{Be}(1,1)-p(x_{Be}(1,1)) m_{Be}(1,1) \quad (3.50b)$$

Dans les formules ci-dessus, $m_{Ae}(1,2)$ et $m_{Be}(1,2)$ sont les particules qui ont des collisions subies dans la première étape et vont subir d'autres collisions au cours de la deuxième itération. Par conséquent, la probabilité de séparation est plus grande par rapport aux nouvelles particules qui seront introduites dans le lit fluidisé à l'étape suivante.

L'étape j ($j \geq 2$): soit $m(j,j)$ la masse m ajoutée à chaque étape j :

$$m_e(j,j)=m; m_{Ae}(j,j)=m_A; m_{Be}(j,j)=m_B \quad (3-51)$$

où $m_{Ae}(j,j)$ et $m_{Be}(j,j)$ sont les masses des nouveaux granulés introduits dans le lit fluidisé. La masse totale dans le lit fluidisé à l'étape j peut être exprimée comme suit:

$$M_{Ae}(j)=\sum_{i=1}^j m_{Ae}(i,j) \quad (3.52)$$

Une formule similaire peut être écrite pour $M_{Be}(j)$. La masse totale estimée à l'étape j est:

$$M_e(j) = M_{Ae}(j) + M_{Be}(j) + M_P \quad (3.53)$$

Les masses $m_{Ae}(i,j)$ et $m_{Be}(i,j)$ introduites à l'étape i et celles encore présentes dans le lit fluidisé au début de l'étape j sont calculées séparément:

$$m_{Ae}(i,j)=m_{Ae}(i,j-1) - m_{Ae}(i,j-1) * p(x_{Ae}(i,j-1)) \quad (3.54a)$$

$$m_{Be}(i,j)=m_{Be}(i,j-1) - m_{Be}(i,j-1) * p(x_{Be}(i,j-1)) \quad (3.54b)$$

Les concentrations $c_{Ae}(j)$ et $c_{Be}(j)$ des granulés A et B peuvent être déterminées à partir de (3.36), en utilisant les estimations $M_{Ae}(j)$ et $M_{Be}(j)$ des masses des deux matières dans le lit fluidisé:

$$c_{Ae}(j) = M_{Ae}(j) / M(j) \quad (3.55a)$$

$$c_{Be}(j) = M_{Be}(j) / M(j) \quad (3.55b)$$

$$x_{Ae}(i,j) = X_{Ae}(i,j)/N(0), \quad x_{Be}(i,j) = X_{Be}(i,j)/N(0) \quad (3.56)$$

Avec ces notations, les charges unitaires normalisées échangées par les granulés *A* et *B* des masses initiales $m_{Ae}(1,1)$ et $m_{Be}(1,1)$ dans le lit fluidisé jusqu'à l'instant $t = j$ peuvent être exprimées comme suit:

$$x_{Ae}(1,j) = \{ [c_{Be}(1) + {}_A c_{Pe}(1)] + [c_{Be}(2) + {}_A c_{Pe}(2)]M_e(2)/M_e(1) \dots + [c_{Be}(j) + {}_A c_{Pe}(j)]M_e(j)/M_e(1) \} \quad t \quad (3.57a)$$

$$x_{Be}(1,j) = \{ [c_{Ae}(1) + {}_B c_{Pe}(1)] + [c_{Ae}(2) + {}_A c_{Pe}(2)]M_e(2)/M_e(1) \dots + [c_{Ae}(j) + {}_B c_{Pe}(j)]M_e(j)/M_e(1) \} \quad t \quad (3.57b)$$

Les nouvelles particules introduites à chaque pas de temps t ont la possibilité de se charger en commençant par l'étape j :

$$x_{Ae}(j,j) = \{ [c_{Be}(j) + {}_A c_{We}(j)]M_e(j)/M_e(1) \} \quad t \quad (3.58a)$$

$$x_{Be}(j,j) = \{ [c_{Ae}(j) + {}_B c_{Pe}(j)]M_e(j)/M_e(1) \} \quad t \quad (3.58b)$$

En general:

$$x_{Ae}(i,j) = \{ [c_{Be}(i) + {}_A c_{Pe}(i)]M_e(i)/M_e(1) + [c_{Be}(i+1) + {}_A c_{Pe}(i+1)]M_e(i+1)/M_e(1) + \dots + [c_{Be}(j) + {}_A c_{Pe}(j)]M_e(j)/M_e(1) \} \quad t \quad (3.59a)$$

$$x_{Be}(i,j) = \{ [c_{Ae}(i) + {}_B c_{Pe}(i)]M_e(i)/M_e(1) + [c_{Ae}(i+1) + {}_B c_{Pe}(i+1)]M_e(i+1)/M_e(1) + \dots + [c_{Ae}(j) + {}_B c_{Pe}(j)]M_e(j)/M_e(1) \} \quad t \quad (3.59b)$$

Par conséquent, les masses estimées des granulés séparés *A* et *B* à une étape j sont obtenues à partir de (3.7a):

$$M_{Ase}(j) = p(x_{Ae}(1,j)) m_{Ae}(1,j) + p(x_{Ae}(2,j)) m_{Ae}(2,j) + \dots + p(x_{Ae}(i,j)) m_{Ae}(i,j) \quad (3.60a)$$

$$M_{Bse}(j) = p(x_{Be}(1,j)) m_{Be}(1,j) + p(x_{Be}(2,j)) m_{Be}(2,j) + \dots + p(x_{Be}(i,j)) m_{Be}(i,j) \quad (3.60b)$$

3.3 Validation du code

L'objectif de ce paragraphe est de simuler le fonctionnement intermittent et continu d'un dispositif de séparation tribo-aéro-électrostatique à débit faible. L'évolution dans le

temps de la masse de granulés séparés par les électrodes a été estimée pour différentes compositions du mélange granulaire. L'effet des parois a été pris en compte et les résultats démontrent que le fonctionnement du dispositif est possible.

Les calculs ont été effectués avec un programme écrit en MATLAB 7.0. L'étape d'itération est $t = 1$ s, la masse initiale a été prise $M_1 = 170$ g (avec $M_P = 20$ g). Les valeurs de x_{Aav} , s_{xA} , x_{Bav} , s_{xB} ont été choisies sur la base des données expérimentales et à la suite de la procédure décrite par les équations (3.33) et (3.34).

3.3.1 Régime intermittent : Séparation d'un mélange 50%A+ 50%B

Afin de valider les résultats de simulation, des expériences ont été effectuées au laboratoire d'Angoulême - France (§2.2.2) sur un dispositif tribo-aéro électrostatique à débit faible (Figure 2.1). Les particules chargées par effet triboélectrique sont dirigées par les forces du champ électrique vers les deux électrodes alimentées en haute tension, auxquelles elles adhèrent sous l'action des forces d'image électrique. Les électrodes conduisent les particules vers les deux compartiments du collecteur. Le processus peut être observé à travers les parois frontales du séparateur, confectionnées en *PMMA* transparent. Les deux matières utilisées pour la séparation sont le polyamide (*PA*) et le polycarbonate (*PC*). Selon la série triboélectrique de la figure 3.5, les granulés de *PC* devraient s'électriser négativement et être collectés à l'électrode positive et les granulés de *PA* devraient s'électriser positivement et être collectés à l'électrode négative. Ce qui signifie que les parois se situent entre *PA* et *PC* dans la série triboélectrique.

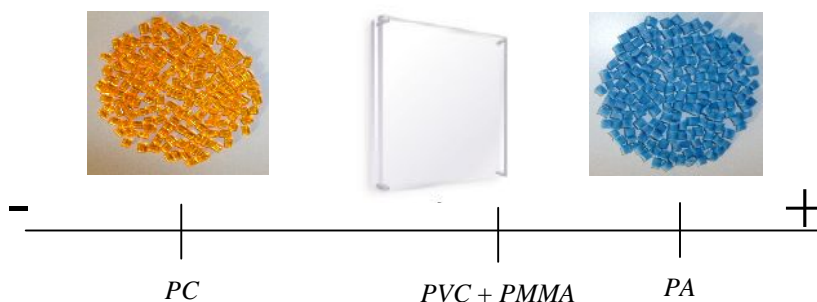


Figure 3.5: Série triboélectrique montrant la position de *PC* et *PA* par rapport au *PVC+PMMA*

Dans l'application numérique, nous allons considérer que l'efficacité des échanges de charge entre un granule *PC* (ou *PA*) et les parois seraient caractérisée respectivement par les coefficients $\lambda_A=0.68$ et $\lambda_B=0.32$. La figure 3.6 représente l'évolution de la masse récupérée d'un mélange de 50%A+50%B.

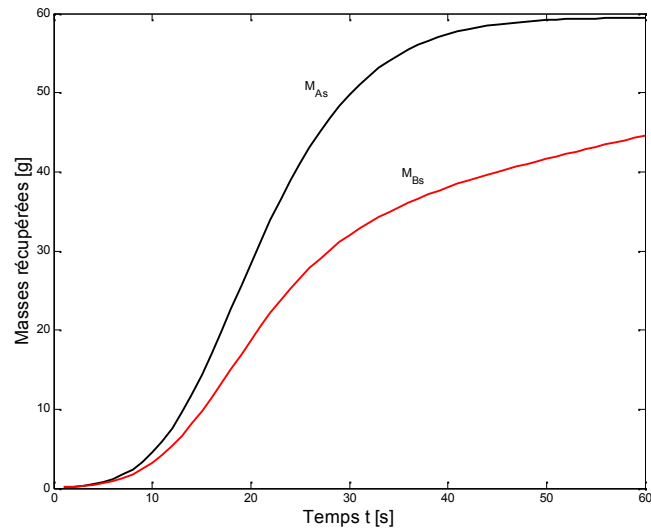


Figure 3.6 : Masses récupérées en régime intermittent.
Masse initiale introduite $M=150g$ pour 50%A+50%B

La matière dont elle est réalisée la chambre tribo-électrostatique a une influence sur le processus de charge électrique des particules. Une différence importante a été remarquée sur la récupération des particules *A* par rapport à la récupération des particules *B*. Les parois de la chambre facilitent la charge électrique des particules *A*. Les simulations effectuées sont en bon accord avec les résultats expérimentaux.

3.3.2 Régime intermittent : Séparation d'un mélange 40%A+60%B

Une autre simulation a été effectuée sur un mélange binaire de masse 170 g avec composition de 40%A+60%B pour une durée $t = 30$ s (Fig.3.7). La masse totale récupérée a été calculée comme la somme des valeurs récupérées pendant $t=1$ s au cours du processus de séparation. La simulation a été effectuée en gardant les mêmes valeurs de x_{Aav} , s_{xA} , x_{Bav} , s_{xB} , λ_A et λ_B utilisées précédemment.

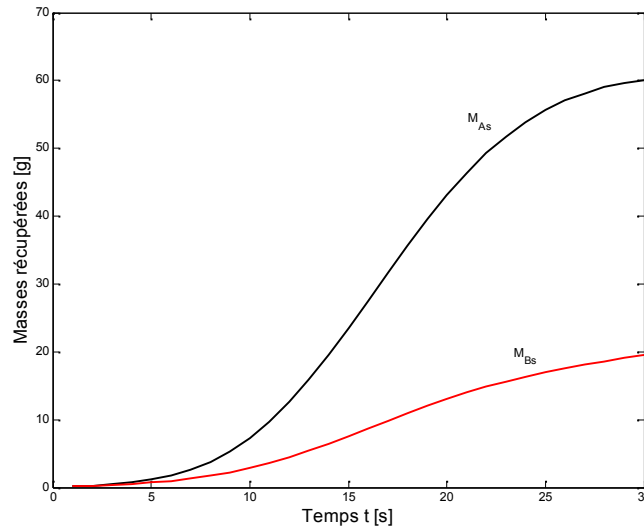
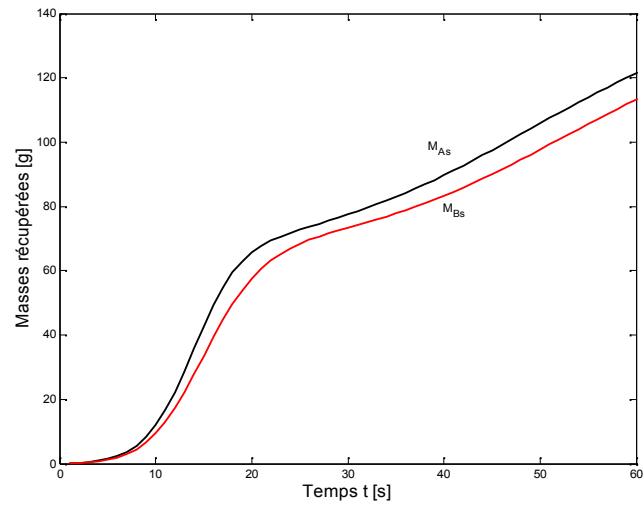


Figure 3.7 : Masses récupérées en régime intermittent, masse initiale introduite $M=150g$, pour 40%A+60%B

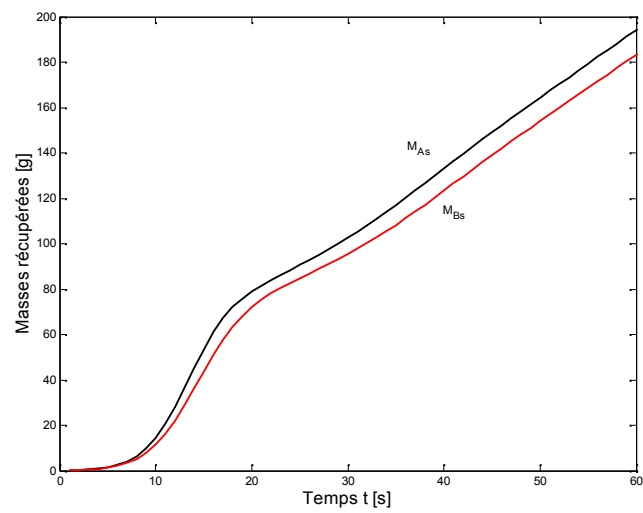
La loi de probabilité donnée par (3.7) a servi également pour le calcul des masses séparées $M_{Ase}(t)$ et $M_{BSE}(t)$ à partir de 170 g d'un mélange granulaires 40% A + 60% B. Un très bon accord existe entre les données expérimentales et les courbes prédites. Les granules de la matière A, qui sont minoritaires se chargent plus vite que les granules de B et la quasi-totalité d'entre eux sont séparés en moins de 25 s. En revanche, seulement 20 g de granules de PA sont collectés à l'électrode (Figure 2.15), comme prévu par la courbe de simulation pour les granules de la majorité B.

3.3.3 Régime continu

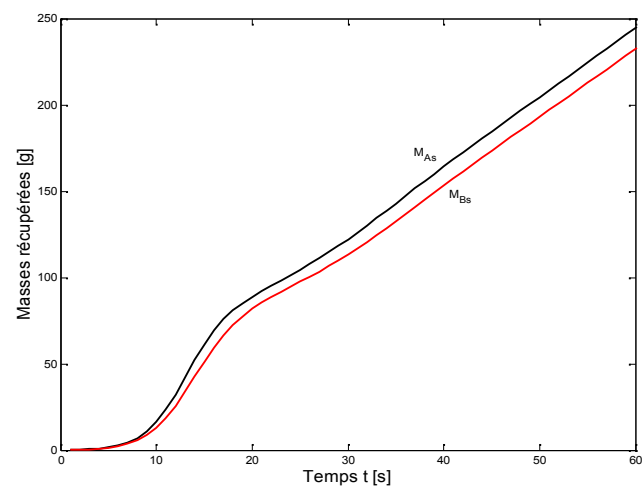
Les calculs ont été effectués avec un autre programme écrit en MATLAB 7.0. Le pas d'itération est $t = 1 s$, la masse initiale a été prise $M1 = 170 g$ (avec $M = 20 g$) et la masse $m(j, j)$ introduite à chaque étape a été successivement fixée à 3 g/s, 6 g/s ou 9 g/s. Les valeurs de x_{Aav} , s_{xA} , x_{Bav} , s_{xB} , λ_A et λ_B ont été calculées précédemment. Les masses $M_{As}(j)$ et $M_{Bs}(j)$ séparées à chaque étape j ont été estimées par (3.58a) et (3.58b) et sont représentées par les courbes de la figure (3.8c). Dans les trois cas, on considère que le mélange granulaire est constitué de 50% A+50% B.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.8 : Masses récupérées en régime continu. Masse initiale introduite $M=150g$, 50%A+50%B: a) $m(j, j) = 3g/s$, b) $m(j, j) = 6g/s$, a) $m(j, j) = 9g/s$

Dans tous les cas, la légère différence entre les masses séparées de A et B est due à l'intensité différente de l'effet des collisions entre les granulés et les parois (plus fort pour A que pour B , comme $\lambda_A=0.68$ et $\lambda_B=0.32$). Cependant, après une quarantaine de secondes, la somme des masses de produits A et B collectés dans une unité de temps est égale au débit d'alimentation. Ceci nous assure sur la possibilité de fonctionner en régime continu stabilisé, sans avoir besoin d'une boucle de réglage du débit d'entrée en fonction du débit de sortie. Le système a la propriété remarquable de s'autoréguler.

Conclusion

Les expériences ont souligné que la loi de distribution normale est une solution appropriée pour exprimer la probabilité d'un granulé à être séparé après avoir subi un certain nombre de collisions avec des granulés de l'autre matériau.

Le fonctionnement continu d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique peut être prédit avec précision par la simulation numérique, basée sur un modèle mathématique simple. Aussi, le fonctionnement du séparateur dépend de la composition du mélange. Les particules minoritaires se chargent plus rapidement et sont facilement séparées du mélange, alors que les particules majoritaires doivent passer plus de temps dans le lit fluidisé avant d'être recueillies sur les électrodes.

-4- Simulation numérique du fonctionnement d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique

La simulation numérique peut être un outil puissant dans la recherche et le développement d'un nouveau procédé électrostatique. L'objectif du présent chapitre est d'appliquer et simuler le modèle mathématique présenté dans le chapitre précédent à un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges binaires de matériaux granulaires. La simulation est caractérisée par l'étude de l'influence des variables tels que l'effet des parois et la nature des matières à séparer pour le régime intermittent (§ 4.1). Une étude plus compliquée est présentée dans ce paragraphe par le changement de débit de matière introduite dans le séparateur et la variation non contrôlée de la composition des mélanges granulaires (§ 4.2).

4.1 Simulation du régime de fonctionnement intermittent

Le procédé est caractérisé par le fait que la charge des particules est produite dans un dispositif à lit fluidisé en forme de parallélépipède, en présence d'un champ électrique. Ce champ horizontal, perpendiculaire à la direction de l'air de fluidisation, est produit par la métallisation des deux parois verticales opposées de la chambre de tribo-chargement et en les reliant à deux alimentations à courant continu de haute tension de polarités opposées. En dépit de la simplicité de son principe de fonctionnement, la demande de l'industrie pour ce type de dispositif est entravée par la difficulté de traiter des mélanges granulaires binaires caractérisés par des proportions des constituants qui peuvent être aléatoires [28]. Les simulations numériques sont censées fournir des moyens pour évaluer les différentes solutions d'optimisation du processus.

L'étude se concentre sur la séparation d'un mélange binaire de matériaux granulaires, notés *A* et *B*. Les deux classes de granules ont une taille et une densité de masse similaires, mais des caractéristiques tribo-électriques différentes. Dans cette étude, l'effet des parois (§4.1.1) et la nature des matériaux à séparer (§4.1.2) pour différentes concentrations de mélanges binaires ont été analysés.

4.1.1 Effet des parois

Le but de cette étude a été dans un premier temps d'observer si les granulés A ou B s'électrisent par le contact avec les parois selon leurs places dans la série triboélectrique. Dans un lit fluidisé de géométrie et de vitesse d'air connues, chaque granulé subit $N(t)$ collisions par unité de temps. Pour la composition initiale des matériaux dans le lit fluidisé, à l'instant $t = 0$, nous posons $N(0) = N1$. L'échange de charge après chaque collision granulé-parois est différent par rapport au cas d'un contact entre deux granulés, car il dépend de la position relative de la matière des parois P et des deux matériaux A et B dans la série triboélectrique. Si une unité de charge a été échangée dans une collision entre deux granulés A et B , la charge échangée entre un granule A (ou B) et la paroi serait respectivement λ_A (ou λ_B). Il ya plusieurs situations qui peuvent être rencontrées dans cette étude (Figure 4.1):

- a) La paroi P est comprise entre A et B dans la série triboélectrique, alors $0 < \lambda_A < 1$, $0 < \lambda_B < 1$ (les collisions granulé-parois ont moins d'effet que ceux entre deux granulés);
- b) B est entre A et P , alors $\lambda_A > 1$ (un granulé A se charge mieux en cas de collision avec la paroi P qu'avec un granulé B), et $\lambda_B < 0$ (les échanges de charge B avec la paroi a un signe opposé à celle échangée avec A);
- c) A est compris entre B et P , alors $\lambda_B > 1$ (un granulé B se charge mieux dans une collision avec la paroi P qu'avec un granule A), et $\lambda_A < 0$ (les échanges de charge A avec la paroi a un signe opposé à celle échangée avec B).

Par ailleurs, dans le même temps, avec toutes les particules ayant une dimension similaire, il n'y a pas d'échange de charge entre les particules de la même nature.

Pour cette étude, il a été appliqué l'algorithme présenté dans §3.2.2. Les calculs ont été effectués avec un programme écrit en MATLAB 7.0. L'étape d'itération est $t = 1s$, la masse initiale a été prise $M_1 = 170$ g (avec $M_P = 20$ g). Les valeurs de x_{Aav} , s_{xA} , x_{Bav} et s_{xB} ont été choisis à la suite de la procédure expérimentale décrite au troisième chapitre et sur la base des données expérimentales par les équations (3-33) et (3-34). La figure 4.2 montre l'évolution de la masse récupérée pour trois exemples de la position des parois par rapport à la position des granulés dans la série tribo-électrique. Pour bien comparer les trois cas de position des parois dans la série tribo-électrique, la composition choisie du mélange binaire était de 50%A+50%B.

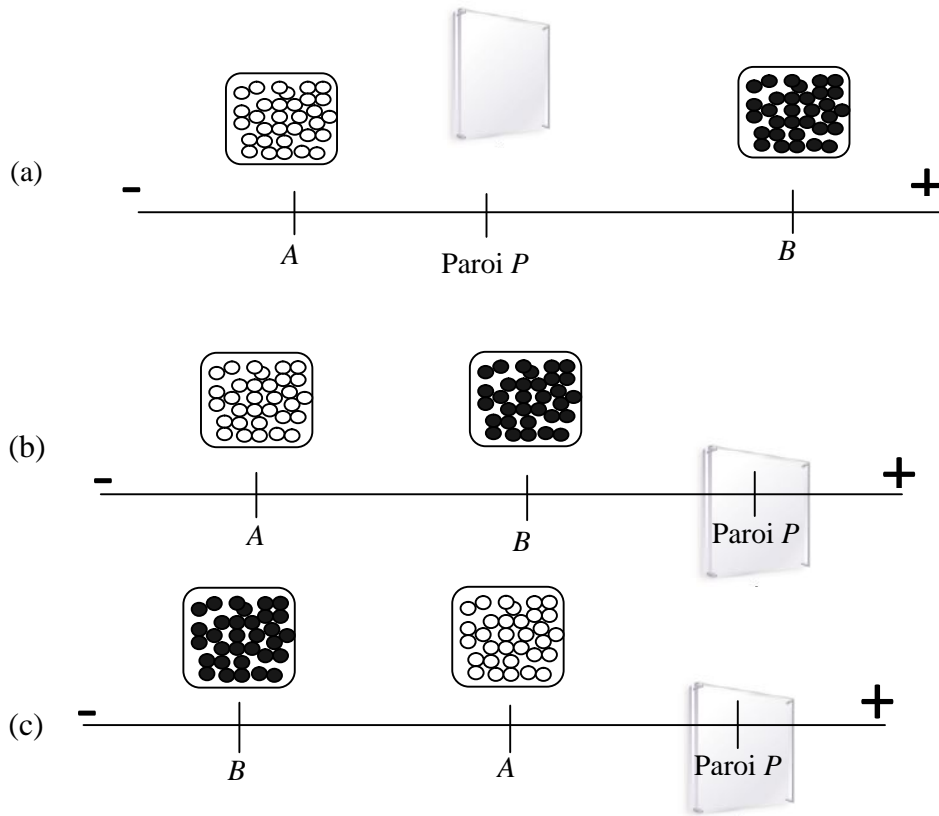


Figure 4.1: Série triboélectrique montrant la position de A et B par rapport à la paroi P

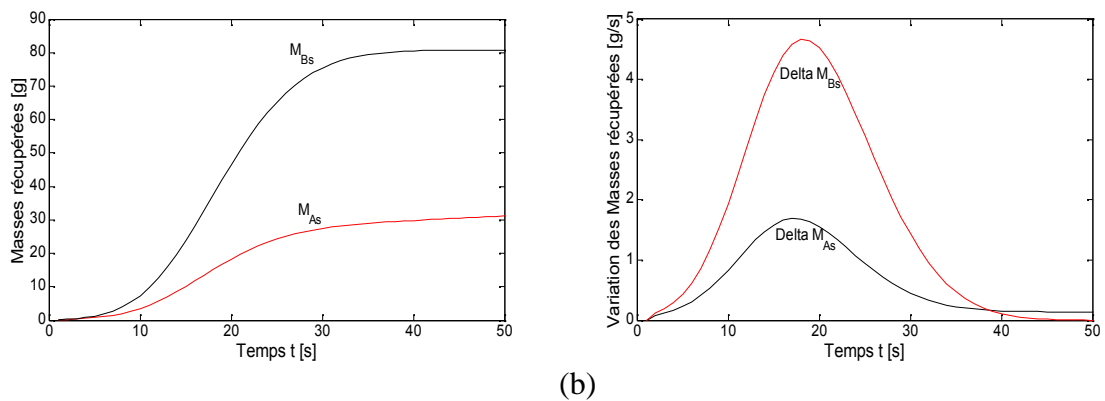
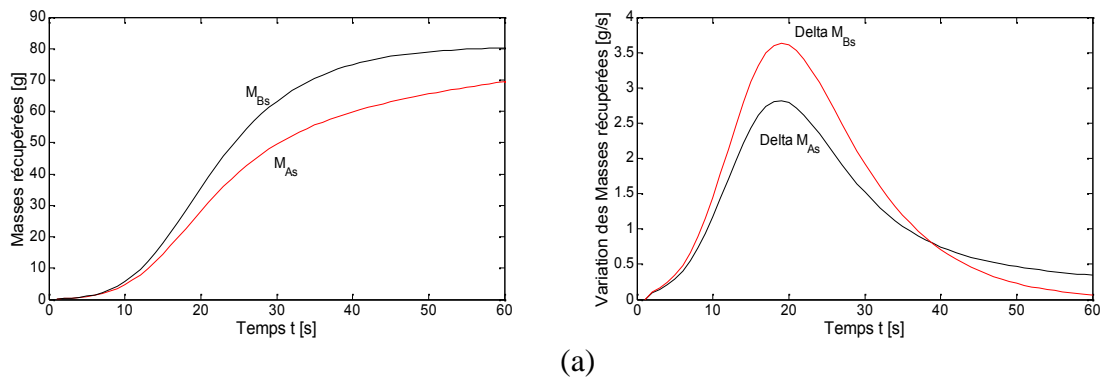


Figure 4.2: Evolution des masses séparées M_A , M_B et la variation instantanée M_{As} et M_{Bs} par rapport à la paroi P, a) $B=0,6$ $A=0,4$ b) $B=1,2$, $A=-0,2$

Les résultats de la figure 4.2 (a) montrent la première simulation exécutée où la paroi P étant comprise entre A et B est plus proche de A dans la série triboélectrique, les charges échangées entre les particules A ou B et la paroi sont respectivement $q_A=0.4$ et $q_B=0.6$. Cependant, pour la présente étude, on a supposé que les deux classes de particules ont des caractéristiques similaires.

Les granulés de B sont collectés à un rythme légèrement plus rapide que les granulés de A . Ceci explique que les collisions granulé-parois ont moins d'effet que ceux entre deux granulés.

Sur la figure 4.2 (b) le granulé A est compris entre le granulé B et la paroi P , dans ce cas les charges échangées entre les particules A ou B et la paroi sont respectivement $q_A=-0,2$ et $q_B=1,2$; un granulé B se charge mieux après une collision avec la paroi P qu'avec un granule A . Ce qui explique la quantité récupérée importante des particules B par rapport aux particules A .

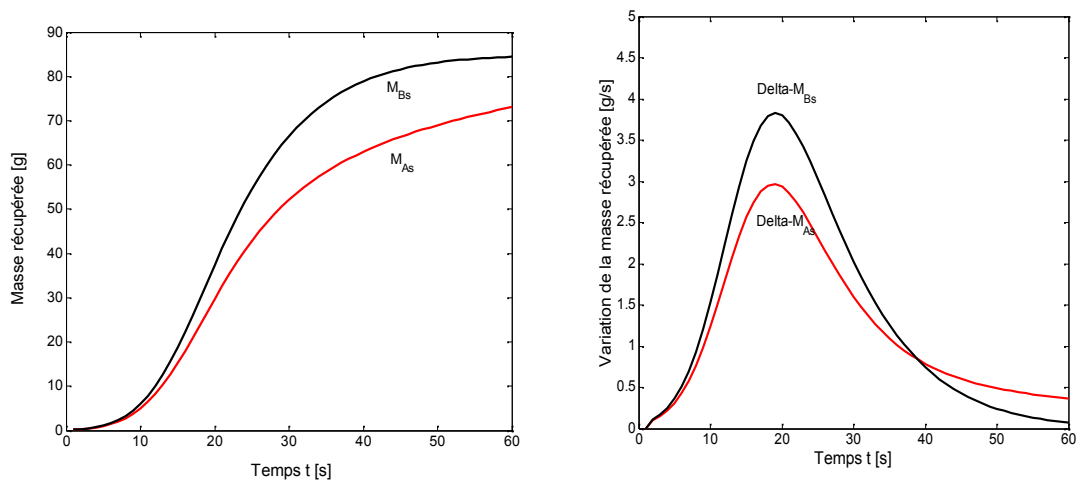
Il convient de noter que la somme des masses des produits collectés après 30 s : $M_{As}+M_{Bs}<M = 150$ g. En fait, la M_{LIM} restante représente la limite inférieure de la masse à laquelle le dispositif expérimental fonctionne correctement. Très peu de particules sont recueillies au niveau des électrodes à $t > 30$ s. Il existe deux raisons à cela:

- 1) Le lit fluidisé est de plus en plus dilué,
- 2) La hauteur du lit fluidisé est réduite, les particules sont de plus en plus éloignées des électrodes et les forces électriques ne sont pas assez fortes pour conduire les particules aux compartiments.

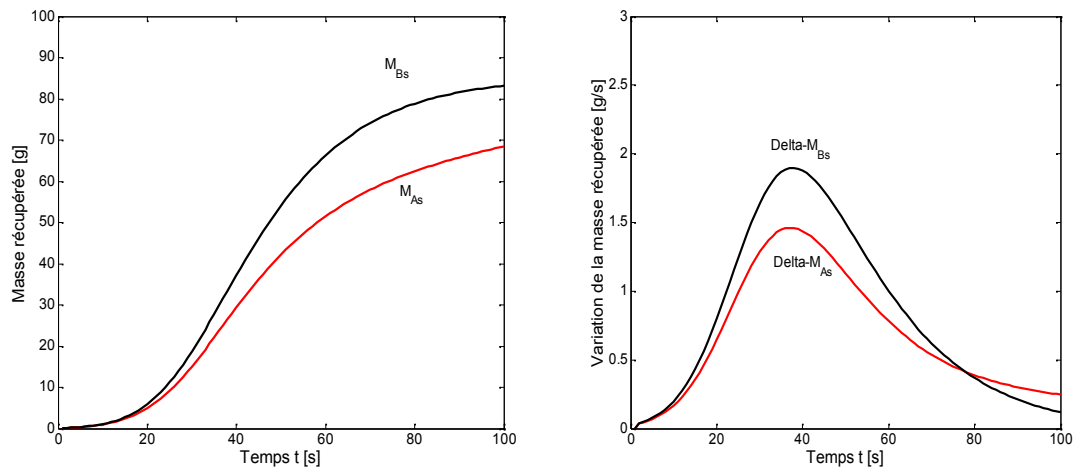
4.1.2 Nature des matières à séparer

L'étude porte sur le comportement des mélanges binaires de plusieurs matériaux plastiques granulaires de nature différente dans le lit fluidisé parallélépipédique. En supposant qu'aucun granulé n'est retiré du lit fluidisé jusqu'à ce que chacun d'eux acquiert suffisamment de charge pour être séparé. La quantité de charge électrique créée par la mise en contact de deux matériaux dépend de la nature des deux matériaux définie par des séries triboélectriques, c'est-à-dire des listes ordonnées de matériaux : la position relative définit le signe

des charges, et la distance donne une idée de l'importance de l'échange. Dans ce paragraphe, la nature des matériaux à séparer a été prise en considération en tenant compte des équations (3-11) et (3-18) pour le calcul du nombre moyen de collision x_{ABav} et l'écart type s_{xAB} . Afin de mieux étudier la nature des matériaux isolants, la concentration du mélange est 50%A+50%B, la masse initiale était $M_1 = 170$ g (avec $M_P = 20$ g). Les charges échangées entre les particules A ou B et la paroi sont respectivement $q_A=0.4$ et $q_B=0.6$. La figure 4.3 montre l'évolution de la masse récupérée pour différentes valeurs de x_{ABav} et s_{xAB} .



(a)



(b)

Figure 4. 3: Evolution des masses séparées M_A , M_B et la variation instantanée ΔM_{As} et ΔM_{Bs} :

a) $x_{ABav} = 10$, $s_{xAB} = 3.33$; b) $x_{ABav} = 20$, $s_{xAB} = 6.66$

Les résultats de simulation de la figure 4.3 montrent que la durée de réponse pour la simulation du processus de tribo-électrisation des mélanges binaires granulaires pour le cas (b) est plus longue par rapport au cas (a). Les particules du deuxième cas avaient besoin d'une durée suffisante pour que l'effet triboélectrique se manifeste. La charge triboélectrique des granules étant si faible, il peut être vu que les particules quittent la chambre triboélectrique après 100s car elles ont besoin d'accumuler une quantité de charge plus importante, afin d'être conduits dans les collecteurs, tandis que les particules du premier cas se séparent rapidement.

4.1.3 Mélange de trois matériaux granulaires

L'objectif de cette étude est basé sur la séparation d'un mélange de trois matériaux granulaires, notés A , B et C . Les trois classes de granulés ont une taille et une densité de masse similaires. Dans cette étude l'effet des parois et la nature des matériaux à séparer des mélanges ont été négligés.

Pour cette étude, il a été appliqué l'algorithme présenté dans le §3.2.2. Les calculs ont été effectués pour la séparation de trois types de matières isolantes. L'étape d'itération est $t = 1s$, la masse initiale était $M_1 = 170$ g. Les valeurs de x_{Aav} , s_{xA} , x_{Bav} , s_{xB} , x_{Cav} , s_{xC} ont été choisies sur la base des données expérimentales et par les équations (3-33) et (3-34). La figure 4.4 montre l'évolution de la masse récupérée en fonction de la position de la troisième matière C par rapport à la position des granulés A et B dans la série tribo-électrique. Pour les mêmes concentrations des trois matériaux 20% de A , 45% de B et 35% de C , deux cas ont été envisagés :

- ✓ Cas a) : le matériau C est compris entre les deux matériaux A et B et plus proche à A dans la série triboélectrique, les charges échangées entre les particules A ou B et les particules C sont respectivement $q_{AC}=0.4$ et $q_{BC}=0.6$.
- ✓ Cas b) : le granulé A est compris entre le granulé B et le granulé C dans la série triboélectrique, dans ce cas les charges échangées entre les particules A ou B et la particule C sont respectivement $q_{AC}=-0,005$ et $q_{BC}=1,005$.

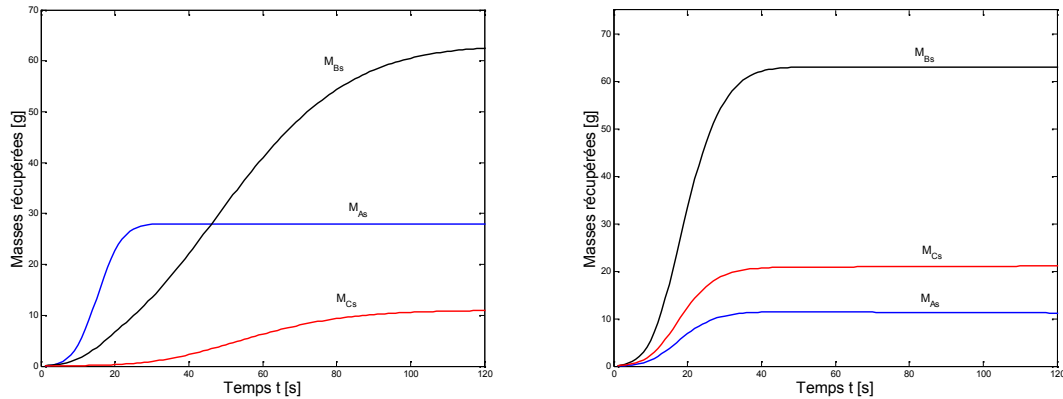


Figure 4. 4: Evolution des masses séparées M_A , M_B , M_C et la variation instantanée M_{As} ,

M_{Bs} et M_{Cs} , a) $AC=0.4$ et $BC=0.6$, b) $AC=-0,005$ et $BC=1,005$.

La figure 4. 4 a) montre que les granulés de B sont collectés à un rythme plus rapide que les granulés de A , tandis que la masse des granulés de C séparés est très faible. Ceci explique que les collisions des granulés $A-C$ et $B-C$ ont moins d'effet que ceux entre les granulés $A-B$, car ces derniers sont loin l'un de l'autre dans la série triboélectrique.

Sur la figure 4. 4 (b) un granulés B se charge mieux dans une collision avec un granulés C qu'avec un granulés A . Ce qui explique la quantité récupérée importante des particules B et C par rapport aux particules A . Très peu de particules sont recueillies au niveau des électrodes à $t > 30$ s.

4.2 Simulation du régime de fonctionnement continu en boucle ouverte

Afin de pouvoir être intégrée dans un flux industriel, l'installation de séparation doit fonctionner en régime continu, c'est ainsi que plusieurs situations ont été imaginées. Dans le but de simuler le fonctionnement en flux continu, le dispositif est alimenté par un convoyeur vibrant (§ 2.3.1). Son débit de matière varie en fonction des besoins des utilisateurs et il est nécessaire de diriger les granules à la chambre inférieure de tribo-électrisation. Le débit d'alimentation en matière varie de 3 g/s à 9 g/s pour maintenir le lit fluidisé (§ 2.3.2).

Les expériences du § 2.3.1 montrent que le phénomène principal qui assure le rechargement des granulés est dû au lit fluidisé, alors que le rechargement des granulés provoqué par les vibrations du convoyeur est négligeable.

4.2.1 Effet de débit

Pour ces simulations les mêmes caractéristiques triboélectriques ont été prises, les charges échangées entre les particules A ou B et la paroi sont respectivement $A=0.4$ et $B=0.6$. La masse initiale du mélange introduite dans le lit fluidisé était de 160g. La composition choisie du mélange de la masse est de 40% de A + 60% de B .

Le fonctionnement du dispositif a été vérifié par l'algorithme développé dans le §3.2.3. Dans cette étude il sera intéressant de noter la masse qui demeure dans la chambre triboélectrique après une durée de séparation et si cela influe sur les masses limites inférieures ou supérieures qui assurent le bon fonctionnement du dispositif.

La figure 4.6 montre l'évolution de la masse récupérée et les variations de la masse récupérée par rapport au temps pour quatre valeurs de débit.

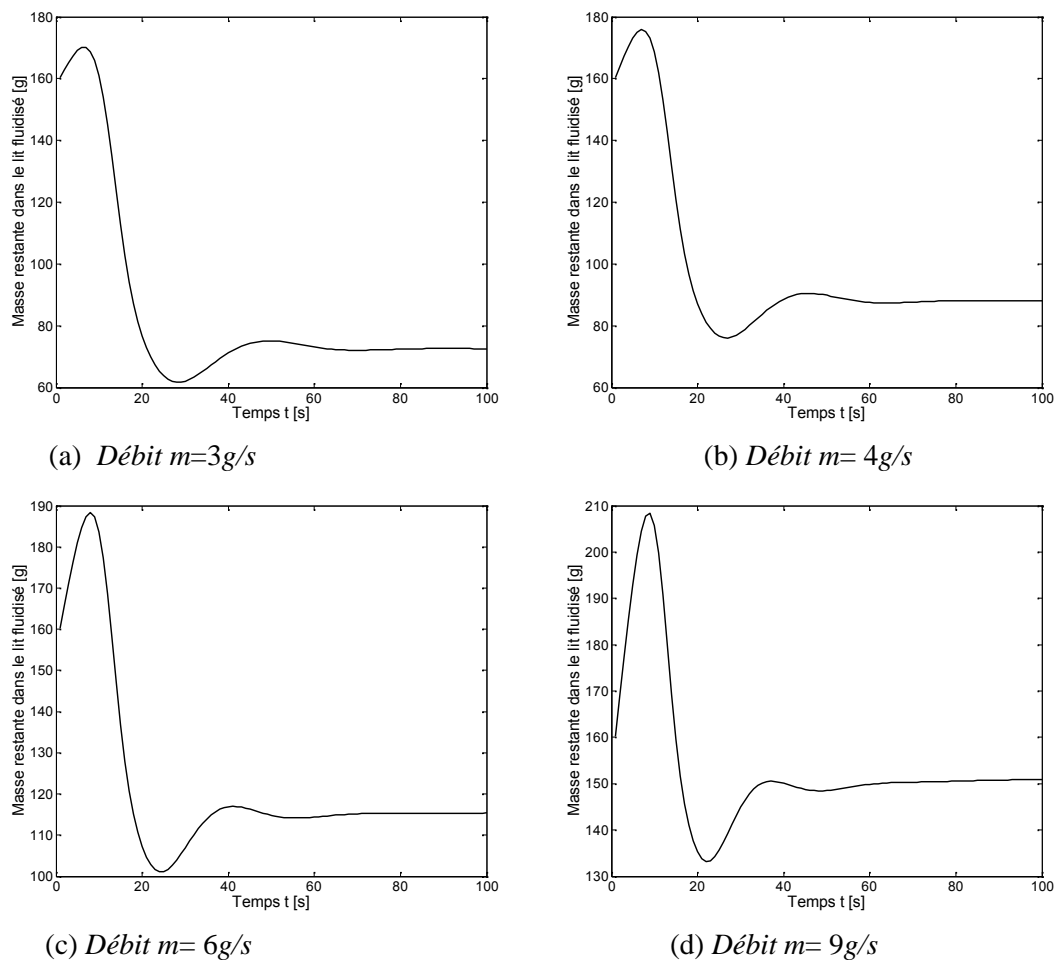


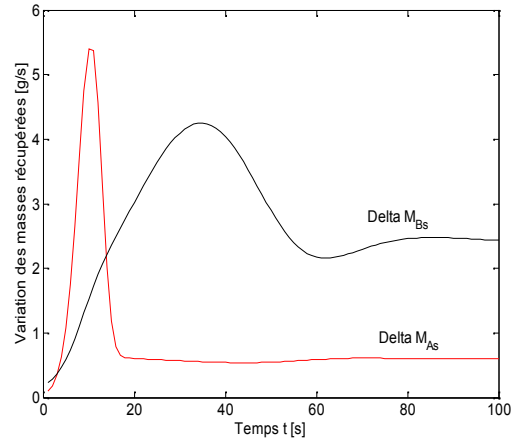
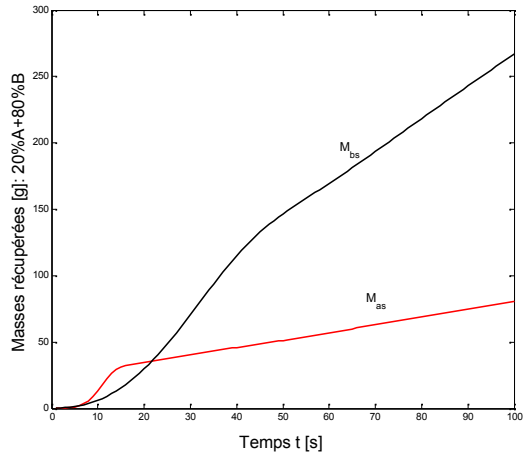
Figure 4.6: Evolution de la masse restante dans le lit fluidisé M :
 a) Débit $m=3\text{g/s}$; b) Débit $m=4\text{g/s}$; c) ; Débit $m=6\text{g/s}$; d) Débit $m=9\text{g/s}$.

Sur la figure 4.6 est représentée la variation de la masse de matière demeurant dans le lit fluidisé lorsque le facteur d'entrée est le flux de matières introduites. Une augmentation progressive de cette masse est observée jusqu'à une certaine valeur, après elle commence à décroître. A partir des figures 4.6 (a), (b) et (c), on peut noter que la valeur de la masse qui demeure dans la chambre triboélectrique varie entre la valeur minimale et la valeur maximale : par contre sur la figure 4.6 (d), la masse dépasse la valeur maximale. Les expériences ont également montré que le débit optimal pour le fonctionnement du dispositif triboélectrique devrait varier entre 3g/s et 6g/s. Par conséquent, il peut être spécifié le débit maximal d'entrée (environ 6g/s) pour lequel le séparateur fonctionne à paramètres nominaux.

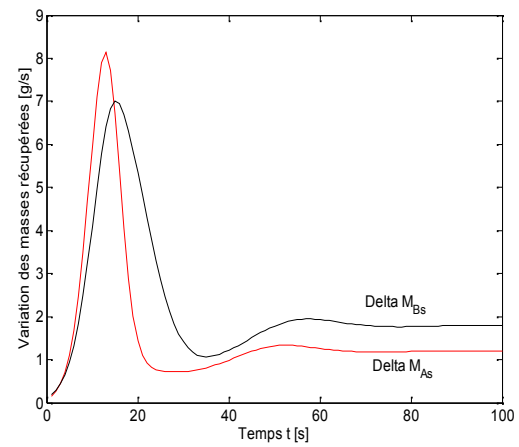
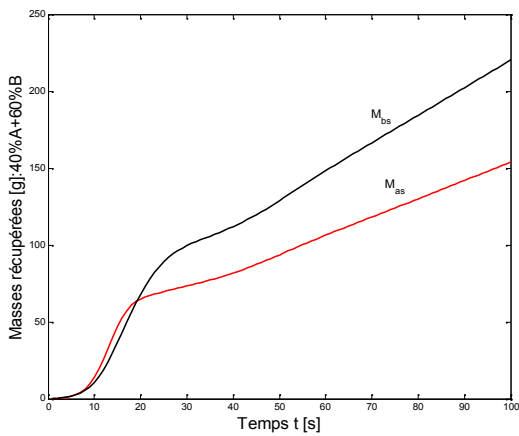
4.2.2 Effet de la composition du mélange

Le Processus de séparation électrostatique dépend de nombreux facteurs, dont certains ne peuvent pas être contrôlés (température, humidité et composition du mélange à séparer). Les simulations effectuées pour le régime continu ont montré la faisabilité et la validité du programme pour un mélange de 50% A+50% B (voir § 3.3.3). L'objectif de ce paragraphe est d'évaluer la faisabilité du processus de charge triboélectrique pour différentes compositions du mélange granulaire binaire ;

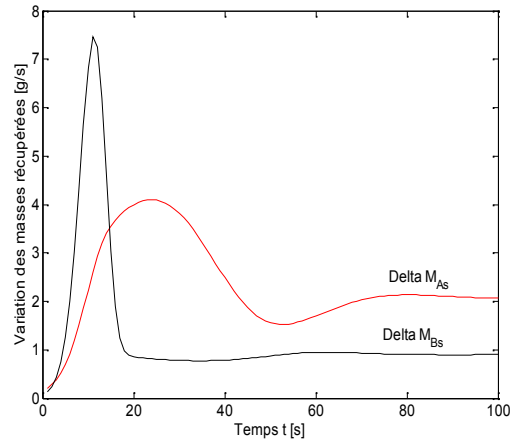
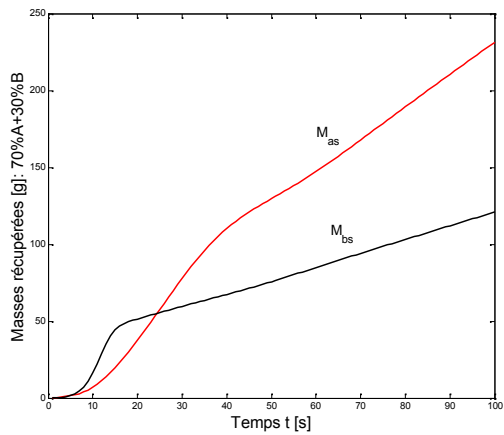
Pour cette étude, il a été appliqué l'algorithme présenté dans §3.2.3. Les calculs ont été exécutés à l'aide d'un programme écrit en MATLAB 7.0. L'étape d'itération est $t = 1s$, la masse initiale était $M_1 = 170$ g (avec $M_p = 20$ g). Les charges échangées entre les particules A ou B et la paroi sont respectivement $\alpha_A = 0.4$ et $\alpha_B = 0.6$. Cependant, pour la présente étude, on a supposé que les deux classes de particules ont des caractéristiques similaires. Le débit choisi de l'alimentation en matière était 3g/s. La figure 4.5 montre l'évolution de la masse récupérée en fonction de la concentration des mélanges granulaires. Plusieurs cas ont été analysés : 20% A+80%B, 40%A+60%B et 70%A+30%B.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.5: Evolution des masses séparées M_A , M_B et la variation instantanée M_{As} , M_{Bs}

a) 20% A+80%B ; b) 40%A+60%B et c) 70%A+30%B.

La figure 4.4 a) montre que les granulés de type A sont collectés à un rythme plus rapide que les granulés de B jusqu'à un temps $t=15s$, car elles sont minoritaires dans la composition du mélange granulaire. En effet, un granulé de B a une probabilité plus faible qu'un granulé de A d'entrer en collision avec un granulé de polarité opposée. Le processus de charge tribo-électrique est plus efficace pour les particules minoritaires qui acquièrent une charge suffisante pour qu'elles soient séparées. Au-delà de $t=15s$, les granulés de B sont collectés à une quantité plus grande que les granulés de A , cela est expliqué par le fait que le matériau A existe en petite quantité dans le lit fluidisé par rapport au matériau B .

La figure 4.4 c) montre que jusqu'à un temps $t=15s$ les granulés de type B sont collectés à un rythme plus rapide que les granulés de A vu qu'elles sont minoritaires et elles sont plus loin de la paroi par rapport aux granulés de A dans la série triboélectrique.

4.2.3 Effet de la concentration et du débit non contrôlés

Les mêmes simulations ont été refaites pour des concentrations et débit non contrôlés. La matière initiale introduite est de 160 g, la composition choisie du mélange de la matière initiale est la même composition de flux du mélange. Les charges échangées entre les particules A ou B et la paroi sont respectivement $A=0.4$ et $B=0.6$. Pour une première simulation la composition du mélange reste la même pour toute la durée de séparation par contre le débit de la matière introduite est varié sur toute la période.

Les figures 4.7 et 4.8 montrent respectivement l'évolution de la masse qui demeure dans la chambre triboélectrique pour les variations non contrôlées de débit et concentration.

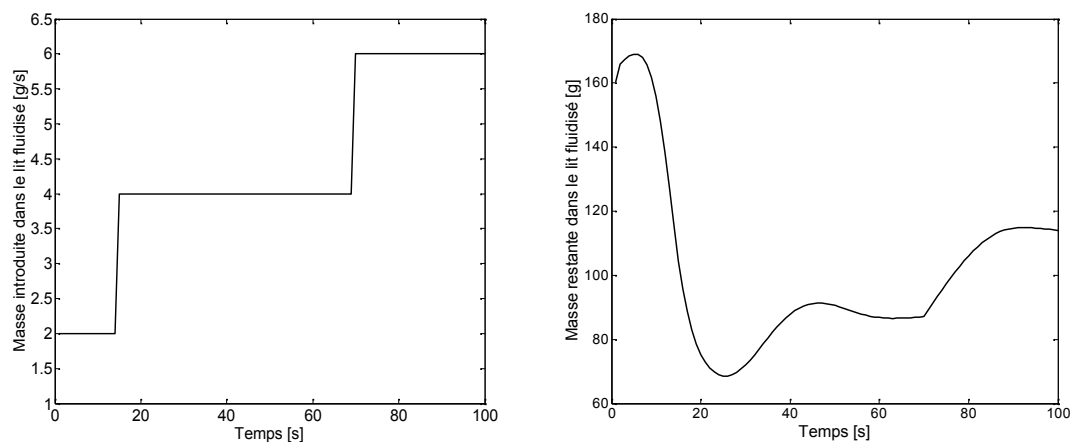


Figure 4.7: Evolution de la masse introduite et la masse et la masse. Pour la deuxième étape, dans la composition du mélange de flux pendant toute la durée de séparation, alors que le débit de la matière introduite varie selon la figure précédente.

Les figures 4.7 et 4.8 représentent une légère perturbation de la masse au début de simulation mais qui n'influe pas sur le fonctionnement. Il est recommandé de commencer par des petites valeurs de débit pour assurer le bon fonctionnement du dispositif.

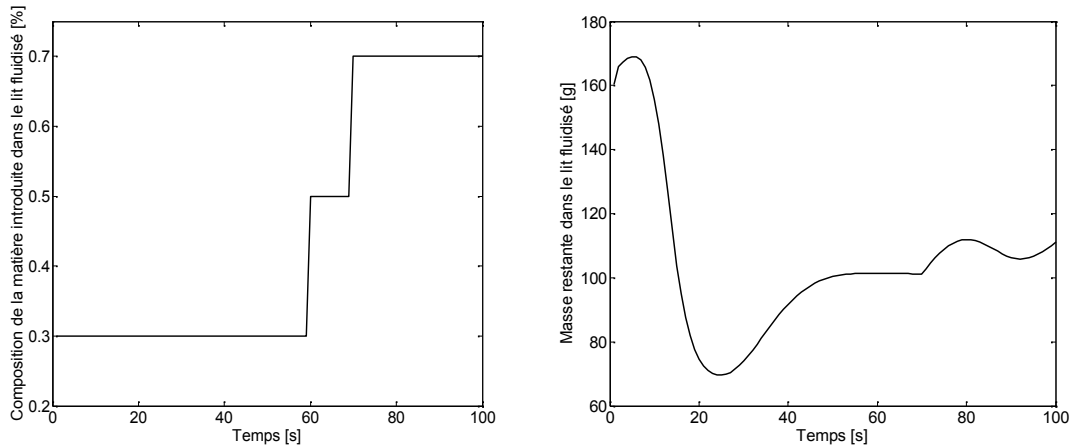


Figure 4.8: Evolution de la masse introduite et la masse et la masse restante dans le lit fluidisé M en fonction de la concentration du mélange

Pour une récupération plus grande des mélanges granulaires, il est nécessaire d'utiliser une concentration plus équilibrée.

4.3 Simulation du régime de fonctionnement continu en boucle fermée

Le résultat de tout processus de séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules. Ceci dépend de plusieurs facteurs qui ne peuvent pas être contrôlés (concentration, débit de matière et la masse maximale dans le lit fluidisé). Afin de trouver des solutions techniques essentielles à la séparation triboélectrique en mode continu d'un processus de charge en lit fluidisé, l'algorithme de calcul doit être modifié. L'objectif de ce paragraphe est d'élaborer l'algorithme de calcul du processus triboélectrique en régime continu avec une boucle fermée d'alimentation en matière. Ce calcul consiste à introduire à chaque pas une masse de matière introduite égale à la masse de matière sortie du lit fluidisé au pas précédent.

La mesure du débit de matière en sortie pourra se faire en pesant les produits collectés après leur récupération dans les collecteurs (la somme des produits collectés dans les deux collecteurs).

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

$$m_e = dM_e/dt = m = dM/dt \quad (4-1)$$

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

$$m_s = dM_s/dt = m \quad (4-2)$$

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

$$m_{eA} = cm \text{ et } m_{eB} = (1 - c)m \quad (4-3)$$

Avec $c = 0,5$; ainsi :

$$m_{eA} + m_{eB} = m.$$

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.

Les probabilités pour des particules de type A et B de subir des collisions entraînant une modification de la charge sont respectivement :

$$P_A = P(X_{AB}) = P(1 - c)N \quad (4-4)$$

$$P_B = P(X_{BA}) = P(c)N \quad (4-5)$$

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

$$P(X_{AB} - X) = ((x_{AB} - x_{ABav})/s_{xAB}) \quad (4-6)$$

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 $N_{BA} - X$ collisions, afin de pouvoir être collectée à l'électrode de polarité opposé, s'exprime comme :

$$P(X_{BA} - X) = ((x_{BA} - x_{BAav})/s_{xBA}) \quad (4-7)$$

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 :

$$dM_{As}/dt = P(N_{AB} - X)M_A = [((x_{AB} - x_{ABav})/s_{xAB})] cM \quad (4-8)$$

$$dM_{Bs}/dt = P(N_{BA} - X)M_B = [((x_{BA} - x_{BAav})/s_{xBA})](1 - c)M \quad (4-9)$$

Dans cette méthode le débit dépend de la masse récupérée. La masse dans le lit fluidisé reste constante car la masse de débit d'entrée est égale à la masse de sortie du séparateur, ce qui conduit à un lit constant et un fonctionnement stable sans l'effet de la masse limite. Il reste à étudier la composition de la matière dans le lit fluidisé, dans ce cas deux cas sont envisagés : la première boucle est à composition du lit variable, la deuxième est à composition du lit constante.

4.3.1 Effet de la composition du mélange dans le lit fluidisé

Le lit fluidisé doit contenir initialement la quantité $M(0)$ jugée nécessaire au bon fonctionnement de l'installation. Afin de pouvoir être introduite dans un processus industriel, l'installation de séparation doit fonctionner en régime continu. C'est ainsi que plusieurs cas ont été imaginés pour simuler ce flux continu industriel (§3.3.1.1 et § 3.3.1.1).

4.3.1.1 Boucle 1 : Composition variable

Les expériences et les simulations qui ont été réalisées dans le chapitre 2 et 3 sur le séparateur à faible débit ont montré que pour assurer le bon fonctionnement du dispositif, le débit de matière introduite dans le séparateur doit varier entre 3g/s et 6g/s pour éviter la contrainte de la masse limite inférieure et supérieure dans le lit fluidisé. Dans ce cas le fonctionnement est limité. Pour faire face à cette contrainte, une modification sur l'algorithme a été apportée. Le débit de matière à l'entrée doit être égal à la masse récupérée à la sortie de l'installation:

$$m_e(t) = m_s(t) \quad (4-10)$$

A partir des équations (4-8) et (4-9), la somme des deux masses collectées dans les collecteurs est donnée par l'équation suivante :

$$dM/dt = dM_{As}/dt + dM_{Bs}/dt \quad (4-11)$$

La masse du débit introduite dans le dispositif est calculée par :

$$m_{Ae}(t) = (dM/dt) * c$$

$$m_{Be}(t) = (dM/dt) * (1 - c)$$

$$m_e(t) = m_{Ae}(t) + m_{Be}(t) \quad (4-12)$$

La masse instantanée de la matière dans le lit fluidisé $M(t+1)$ est exprimée par la somme de la masse du pas précédent et la masse introduite dans le dispositif :

$$M(t+1) = M(t) - dM/dt + m(t) \quad (4-13)$$

Comme $m(t) = dM/dt$

$$\text{Alors : } M(t+1) = M(t) \quad (4-14)$$

La concentration instantanée $c'(t)$ de la matière restante dans le lit s'exprime par :

$$c'(t) = M_A(t) / M(t) \quad (4-15)$$

Pour ces simulations, les mêmes caractéristiques triboélectriques ont été considérées, les charges échangées entre les particules A ou B et la paroi sont respectivement $\alpha_A=0.4$ et $\alpha_B=0.6$. La masse initiale du mélange introduite dans le lit fluidisé était de 160g avec différentes valeurs de la composition de matière introduite en continu. Les valeurs de la concentration de la matière introduite (débit) sont 20%A+80%B, 40%A+60%B et 70%A+30A.

La figure 4.9 montre l'évolution des variations des produits récupérés par rapport au temps et la concentration de la matière demeurant dans la chambre triboélectrique.

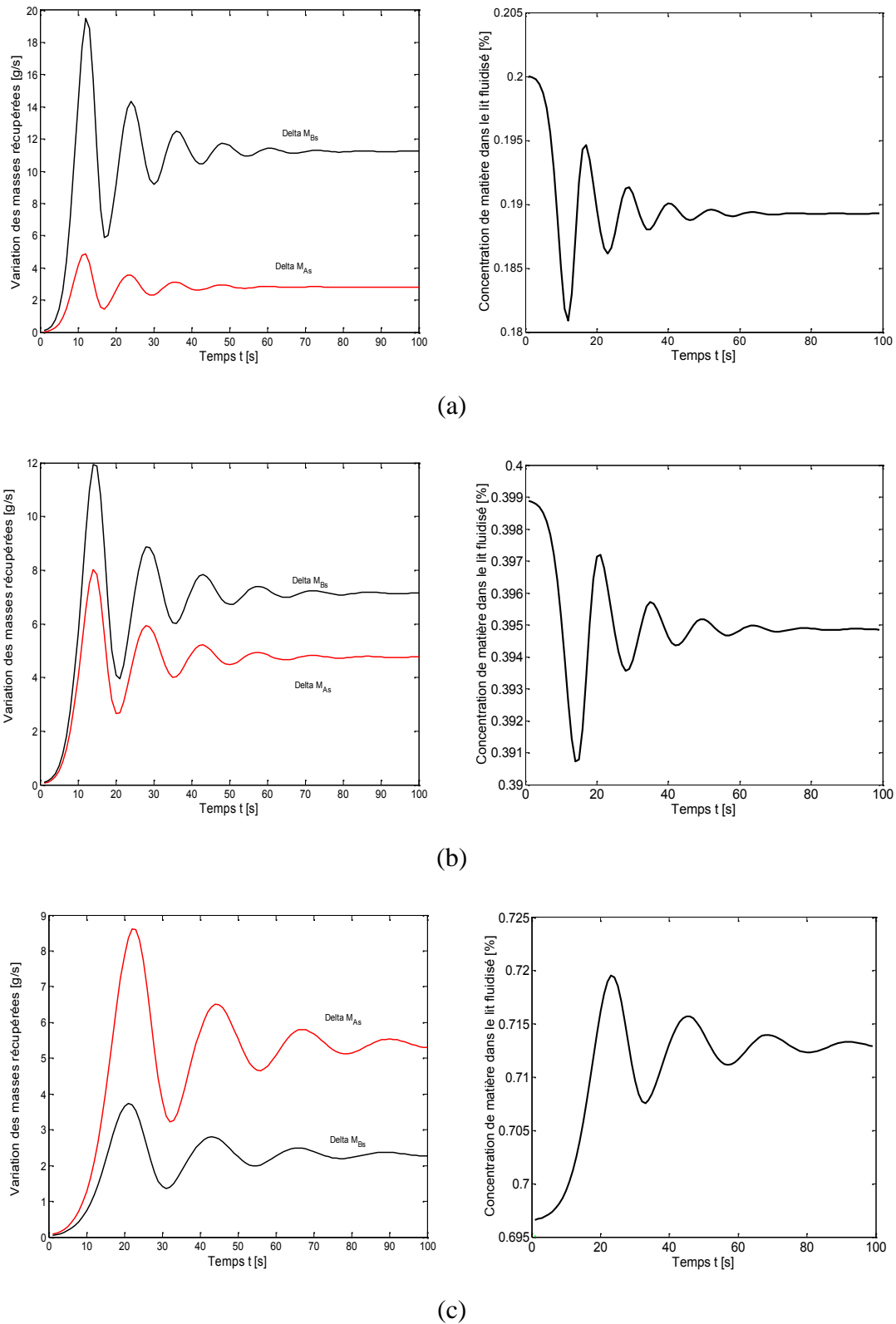


Figure 4.9: Evolution des variations M_{As} , M_{Bs} et la concentration du lit fluidisé c' :

a) 20% A+80%B ; b) 40%A+60%B et c) 70%A+30%B.

La figure 4.9 représente une perturbation de variation de la masse récupérée, jusqu'à un temps de simulation de 40s pour le cas (a), 60s pour le cas (b) et plus pour le cas (c). Cette perturbation n'est pas gênante, car la masse de produit dans le lit fluidisé reste constante.

Afin d'obtenir une récupération plus grande des mélanges granulaires, il est nécessaire d'utiliser une concentration équilibrée. Ce qui conduit à réfléchir à une autre boucle à concentration du lit fluidisé constante (§ 4.3.1.2).

4.3.1.2 Boucle 2 : Composition constante

Le domaine d'utilisation du dispositif étudié précédemment (à faible débit) reste limité. Pour ce qui suit c'est le principe du dispositif industriel qui sera utilisé. 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 $k < 1$, afin que la condition suivante soit respectée :

$$k (dM_{As}/dt)/(dM_{Bs}/dt) = c/(1 - c) \quad (4-16)$$

Compte tenu des relations (4-8) et (4-9), la constante k peut s'exprimer comme suit :

$$k = [\Pi((X - N_{BA})/\sigma_{BA})]/[\Pi((X - N_{AB})/\sigma_{AB})] \quad (4-17)$$

Les valeurs de $\Pi((X - N_{BA})/\sigma_{BA})$ et de $\Pi((X - N_{AB})/\sigma_{AB})$ 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 4.10. 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 :

$$k [dM_{A0}/dt] = dM_A/dt \quad (4-18)$$

Pour que la concentration reste constante, la relation entre les particules séparées est définie par :

$$dM_{A0}/dt = [c/(1-c)] (dM_B/dt) \quad (4-19)$$

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

$$m_e = (dM_{A0}/dt) + (dM_B/dt) \quad (4-20)$$

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.

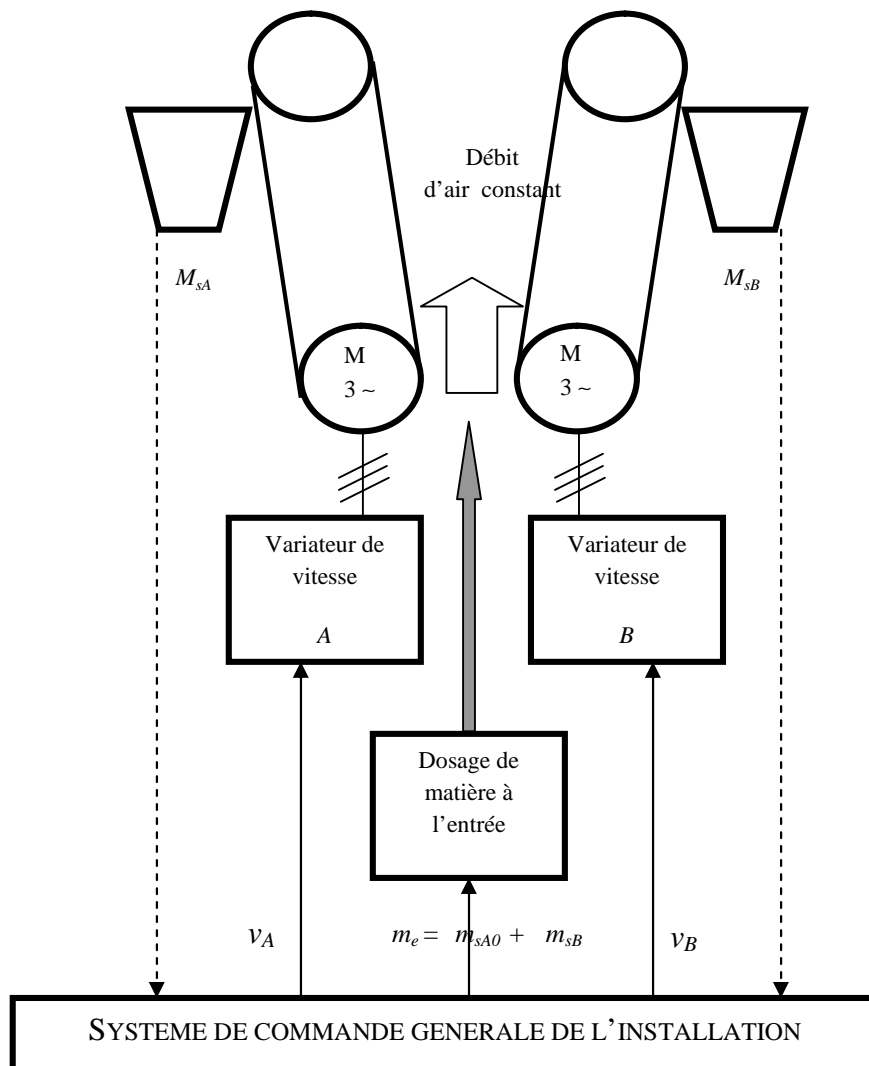
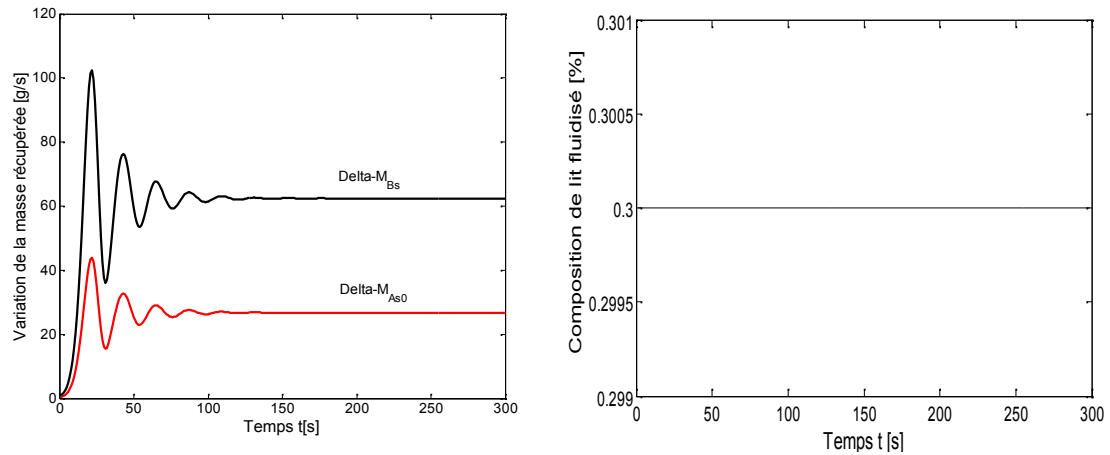


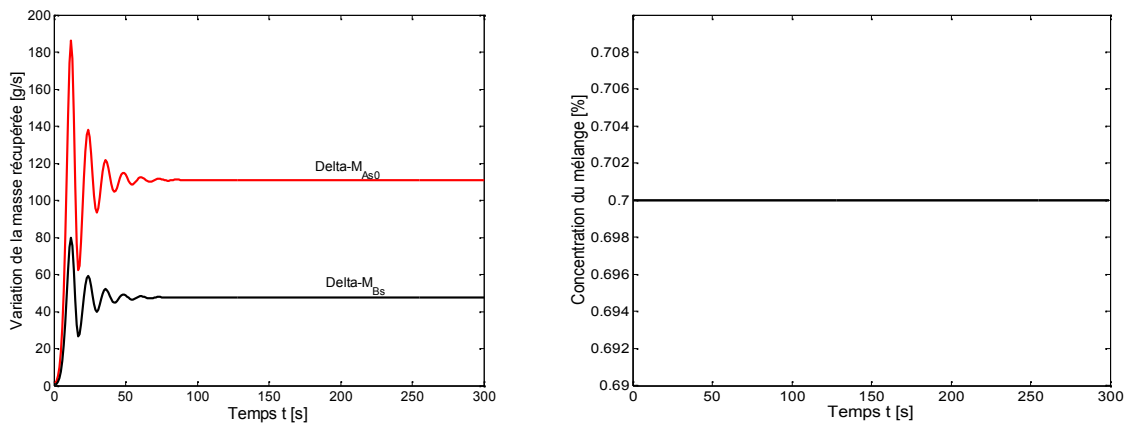
Figure 4.10: Schéma de principe de la commande de l'installation industrielle

Le fonctionnement du dispositif a été vérifié par l'algorithme développé dans le §3.2.3. Dans le but d'examiner le programme écrit sur MATLAB 7.0, quelques résultats de simulation ont été relevés. Les calculs ont été effectués avec caractéristiques tribo-électriques différentes des particules. L'étape d'itération est $t=1s$, la masse initiale a été prise $M_1 = 2kg$ (avec $M_P = 200 g$). Les charges échangées entre les particules A ou B et la paroi sont respectivement $A=0.6$ et $B=0.4$.

La figure 4.9 montre l'évolution des variations des produits récupérés par rapport au temps et la concentration de la matière demeurant dans la chambre triboélectrique.



(a)



(b)

Figure 4.11: Evolution des variations M_{As} , M_{Bs} et la concentration du lit fluidisé c' :

a) $c=30\%$ et b) $c=70\%$.

Sur les graphes de la figure 4.11 (b), il est remarqué que les particules de type A se séparent plus rapidement et à des quantités plus grandes par rapport aux particules de type B (Figure 4.11 (a)), malgré la même composition des particules B dans le mélange (a) et des particules A dans le mélange (b). Cela est expliqué par le fait que les particules B sont plus proches à la paroi sur la série triboélectrique par rapport aux particules A. Le système est stable.

Conclusion

Les résultats de simulation présentés dans ce chapitre ont été obtenus par le développement de l'algorithme décrit au chapitre 3. Les résultats ont illustré que le fonctionnement du séparateur dépend de la composition du mélange, du débit introduit instantanément et du matériau utilisé pour les parois. Les particules minoritaires se chargent plus rapidement et sont facilement séparées du mélange. L'effet de la paroi dépend de la position de sa matière dans la série triboélectrique par rapport aux matériaux à séparer. Pour assurer un fonctionnement continu il est nécessaire de développer une boucle de contrôle qui relie les paramètres de sortie avec les paramètres d'entrée.

Après cette étude, il reste plusieurs difficultés à résoudre, les plus essentielles sont:

- ✓ Valid
er les résultats de simulation par des expériences sur le modèle industriel.
- ✓ Détail
ler 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 qui ont été conçus et mis au point, ainsi que les résultats des simulations numériques qui ont été obtenus sur la tribo-électrisation en lit fluidisé des matériaux plastiques et sur la séparation tribo-aéro-électrostatique des mélanges de polymères.

Les résultats des calculs numériques ont montré que le fonctionnement d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique peut être prédit avec précision par la simulation numérique, basée sur un modèle mathématique simple. Le fonctionnement du séparateur dépend de la composition du mélange, du débit introduit instantanément et du matériau utilisé pour les parois. Les particules minoritaires se chargent plus rapidement et sont facilement séparées du mélange. La charge triboélectrique en lit fluidisé, est un procédé efficace de récupération des principaux matériaux thermoplastes provenant des équipements électriques et électroniques en fin de cycle de vie.

a. Les principales contributions originales

- ✓ Identification des problèmes scientifiques et techniques à résoudre dans le domaine de la séparation tribo électrostatique des mélanges des matériaux plastiques provenant des équipements informatiques.
- ✓ Evaluation des facteurs influents du processus de charge triboélectrique des matériaux granulaires dans des installations de séparateur ribo-aéro -électrostatique.
- ✓ Analyse des phénomènes physiques en lit fluidisé et adaptation de certains concepts à la fluidisation des matériaux plastiques granulaires.
- ✓ essais expérimentaux sur le séparateur à faible débit et le séparateur industriel 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, orthogonal à la direction d'écoulement de l'air de fluidisation, afin de valider un concept d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique.

- ✓ Modélisation de la tribo-électrisation des granules de matériaux plastiques vierges de polyamide (PA), polycarbonate (PC) en lit fluidisé, par la méthode des plans d'expériences, en utilisant le logiciel MODDE 5.0.
- ✓ Elaboration d'un modèle mathématique qui assure le fonctionnement continu du processus de séparation tribo-aéro-électrostatique des mélanges binaires pour diverses concentrations des constituants.
- ✓ Etude de l'effet des parois du séparateur tribo-aéro-électrostatique sur la charge triboélectrique des matériaux plastiques.

b. Perspectives de recherche

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 tribo-électrisation en lit fluidisé :

- ✓ 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.
- ✓ Modéliser le processus de séparation tribo-aéro-électrostatique d'un mélange constituant plus de deux matériaux.
- ✓ Amélioration 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] Rapport Technique ERA Technologie « rapport de synthèse sur la récupération électrostatique des emballages plastiques et papier » ERA Technologie LTD 2000.
- [2] Lucian Descalescu « Introduction to ionized gases, theory and application » TOYOHASHI university technology, 1993
- [3] Michel Aguet, Michel Ianoz « Traité d'électricité, Haute tension » publié sous la direction de Jacques Neiryck, Volume XXII, presse polytechnique et universitaires romandes [1982].
- [4] D.M Taylor, P.E. Secker «Industrial electrostatics fundamentals and measurements » RSP Edition England, 1994.
- [5] S. Trigwell, N. Grable, C.U. Yurteri, R.Sharma, M.Mazumder «Effects of Surface Properties on the Tribocharging Characteristics of Polymer Powder as Applied to Industrial Processes». IEEE, Transactions on Industry Applications, VOL. 39, NO. 1, January/February [2003].
- [6] Coste. J et pechery P «Influence of surface profile in polymer-metal contact charging» Journal Electrostatics May1981, Volume 10 pages 129-136.
- [7] Haenan H.T.M. «Experimental investigation of the relationship between generation and decay of charges on dielectrics». Journal Electrostatics, June 1976, Volume 2 pages 151-173.
- [8] Ohara.K “Contribution of molecular motion of polymer to frictional electrification” Journal Electrostatics May 1978 pages 249-256
- [9] E. Nemeth, V. Albercht, G. Schubert. F.Simon polymer tribo-elctric charging, dependence on thermodynamic surface properties and relation humidity Journal Electrostatics May 2003, Volume 58 pages 3-16.
- [10] Lowell J the electrification of polymer by metals Journal physiques Application physics 1978 Volume 9 pages 1571-1585.
- [11] C. Dragan « modélisation du processus de charge et séparation tribo-électrostatique de matériaux plastiques granulaires ». Thèse pour Obtention de grade de Docteur de l'université de Poitiers Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées.

- [12] M. Blajan, A. Samuila, V. Neamtu, R. Beleca, L. Caliap, D. Vadan, A. Iuga, and L. Dascalescu, "Experimental modelling of particle electrification in vibrated zigzag-shaped metallic tubes," in Proc. ESA/IEEE-IAS/IEJ/SFE Joint Conf. Electrostat., Jun. 6–9, 2006, pp. 538–543.
- [13] Blajan, M.; Umeda, A.; Muramatsu, S.; Shimizu, K.; Triboelectrification of Granular Plastic Wastes in Vibrated Zigzag-Shaped Square Pipes in View of Electrostatic Separation 01 novembre 2010 10.1109/IAS.2010.5614482
- [14] 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).
- [15] Higashiyama, Y., Ujiie, Y., Asano, K. "Triboelectrification of plastic particles on vibrating feeder laminated with a plastic film". Journal of Electrostatics. 42 (1-2), 63-68 (1997).
- [17] *** Association of Plastics Manufactures in Europe. "Insight into consumption and recovery in Western Europe 2000".
- [18] 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.
- [19] Bailey, A.G. "The charging of insulator surfaces". In: Journal of Electrostatics. 51-52, 82-90 (2001).
- [20] 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. Volume 44 N°4 (In press 2008).
- [21] 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).
- [22] Tilmatine. A, Medles. K, Younes. M, Bendaoud. A, Dascalescu. L. : « Roll-Type Versus Free-Fall Electrostatic Separation of Tribocharged Plastic Particles » Industry Applications, IEEE Transactions on Volume: 46 , Issue: 4 Digital Object Identifier: 10.1109/TIA.2010.2049553 , Publication Year: 2010.

- [23] 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).
- [24] 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.
- [25] Marc Séguin. « Electricité et magnétisme » Physique XXI Volume B. Edition de Boeck 2010.
- [26] 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).
- [27] Dascalescu, L. Fati, O, Bilici, M. Rahou, F Z. Dragan, C. Samuila, A. Iuga, A. « Factors that influence the efficiency of a fluidized-bed-type tribo-electrostatic separator for mixed granular plastics» 13th International Conference on Electrostatics. IOP Publishing, Journal of Physics: 2011.
- [28] Bilici, M. Dascalescu, L. Dragan, C. Fati, O. Iuga, A. Samuila, A. « Factors that influence the efficiency of a fluidized-bed-type tribo-electrostatic separator for mixed granular plastics » In IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, October 2011 1070-9878
- [29] Crowley, J.M. Fundamentals of Applied Electrostatics. Morgan Hill, California, Laplacian Press, 1999.
- [30] Kama, H., Kiyomura, Y., Seki, N. "Method and apparatus for feeding and carrying ground plastic and electrostatic separator for ground plastic". Matsushita Electric Co Ltd. Patent No: JP 2002 177 820, 2002.
- [31] 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.
- [32] Crawford, R.J. Plastic Engineering. London, Butterwoth Heinemann, 1998.
- [33] Jones, T.B., and King, J.L., Powder Handling and Electrostatics, Lewis Publishers, Chelsea, MI, 1991.

- [34] Higashiyama, Y., Asano, K. "Recent progress in electrostatic separation technology". In: *Particulate Science and Technology*, 16 (1), 77-90 (1998).
- [35] Hughes, J.F. *Electrostatic Particle Charging*. New York, Wiley, 1997.
- [36] *** *Encyclopedia of Chemical Technology*. Fourth Edition. A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, 1998.
- [37] 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).
- [38] Liu, C., Bard, A.J. "Electrons on dielectrics and contact electrification". In: *Chemical Physics Letter*, volume 480, issues 4-6, pp 145-156 (2009)
- [39] 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).
- [40] Mazumder, K., M. "Electrostatic Processes". In: *Wiley Encyclopedia of Electrical Electronics Engineering*. Volume 7. John Wiley&Sons, Inc., 1999 pp. 15-39.
- [41] Schein, L.B., Castle, G.S.P. "Triboelectricity". In: *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. John G. Webster (Editor). 22, 574-585.
- [42] Castle, G.S.P., Schein, L.B. "General model of sphere-sphere insulator contact electrification". In: *Journal of Electrostatics*. 36(2), 165-173 (1995).
- [43] Castle, G.S.P. "Contact charging between insulators". In: *Journal of Electrostatics*. 40-41, 13-20 (1997).
- [44] Medley, J.A., "Fractional Electrification of Polar Polymers". In: *Nature*, 171, 1077 (1953).
- [45] Diaz, A.F., "Contact electrification of materials: The chemistry of ions on polymer surfaces". In: *The Journal of Adhesion*, 67, 111 (1998)
- [46] Diaz, A.F., Guay, J., "Contact charging of organic materials: Ion vs. electron transfer". In: *IBM Journal of Research and Development*, 37, 249 (1993)
- [47] Lowell, J., Rose-Innes, A.C. "Contact electrification". In: *Advances in Physics*. 29, 947-1023 (1980).

- [48] Cundall, P.A., Strack, O.D.L., “A discrete numerical model for granular assemblies”. In: *Geotechnique*, 29:47–65, 1979.
- [49] Laurentie, J.C., Traoré, P., Dragan, C., Dascalescu, L. “Elaboration d’un modèle de charge électrostatique de matériaux granulaires dans des lits vibrants”. Proceedings of the 7th Conference of French Society of Electrostatics. Montpellier, France, August 30-31, September 1, 2010.
- [50] 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: *IEEE Transactions on Industry Applications*, 3 (10), 1884-1891, (1998).
- [51] Jean-Charles Laurentie. « Contribution à la modélisation numérique d’écoulement électro-fluido-dynamiques diphasiques tridimensionnels » Thèse pour l’obtention de grade de Docteur de l’Université de Poitiers. Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées. Décembre 2011.
- [52] Touchard, G., “Computation of charge and field in a metallic sphere-dielectric flat plate configuration”. In: *Journal of Electrostatics*, Volumes 40, 41, (1997).
- [53] Matsuyama, T., Yamamoto, H. “Impact charging of particulate materials”. In: *Chemical Engineering Science*. 61, 2230-2238 (2006).
- [54] Chul-Hyun Park , Ho-Seok Jeon , Jai-Koo Park, « PVC removal from mixed plastics by triboelectrostatic separation». *Journal of Hazardous Materials* (2007) 470–476.
- [55] 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).
- [56] 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”. *Journal of Electrostatics* 61, 259-268 (2004).
- [57] Inculet, I.I., Castle, G.S.P., Brown, J.D. “Electrostatic separation of mixed plastic waste”. US Patent No. 5 289 922, 1994.
- [58] Inculet, I.I., Castle, G.S.P. “Triboelectrification of commercial plastic in air”. In: *Institut Physics Conference Series*. 118, 217-222 (1991).

- [59] Laur Florentin CALIN. « Séparation électrostatique des matériaux plastiques provenant d'équipements informatiques, en utilisant la tribo-électrisation en lit fluidisé » Thèse pour l'obtention de grade Docteur de l'Université. Université de Poitiers. Le 20 juin 2008
- [60] Delavelle C., Fayolle D., Eyssen, R. "Caractérisation des plastiques contenus dans les DEEE et état des lieux de la valorisation des déchets plastiques". In: Rapport final. Etude réalisée par AJI-EUROPE pour le compte de l'ADEME No 0302C008, Juillet 2005.
- [61] Tarik hammi « Etude des méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles ». Thèse pour l'obtention de grade Docteur de l'Université. Université des Sciences et Technologies de Lille 06 Avril 2005.
- [62] Claude Menguy. « Électricité statique Principes. Problèmes. Applications ». Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D 1 035.
- [63] René Côté. « Électricité et magnétisme, notes de cours » (PHQ-229), janvier 2000. Département de physique, Faculté des Sciences, Université de Sherbrooke.
- [64] Bilici, M. ; Dascalescu, L. ; Barna, V. ; Gyorgy, T. ; Rahou, F. ; Samuila, A. « Experimental modeling of the tribo-aero-electrostatic separation of mixed granular plastics ». Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011 IEEE.
- [65] Jae-Keun Lee, Jin-Hyouk Shin « Triboelectrostatic separation of pvc materials from mixed plastics for waste plastic recycling » Korean Journal of Chemical Engineering March 2002, Volume 19, pp 267-272.
- [66] Jae-Keun Lee, Jin-Hyouk Shin « Design and Performance Evaluation of Triboelectrostatic Separation System for the Separation of PVC and PET Materials using a Fluidized Bed Tribocharger » Korean Journal of Chemical Engineering, May 2003, Volume 20, pp 572-579.
- [67] Nathan Duff and Daniel J. Lacks « Particle dynamics simulations of the effect of particle size distribution on triboelectric charging in granular insulator systems » Electrostatics. IOP Publishing, Journal of Physics: 2008.

- [68] Rahou, F.Z. ; Tilmatine, A. ; Bilici, M. ; Dascalescu, L. « Numerical Simulation of Tribo-Aero-Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids ». In IEEE Transactions, on Industry Applications, Volume: 48, 2012, Pages: 816 – 822.
- [69] Fatima Rahou. Amar Tilmatine. Mihai Bilici. Lucian Dascalescu « Numerical simulation of the continuous operation of a tribo-aero-electrostatic separator for mixed granular solids » Journal of Electrostatics, Elsevier 2013 (tom 71) 867-874.
- [70] G. Dodbiba, J. Sadaki, K. Okaya, A. Shibayama, T. Fujita «The use of air tabling and triboelectric separation for separating a mixture of three plastics» In Science Direct, Minerals Engineering 18 (2005) 1350–1360
- [71] 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).
- [72] Cangialosi, Federico; Notarnicola, Michele; Liberti, Lorenzo; Stencel, John M. « The effects of particle concentration and charge exchange on fly ash beneficiation with pneumatic triboelectrostatic separation». In Science Direct, Separation and Purification Technology; Volume 62, August 1, 2008. p. 240-248.

Annexe 1

La loi normale (ou loi de Laplace-Gauss ou loi de Gauss)

A1. 1 Les fondamentaux

La distribution normale est une distribution théorique, en ce sens qu'elle est une idéalisation mathématique qui ne se rencontre jamais *exactement* dans la nature. Mais de nombreuses distributions réellement observées s'en rapprochent et ont cette fameuse forme de « cloche » (beaucoup d'individus autour de la moyenne, de moins en moins au fur à mesure qu'on s'en éloigne, et ceci de façon symétrique). D'autre part, elle est très utilisée en statistiques.

a- Sa forme : la courbe en cloche

La loi normale de paramètres m et s , notée $N(m,s)$, est définie sur \mathbb{R} par la densité :

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{A.1})$$

Dont la représentation graphique est la suivante :

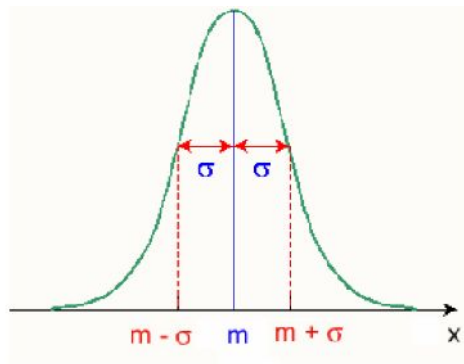


Figure A.1 Représentation graphique de la loi normale

Notons que : - la droite $x = m$ est axe de symétrie. Les points d'inflexion sont situés à une distance σ de cet axe de symétrie

b- Le théorème Central-limite

Si on fait la somme d'un très grand nombre de variables aléatoires de loi quelconque, cette somme suit approximativement une loi normale (en fait, sans rentrer dans le détail des hypothèses, il nous dit que la variable $X = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ tend à suivre une loi normale quand n tend vers l'infini). D'une part, cela nous permet de comprendre pourquoi autant de distributions observées dans la réalité ont approximativement cette forme de cloche : elles décrivent des phénomènes qui résultent.

D'autre part, cela nous permettra d'approcher beaucoup de lois par une loi normale, pour peu que la variable étudiée s'exprime comme une somme d'un grand nombre de variables indépendantes.

C'est le cas notamment de la variable binomiale (somme de n variables de Bernoulli indépendantes), dont la loi «tend à prendre la forme d'une cloche » quand n augmente.

Cela reste possible même quand on ne connaît pas loi des variables X_i . de l'addition d'un grand nombre de causes de fluctuation indépendantes

A1. 2 Espérance et variance

Soit X une valeur aléatoire qui suit la loi $N(m,s)$. Par raison de symétrie: $E(X) = m$ et on montre facilement que

$V(X) = s^2$, donc le paramètre correspond à l'écart-type.

Ainsi grâce à ses 2 paramètres, la loi normale permet de décrire des distributions de moyenne quelconque (on translate la courbe vers la gauche ou vers la droite), et de dispersion quelconque (on rapproche ou on écarte le point d'inflexion).

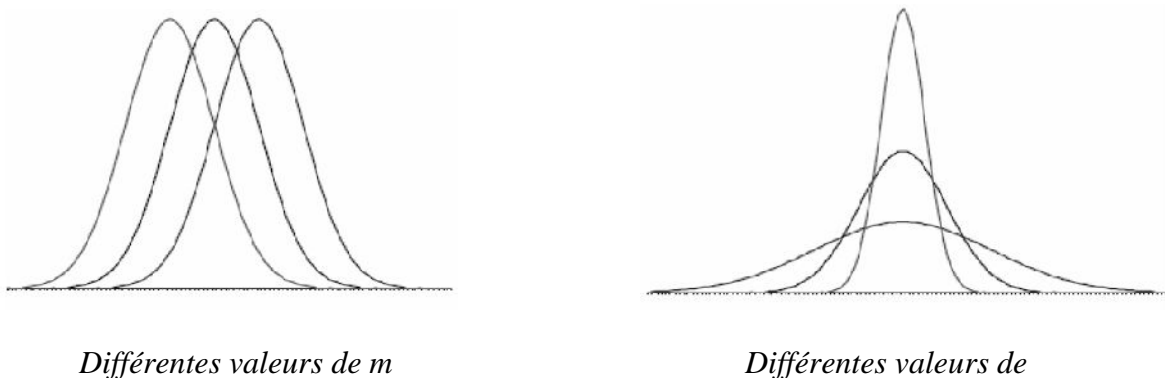


Figure A.2 Distribution normale pour différentes valeurs de m et

A1. 3 La loi normale centrée-réduite

Centrer et réduire une variable, c'est raisonner en nombre d'écart-types par rapport à la moyenne. Donc la densité de probabilité de la loi normale centrée-réduite $N(0,1)$ s'écrit :

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} x^2} \quad (\text{A.2})$$

Propriétés

$$p(0) = 0,5$$

$$p(-x) = 1 - p(x)$$

Annexe 2

Méthode des plans des expériences

Cette méthode permet la modélisation et l'optimisation d'un processus. Le comportement d'un système peut être défini par 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 A.3).

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.

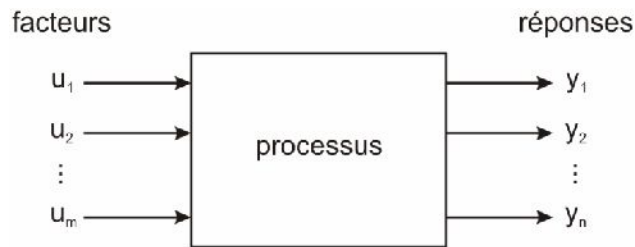


Figure A.3. : Représentation schématique d'un processus quelconque

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

$$y = c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ij} u_i^2, \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (\text{A.3})$$

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

$$x_i = \frac{(u_i - u_{i0})}{\Delta u_i} = u_i^* \quad (\text{A.4})$$

où

$$u_{i0} = \frac{(u_{i\max} + u_{i\min})}{2}; \quad \Delta u_i = \frac{(u_{i\max} - u_{i\min})}{2} \quad (\text{A.5})$$

La fonction de réponse devient :

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,i} x_i^2, \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (\text{A.6})$$

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

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 (Fig. A.4). 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.

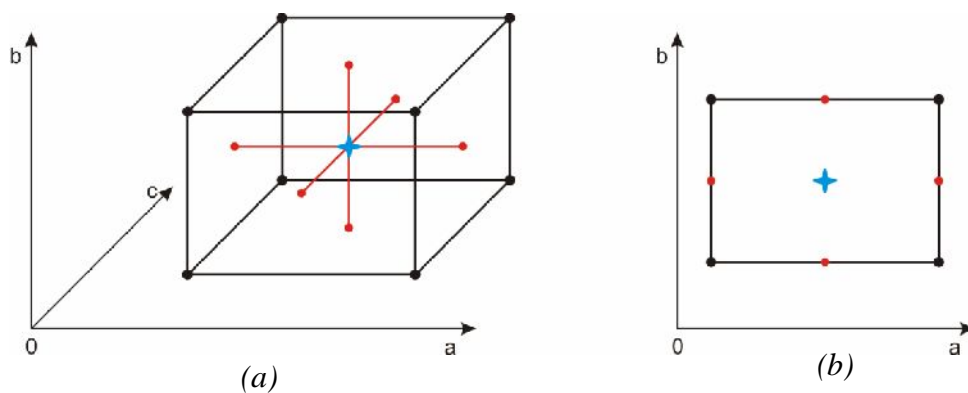


Figure A.4. : Représentation graphique des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences composite pour un domaine défini par 3 facteurs (a) ou 2 facteurs (b)

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 :

$$N = 2^k + 2 \cdot k + 3 \quad (\text{A.6})$$

Abstract

Numerical simulation has proved to be a powerful tool in the research and development of new electrostatic processes. In this work has been introduced a simple mathematical model for simulating the outcome of a tribo-aero-electrostatic separation process for binary mixtures of granular materials. The mathematical model assumed that the probability of a granule to be separated can be expressed as a function of the number of impacts with granules belonging to the other class of materials. The process is characterized by the fact that the charging of the granules is produced in a fluidized bed device, in the presence of an electric field. The aim of this study is to simulate the continuous operation of such a device at various feed rates. The evolution in time of the mass of granules collected at the electrodes has been computed for various compositions of the granular mixture. The effect of the walls and the presence of a third species of particles were taken into account. The computed results were in good agreement with the experiments. They demonstrate that open-loop continuous operation of the separator is possible for a range of feed-rates that depends on the composition of the materials to be separated.

Word keys : Electrostatic Separation, Granular Materials, Numerical Techniques, triboelectricity

Résumé

La simulation numérique s'est avérée être un outil puissant dans la recherche et le développement de nouveaux procédés électrostatiques. Dans ce travail il a été introduit un modèle mathématique pour simuler le résultat d'un processus tribo-aéro-électrostatique de séparation pour les mélanges binaires de matériaux granulaires. Le modèle mathématique suppose que la probabilité d'un granule à séparer peut être exprimée comme une fonction du nombre de chocs avec des granulés appartenant à l'autre classe de matériaux. Le procédé est caractérisé par le fait que le chargement des granulés est réalisée dans un appareil à lit fluidisé, en présence d'un champ électrique. Le but de cet étude est de simuler le fonctionnement continu d'un tel dispositif à différents débits d'alimentation. L'évolution dans le temps de la masse de granules recueillis sur les électrodes a été calculé pour les différentes compositions du mélange granulaire. L'effet des parois et de la présence d'une troisième espèce de particules ont été prises en compte. Les résultats calculés sont en bon accord avec les expériences. Ils démontrent que la boucle ouverte fonctionnement continu du séparateur est possible pour une plage de débit qui dépend de la composition des matières à séparer.

Mots clés : Séparation Electrostatique, Matériaux Granulaires, Techniques Numériques, Triboélectricité.

لقد ثبت ان التمثيل العددي هو أداة قوية في مجال البحث و تطوير عمليات الكهرباء الساكنة . في هذا العمل تم عرض نموذج رياضي لتمثيل عملية الفصل بواسطة الكهرباء الساكنة لمخاليط ثنائية من المواد الحبيبية العازلة. يفترض النموذج الرياضي أن احتمال انفصال حبيبية من المزيج يمكن التعبير بعدد من الاصطدامات مع حبيبات ينتمون إلى فئة أخرى من المواد . وتتميز هذه الطريقة في أن شحن الحبيبات يتم في جهاز مميح في وجود مجال كهربائي . والغرض من هذه الدراسة هو تمثيل العملية المستمرة في الجهاز في معدلات تغذية مختلفة. تم حساب تطور كتلة الحبيبات المنفصلة على الأقطاب لتركيبات مختلفة من الخليط المحبب . واتخذ تأثير الجدران و وجود نوع ثالث من الجسيمات بعين الاعتبار. اثبتت التجارب صحة النتائج المحسوبة. اثبتت النتائج أن العملية المستمرة في حلقة مفتوحة لفصل المواد تعتمد على تركيبة المواد الممزوجة.

: فصل بالكهرباء الساكنة ، مواد محببة، تقنيات رقمية، احتكاك كهربائي.

Abstract

Numerical simulation has proved to be a powerful tool in the research and development of new electrostatic processes. In this work has been introduced a simple mathematical model for simulating the outcome of a tribo-aero-electrostatic separation process for binary mixtures of granular materials. The mathematical model assumed that the probability of a granule to be separated can be expressed as a function of the number of impacts with granules belonging to the other class of materials. The process is characterized by the fact that the charging of the granules is produced in a fluidized bed device, in the presence of an electric field. The aim of this study is to simulate the continuous operation of such a device at various feed rates. The evolution in time of the mass of granules collected at the electrodes has been computed for various compositions of the granular mixture. The effect of the walls and the presence of a third species of particles were taken into account. The computed results were in good agreement with the experiments. They demonstrate that open-loop continuous operation of the separator is possible for a range of feed-rates that depends on the composition of the materials to be separated.

Word keys : Electrostatic Separation, Granular Materials, Numerical Techniques, triboelectricity