



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Université Djillali Liabès de Sidi Be Abbas

Faculté Génie Electrique

Département d'électrotechnique

MIMOUNI Chahinez

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en sciences

Option : Haute tension

Intitulé de thèse :

**Simulation Numérique Des procédés de Séparation Tribo-
Aéro-Electrostatique**

Présentée devant le jury composé de :

Président :	BRAHAMI Mostefa	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès
Directeur de thèse :	TILMATINE Amar	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès
Examineurs	HENNAD Ali	Professeur	UST. MB. Oran
	OUIDDIR Rabah	Professeur	UST. MB. Oran
	ZELMAT M. Elmouloud	MCA	UST. MB. Oran

2017-2018

Tables des matières

Remerciements	<i>i</i>
Table des notations	<i>iii</i>
Liste des figures et des tableaux	<i>v</i>
Résumé	<i>viii</i>
Abstract	<i>ix</i>
ملخص	<i>x</i>
Introduction Générale	2
<u>Chapitre I: Etat de l'art</u>	6
I.1. Notions d'électrostatique	6
I.1.1 Phénomène de charge	6
a) L'effet triboélectrique	7
b) Chargement par influence ou par induction	9
I.1.2. Triboélectricité du troisième corps tribologique	10
I.2. Recyclage des déchets plastiques	10
I.2.1. Les différents types de déchets	10
I.2.2. Définition d'un polymère	11
I.2.3. Différents types de polymères	11
I. 2. 3. 1. Les monomères	11
I. 2. 3. 2. Les polymères	11
I.2.4. Catégories de matières plastiques	12
I.2. 4. 1. Les thermoplastiques	12
a) Polyéthylène (PE)	13
b) Polypropylène (PP)	13
c) Chlorure de polyvinyle (PVC)	14
d) Polystyrène (PS)	14
e) Polyéthylène téréphtalate (PET)	15
f) Polyamide (PA)	15
I. 2. 4. 2 Les thermodurcissables	16
I. 2. 4. 3 Les élastomères	16
I. 2. 4. 4 Les bio-polymères	17
I.2.5 Production mondiale de matières plastiques en 2007	17
	18

I. 3. 1 Séparateur « classique » à chute libre	
I. 3. 2 Dispositif de séparation à faible débit	19
I. 3. 3 Séparateur électrostatique à deux étages	20
I. 3. 4 Séparateur tribo-aéro-électrostatique industriel	22
I. 3. 5 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à tapis roulant	23
I.4. Lits fluidisés	24
I.4.1. Fluidisation des matériaux granulaires	24
I.4.2. Forces aérodynamiques et électrostatiques	27
a. Forces de la pesanteur	27
b. Forces de LONDON – van der WAALS	28
c. Force de Coulomb	28
d. Cohésion due aux forces électrostatiques	29
e. Adhésion due aux forces électrostatiques	29
f. Forces aérodynamiques	30
Conclusion	31
Chapitre II: Procédure, Méthodologie et Résultats Expérimentaux	33
II.1 Charge triboélectrique d'un mélange ternaire dans un lit fluidisé à faible débit en régime intermittent	33
II.1.1. Installations expérimentales	33
II.2. Régime intermittent	35
II.2. 1. Description physique des matériaux granulaires	35
a) Polystyrène "choc" ou HIPS	36
b) Polypropylène (PP)	36
c) Polychlorure de vinyle	36
II.2.2. Etude des facteurs influents	37
II.2.2.1 Effet de la durée du processus de triboélectricité	37
II.2.2.2 Effet de la haute tension appliquée	41
II.2.2.3 Effet de la composition du mélange	43
a) Echantillon de mélange 60%HIPS + 30 % PVC +10% PP	43
b) Echantillon de mélange 60%HIPS + 30 % PVC +10% PP	44
II.3. Régime continu	45
II.3.1 Procédure expérimentale	45
II.3.2 Effet de la haute tension appliquée	47
II.3.3 Effet de la composition granulaire du mélange	48
II.3.4 Effet du débit de matière	50
II.4. Charge d'un mélange de trois matériaux plastiques granulaires dans un dispositif à lit fluidisé industriel en régime intermittent	51
Conclusion	52

Chapitre III: Elaboration des modèles numériques	54
III.1. Elaboration du modèle numérique pour un séparateur tribo-aéro-électrostatique à faible débit en régime intermittent	55
III.1.1. Equations de base	55
III. 1. 2. Algorithme de simulation	59
III.2. Elaboration du modèle numérique pour un séparateur tribo-aéro-électrostatique à faible débit en régime continu	62
III.2.1 Equations de base	62
III.2.2 Algorithmes de simulation	64
III.3. Elaboration d'un modèle numérique pour un séparateur tribo- aéro -électrostatique industriel	68
III. 3.1. Régime intermittent	69
III. 3.2. Régime continu	69
Conclusion	69
Chapitre IV: Simulation numérique de la séparation tribo-aéro-électrostatique d'un mélange granulaire ternaire	72
IV.1. Charge d'un mélange granulaire ternaire dans un dispositif à lit fluidisé à faible débit en régime intermittent	72
IV.1.1 Nature des matières à séparer	74
IV.1.2 Composition du mélange granulaire	74
IV.1.3 Effet des forces aérodynamiques	76
IV.2. Charge d'un mélange granulaire ternaire dans un dispositif à lit fluidisé à faible débit en régime continu	77
IV.2.1 Effet de parois	77
IV.2.2 Effet du débit	82
IV.2.3 Effet de la composition du mélange	84
IV.3. Charge d'un mélange granulaire ternaire dans un dispositif à lit fluidisé industriel en régime intermittent	86
IV.3.2 Nature du mélange granulaire	87
IV.3.3 Composition du mélange granulaire	88
Conclusion	90
Conclusion Générale et Perspectives	93
Références Bibliographiques	96

Remerciements

*Tout d'abord, je remercie le **Bon Dieu, Clément et Miséricordieux** de nous avoir aidés dans tous les cas et circonstances.*

*Il est à noter que cette thèse conclue cinq ans de travaux réalisés au sein du Laboratoire **APELEC** (Applications of Plasma, Electrostatics & Electromagnetic Compatibility Laboratory) de l'Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbes en collaboration avec le Laboratoire **Pprime**, de l'**IUT** d'Angoulême, (Université de Poitiers, France).*

*A cet effet, je tiens à remercier grandement mon Directeur de thèse, le Professeur **Amar TILMATINE** de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et de m'avoir su supporter et m'encourager durant toute cette période. Je tiens à lui exprimer ma gratitude pour ses conseils et son soutien, sa patience, sa disponibilité, sa générosité et sa grande compétence qui m'ont beaucoup aidé à surmonter les obstacles. Monsieur je vous suis très reconnaissante.*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur le Professeur **Lucian DESCALESCU** pour ces conseils qu'il m'a donnés. Sa disponibilité ainsi que son écoute ont constitué un soutien précieux pour moi. Il a souvent su orienter mes réflexions au cours des plusieurs discussions très enrichissantes et fructueuses, me faisant profiter d'une grande partie de l'avancement de cette thèse. J'adresse mes plus vifs remerciements à **M^{me} Fatima RAHOU** pour son aide précieuse, sa disponibilité et pour la sincérité de nos rapports.*

*Je voudrais remercier aussi le Professeur **Mostefa BRAHAMI** de l'Université, Djillali Liabès, Sidi Bel Abbes pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider cet honorable jury.*

*Je tiens à remercier les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à cet humble travail: Messieurs les Professeurs **Ali HENNAD, Rabah OUIDDIR** ainsi que le Docteur **Mohamed Elmouloud ZELMAT**(Maitre de Conférences-A) de l'université d'Oran, qui ont bien voulu mobiliser leur temps et leurs compétences pour consentir ce travail*

*Un grand merci à toutes les personnes qui travaillent au laboratoire **APELEC**, pour toute l'aide qui m'ont apportée pour réaliser ce travail. Je remercie beaucoup tous mes collègues et amies, pour leurs encouragements et leurs soutiens, qu'ils trouvent dans ce travail le témoignage de mon affection.*

A mes très chers parents lumières de ma vie.

*A mon très cher mari Mohamed que je lui suis très reconnaissante pour le soutien qu'il m'a
apporté.*

A mes adorables princesses : Yasmine, Wafaa et Iméne.

A mes chers frères et sœurs.

Table des notations

m_0	Masse molaire de l'unité de répétition
m	Masse molaire
x	Degré de polymérisation
u_{mf}	Vitesse minimale de fluidisation
u_t	Vitesse terminale de chute libre des particules
u_{mb}	Vitesse minime d'apparition des boules
Δp	La chute de pression
θ	Porosité du lit fluidisé
h	La hauteur du lit fluidisé
γ_p	Masse volumique du matériau plastique
γ_a	Masse volumique de l'air de fluidisation
F_A	Force d'Archimède
F_g	Force gravitationnelle
F_V	Force de Van Der WAALS
F_C	Force de Coulomb
F_a	Forces d'adhésion
F_i	Force d'inertie
F_{el}	Force électrique créée par un champ électrique uniforme
F_a	Force aérodynamique
E_0	Intensité du champ électrique
Y	Distance entre les électrodes.
v	Vitesse des particules
K	Coefficient de forme
W	Volume d'une particule
ρ_s	Densité d'une particule
ρ	Densité de l'air
C_d	Coefficient qui dépend du nombre de Reynolds
v_r	Vitesse relative d'une particule dans l'air.
A_t	L'aire de la section droite de la chambre de triboélectrisation
λ	Distance entre les centres de deux particules
Q_a et Q_b	Charges électriques des deux particules
ϵ_0	Permittivité du vide
A, B, C	Matériaux à séparer
p	Parois du lit fluidisé
c_A, c_B, c_C	Concentrations des matériaux A, B, C .
c_p	Concentration fictive des parois

$C_{air(A, B \text{ and } C)}$	Concentrations de A , B et C récupérées sous l'effet du courant d'air.
M	Masse totale à séparer.
M_A, M_B, M_C	Masses de A , B et C introduites dans le lit fluidisé
M_p	Masse fictive des parois
M_{As}, M_{Bs}, M_{Cs}	Masses séparées de A , B et C .
$M_{A(A)}$	Masses des granules A récupérées dans le collecteur A .
$M_{B(B)}$	Masses des granules B récupérées dans le collecteur B .
$M_{(A,B,C)s \text{ air}(A)}$	Masses séparées de A , B et C récupérées dans le collecteur A sous l'effet du courant d'air.
$M_{(A,B,C)s \text{ air}(B)}$	Masses séparées de A , B et C récupérés dans le collecteur B sous l'effet du courant d'air.
$M_{bac(-)}, M_{bac(+)}$	Masses totales collectées respectivement dans le collecteur A et le collecteur B .
$X_{AC(B)}$	Nombre de collisions équivalent utilisé pour calculer la masse de C récupérée dans le collecteur A
$X_{BC(A)}$	Nombre de collisions équivalent utilisé pour calculer la masse de C récupérée dans le collecteur B
$\lambda_{AC}, \lambda_{BC}$	La charge échangée entre un granule A (ou B) et C .
$\lambda_{CA}, \lambda_{CB}$	La charge échangée entre un granule C et (A ou B) .
$\lambda_{PA}, \lambda_{PB}, \lambda_{PC}$	La charge échangée entre la paroi P et (A, B ou C) .
N	Nombre de collision par unité de temps.
P	La fonction de probabilité.
Π	Fonction de distribution standard normale
PP	Polypropylène
PA	Polyamide
PVC	Poly- chlorure de vinyle
$HIPS$	Polystyrène à fort impact
X_A, X_B, X_C	Nombre de collisions.
x_A	Nombre normalisé de collisions A- (B et C) .
x_B	Nombre normalisé de collisions B- (A et C) .
x_C	Nombre normalisé de collisions C-(B et A) .
$S_{x(A,B,C)}$	Écart-type normalisé.
σ_x	Écart-type
$t_{50\%}$	Temps de séparation de 50% des granules A
P_A	Pureté du produit A .
P_B	Pureté du produit B .
d	Débit de matière introduite dans le lit fluidisé instantanément en régime continu.
av	Valeur moyenne.
e	Valeur estimée.
exp	Valeur Expérimentale.

Listes des figures et des tableaux

1. Listes des figures

Figure I.1	<i>Electrisation par frottement</i>	7
Figure I.2	<i>Série tribo-électrique qui combine différent séries de la littérature</i>	8
Figure I.2	<i>Influence entre deux corps (le corps B étant isolé)</i>	9
Figure I.4	<i>Influence entre deux corps (le corps B étant relié à la terre)</i>	9
Figure I.5	<i>Représentation d'un polymère (Polyéthylène)</i>	11
Figure I.6	<i>Consommation mondiale de matières plastiques en 2007</i>	18
Figure I.7	<i>Représentation schématique du procédé de séparation triboélectrique de chute libre</i>	19
Figure I.8	<i>Dispositif de tribo-électrisation à faible débit et électrodes verticales</i>	20
Figure I.9	<i>Photographie du séparateur à deux étages</i>	21
Figure I.10	<i>Séparateur tribo-électrostatique à lit fluidisé dit (séparateur industriel)</i>	23
Figure I.11	<i>Séparation tribo-aéro-électrostatique à tapis roulant</i>	24
Figure I.12	<i>Les régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation ; u_{mf} - vitesse minimale de fluidisation; u_{mb} - vitesse minimale d'apparition des boules ; u_t - vitesse de transport pneumatique</i>	24
Figure I.13	<i>Variation de la perte de pression Δp en fonction de la vitesse d'air u pendant les différentes étapes de la fluidisation des matériaux plastiques granulaires</i>	26
Figure I.14	<i>Diagramme Geldart pour les régimes de fluidisation des granules en fonction de leur densité et diamètre</i>	26
Figure I.15	<i>Phénomène physique derrière la force Van der Waals : polarisation électrique des atomes ou molécules neutres</i>	28
Figure I.16	<i>Représentation des différentes forces intervenant dans l'interaction particule-parois</i>	29
Figure II.1	<i>Dispositif de séparation à faible débit et électrodes verticales</i>	34
Figure II.2	<i>Banc expérimental pour l'étude de la charge des mélanges de trois matériaux plastiques dans un dispositif de séparation à faible débit et électrodes verticales ;1 : dispositif de séparation à faible débit et électrodes verticales ;2-3 : sources haute tension ;4-5 : Balances électroniques ;6 :électromètre.</i>	34
Figure II.3	<i>Aspect des granules du HIPS(a),du PP (b)et du PVC(c) appartenant à la classe granulométrique 1÷2 mm</i>	36
Figure II.4	<i>Masses récupérées dans les deux bacs en régime intermittent pour différentes valeurs de tensions, a) 28kV, b) 30kV, c)32kV. M initiale M=240g pour 33% HIPS+33%PVC +33%PP</i>	38
Figure II.5	<i>Variation du rapport Charge/masse (Q/m) en fonction de la tension en régime intermittent: a) 28kV, b) 30kV, c)32kV. M initiale M=240g pour 33% HIPS+33%PVC +33%PP.</i>	39
Figure II.6	<i>Valeurs de la masse récupérée après séparation (mélange 33% HIPS+33% PP+33%PVC, masse introduite dans le séparateur M=240g).</i>	41
Figure II.7	<i>Valeurs de la pureté de la masse récupérée pour le cas de 33% HIPS+33% PP+33%PVC, la masse introduite dans le séparateur M=240 g</i>	41

Figure II.8	Masses récupérées dans les deux bacs du collecteur. Masse initiale $M=240g$ pour 60% HIPS + 30 % PVC +10% PP	43
Figure II.9	Masses récupérées dans les deux bacs du collecteur en régime intermittent. Masse initiale $M=240g$ pour 30% HIPS + 60 % PVC +10% PP:	43
Figure II.10	Aspect des granules du PA (a) de PP (b) et de PVC (c) appartenant à la classe granulométrique 1÷2 mm.	44
Figure II.11	Séparateur tribo- aéro-électrostatique à électrodes plaques parallèles (en régime continu)	45
Figure II.12	Evolution des masses expérimentales séparées et récupérées dans les deux bacs du collecteur ,bac(-) (a) et bac(+)(b) en régime continu pour trois valeurs de la différence de potentiel.	46
Figure II.13	Evolution des masses expérimentales récupérées dans les deux bacs du collecteur en régime continu pour : a-30% PA + 60% de PVC+10% PP b- 60% PA + 30% de PVC+10% PP c-33% PA + 33% de PVC+33% PP d- 30% PA+ 30% de PVC+40% PP	48
Figure II.14	Masses expérimentales récupérées en régime continu pour différentes valeurs de débit D :5 [g/s] ;10[g/s] ;20 [g/s] a-bac(+); b-bac(-)	49
Figure IV.1	Série triboélectrique montrant les positions de A, B e tC	72
Figure IV.2	Evolution des masses estimées récupérées dans les deux bacs du collecteur en régime intermittent pour a) $x_{av}=12$;$s_x=6$; b) $x_{av}=24$;$s_x=12$	73
Figure IV.3	Evolution des masses récupérées dans les deux bacs du collecteur en régime intermittent pour un mélange granulaire qui se compose :a) 60% A+ 30 % B +10% C ; b) 30%A + 60 % B +10% C	74
Figure IV.4	Evolution des masses récupérée dans les deux bacs du collecteur pour différent c_{air} en régime intermittent a) $c_{airA}=2\%$; $c_{airB}=2\%$; $c_{airC}=2\%$; b) $c_{airA}=5\%$; $c_{airB}=5\%$; $c_{airC}=5\%$	75
Figure IV.5	Série triboélectrique montrant les positions de A,B etC par rapport à la paroi P en régime continu	77
Figure IV.6	Evolution des masses estimées récupérées $M_{bac(-)}$, $M_{bac(+)}$ et des variations instantanées $\Delta M_{bac(-)}$, $\Delta M_{bac(+)}$ en régime continu pour : a) $\lambda_{PA}=0,2$; $\lambda_{PB}=0,6$ et $\lambda_{PC}=0,2$ b) $\lambda_{PA}=0,8$ $\lambda_{PB}=0,1$ et $\lambda_{PC}=0,1$ c) $\lambda_{PA}=1,2$; $\lambda_{PB}=0,2$ et $\lambda_{PC}=-0,4$ d) $\lambda_{PA}=0,2$ $\lambda_{PB}=1,2$ et $\lambda_{PC}=-0,4$	79
Figure IV.7	Evolution des masses estimées et la variation des masses récupérées estimées en régime continu pour : a) Débit $d=5g/s$; b) Débit $d=10g/s$; c) Débit $d=20 g/s$; c) Débit $d=25 g/s$	82
Figure IV.8	Evolution des masses estimées et des variations des masses estimées en régime continu pour : a) 60% A+ 30 % B +10% C b) 30%A + 60 % B +10% C c) 50% A+20% B+30% C d) 33% A + 33% B+33% C	84
Figure IV.9	Evolution des masses récupérée dans les deux bacs du collecteur du lit fluidisé industriel pour : a) $\lambda_{AC}=0,6$; $\lambda_{BC}=0,4$ b) $\lambda_{AC}=0,4$; $\lambda_{BC}=0,6$	86
Figure IV. 10	Evolution des masses estimées récupérées dans les deux bacs du collecteur d'un lit fluidisé industriel pour un mélange granulaire qui se compose : a) 33% A+ 33 % B +33% C b) 20%A + 50 % B +30% C c) 50% A+ 30 % B +20% C d) 20% A + 30 % B +50% C	88

2. Listes des tableaux

Tableau II.1	<i>Caractéristiques des matériaux plastiques granulaires vierges utilisés dans les expériences de charge par effet tribo-électrique en régime intermittent.</i>	37
Tableau II.2	<i>Résultats expérimentaux obtenus en fonction du temps t pour 3 valeurs de tension U pour de 33% HIPS+33% PP+33%PVC</i>	37
Tableau II.3	<i>Résultats expérimentaux préliminaires du dispositif à faible débit</i>	40
Tableau II.4	<i>Caractéristiques des matériaux plastiques granulaires vierges utilisés dans les expériences de charge par effet tribo-électrique en régime continu</i>	45
Tableau II.5	<i>Pureté des matériaux séparés pour différentes valeurs de la différence de potentiel entre les électrodes</i>	47
Tableau II.6	<i>Masses et pureté du PVC et du HIPS récupérés pour une masse de mélange granulaire de 3Kg.</i>	50

Résumé

Les simulations numériques permettent d'identifier quels sont les paramètres clés d'un procédé lors de sa conception, de son amélioration ou de son optimisation. Elles ne remplaceront pas complètement les essais expérimentaux mais peuvent permettre de mieux les cibler afin d'en réduire leur coût. L'objectif du présent travail est de simuler le fonctionnement intermittent et continu d'un processus de séparation tribo-aéro-électrostatique pour un mélange de trois matériaux granulaires par le développement d'un modèle mathématique simple. On supposait que la probabilité d'une séparation des granules peut être exprimée en utilisant la loi de distribution normale, en fonction du nombre d'impacts avec des granules appartenant à l' autres classes de matériaux ou avec les paroi du dispositif. L'effet de la présence d'une troisième espèce de particules a été pris en compte. Ainsi, il a été possible de calculer l'évolution dans le temps de la masse des granules séparés aux électrodes pour différentes compositions du mélange granulaire. Les résultats obtenus sont en accord avec les expériences.

Mots clés :Séparation électrostatique - Mélange de trois matériaux granulaires - simulation numérique - Triboélectricité.

Abstract

Numerical simulations identify the key parameters of a process when designing, improving or optimizing it. They will not completely replace the experimental trials, but can better target them in order to reduce their cost. The objective of this work is to simulate the intermittent and continuous operation of a tribo-aero-electrostatic separation process for a mixture of three granular materials by the development of a simple mathematical model, A separation of the granules can be expressed using the law of normal distribution as a function of the number of impacts with granules belonging to the other classes of materials or with the wall of the device. The effect of the presence of a third species of particles was taken into account. Thus, it was possible to calculate the time evolution of the mass of the separated granules at the electrodes for different compositions of the granular mixture. The results obtained are in agreement with the experiments.

Keywords: Electrostatic separation- Ternary granular materials -numerical simulation- Triboelectricity.

ملخص

المحاكاة العددية تحدد ما هي المعايير الرئيسية لجهاز أثناء تصميمه أو تحسينه, فإنها لن تحل تماما محل العمليات التجريبية ولكن قد تسمح باستهدافها أكثر من أجل الحد من تكلفتها. الهدف من هذا العمل هو محاكاة جهاز لعملية فصل التريبو كهر وهوائي في النظامين (المتقطع والمستمرة) لخليط متكون من ثلاثة مواد بلاستيكية, من خلال تطوير نموذج حسابي بسيط. لذلك افترضنا أن احتمال انفصال الحبيبات البلاستيكية يمكن التعبير عنه باستخدام التوزيع الطبيعي, اعتمادا على عدد صدماتها مع حبيبات من فئة أخرى أو مع جدار الجهاز. أخذنا بعين الاعتبار تأثير وجود النوع ثالث من الجسيمات على عملية فصل التريبو كهر وهوائي, لذلك كان من الممكن حساب تطور كتلة الحبيبات البلاستيكية لمفصلة بدلالة الزمن لتركيبات مختلفة من الخليط. النتائج المتحصل عليها متفقة مع نتائج التجارب.

كلمات البحث: الفصل كهربائي- مزيج من ثلاث مواد الحبيبية بلاستيكية - المحاكاة العددية - التري

Introduction Générale

Introduction Générale

Le domaine de la séparation des déchets de matières plastiques connaît un essor important depuis plusieurs années. Cette évolution est directement liée, d'une part, à la prise de conscience de préoccupations environnementales graves (dues aux développements industriels anarchiques). D'autre part, elle est liée à l'ampleur grandissante des déchets divers qui ne trouvent pas d'autres issues que la mise en décharge.

Autant de complexité à résoudre dans le cadre de la problématique de la séparation des matières plastiques, ce qui a conduit au développement de procédés de tri s'appuyant sur les nombreuses caractéristiques de ces matières. Plusieurs techniques qui seront décrites dans ce document trouvent leurs origines dans le domaine de la séparation électrostatique, par la transposition d'un certain nombre de phénomènes, de lois physiques et/ou chimiques, au traitement des matières plastiques.

L'utilisation des technologies de la séparation électrostatique pour le traitement de ces déchets ouvre des opportunités intéressantes aux entrepreneurs. Plusieurs technologies sont déjà appliquées dans l'industrie de recyclage ou font l'objet d'une activité de recherche et de développement très soutenues. Ainsi, des séparateurs couronne-électrostatique à tambour sont utilisés pour extraire le métal et les matériaux isolants des déchets de câbles électriques ou de matériel informatique. Des séparateurs tribo-électrostatiques à chute libre et à lit fluidisé peuvent traiter plus de 1,5 tonne de déchets de plastiques granulaires par heure.

Les chercheurs et les praticiens ont besoin d'un outil de simulation plus facile à utiliser pour réaliser les études de faisabilité qui précèdent le développement d'une nouvelle application. il ne remplace pas complètement les essais expérimentaux mais peut permettre de mieux les cibler afin d'en réduire leur cout.

L'analyse des problèmes présentés dans les paragraphes permettra de dégager comme but de cette thèse la **simulation numérique des procédés de séparation tribo-aéro-électrostatique** afin d'améliorer les méthodes de séparation électrostatique actuelles et de proposer des solutions fiables à des nouvelles applications industrielles .

D'un autre côté, une modélisation numérique a été développée et vérifiée par des essais expérimentaux appropriés afin d'assurer une croissance rapide des quantités à traiter.

En s'appuyant sur l'étude de l'état de l'art, présentée dans le **chapitre 1**, nous avons abordé, quelques concepts sur l'effet tribo-électrique, le recyclage des déchets plastiques, les mélanges de polymères, ainsi que la construction et les principes de fonctionnement de certains dispositifs de triboélectricité et de séparation électrostatique.

Les études présentées dans le cadre du **2^{ème} chapitre** ont comme objectif, l'étude expérimentale d'un dispositif tribo-aéro-électrostatique à faible débit, réalisé au sein du laboratoire APELEC(Université de Sidi-Bel-Abbés). Il a été ainsi possible d'évaluer les effets de plusieurs facteurs qui pourraient influencer sur l'efficacité d'un processus de chargement triboélectrique en lit fluidisé d'un mélange granulaire ternaire, en présence d'un champ électrique. Les données expérimentales obtenues serviront aussi à la validation des résultats des simulations numériques présentés par la suite.

Nous nous sommes ensuite concentrés sur l'élaboration des différents modèles numérique. Dans cette logique, la construction d'un code numérique a commencé par la programmation de la partie granulaire, celle-ci étant à la base de tout le développement d'un logiciel. Cette partie du code, bâtie sur un logiciel de simulation Matlab, fait l'objet du **chapitre 3** où les données ont été validées par trois modèles numériques. Le premier et le deuxième étaient consacrés pour la séparation des mélanges granulaires en régime intermittent et continu du séparateur tribo-aéro-électrostatique à faible débit. Le troisième était consacré à un séparateur tribo-aéro-électrostatique industriel afin de pouvoir l'appliquer dans l'industrie.

Les données présentées dans le **4^{ème} chapitre** ont été calculées à l'aide de trois modèles numériques élaborés dans le chapitre précédent, caractérisés en premier lieu par l'étude de l'influence des variables tels que l'effet de la nature des matières à séparer, l'effet des forces aérodynamique, l'effet de la présence d'une troisième espèce dans le mélange à séparer pour le régime intermittent. Ensuite, nous avons également étudié la simulation de l'influence des parois et du débit de la matière instantanément introduite dans le dispositif sur l'efficacité de processus de la séparation triboélectrique en régime continu.

Enfin, nous présenterons les résultats de simulation du séparateur tribo-aero-électrostatique industriel en régime intermittent qui mettent le point sur les facteurs qui influent d'avantage sur le rendement d'un tel dispositif.

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

Chapitre I : Etat de l'art

I. Etat de l'art

Le recyclage est l'objet d'études le plus analysé de nos jours. C'est un problème sur lequel les industriels travaillent d'avantage et auquel le grand public est de plus en plus sensible. C'est pour cela que l'embarras de la récupération et du traitement des équipements informatiques en fin de vie est devenue une préoccupation majeure pour toutes les entreprises qui travaillent dans ce secteur. Les méthodes de récupération de matériaux provenant des déchets informatiques sont variées [1]. Les technologies électrostatiques se sont imposées comme la solution de choix pour le recyclage des matériaux plastiques contenus dans ces déchets [2]. A travers cette thèse, différents domaines ont été abordés, tels que le recyclage des déchets plastiques, les mélanges de polymères, les différents séparateurs électrostatiques (isolant/isolant), tel que les lits fluidisés. L'objectif de ce chapitre est de faire le point sur l'état de l'art concernant ces différents sujets [3].

I.1 Notions d'électrostatique

Les nuisances dues à l'électricité statique ont une importance de premier ordre dans un très grand nombre de domaines. Ces nuisances peuvent entraîner de simples gênes qui peuvent être coûteuses, voire destructrices (notamment dans le domaine de la microélectronique) ou bien des dommages plus graves, liés à la sécurité des personnes [2].

I.1.1 Phénomène de charge

Un corps chargé électriquement est la manifestation d'une accumulation ou d'une perte de charges électriques. En effet, lorsqu'un corps est en équilibre, il est électriquement neutre. Ce corps sera électrisé lorsque quelques-uns de ses atomes auront soit gagné, soit perdu un ou plusieurs électrons rompant ainsi l'équilibre et la neutralité. On dit alors que ce corps possède une charge électrique.

Il y a de nombreux modes d'électrisation possibles :

- par frottement (triboélectricité)
- par contact (transfert direct de charges)
- par ionisation (émissions d'ions sous haute tension)
- par influence (à l'aide d'un champ électrique)
- par clivage (fragmentation)

- par effet photoélectrique
- par émission thermoélectronique
- par ballo-électricité (agitation des particules dans un flux de gaz) [2].

Les phénomènes les plus répandus étant l'effet triboélectrique et le chargement par influence, ils sont définis comme suit :

a) L'effet 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 [3]. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges générées subsisteront après séparation. De nouveaux contacts auront pour effet de produire ainsi 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 au transfert 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 (Figure I.1).

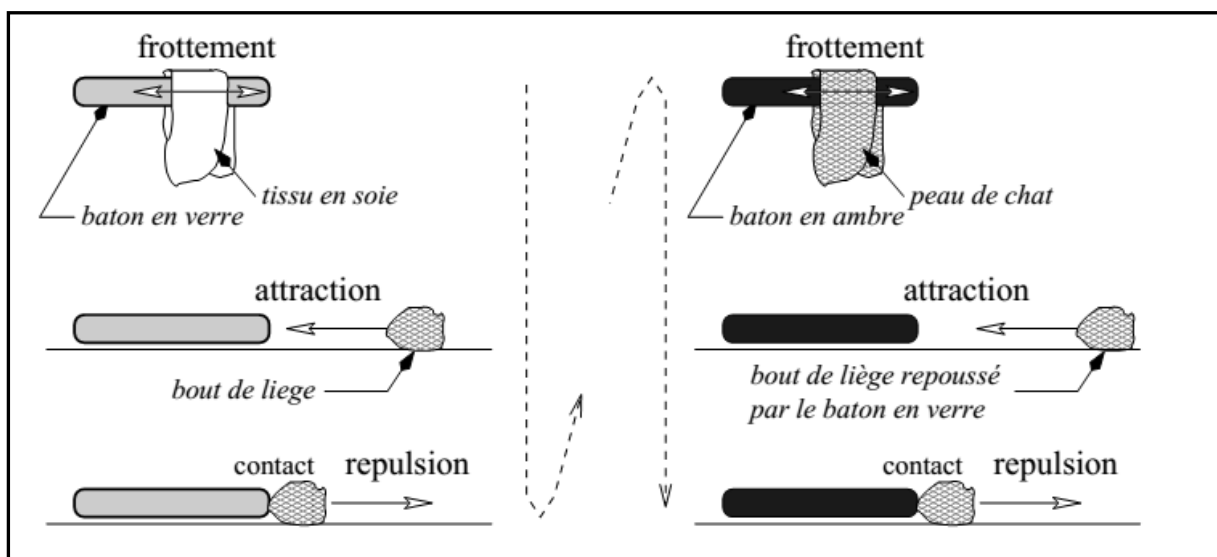


Figure I.1 : Electrification par frottement [4]

La polarité des charges dépend de nombreux facteurs, on peut cependant établir des listes ou des séries dites triboélectriques (Figure I.2), auxquelles on prête la valeur d'indice : plus les deux matériaux 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 méfier complètement à l'ordre des matériaux dans ces listes car ils diffèrent souvent d'un auteur à un 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 surprenante. Elle représente un élément de plus, qui peut permettre de comprendre les mécanismes électrostatiques.

+	Glass
	Mica
	Polyamide (Nylon 6,6)
	Rock salt (NaCl)
	Wool
	Fur
	Silica
	Silk
	Aluminum
	Poly(vinyl alcohol) (PVA)
more positive	Poly(vinyl acetate) (PVAc)
	Paper
	Cotton
	Steel
	Wood
	Amber
	Poly(methyl methacrylate) (PMMA)
	Copper
	Silver
	Gold
-	Poly(ethylene terephthalate) (Mylar)
	Epoxy resin
	Natural rubber
	Polyacrylonitrile (PAN)
	Poly(bisphenol A carbonate) (Lexan, PC)
	Poly(vinylidene chloride) (Saran)
	Polystyrene (PS)
	Polyethylene (PE)
	Polypropylene (PP)
	Poly(vinyl chloride) (PVC)
more negative	Polytetrafluoroethylene (Teflon, PTFE)
-	

Figure I. 2. Série tribo-électrique qui combine différentes séries de la littérature [5]

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

b) Chargement par influence ou par induction

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

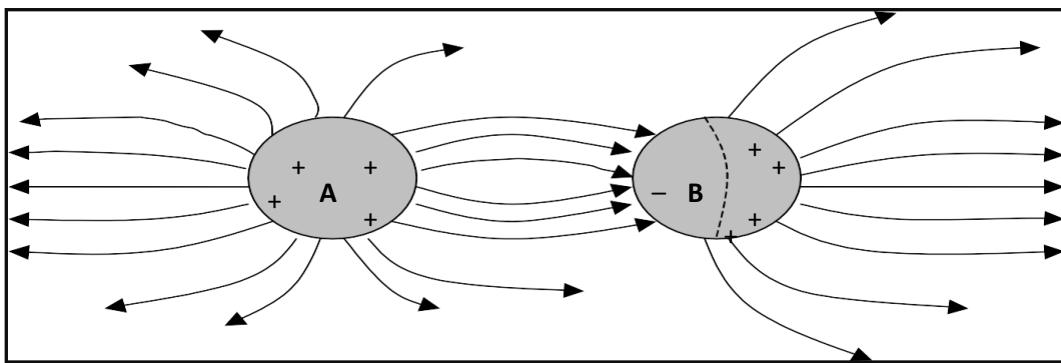


Figure I.3 Influence entre deux corps (le corps B étant isolé)

A la séparation des deux zones chargées formées sur le corps influencé, il existe une ligne neutre. La région qui est la plus proche du corps influençant est chargée de signe contraire, et comme on peut le voir sur la figure, une partie des lignes de champ partant du corps influençant n'arrivent pas sur le corps influencé, de telle sorte que la charge ainsi induite sera toujours plus faible en valeur absolue que celle portée par le corps A[6]-[7]-[2].

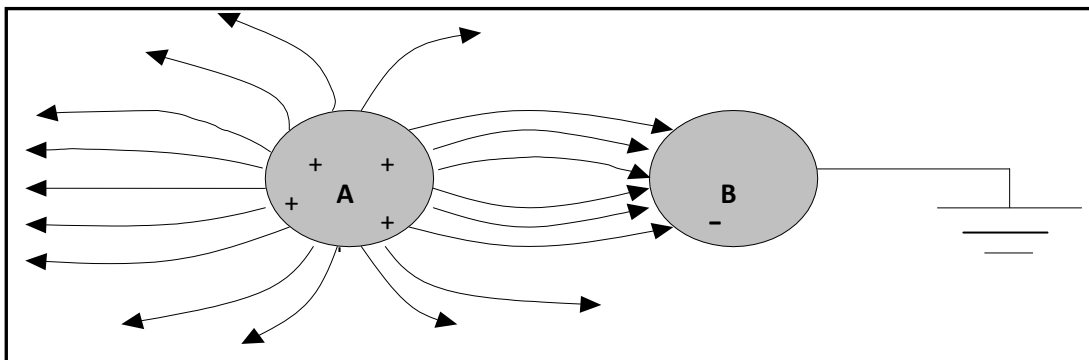


Figure I.4 Influence entre deux corps (le corps B étant relié à la terre)

I.1.2. Triboélectricité du troisième corps tribologique

Que le troisième corps soit conducteur ou isolant, lors d'un contact dynamique glissant, le troisième corps tribologique du contact se trouve porté au même potentiel électrique que le premier ou le second corps du contact. Ce troisième corps chargé sera attiré par le corps à charge opposée et sera soumis aux contraintes de contact.

Une aspérité ou jonction de contact à faible rayon de courbure a une forte densité de charge avant contact. Son cisaillement ou sa rupture de l'un des deux premiers corps, l'entraîne en troisième corps, avec sa densité de charge électrique. Lors du détachement d'une particule du troisième corps des deux premiers, sa température est élevée et sa charge électrique qui dépend de sa forme, peut aussi être très élevée (effet de pointe). Ces deux effets combinés conduisent à un micro plasma de jonction [8].

I.2 Le recyclage des déchets plastiques

1.2.1. Les différents types de déchets

Il faut différencier les déchets plastiques en fonction de leur source : déchets ménagers et déchets industriels. Ces derniers sont souvent des résidus du procédé. Leur composition est connue du fabricant et leur récupération est aisée. Ces déchets sont généralement directement recyclés par leur producteur, pour des raisons économiques. Ils peuvent être :

- broyés, mélangés au polymère vierge et mis en œuvre à nouveau,
- revendus à un sous-traitant pour être réutilisés sous une autre forme
- dans les objets multicouches, une couche de produits recyclés peut être incorporée au sein du matériau sandwich. . .

Alors que le recyclage des déchets industriels est souvent aisé, les déchets plastiques ménagers posent plus de problèmes. Sur plusieurs milliards tonnes d'ordures ménagères produites par an à travers le monde, les matières plastiques ne représentent que 7% en poids du total, mais cela correspond à 20% en volume [9].

Pour la plupart des déchets ménagers, des filières de récupération sélective et de valorisation ont été mises en place dans plusieurs pays développés. L'une des difficultés principales avec les plastiques est qu'ils représentent un grand volume pour un faible poids, d'où des inconvénients de récupération et de stockage.

1.2.2. Définition d'un polymère

Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelés motifs) et préparée à partir de molécules appelées monomères[10].

Le nombre moyen de ces unités de base (monomères) dans les molécules finales(polymères) représente le degré de polymérisation. Si ce degré est élevé, on parle de hauts polymères par contre s'il est faible, le composé est une oligomère [11]. Le nom des polymères est généralement dérivé de celui du monomère en ajoutant le préfixe poly Exemple :polyéthylène, poly(acide glycolique)...etc [12].Une macromolécule est caractérisée par sa masse molaire (m), qui est en rapport avec le degré de polymérisation (x) représentant le nombre d'unités de la répétition dans la macromolécule par la relation simple.

$$m = x \cdot m_0 \quad (I.1)$$

Où m_0 est la masse molaire de l'unité de la répétition [13].

I.2.3. Différents types de polymères

Il existe deux types de polymères

I.2.3. 1.Les monomères

Les monomères sont les unités chimiques de base, ou molécules des matières plastiques. Ils sont construits autour des atomes de carbone (C), et contiennent des atomes d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N), chlore (Cl), soufre (S), fluor (F)...[14].

I.2.3. 2.Les polymères

Les plastiques désignent une famille de produits constitués de **polymères** (ou macromolécules) caractérisés par la répétition d'un très grand nombre de fois, de monomères. Cet assemblage crée un "motif" appelé motif constitutif.

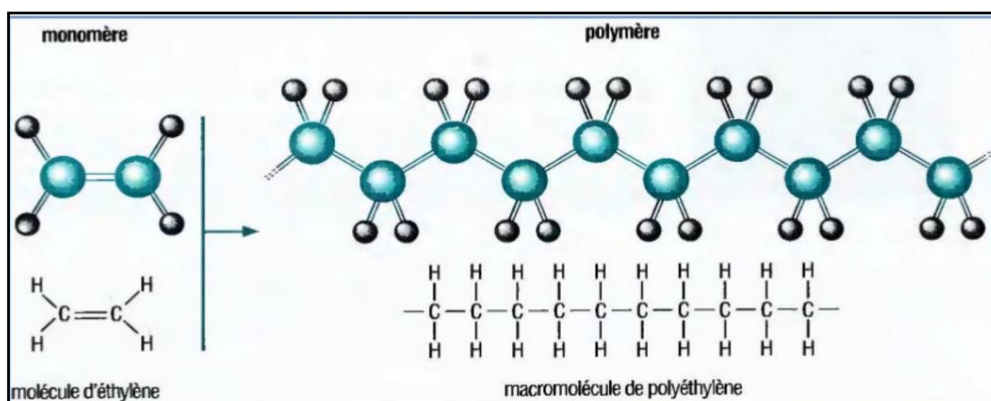


Figure I.5 : Représentation d'un polymère (Polyéthylène)[15]

I.2.4. Catégories de matières plastiques

Il existe trois grandes catégories de matières plastiques synthétiques : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

I.2.4. 1. Les thermoplastiques :

Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires, reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes. Elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leur nouvelle forme.

Ils représentent 80% des matières plastiques consommées à travers le monde soit plus de 180 millions de tonnes. Avant transformation, ils sont sous forme de granulés ou de poudres dans un état chimique stable et définitif car il n'y a pas de modification chimique lors de la mise en forme. Les granulés sont chauffés puis moulés par injection et le matériau broyé est réutilisable [16].

Le plastique est fabriqué à base de résines, issues principalement de la transformation de pétrole. Les autres composants comprennent notamment des plastifiants et des additifs, choisis en fonction des propriétés recherchées (légèreté, absence d'oxydation, solidité, transparence ou opacité, souplesse ou rigidité, isolation, résistance au chaud ou au froid, etc.) [17]. Du point de vue chimique, les plastiques sont tous des molécules en chaîne, qu'on obtient par polymérisation (enchaînement) d'une molécule simple (monomère). Le monomère est obtenu soit directement par raffinage du pétrole brut, soit après traitement avec des additifs (exemple : remplacement de certaines parties des molécules issues du raffinage par des atomes de chlore). Dans les tableaux suivants, les symboles permettant de reconnaître les familles de plastiques ont été indiqués. Ils se retrouvent sur chaque élément fait de matière synthétique pour en faciliter le tri.

Parmi les 5000 types de plastiques connus, seule une cinquantaine présente un intérêt économique. Plus de 90% de la production mondiale se compose des six familles de thermoplastique suivantes [18].

- a) Polyéthylène (PE) qui comprend le polyéthylène à basse densité (LDPE) et le polyéthylène à haute densité (HDPE)
- b) Polypropylène (PP)
- c) Chlorure de polyvinyle (PVC)
- d) Polystyrène solide (PS) et polystyrène expansé (PSE)
- e) Polyéthylène téréphtalate (PET)
- f) Polyamide (PA)

a) Polyéthylène (PE)

Le PE possède une excellente résistance aux agents chimiques et aux chocs. On distingue principalement deux types de polyéthylènes :

- ✓ polyéthylènes à «basse densité» (LDPE), appelés également PE «ramifiés». Ils offrent une bonne résistance aux chocs, sont de bons isolants même en milieu humide et peuvent être utilisés dans l'alimentaire.
- ✓ polyéthylènes à «haute densité» ou «linéaires» (HDPE). Ils ont les mêmes propriétés que les LDPE, tout en étant plus rigides, plus résistants (notamment aux températures) et plus transparents [17].

Le polyéthylène est le plastique le plus populaire du monde. C'est le polymère dont sont faits les sacs des supermarchés, les bouteilles de shampoing, les jouets des enfants, et même les gilets pare-balle. Et ce matériau qui a des usages aussi variés a une structure très simple, la plus simple de tous les polymères du commerce. Une molécule de polyéthylène n'est rien de plus qu'une longue chaîne d'atomes de carbone, avec deux atomes d'hydrogène attachés à chaque atome de carbone. C'est ce que montre la **figure I.5 [19]**.

b) Polypropylène (PP)

Le polypropylène (PP) est à peu près similaire au polyéthylène dans sa structure. Le polymère très polyvalent, le PP est utilisé à la fois comme thermoplastique et comme fibres : Sous la forme de thermoplastique, il permet des applications où il est résistant à des températures élevées, car il ne fond qu'à 160 °C.

Il est également rigide et résistant aux chocs. Sous forme de fibres, il est utilisé pour fabriquer des revêtements de sol intérieurs et extérieurs, tels ceux que l'on trouve autour des piscines. Il se colore très facilement [20].

Le PP est présent sous forme de fibres dans les tapis et les textiles, de film dans les emballages à sous forme moulée, dans le secteur automobile (tableaux de bord, pare-chocs, etc.), l'électroménager, les ustensiles ménagers (vaisselle pour four à micro-ondes, boîtes pouvant aller dans le lave-vaisselle, etc.), les jouets, les bagages, le mobilier de jardin, etc.

c) Chlorure de polyvinyle (PVC)

Le chlorure de polyvinyle (PVC) est constitué de 43% d'éthylène et 57% de chlore, issu du sel ou de l'acide chlorhydrique. C'est le troisième plastique le plus utilisé au monde, après le PE et le PP.

Le PVC offre une excellente résistance au vieillissement, aux agressions chimiques, aux rayons ultraviolets, à la corrosion, aux chocs et à l'usure. Il est léger et a de bonnes propriétés d'isolation électrique, thermique et phonique. Grâce à cette résistance, 65% des articles fabriqués en PVC ont des durées de vie supérieures à 15 ans, 24% entre 2 et 15 ans, 12% de moins de 2 ans.

La vaste gamme de propriétés du PVC permet de fabriquer les produits les plus divers. Mais en raison de sa résistance aux intempéries, plus de la moitié de la production est destinée au secteur de la construction : châssis de fenêtres, canalisations d'eau et autres tuyaux, toiles et membranes de revêtement des toits et des sols mobilier urbain, etc. Autres utilisations : câbles électriques bouteilles (notamment dans le domaine médical et pharmaceutique) enduits chaussures, etc.

d) Polystyrène (PS)

Le polystyrène (PS) est relativement proche du polyéthylène dans sa structure. Selon les différents modes de polymérisation et les adjuvants utilisés, on trouve le PS sous de multiples formes, avec des propriétés qui varient. Le produit de base «PS cristal» est très cassant, n'offre pas une bonne résistance sur le plan chimique et se fissure facilement. On le reconnaît à son bruit métallique lorsqu'il tombe sur une surface dure. Le «PS choc» est plus

résistant aux chocs grâce à un additif. Le PS expansé (EPS) est un matériau-mousse utilisé dans les emballages pour protéger des chocs ou pour isoler des bâtiments.

Les utilisations principales sont les suivantes: boîtiers de CD («PS cristal», transparent, cassant), vaisselle en plastique (couverts en «PS choc», gobelets, flûtes transparentes et verres), articles de décoration ou de bureau (règles, rapporteurs, etc.), emballages alimentaires (gobelets de yogourts en «PS choc»), matériel de calage pour objets fragiles (électronique) à l'intérieur des boîtes en carton, isolants pour glaciers, flotteurs, caisses à poissons et EPS isolation thermique des bâtiments (EPS)

e) Polyéthylène téréphtalate (PET)

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est fabriqué à base d'éthylène glycol (un alcool dérivé de l'éthylène) et d'acide téréphtalique. Au niveau mondial, la demande ne cesse d'augmenter depuis 1993, et la production a doublé depuis cette date [21].

Le PET se distingue par les propriétés suivantes : transparence, brillance, bonne résistance aux chocs, à la pression et aux produits chimiques, étanchéité aux gaz [8]. Il a également l'avantage d'être recyclable à 100% sans perdre ses propriétés et entre ainsi dans la composition de divers produits, notamment les emballages pour boissons.

Les deux principales sources de consommation du PET sont les emballages ainsi que les fibres non tissées fabriquées à partir du recyclage du PET, également appelées polyester pour les vêtements. Les applications du PET sont nombreuses [22]: bouteilles, flacons, toiles (tentes, parapentes, canapés), textiles (polyester, vestes polaires), électronique (écrans), cartes de crédit pièces pour véhicules, chaussures.

f) Polyamide (PA)

Appelée aussi (Nylon) est un polymère contenant des fonctions amide pouvant résulter de la polycondensation entre les fonctions acide carboxylique et amine. Les nylons sont généralement résistants, solides (bien que facilement susceptibles d'être entaillés), des polymères assez élastiques ayant de bonnes propriétés de protection, ainsi qu'une haute résistance à l'abrasion et à la fatigue.

Ils sont capables toutefois d'absorber une grande quantité d'eau (lents dans les sections épaisses) augmentant alors leurs dimensions jusqu'à 3% dans des conditions extrêmes. Si les nylons sont très résistants aux huiles, graisses, solvants et alcalis, il en est autrement par rapport aux acides qui ont tendance à les hydrolyser.

Ce polymère peut être utilisé pour la fabrication des composants industriels essentiellement, comme (engrenages, coussinets, écrous, boulons, rivets, roues, coffres à outils électriques, caches-culbuteurs). Beaucoup utilisé comme mono filament (pour les brosses), pour l'habillement, les tapis ...[23].

I. 2. 4. 2 Les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Sous de trop fortes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation). Les molécules de ces polymères sont organisées en de longues chaînes dans lesquelles un grand nombre de liaisons chimiques solides et tridimensionnelles ne peuvent pas être rompues et se renforcent quand le plastique est chauffé. La matière thermodurcissable garde toujours sa forme en raison de ces liaisons croisées et des pontages très résistants qui empêchent tout glissement entre les chaînes.

Les thermodurcissables les plus connus sont les polyuréthanes, les polyesters, les phénoplastes, les aminoplastes, les résines époxydes et phénoliques. Au départ, ils se présentaient sous forme de poudres ou de résines qui subissent une transformation chimique au cours de leur chauffage, de leur refroidissement ou par l'action de durcisseurs [16].

I. 2.4. 3 Les élastomères

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déforment. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité il subit une vulcanisation. C'est un procédé de cuisson et de durcissement qui permet de créer un réseau tridimensionnel plus ou moins rigide sans supprimer la flexibilité des chaînes moléculaires. On introduit dans l'élastomère au cours de la vulcanisation du soufre, du carbone et différents agents chimiques. Différentes formulations permettent de produire des caoutchoucs de synthèse en vue d'utilisations spécifiques. Les élastomères sont employés dans la fabrication des coussins, de certains isolants, des semelles de chaussures ou des pneus [16].

I. 2. 4. 4 Les bio-polymères

Les bio-polymères (ou bioplastiques) sont des produits à base de ressources végétales au lieu de pétrole : cellulose de plantes, protéines, lignine ou amidon. Ils ne sont pas encore d'un usage très fréquent. On s'en sert avant tout pour les emballages, mais leurs possibilités d'applications sont bien plus vastes. Les plastiques d'origine végétale nécessitent moins d'énergie fossile pour la fabrication ; ils utilisent généralement moins d'ingrédients toxiques et ne relâchent pas de gaz ou d'autres substances toxiques dans l'environnement pendant la phase d'utilisation. On peut observer, en revanche, d'autres impacts durant la phase de production, notamment ceux liés des matières premières, avec des problèmes très similaires à ceux des biocarburants : pollution des eaux et des sols par les pesticides et engrais, concurrence avec les besoins agricoles destinés à l'alimentation, consommation d'énergie liée aux machines et au transport sur de longues distances, utilisation d'organismes génétiquement modifiés (OGM).

Les impacts dépendent donc fortement des pratiques agricoles du lieu de production. De plus, le fait que ces matériaux soient décrits comme biodégradables ne signifie pas forcément qu'ils seront «biodégradés». Il faudrait s'assurer que les utilisateurs les collectent effectivement de manière séparée et que les filières de compostage non seulement existent, mais en plus acceptent de traiter ces matières, ce qui n'est de loin pas encore la règle. Ces contradictions montrent que l'utilisation de bio-polymères s'avère ambiguë sur le plan écologique [23].

I.2.5 Production mondiale de matières plastiques en 2007

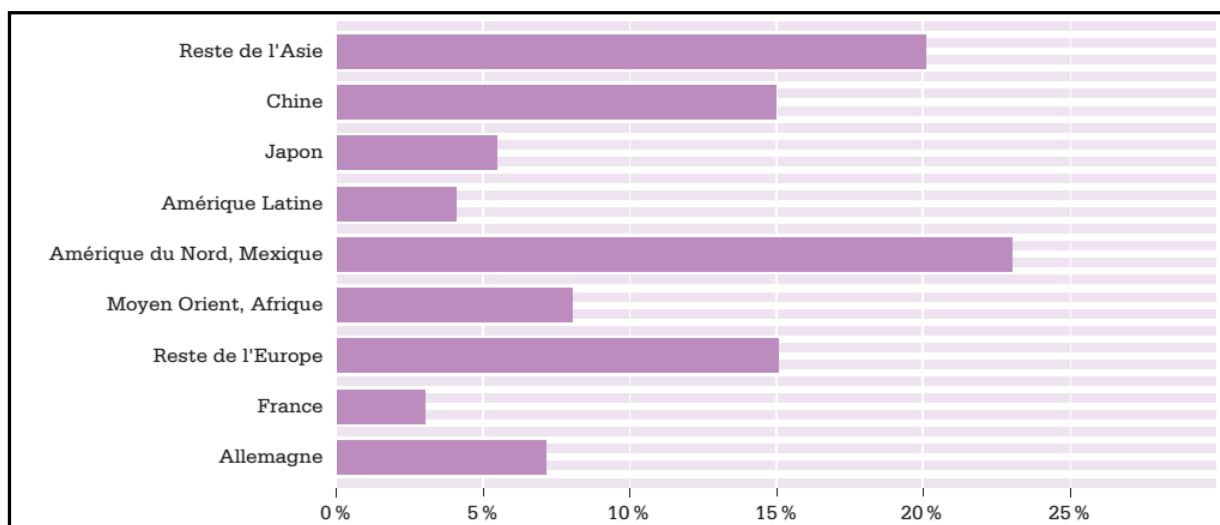


Figure I.6 : consommation mondiale de matières plastiques en 2007

La consommation de matières plastiques varie d'une région à l'autre. En Europe, elle s'élève à environ 100 kg par habitant et par an ; au Japon à 89 kg ; en Asie, elle est estimée à 20 kg en moyenne [23].

I.3.Procédés de séparation électrostatique d'un mélange de granules plastiques

Des procédés de séparation électrostatique sont déjà utilisés pour trier des matériaux granulaires mélangés provenant, par exemple, du broyage des déchets industriels. De préférence, ces matériaux sont isolants. Ainsi, le recyclage de déchets électriques et/ou électroniques nécessite de séparer les différents composants avant de valoriser les matériaux obtenus. Cette séparation doit être la plus efficace possible pour obtenir une qualité sensiblement constante des matériaux obtenus. Il est alors envisageable de créer et de pérenniser une filière aval de valorisation de ces matériaux. Par exemple, les matériaux plastiques récupérés des déchets électriques et/ou électroniques peuvent servir à la fabrication de planches de contours de terrasse. Pour pérenniser cette activité, les planches doivent avoir une qualité et une couleur sensiblement constante. On a également besoin de pouvoir séparer et récupérer des matériaux plastiques de natures différentes, de manière efficace et automatisée [24].

I. 3. 1. Séparateur« classique » à chute libre

Le séparateur électrostatique à chute libre TESS (Tribo-Electro-Static-Separator) est présenté sur la **Figure. I.7**. Le mélange granulaire à séparer est d'abord chargé par un tube rotatif. Ensuite, les particules chargées tombent librement dans le champ électrique généré entre les deux électrodes dans une plaque (de longueur : 1250 mm et de largeur : 540 mm) du séparateur électrostatique. Les particules chargées négativement sont respectivement attirées par l'électrode positive (+30 KV) et celles chargées positivement seront attirées par l'électrode négative (-30 kV). La distance entre les bords supérieurs des électrodes est de 120 mm pour obtenir un maximum l'intensité du champ électrique dans cette zone. Les électrodes sont inclinées selon un angle de 5° par rapport à la verticale, de sorte qu'avoit moins d'interférence avec des trajectoires de séparation des particules.

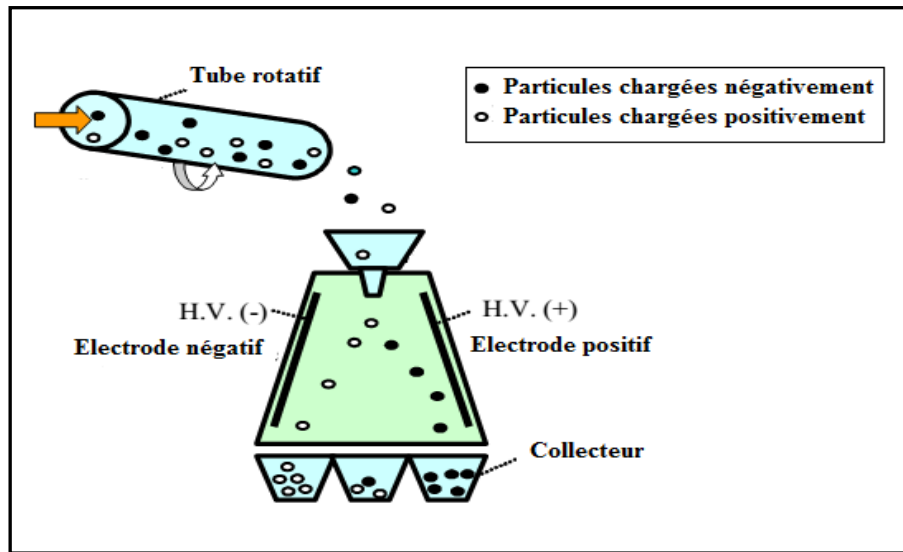


Figure I.7 Représentation schématique du procédé de séparation triboélectrique de chute libre [25].

I.3.2 Dispositif de séparation à faible débit

Ce dispositif est destiné aux études de laboratoire[26]-[27], 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. La chambre est fixée sur un support plastique (**Figure I.8**) 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 ainsi deux cages de Faraday sont installées. 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 de mesurer leur charge électrique à l'aide d'un électromètre.

La particularité fonctionnelle de ce dispositif est que, une fois les granules accumulent une charge suffisamment grande, elles vont être attirés par des forces électriques à une électrode de polarité opposée et ils ne participeront plus au processus de charge triboélectrique [28].

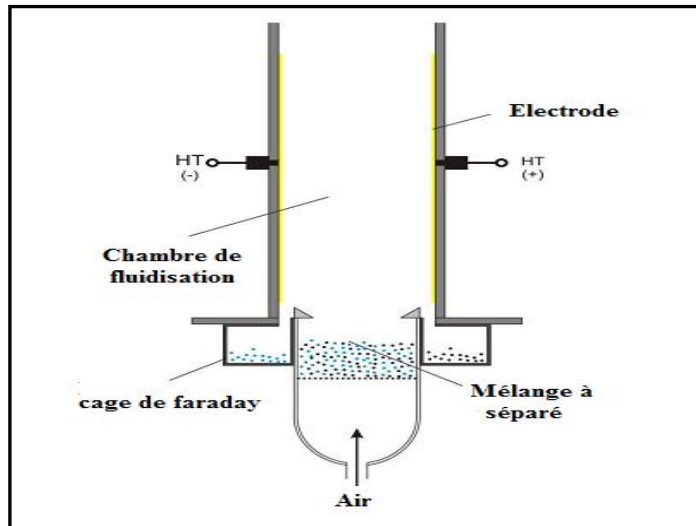


Figure I.8 : Dispositif de séparation à faible débit et électrodes verticales [27]

I.3.3. Séparateur électrostatique à deux étages:

L'installation se compose de deux éléments superposés, amovibles, fixés à un même support vertical (**Figure. I.9**). La partie supérieure de l'ensemble est un séparateur tribo-aéro-électrostatique qui consiste en un parallélépipède (Hauteur:500 mm, largeur: 130 mm, profondeur: 110 mm), comportant deux parois transparentes pour permettre la visualisation des phénomènes, et deux parois latérales qui ont des électrodes en tôle d'aluminium collées sur leur surfaces. Ces électrodes sont excitées à partir de deux alimentations haute tension CC de polarités opposées ± 50 kV, pour créer un champ électrique intense permettant de contrôler la trajectoire de granules chargés. La charge des granules est produite par un effet tribo-électrique généré à l'intérieur de l'enceinte du lit fluidisé.

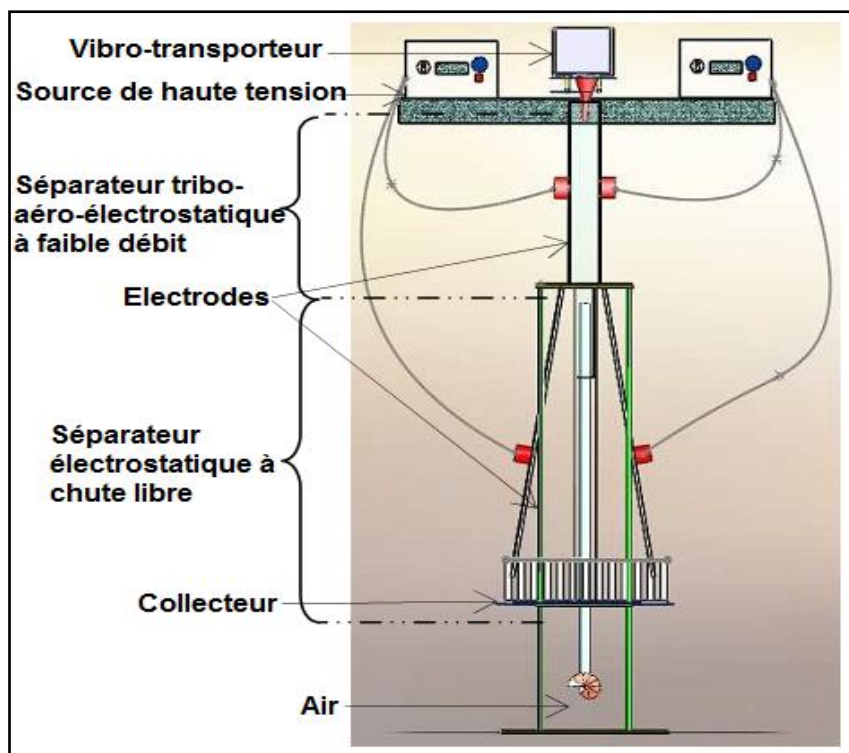


Figure. I.9 Photographie du séparateur à deux étages [29]

L'air de fluidisation est fourni par une vitesse variable de ventilation. Sous l'action combinée de l'action gravitationnelle, aérodynamique et les forces électriques, les granules se séparent essentiellement en fonction de la polarité de leur charge. Ils sortent de la première étape de séparation à travers deux fentes qui les dirigent vers la partie inférieure du montage expérimental (**figure I.9**).

Cette section se compose d'un séparateur électrostatique à chute libre, dont les électrodes sont des plaques d'aluminium (520 mm x 100 mm) collées sur quatre panneaux isolants (PMMA)(650 mm x 110 mm). Les bords supérieurs de ces quatre panneaux sont positionnés à la sortie du séparateur tribo-aéro-électrostatique. Les deux plaques centrales sont fixées et reliées à la terre, tandis que les deux électrodes extérieures sont connectées à des alimentations haute tensions de polarités opposées. Les produits séparés sont récupérés dans deux collecteurs identiques et ils sont subdivisés en vingt compartiments (longueur: 100 mm, largeur: 30 mm; Profondeur: 85 mm) [29].

I.3.4 Séparateur tribo-aéro-électrostatique semi industriel

Un modèle de laboratoire du séparateur tribo-aéro-électrostatique a été construit dont il permet de trouver les facteurs d'échelle à adopter pour créer le régime de charge optimal dans un lit fluidisé de dimensions industrielles. Il utilise 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 dans le lit fluidisé en ébullition [30]. Cette dernière est générée par un gradient négatif de pression en direction verticale (établie 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 et parallèles aux parois de la chambre de séparation. Ils sont soumis ensuite à la force d'image électrique qui les attachent 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 des 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 sur un temps minimum nécessaire pour accueillir une charge suffisante afin 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 des produits. Il permet donc 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 I.10** représente l'installation du séparateur électrostatique industriel [27].

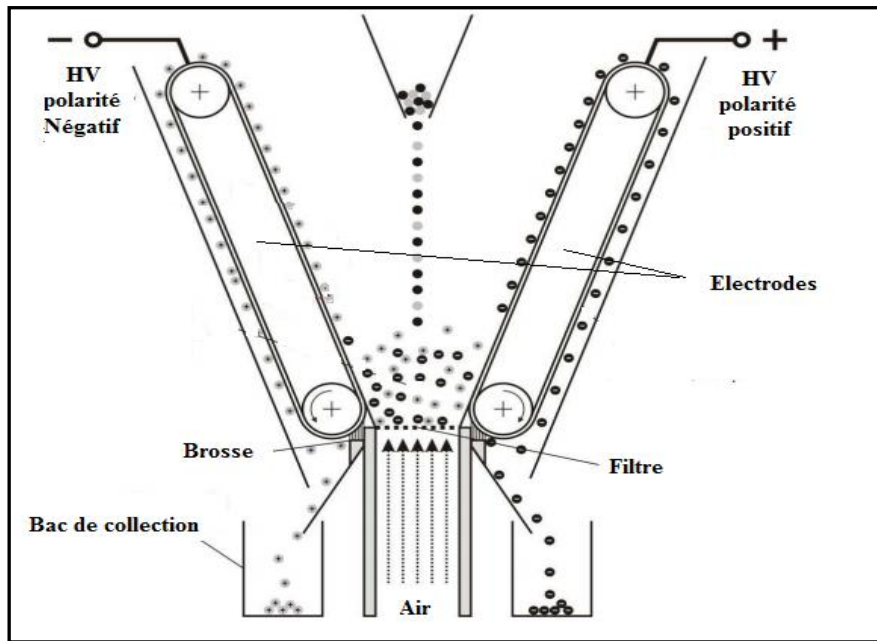


Figure I.10: Séparateur tribo-aéro-électrostatique à lit fluidisé dit (séparateur semi industriel)

1.3.5 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à tapis roulant

Dans le cas des séparateurs à tapis roulant (**Figure. I.11**), les granules sortant (du dispositif tribo-électrique chargé avec des tâches différentes) sont déposés sous forme de couche uniforme sur une bande transporteuse en matériau conducteur relié à la terre. Sous l'action de la force d'image électrique, les billes collées aux conducteurs de surface (à l'extrémité droite de la bande), génère un champ électrique intense par rapport à la bande métallique mise à la terre.

Les principales forces qui agissent sur les granules ont atteint la bonne électrode (Le split) sont: F_I force électrique d'image, F_G force de gravité, la force centrifuge F_C et la force électrique F_E (champ électrostatique entre l'électrode et la bande).

Les granules chargés électriquement sont attirés par un signe opposé à l'électrode et ce dernier recueille séparément si la force électrique résultante et la force centrifuge sont supérieures à la force d'image. Une partie des granules reste collée au ruban jusqu'à ce qu'à la perte de leurs charges et quittent la bande [24].

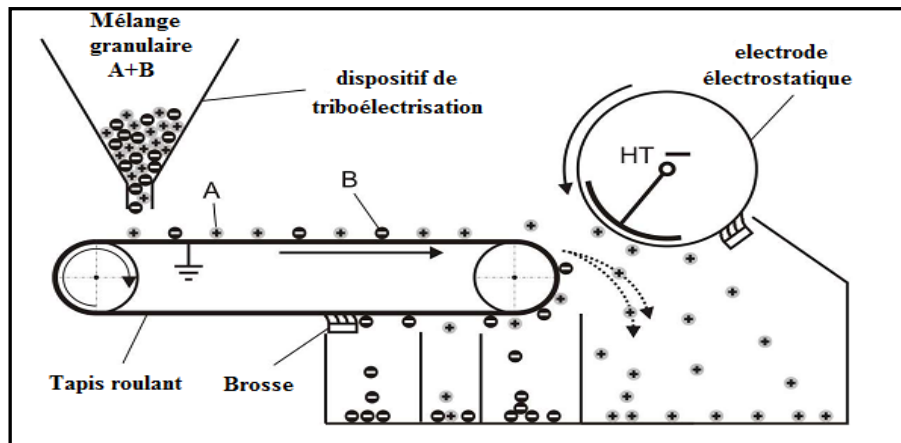


Figure I.11 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à tapis roulant [27]

I.4. Lits fluidisés

Dans la pratique, il existe des nombreuses variantes de lits fluidisés, en fonction des applications. Certains dispositifs de cette catégorie sont utilisés pour la charge triboélectrique des matériaux granulaires ou pulvérulents [31].

I.4.1. Fluidisation des matériaux granulaires

Le fonctionnement du lit fluidisé (figure I.12) dans les processus de triboélectricité est délimité par la vitesse minimale de fluidisation u_{mf} et la vitesse terminale de chute libre des particules u_t [32].

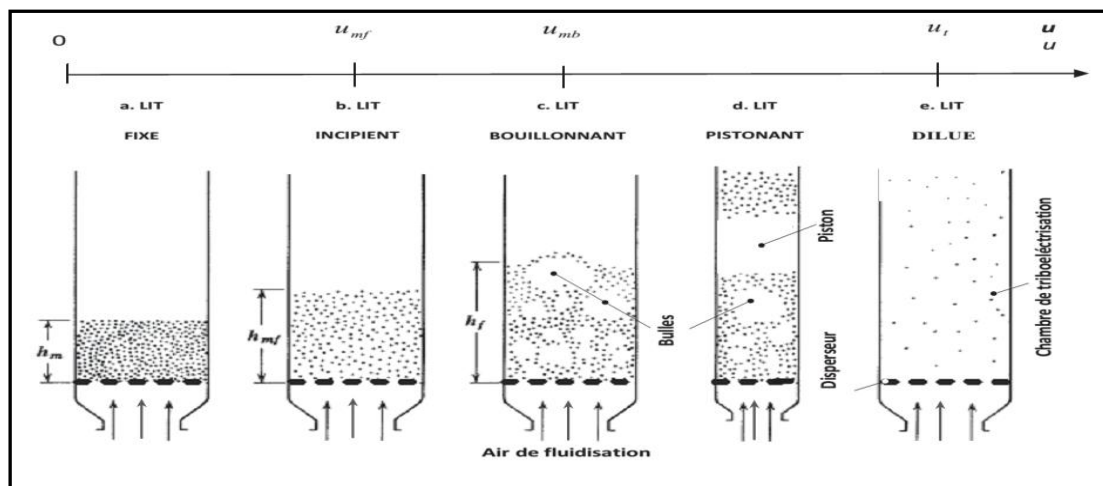


Figure I.12 : Les régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation ; u_{mf} - vitesse minimale de fluidisation ; u_{mb} - vitesse minimale d'apparition des boules ; u_t - vitesse de transport pneumatique

Le début du processus de triboélectricité dans les dispositifs à lit fluidisé correspond à la phase de « lit fixe » mais il devient efficace dans les phases appelées « lit bouillonnant » et « fluidisation turbulente », caractérisées par des impacts forts. On constate, expérimentalement, que la fluidisation des matériaux plastiques granulaires dans les phases « lit bouillonnant » et « fluidisation turbulente » est accompagnée par la présence des bulles dans tout le volume du matériau, (qui peuvent se réunir pour former courants gazeux voir zone sans particules) et l'agitation de la suspension ayant l'aspect d'un liquide bouillant. La vitesse minimale de fluidisation u_{mf} , la vitesse terminale de chute libre des particules u_t et la chute de pression du lit fluidisé Δp sont les principaux paramètres de contrôle du lit fluidisé. Un lit fixe de granules de plastique est transformé en état de fluidisation par un courant d'air, dépassant la vitesse minimale de fluidisation u_{mf} [32].

Les particules sont maintenues en suspension par le courant d'air. La chute de pression Δp du lit fluidisé est égale à la différence entre le poids du matériau granulaire F_g et la force d'Archimède, divisée par l'aire de la section droite A_t de la chambre de triboélectricité :

$$\Delta P = \frac{F_g - F_A}{A_t} = g(\gamma_p - \gamma_a)h(1 - \beta) \quad (\text{I.2})$$

où :

β : représente la porosité du lit fluidisé (le rapport entre le volume d'air entre les particules et le volume total du lit fluidisé).

h : la hauteur du lit fluidisé [m].

γ_p : masse volumique du matériaux plastique [kg/m^3]

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

Dans le processus de fluidisation les particules ont des comportements spécifiques, qui peuvent affecter les caractéristiques de la couche fluidisée Geldart propose une classification de ces comportements dans quatre groupes A, B, C, D (**figure I.13**) [33].

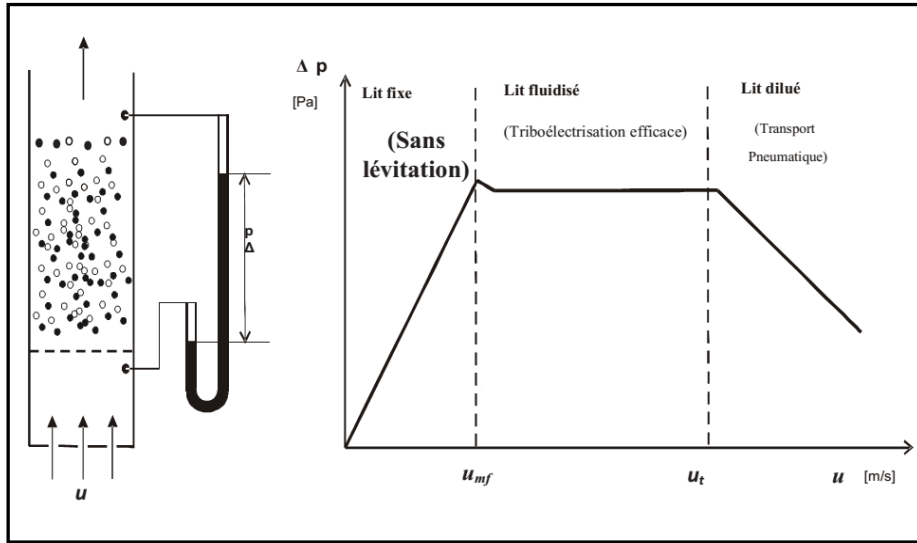


Figure I.13 : Variation de la perte de pression Δp en fonction de la vitesse d'air u pendant les différentes étapes de la fluidisation des matériaux plastiques granulaires [33].

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

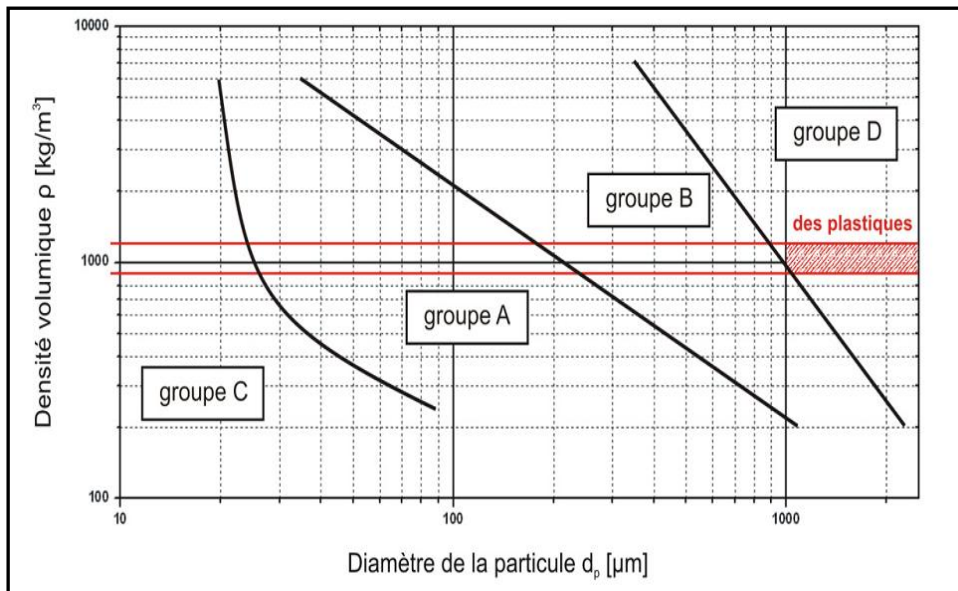


Figure I.14 : Diagramme Geldart pour les régimes de fluidisation des granules en fonction de leur densité et diamètre [33].

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

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

Les particules du groupe D ont des diamètres plus grands que 0.5 mm ou de densités élevées. Les bulles commencent à se former immédiatement après le point de fluidisation et montent lentement. A l'interruption brusque de l'air de fluidisation, le lit disparaît brusquement. Les plastiques sont un des composants de ce groupe. La triboélectricité en lit fluidisé est caractérisée par des explosions des grandes bulles à la surface (lit bouillant). Un des buts essentiels des études menées sur les lits fluidisés, consiste à caractériser la structure de l'écoulement dans la colonne. Une bonne connaissance des caractéristiques hydrodynamiques du lit fluidisé favorise l'optimisation des paramètres de fonctionnement [33].

I.4.2. Forces aérodynamiques et électrostatiques

Le transport, le stockage, les mélanges, l'écoulement, la densification des matériaux pulvérulents sont influencés par les forces inter particulaires qui prennent naissance lors de la friction ou du simple contact [28].

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

a. Forces de la pesanteur

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

$$F_g = Mg \quad (\text{I.3})$$

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

Aux forces de la pesanteur s'opposent des forces inter-particulaires. Elles sont différentes pour des particules chargées d'électricité statique ou électriquement neutres [28].

b. Forces de LONDON – van der WAALS

Ce sont des forces de nature électrostatique qui s'exercent sur des molécules ou des particules électriquement neutres. Elles peuvent être estimées en faisant la somme de toutes les combinaisons possibles de paires d'atomes entre particules et s'écrivent [28]:

$$F_V = \frac{\lambda}{a^7} \quad (\text{I.4})$$

où a est la distance entre les deux centres et λ est une constante, qui dépend de la polarisation et de l'énergie d'ionisation des atomes impliqués (**Figure I.15**). Les forces de London – van der Waals étant inversement proportionnelles à la septième puissance de leur distance, cela entraîne un accroissement rapide de l'interaction pour les courtes distances [28].

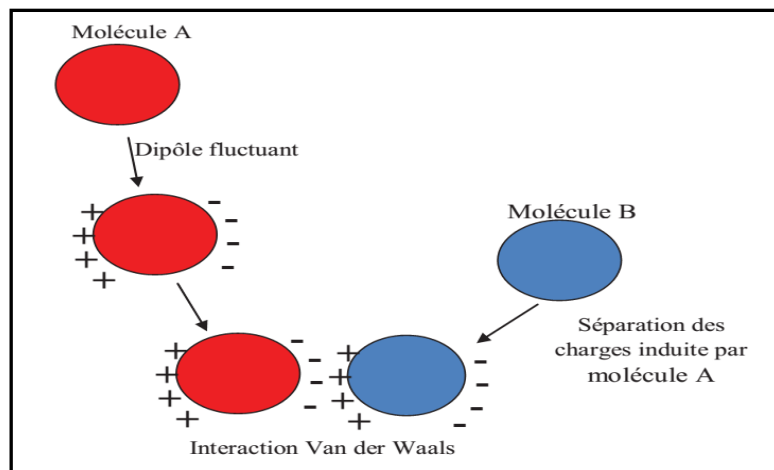


Figure I.15 : Phénomène physique derrière la force Van der Waals :
polarisation électrique des atomes ou molécules neutres

c. Force de Coulomb

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

$$F_C = \frac{Q_a Q_b}{a^2} K \quad (\text{I.5})$$

avec $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9$ et ϵ_0 étant la permittivité du vide.

Le calcul de ces forces a été établi pour des éléments supposés sphériques de charges données, de tailles différentes et en proche contact [28].

d. Cohésion due aux forces électrostatiques

La cohésion entre particules est due aux forces d'attraction de nature électrostatique qui prennent naissance lors du contact ou de la friction. Les charges électrostatiques formées au niveau des surfaces de contact se comporteront avec diverses façons en fonction de la nature du matériau: conducteur ou isolant. Lorsque deux isolants chargés de signe opposé se rencontrent, la cohésion a lieu et persiste. Les électrons ne peuvent pas se répartir et les force d'attraction ne s'annulent pas. Les charges restent localisées aux points de contact et de friction avec le matériau responsable de l'électrification [28].

e. Adhésion due aux forces électrostatiques

L'adhésion des particules sur une paroi dépend des forces capillaires d'adhésion, des forces d'interaction électrostatique et de Van der Waals. Le mouvement d'une particule dans un système d'écoulement est donc le résultat des forces d'adhésion F_a (ou F_1) et de la force de pesanteur F_g (ou F_2) (**figure I.16**).

Comme nous l'avons déjà souligné, les forces de Coulomb jouent un rôle prépondérant et il est bien évident que la nature du matériau support influencera de façon considérable ce phénomène [28].

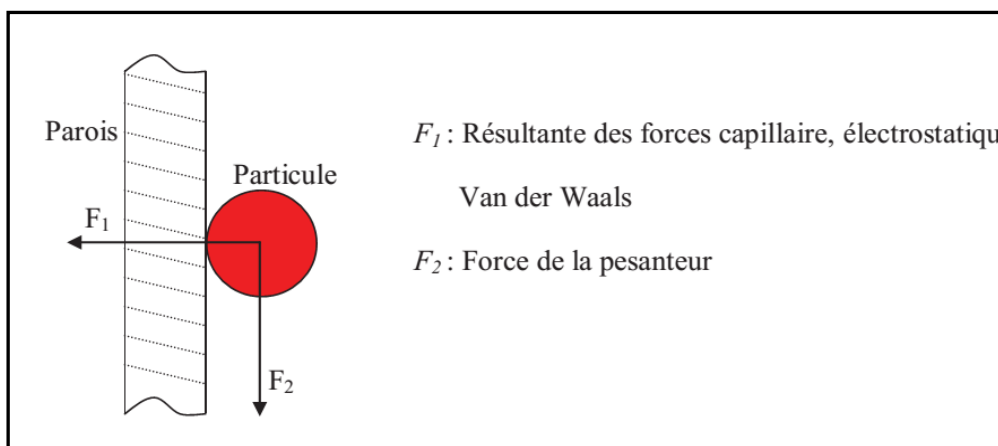


Figure I.16 : Représentation des différentes forces intervenant dans l'interaction particule-parois [28].

f. Forces aérodynamiques

Dans l'étude théorique du mouvement des particules en présence ou en absence de champ électrique, il faut tenir compte des forces aérodynamiques agissant sur ces particules. L'équation des forces agissant sur une particule chargée électriquement est la suivante [28]:

$$F_i = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad (\text{I.6})$$

où:

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

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

$$F_i = W(\rho_s - K_\rho) \frac{dv}{dt} \quad (\text{I.7})$$

où:

v : c'est la vitesse de particule, K :coefficient de forme [35] (pour les particules sphériques $K = 0,5$), W : le volume d'une particule ayant la densité ρ_s ; ρ densité de l'air. La force aérodynamique s'exprime par la relation :

$$F_a = C_d \pi R^2 \rho v_r^2 / 2 \quad (\text{I.8})$$

C_d : étant en fonction du nombre du Reynolds, v_r : vitesse relative d'une particule dans l'air. La friction de l'air, ou la résistance de l'air, est un exemple de frottement du fluide. La force de friction est dépendante de la vitesse. Cette dépendance peut être très compliquée, et seulement les cas spéciaux peuvent être traités analytiquement. À des vitesses très faibles des particules, la résistance de l'air est approximativement proportionnelle à la vitesse et peut être exprimée sous la forme :

$$F_f = -bv \quad (\text{I.9})$$

où le signe négatif implique qu'il est directement opposé à la vitesse [28].

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une revue bibliographique concernant les phénomènes tribo-électriques qui étant extrêmement complexes et mal expliqués, l'approche expérimentale est indispensable à l'étude des applications possibles dans le domaine de la séparation des matériaux granulaires en utilisant les forces des champs électriques.

Nous avons donné par la suite quelques généralités sur les matériaux isolants solides qu'on retrouve en général dans les déchets des Equipements Electroniques et Electriques (DEEE) pour les besoins des dispositifs utilitaires. Les isolants solides, notamment les polymères sont très demandés dans le domaine industriel ayant égard à leurs excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques mais surtout pour leurs coûts raisonnables.

Une partie conséquente de ce chapitre a été consacrée pour décrire et expliquer une multitude de dispositifs de charge triboélectrique (rotatifs, à vibrations, à lit fluidisé) et divers lits fluidisés dont l'efficacité a déjà été prouvé pour des applications particulières.

Chapitre II : Procédure, Méthodologie et Résultats expérimentaux

II. Procédure, Méthodologie et Résultats Expérimentaux

La séparation tribo-aéro-électrostatique est un processus complexe et fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules [34]. Il est contrôlé par plusieurs facteurs d'entrée (tension, concentration de matière à séparer...) et les réponses du système définissant la qualité des produits obtenus en sortie (rendement et pureté). Les résultats présentés dans le cadre de ce chapitre ont comme objectif, l'étude expérimentale des processus de séparation tribo-aéro-électrostatique. Les données expérimentales obtenues serviront aussi à la validation des résultats des simulations numérique présentés dans le chapitre IV.

Dans un premier temps nous avons étudié le séparateur tribo-aéro-électrostatique à faible débit en régime intermittent, pour diverses quantités de mélanges granulaires, afin de cerner les facteurs qui influent de façon significative sur la réponse du processus. Une deuxième série d'expériences a été réalisée ensuite pour caractériser le régime continu de fonctionnement du lit fluidisé.

Enfin, nous allons présenter les résultats d'expériences réalisées avec un lit fluidisé industriel en régime intermittent.

II.1 Charge triboélectrique d'un mélange de trois matériaux granulaires dans un lit fluidisé

Le dispositif expérimental à faible débit présenté sur la **Figure II.1**, (réalisé au laboratoire APELEC) se compose d'une chambre à prisme rectangulaire (115 mm x 85 mm x 400 mm), avec deux parois verticales opposées de Polycarbonate, les deux autres parois constituées de plaques en aluminium reliées à une alimentation haute tension, et une plaque perforée au bas de celle-ci. Les granules déposés sur cette assiette sont dispersés par l'air fluidisant orienté verticalement dans la chambre triboélectrique, où se produisent plusieurs collisions granule-granule et collisions granules-paroi. Les particules chargées sont attirées Sous l'action d'un champ électrique perpendiculaire à la direction du déplacement du jet d'air, les granules sont attirées par les deux électrodes alimentées à haute tension, de polarités différentes, et sont collectés dans les deux bacs du collecteur, puis transportée dans une cage de faraday connectées à un électromètre afin de mesurer leur charge électrique.

par les électrodes de polarité opposée et tombent dans les deux bacs de collecte [37].

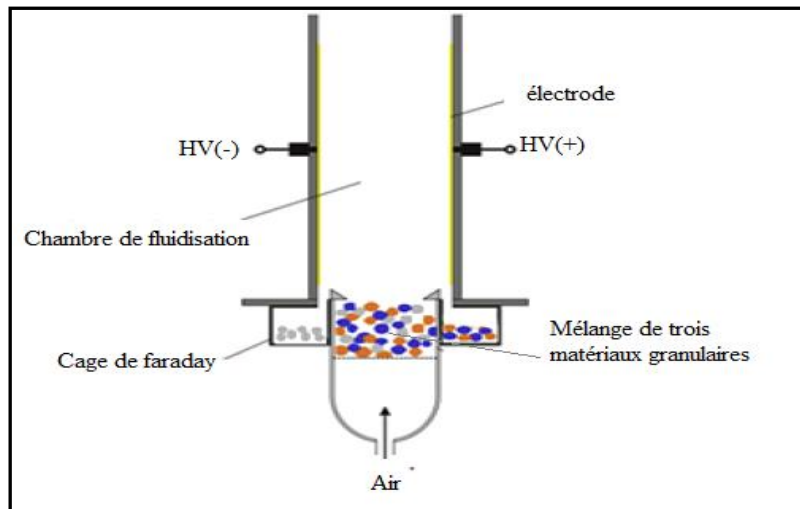


Figure II.1 Dispositif de séparation à faible débit et électrodes verticales [36]

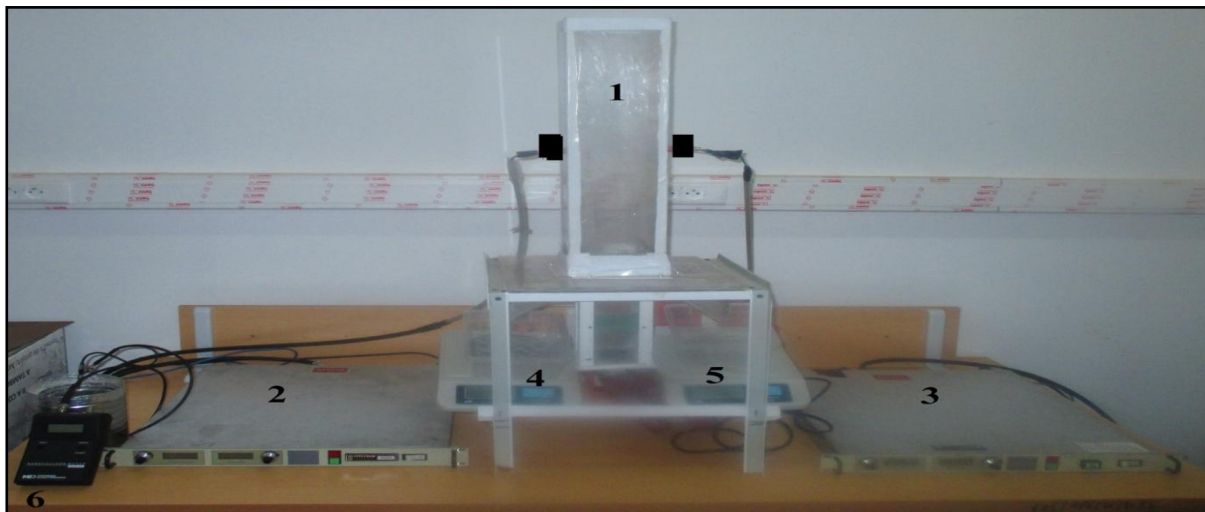


Figure II.2 : Banc expérimental pour l'étude de la charge des mélanges de trois matériaux plastiques dans un dispositif de séparation à faible débit et électrodes verticales ; 1 : dispositif de séparation à faible débit et électrodes verticale ; 2-3 : sources haute tension ; 4-5 : Balances électroniques ; 6 : électromètre.

La quantité de matériau collectée est mesurée à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de 0,01g. La particularité fonctionnelle de ce dispositif est que, une fois les granules ont accumulé une charge suffisamment grande, elles vont être attirés par des forces électriques à une électrode de polarité opposée et ne participeront plus au processus de charge triboélectrique[37].

II.2. Régime intermittent

La première partie de ce chapitre porte sur le comportement des mélanges de trois matériaux plastiques granulaires dans le lit fluidisé parallélépipédique en régime intermittent. 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[24]:

✓ *Efficacité de la collecte*

$$\rho (\%) = \frac{m_{tc}}{m_t} \cdot 100 \quad (\text{II.1})$$

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*

$$P (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \cdot 100 \quad (\text{II.2})$$

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*

$$n (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \cdot 100 \quad (\text{II.3})$$

Le but de cette étude expérimental est d'évaluer les facteurs qui influencent l'efficacité du processus de charge triboélectrique en vue de l'application éventuelle d'un tel dispositif à la séparation électrostatique des mélangés granulaires [40].

II.2. 1. Description physique des matériaux granulaires

Les expériences de séparation électrostatique ont été effectuées sur des mélanges de trois matériaux granulaires : le polystyrène polyvinylique (PVC), le polypropylène (PP) et polystyrène à fort impact (HIPS) (Figure II.3).

a) Polystyrène "choc" ou HIPS:

Nommé aussi acrylonitrile butadiène styrène est un copolymère formé par du styrène et du polybutadiène(**Figure II.3.a**). C'est le plus commun de la famille des thermoplastiques, car il est résistant, capable de supporter des impacts plus forts que le polystyrène normal. Ce polymère est employé par l'industrie pour des produits rigides, légers et moulés (bacs à douche). Le polybutadiène a été un des premiers élastomères synthétiques à être inventé car il est très similaire au caoutchouc naturel[41].

Le HIPS s'obtient par l'ajout de caoutchouc pendant la polymérisation du polystyrène. Le matériau 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 et est utilisé pour la fabrication des carcasses d'imprimantes, photocopieurs et des cartouches de tonner [43]. Sa densité volumique est $\rho = 1,030 \dots 1,060 \text{ kg/m}^3$.

b) Polypropylène (PP) :

C'est aussi un polymère très polyvalent qui sert à la fois comme thermoplastique et comme fibre (**Figure II.3.b**). Il est très facile à colorer et n'absorbe pas l'eau. On le trouve beaucoup sous forme de pièces moulées dans les équipements automobiles (pare-chocs, tableaux de bord, habillage de l'habitacle) et dans le mobilier de jardin.

Ce matériau sert à fabriquer des boîtes à aliments qui résistent au lave-vaisselle (parce qu'il ne fond pas en dessous de 160°C). Le polypropylène est aussi utilisé dans la fabrication de fibres synthétiques (tapis, moquettes, cordes, ficelles) mais aussi pour les emballages alimentaires en raison de son aspect brillant et de sa résistance (flacons, films). Cependant, le PP film est un des plastiques usuels les plus difficiles à recycler surtout s'il est imprimé. Sa densité volumique est $\rho = 0,905 \text{ kg/m}^3$ [43].

c) Le polychlorure de vinyle :

Connu sous le sigle "PVC", est un polymère thermoplastique de grande consommation (**Figure II.3.c**). Il est préparé à partir de deux matières premières : à 57 % de sel de mer (NaCl) et à 43 % de pétrole, c'est la seule matière plastique constituée par plus de 50 % de matière première d'origine minérale[44], Sa densité volumique est $\rho = 1,38 \text{ kg/m}^3$.

Les échantillons ont été préparés sous forme de mélanges de trois produits avec des compositions différentes. Les expériences ont été effectuées à une vitesse fixe de l'air de fluidisation $v = 6 \text{ m / s}$ dans des conditions environnementales relativement stables : température $T = 17 \text{ à } 22 \text{ ° C}$, humidité relative $RH = 44 \text{ à } 60\%$.



(a)

(b)

(c)

Figure II.3 : Aspect des granules du HIPS(a), du PP (b) et du PVC(c) appartenant à la classe granulométrique 2-3 mm.

Tableau II.1 : Caractéristiques des matériaux plastiques granulaires vierges utilisés dans les expériences de charge par effet tribo-électrique en régime intermittent

Granule	HIPS	PP	PVC
Forme	Cylindrique	Cylindrique	Cylindrique
Taille [mm]	Ø 2,7 x 3,2	Ø 3 x 3,6	Ø 2,5 x 3,4
Densité [kg/m^3]	1,030...1,060	0,905	1,38

II.2.2. Etude des facteurs influents

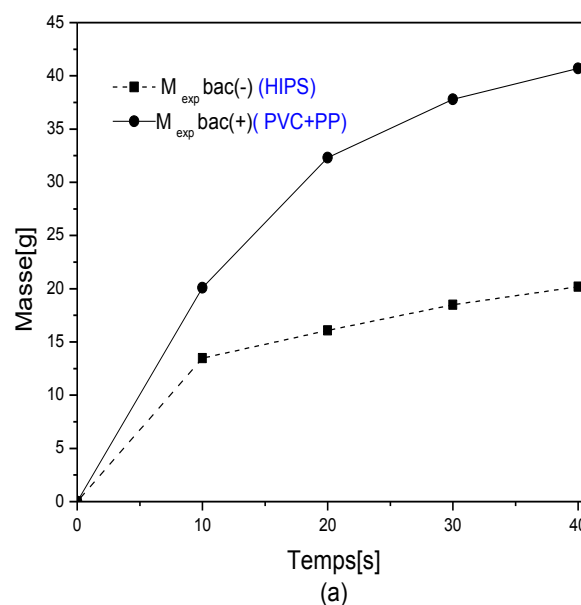
II.2.2.1 Effet de la durée du processus de triboélectricité

L'objectif de la première série d'essais était d'évaluer la faisabilité du processus de charge triboélectrique pour un mélange de trois matériaux granulaires équilibrés : (33% HIPS+ 33%PVC+33% PP). Les tests sur le mélange granulaire ont été effectués pour chaque valeur du temps t ($t= 10 \text{ s}$, 20 s , 30 s et 40 s), pour plusieurs valeurs de tension ($U = 28 \text{ kV}$, $U = 30 \text{ kV}$, $U = 32 \text{ kV}$).

Tableau II 2 : Résultats expérimentaux obtenus en fonction du temps t pour 3 valeurs de la tension U pour de 33% HIPS+33% PP+33%PVC

$U=28\text{kV}$	Masse récupérée Bac(-) [g]	Masse récupérée Bac(+) [g]	Charge Bac(-) [nC]	Charge Bac(+) [nC]	Q/m Bac(-) [nC/g]	Q/m Bac(+) [nC/g]
t=10 s	13,47	20,1	65	-87	4,82	-4,32
t=20 s	16,7	32,3	75	-95	4,49	-2,94
t=30 s	18,5	37,8	184	-122	4,54	-3,22
t=40 s	20,2	40,7	86	-140	4,25	-3,43
U=30kV						
t=10 s	15,1	24,2	118	-156	7,81	-6,44
t=20 s	22,4	35,4	132	-164	5,82	-4,63
t=30 s	35,6	41,6	144	-177	4,04	-4,25
t=40 s	42,3	61,2	165	-210	3,90	-3,43
U=32 kV						
t=10 s	18,3	26,4	156	-185	8,52	-7
t=20 s	24,4	38,7	192	-286	7,86	-7,39
t=30 s	33,3	52,9	225	-365	6,75	-6,90
t=40 s	51,6	78,49	325	-532	6,29	-6,77

Les mesures ont été effectuées sur une durée de 40s pour une masse initial égal à 240 g 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 II.4.



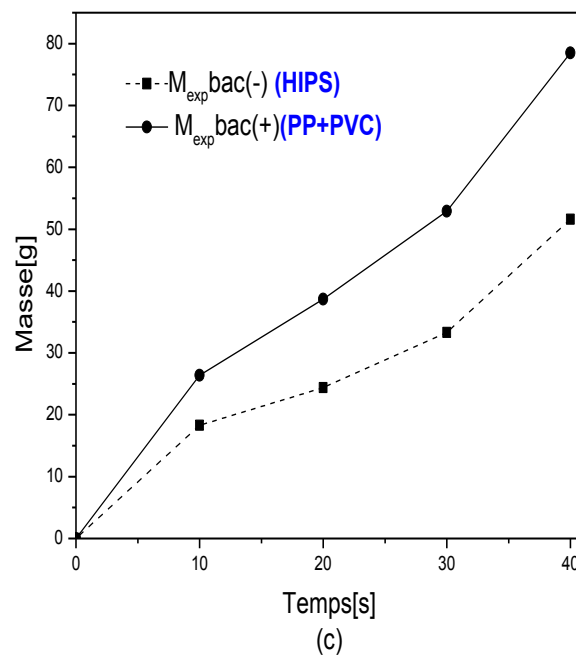
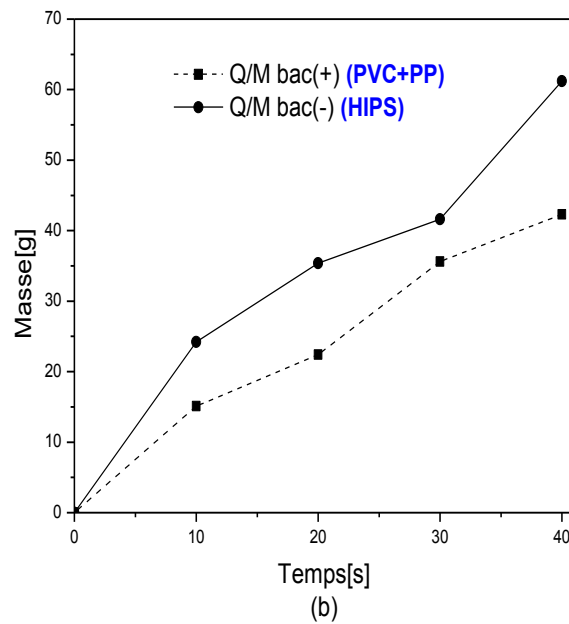


Figure II 4 : Masses récupérées dans les deux bacs en régime intermittent pour différentes valeurs de tensions, a) 28kV, b) 30kV, c) 32kV. M initiale $M=240g$ pour 33% HIPS+33%PVC +33%PP

Les graphes ci-dessus, montrent que les masses des matériaux récupérés dans les deux bacs sont différents à celle récupérées dans le bac (+) est plus importante. Sachant que le PP se trouve plus proche du PVC dans la série triboélectrique donc les deux produits seront collectés dans le même bac. La tension d'alimentation U utilisée est conforme aux essais

préliminaires, les limites inférieures et supérieures étant respectivement de 28kV et 32kV. La force électrique d'attraction est proportionnelle au champ électrique et à la charge des particules ($\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$).

La **figure II.5** montre que les charges des particules restent approximativement constante mais qui augmente avec l'augmentation de la tension d'alimentation parce qu'il existe des particules bien chargées mais qui se trouvent dans un champ qui n'est pas assez intense pour les conduire vers les électrodes de polarités opposées.

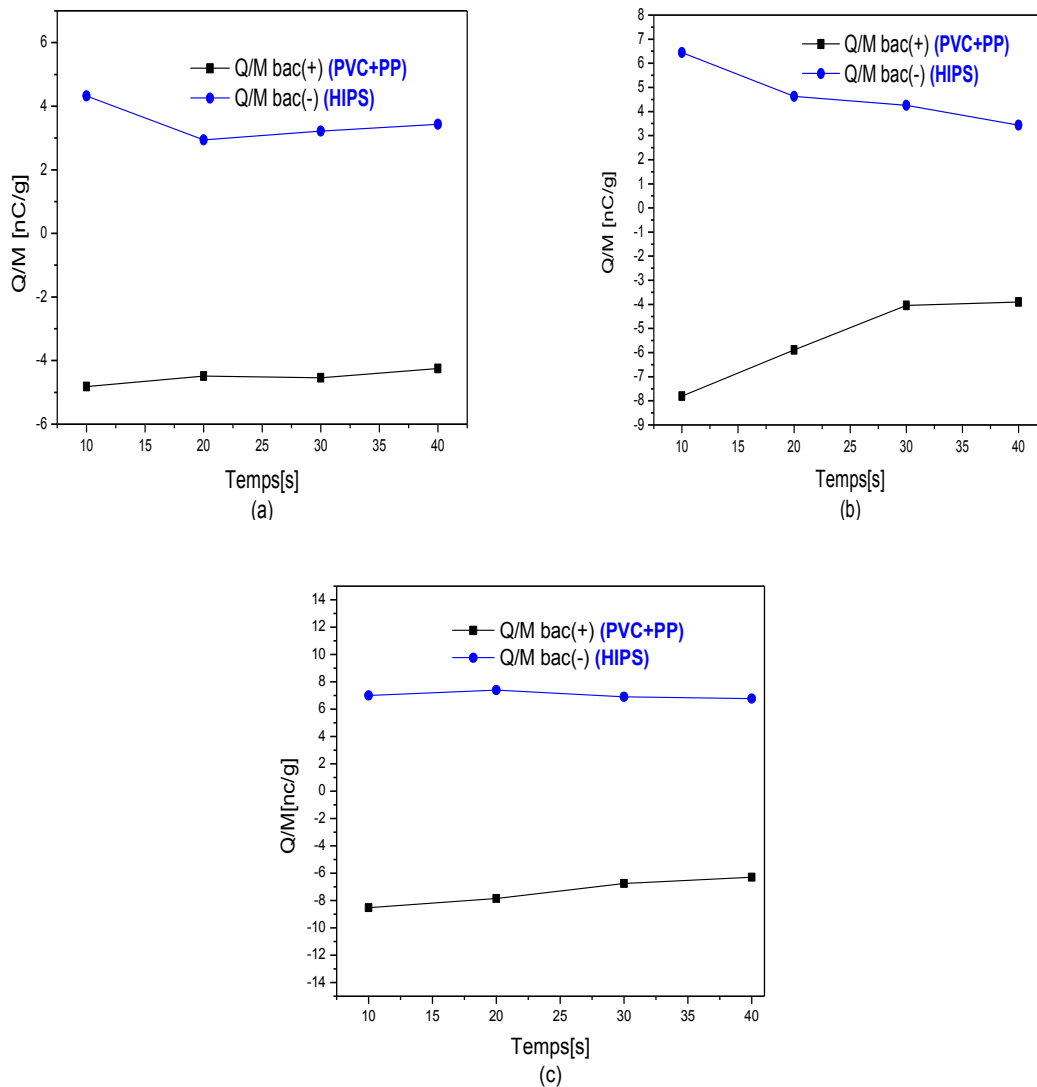


Figure II. 5 : Variation du rapport Charge/masse (Q/m) en fonction de la tension en régime intermittent: a) $U = 28 \text{ kV}$, b) $U = 30 \text{ kV}$, c) $U = 32 \text{ kV}$. M initial $M=240\text{g}$ pour un mélange 33% HIPS+33%PVC +33%PP

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 II.5**) est exprimé par rapport à la masse de la matière récupérée. Il décrit l'évolution de la charge accumulée au cours de la séparation tribo-électrostatique.

Pendant le processus d'accumulation de charge tribo-électrique, les granules *HIPS* acquièrent une charge positive et sont attirés par l'électrode de polarité négative, tandis que les granules *PVC* et *PP* 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.

II.2.2.2 Effet de la tension appliquée

Pour les autres échantillons, les essais ont été effectués à $t = 45$ s et pour plusieurs valeurs de la haute tension appliquée, $U = 28$ kV, 29kV, 30kV, 31 kV, 32 kV. Le **tableau II.3** présente les mesures de masses récupérées et de charge des trois types de particules HIPS, PP et PVC qui ont été effectuées pour différentes valeurs de la tension.

Tableau II.3 : Résultats expérimentaux préliminaires du dispositif à débit faible

Tension U [kV]	Masse récupérée Bac(+) [g]	Masse récupérée Bac(-) [g]	Pureté HIPS [%]	Pureté PVC [%]
28	43,9	20,7	88,2	74,69
29	62,28	31,83	92,98	76,81
30	78,55	46,45	95,07	78,48
31	80,78	50,23	98,56	80,35
32	80,82	53,9	97,23	80,02

D'après le graphe de la **Figure II.6**, on observe qu'à des faibles niveaux de la tension appliqué(28 kV), 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 ($U = 36$ kV) une décharge couronne se produit, conduisant à une mauvaise récupération des particules. Des valeurs satisfaisantes ont été obtenues sur la plage de tensions $U = 28\div 32$ kV représentant les limites inférieure et supérieure de la tension U .

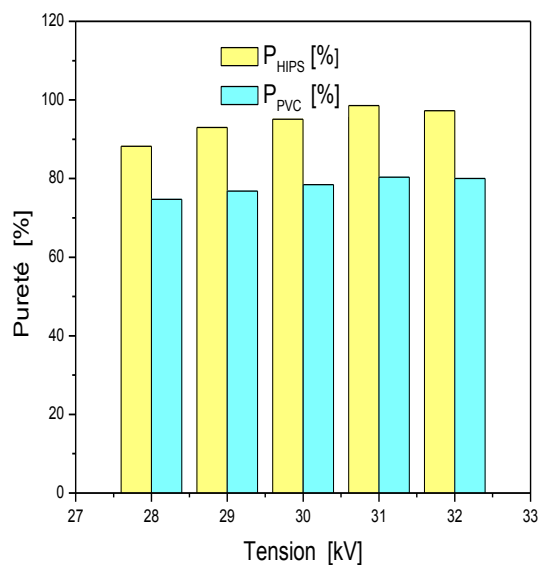
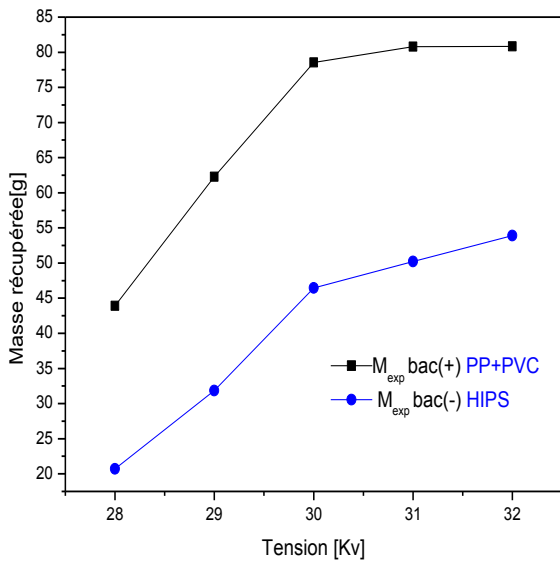


Figure II.6 : Masse récupérée en fonction de la tension d'alimentation pour 33% HIPS+33% PP+33%PVC, $M=240g$

Figure II.7 : Pureté de la masse récupérée pour le cas de 33% HIPS+33% PP+33%PVC, $M=240g$

La pureté des matériaux séparés est influencée par la haute tension. Les résultats obtenus par la séparation électrostatique sont représentés par la **Figure II.7**.

La pureté des matériaux collectés (**Tableau II.3**) a été plutôt acceptable, il est convenu d'avoir une valeur minimale de 76.69%. Le tableau 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 leur pureté. Les meilleures valeurs de puretés sont obtenues pour une valeur de la tension $U=31$ 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.

II.2.2.3 Effet de la composition du mélange

a) Echantillon de mélange 60% HIPS + 30 % PVC +10% PP

L'objectif des expériences réalisées auparavant était d'évaluer la faisabilité du processus de charge triboélectrique pour un mélange de trois matériaux granulaires: **60% HIPS + 30 % PVC +10% PP**. Les deux électrodes sont connectées à une tension de 28 kV, la température $T= 23.4^{\circ}\text{C}$ et l'humidité $RH=44.5\%$. La masse expérimentale instantanée des produits collectés est mesurée à chaque $\Delta t = 10\text{s}$ avec des balances électroniques (résolution : 0,01 g), assurant l'acquisition et le traitement des données. Elles permettent 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.

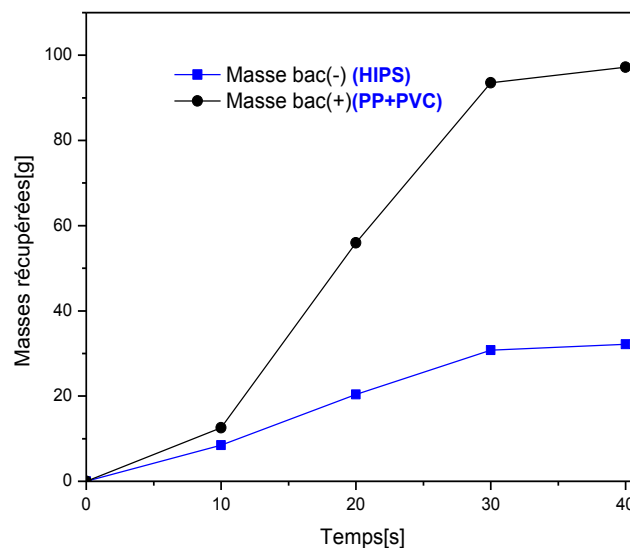


Figure II.8 : Masses récupérées dans les deux bacs du collecteur en régime intermittent.

Masse initiale $M=240\text{g}$ pour 60% HIPS + 30 % PVC +10% PP

La masse récupérée dans le bac(-) réservée aux particules HIPS est plus petite que celle récupérée dans le bac(+), en dépit du fait qu'ils sont majoritaires dans la composition du mélange granulaire. En effet, un granule de HIPS a une probabilité plus faible qu'un granule de PVC ou PP d'entrer en collision avec un granule 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 (**Figure II.8**).

b) Echantillon de mélange 30% HIPS + 60 % PVC + 10% PP

Pour la deuxième d'expérience, on a utilisé un mélange qui contient : **30% HIPS + 60 % PVC + 10% PP**. Les deux électrodes sont connectées toujours à une tension de 28 kV, la température $T = 23.4^{\circ}\text{C}$ et l'humidité $RH = 44.5\%$. La masse instantanée des produits collectés est mesurée à chaque $\Delta t = 10\text{s}$ avec des balances électroniques (la résolution : 0,01 g). La masse totale a été calculée comme la somme des valeurs enregistrées au cours du processus de séparation.

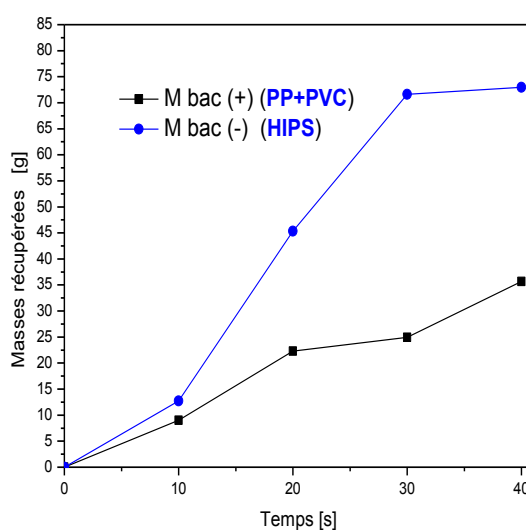


Figure II.9 : Masses récupérées dans les deux bacs du collecteur en régime intermittent.

Masse initiale $M = 240\text{g}$ pour 30% HIPS + 60 % PVC + 10% PP

Dans cette expérience, la composition du mélange granulaire était : **30% HIPS + 60 % PVC + 10% PP**. La durée de l'expérience était limitée à 40s; à $t > 10\text{s}$, on remarque que la masse collectée au bac (-) est plus importante car les particules HIPS ont plus de chance de se charger et de se séparer (particules minoritaires) que les granules du PVC et PP (particules majoritaires) qui commencent à polluer le produit HIPS (De plus en plus des particules de PVC et du PP sont entraînées dans le compartiment du HIPS par les forces aérodynamiques) (**Figure II.9**)

II.3. Régime continu

Les expériences visaient à définir la plage de variation de divers facteurs qui influencent le flux de matériaux de séparation et d'estimer le maximum qui peut être traité en régime continu. Parmi ceux-ci, la différence de potentiel entre les deux électrodes du lit fluidisé. Au cours des expériences, la température et l'humidité relative ont été contrôlées. Leurs valeurs sont maintenues quasi constantes respectivement dans l'intervalle [18-22] C°, [30-40]% RH.

II.3. 1. Procédure expérimentale

Les expériences de séparation électrostatique ont été effectuées sur des mélanges de trois matériaux granulaires : le polystyrène polyvinylique (PVC), le polypropylène (PP) et le polyamide (PA) (**Figure II.10**).



(a)

(b)

(c)

Figure II.10 : Aspect des granules du PA (a), de PP (b) et de PVC(c) appartenant à la classe granulométrique 2÷3 mm.

Une différence se pose concernant l'alimentation en matière, par l'utilisation dans ce cas d'un convoyeur vibrant (**Figure II.11**). Son débit varie en fonction des besoins des utilisateurs et il est nécessaire de diriger les granules vers la chambre inférieure de tribo-électrisation.

Tableau II.4 : Caractéristiques des matériaux plastiques granulaires vierges utilisés dans les expériences de charge par effet tribo-électrique en régime continu

Granule	PA	PP	PVC
Forme	Cylindrique	Cylindrique	Cylindrique
Taille [mm]	Ø 2,7 x 3,2	Ø 3 x 3,6	Ø 2,5 x 3,4
Densité [kg/m ³]	1,14	0,905	1,38

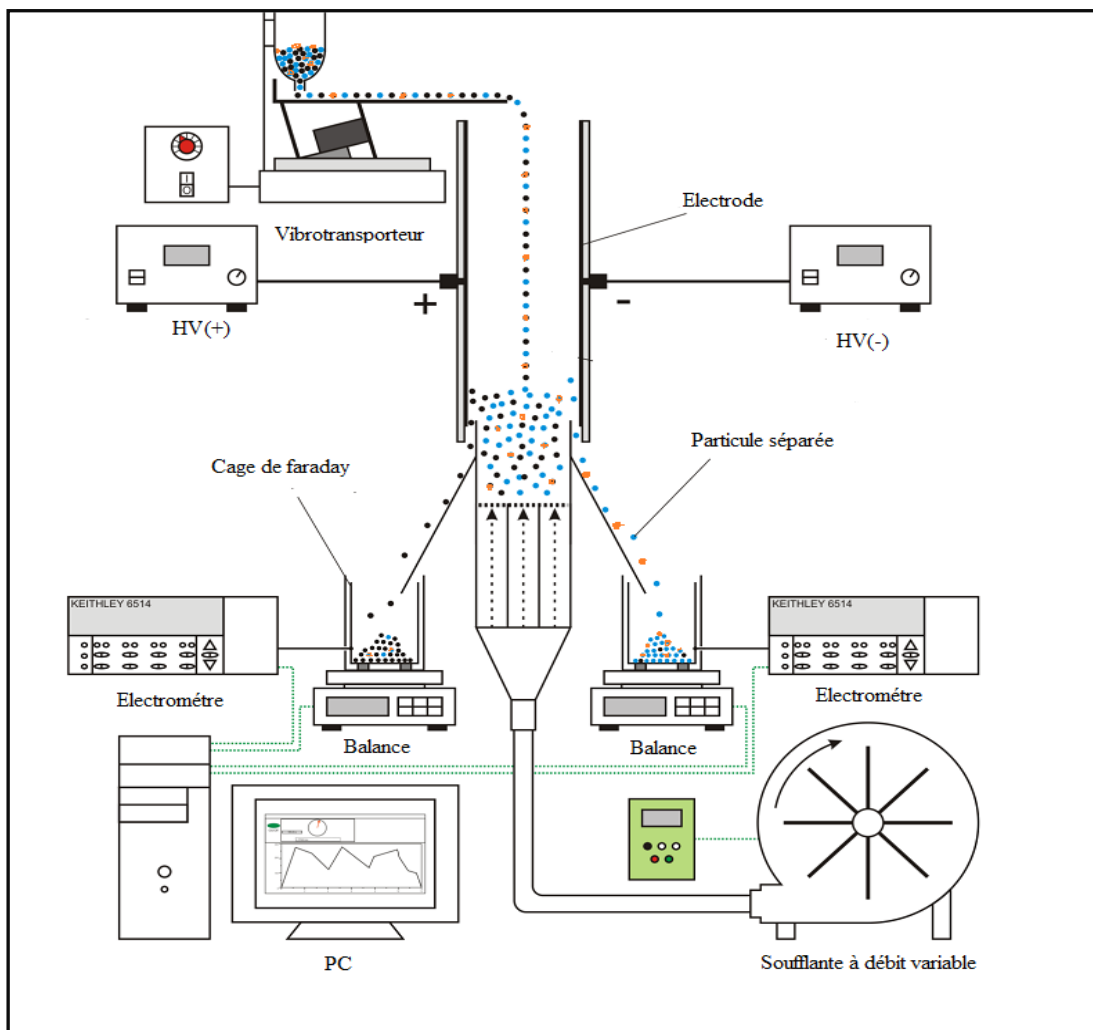


Figure. II.11 Séparateur tribo- aéro-électrostatique à électrodes plaques parallèles (en régime continu)

II.3.2 Effet de la haute tension appliquée

L'ensemble des expériences effectuées pour déterminer la variation de ce facteur a été faite avec un mélange granulaire 33%PA+33%PVC+33%PP, pour une masse initiale de 240 g. L'ensemble des expériences menées vise à assurer le suivi du processus de séparation d'un mélange granulaire en temps réel, pour trois valeurs de différence de potentiel. Les valeurs choisies sont {28 ;30 ;32} kV. Les autres paramètres sont maintenus à des valeurs : $d= 5$ g/s à la composition du mélange granulaire 33%PA+33%PVC+33%PP. Les résultats obtenus sont représentés dans le graphique à la **figure II.12**.

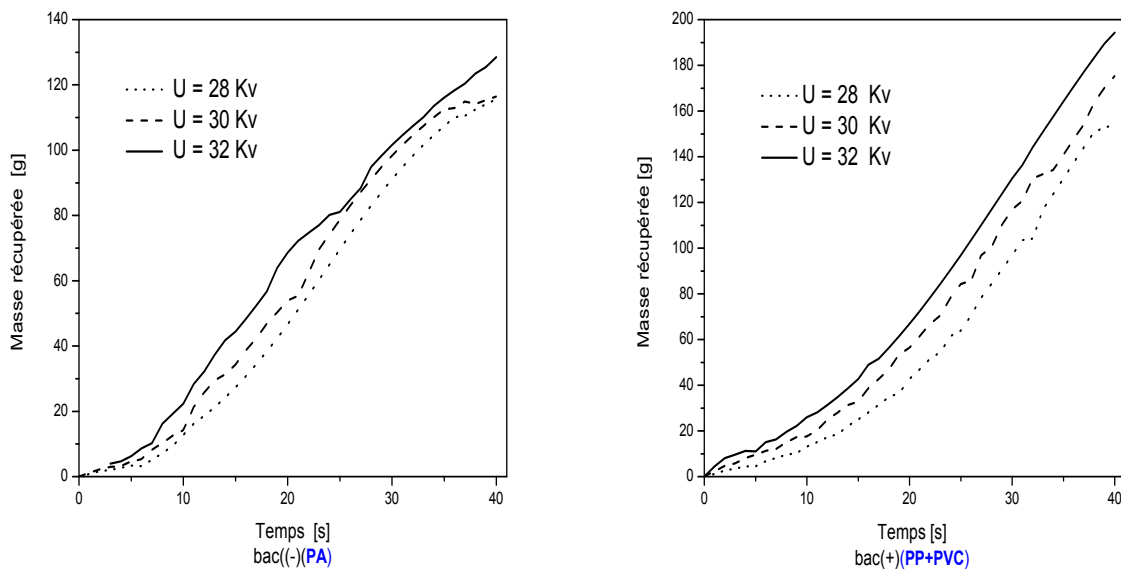


Figure II.12. Evolution des masses expérimentales récupérées dans les deux bacs du collecteur bac(-) (PA) et bac(+) (PP+PVC) en régime continu, pour trois valeurs différentes de différence de potentiel.

On remarque que les courbes qui représentent les masses séparées et récupérées dans les deux bacs du collecteur sont linéaires, ce qui indique un temps de traitement stable. En outre, l'augmentation de la valeur de la différence de potentiel entre les électrodes permet de recueillir plus de quantité de matière dans le collecteur. En effet, étant donné que le champ électrique est plus intense, les granules sont plus déviés vers les électrodes. En ce qui concerne les valeurs de pureté obtenue à la fin des expériences, le tableau **II.5** montre une augmentation substantielle avec l'augmentation des valeurs de la différence de potentiel (28 kV à 32kV).

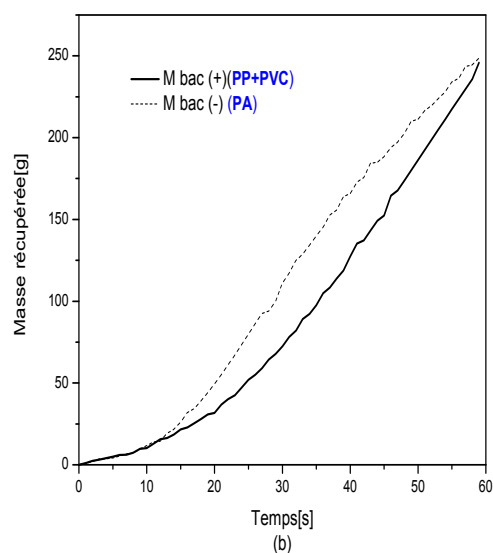
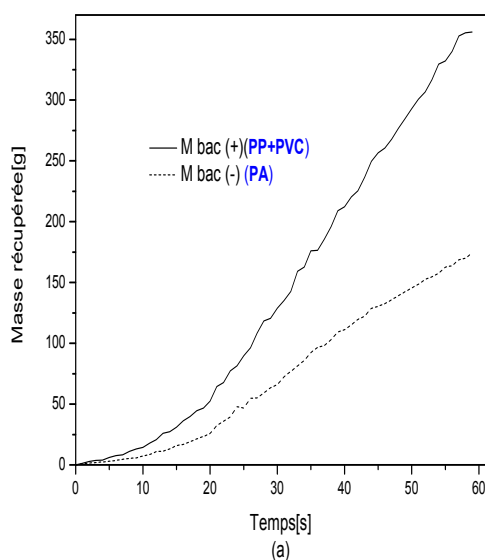
Tableau II.5. Pureté des matériaux séparés à différentes valeurs de la différence de potentiel entre les électrodes

Granule	Pureté [%]		
	U=28 kV	U=30 kV	U=32 kV
PA	95,33	97,36	98,52
PVC	75,66	81,36	85,63

II.3.3 Effet de la composition granulaire du mélange

Afin d'étudier l'influence de la composition granulaire du mélange sur le processus de séparation, on a utilisé des mélanges synthétiques de trois matériaux : PA, PVC et PP (**figure II.10.**), qui pèsent 240g dont les proportions sont les suivantes: **a)** 30% PA +60% PVC +10% PP; **b)** 60% PA +30% PVC +10% PP; **c)** 30% PA +30% PVC +40% PP; **d)** 33% PA +33% PVC + 33% PP.

L'alimentation de matière a été faite à un débit de 5 g/s, la différence de potentiel entre les électrodes a été fixée à la valeur de 32 kV. La durée des essais est de 60 secondes.



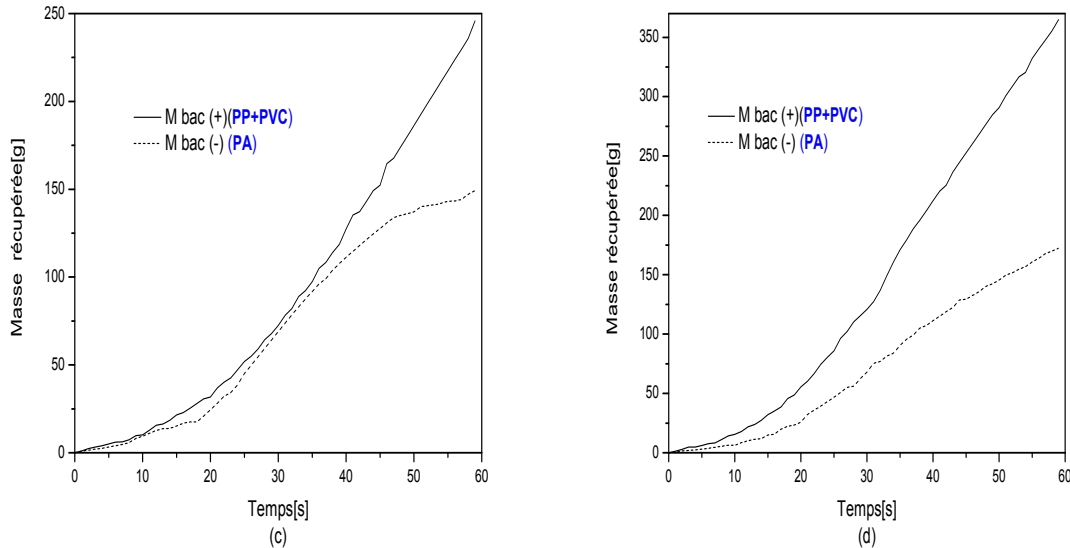


Figure. II.13. Evolution des masses récupérées dans les deux bacs du collecteur en régime continu pour:

- a**-30% PA + 60% de PVC+10% PP **b**- 60% PA + 30% de PVC+10% PP
c-33% PA + 33% de PVC+33% PP **d**- 30% PA+ 30% de PVC+40% PP

Pour les cas des mélanges non équilibrés (**Fig. II.13.a.**) et (**Fig. II.13.d.**), on remarque des quantités identiques des matériaux collectés dans les deux bacs du collecteur: bac(-) réservé aux particules PA et bac (+) réservé au particules PP et PVC. Dans les deux cas toutes les particules PA (minoritaires) sont récupérées rapidement dans le bac(-), c'est parce qu'ils ont plus de chance d'être chargés (avec les particules PVC et PP) attirés par l'électrode (-) puis entraînés vers les compartiments du collecteur.

On remarque aussi que la masse récupérée du PVC et du PP est importante à cause de sa concentration élevée dans le mélange introduit dans le séparateur au début et durant le processus de séparation. Le mélange de matières est mieux recueilli principalement pour un mélange de 60%PA +30%PVC +10%PP (**Fig. II.13.b**), puisque on a considéré que le PVC et le PP se charge de même signe durant la séparation (c'est comme si on a un seul produit qui va se charger négativement dont sa concentration est de 40% et le produit PA qui va se charger positivement dont sa concentration est de 60%). C'est pour cela la différence entre les matériaux collectés dans les deux bacs du collecteur diminue.

II.3.4 Effet du débit de matière

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. La **figure II.14** représente l'évolution de la masse évacuée par le séparateur des matières collectées dans les deux bacs du collecteur, pour des concentrations du mélange granulaires de 240 g : 33%PA +33%PVC+ 33%PP à différentes valeurs de débit d'air, pour une durée de 60 secondes. Par ailleurs la tension d'alimentation des électrodes est de 28 kV. Les expériences ont été réalisées à une température $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ et une humidité $HR = 44.6\%$.

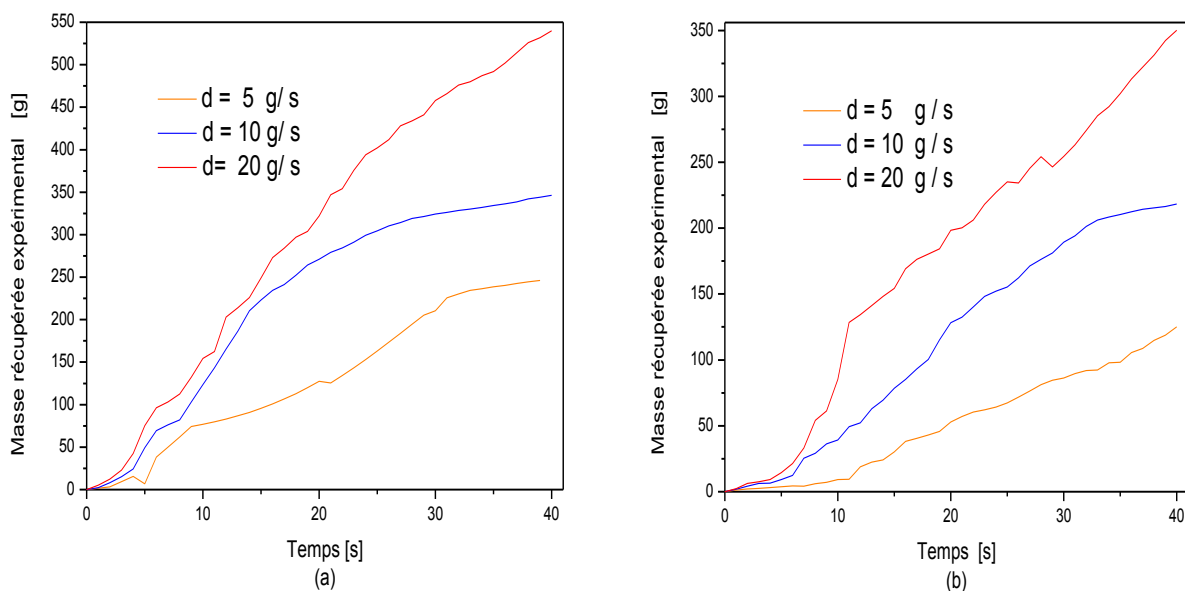


Figure II.14. Masses expérimentales récupérées en régime continu pour différentes valeurs de débit d : 5 [g/s]; 10[g/s]; 20 [g/s]

a-bac(+) (PA)

b-bac(-) (PP+PVC)

On remarque qu'en augmentant le débit de matière, les masses récupérées augmentent. Le flux au quelles expériences ont été effectuées pour $U=28\text{kV}$ pour des valeurs de débit de matière égale à 5,10 et 20[g/s]. Pour $d=5 \text{ g/s}$, les particules subissent moins de collisions en raison de la petite masse de matière introduite dans la chambre tribo-électrique. En augmentant le flux de matière à 10 [g/s], on remarque une légère augmentation de la masse récupérée dans les deux bacs du collecteur.

Dans le cas d'un débit de 20 [g/s], il est remarqué que la limite maximale de l'appareil n'est pas encore atteinte car, après une certaine période de temps, le débit récupéré commence à diminuer bien que le flux d'entrée reste constant.

II.4. Charge d'un mélange de trois matériaux plastiques granulaires dans un dispositif semi industriel à lit fluidisé en régime intermittent

Les procédés de séparation électrostatique sont déjà utilisés pour le tri des matériaux isolants granulaires mélangés, provenant du broyage des déchets industriels [45]. Le plus souvent, les matériaux broyés sont chargés par effet triboélectrique dans des dispositifs à vibrations, rotatifs ou à lit fluidisé (chapitre I)[46]. 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 [47,49].

L'état de charge des particules pourrait être amélioré en augmentant la durée du processus de charge, au détriment de la productivité du procédé [50]. 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. Le séparateur industriel assure le chargement électrique des particules dans un lit fluidisé et pour le chargement optimal, il est nécessaire de déterminer la masse minimale de matière du lit dont le but est d'assurer un bon fonctionnement de l'appareil [51].

Tableau II.6 : Masses et pureté du PVC et du HIPS récupéré pour une masse de mélange granulaire de 3Kg

Masse de mélange[g]	Masse HIPS Bac(-) [g]	Masse PVC,PP Bac(+) [g]	Pureté HIPS [%]	Pureté PVC [%]
3000	356, 2	606, 7	97, 6	81

Le **tableau (II.6)** représente les valeurs de masse récupérées mesurées après 10 min de séparation pour une tension $U=32\text{kV}$, en grammes et en pourcentage, qui ont été effectuées avec un mélange de 3kg qui contient 33%HIPS+33%PVC+33%PP. La récupération en pourcentage montre l'évolution de la masse de la matière séparée par rapport à la masse initialement introduite dans le séparateur.

Conclusion

La première partie de ce chapitre a été consacrée à l'étude expérimentale préliminaire réalisée dans le cas du fonctionnement intermittent qui nous a permis de définir les limites de la tension de fonctionnement ($U = 28\div 32\text{ kV}$), les dimensions des matières granulaires qui varient dans la gamme ($1\div 2\text{ mm}$) et de la masse totale optimale du lit fluidisé ($M = 240\text{ g}$). A des proportions de matériaux données comme suit: 33%HIPS + 33%PVC +33% PP, la pureté des matières séparées est supérieure à 95% et dans le cas des mélanges disproportionnés, la pureté obtenue atteint plus de 99% pour la matière minoritaire.

Par ailleurs, dans le cas d'un fonctionnement continu, les résultats obtenus ont montré que les quantités de matière à séparer peuvent être importantes avec une excellente pureté en augmentant la tension entre les électrodes et en augmentant le débit d'air(valeur maximale $D=20\text{ g/s}$).

En outre, le séparateur industriel à lit fluidisé permet la séparation de mélanges de PVC, de PP et de HIPS, ayant des caractéristiques granulaires dans la gamme $1\div 2\text{ mm}$ avec une pureté du HIPS élevée ($> 97\%$)et une pureté du PVC plutôt bonne (81%), et ceci grâce à la présence du troisième matériau (PP) dans le mélange granulaire. Le flux de matière obtenue à la sortie du séparateur était d'environ 50 g/s .

Chapitre III : Elaboration des modèles numériques

III. Elaboration des modèles numériques

La séparation triboélectrique représente une solution pour le tri sélectif des mélanges de matières plastiques, chaque fois que les composants ont une taille, une forme, une densité, une perméabilité magnétique et une conductivité électrique similaires. L'efficacité de cette technique a déjà fait ses preuves [1]-[2]. Dans un séparateur triboélectrique les granules en plastique sont chargés par effet triboélectrique et séparés par des forces de champ électrique. Les chercheurs et les praticiens ont besoin d'un outil de simulation plus facile à utiliser pour réaliser les études de faisabilité qui précèdent le développement d'une nouvelle application. Par conséquent, le but de ce travail est d'introduire un modèle mathématique simple pour simuler le résultat d'un processus de séparation tribo-aéro-électrostatique pour les mélanges de trois matières plastiques granulaires [15]-[16].

L'étude se concentre sur la séparation d'un mélange de trois matériaux granulaires, notés A , B et C (chapitre II). L'utilisation de ce modèle suppose que l'on se place dans le cas de collisions parfaitement élastiques. D'une manière générale, les particules retrouveront donc leur forme initiale après la collision. Toutes les particules utilisées sont supposées initialement électriquement neutres, et ont une taille identique, mais ont des densités de masse et caractéristiques triboélectriques différentes. Dans le cas des mélanges de trois matériaux différents, plusieurs types de collisions peuvent se produire. Le premier type est celui qui est utile à la séparation électrostatique, qui est le contact inter-granulaire (entre A , B et C). Les autres collisions, considérées comme "parasites", se produisent entre les particules de matériau A, B ou C et la paroi, ainsi qu'entre les particules de même matériau. On suppose aussi que les deux matériaux les plus proches dans la série triboélectrique se chargent de même signe et ils seront collectés dans le même bac tandis que le troisième matériau se charge de signe opposé et il sera collecté dans l'autre bac du collecteur [36].

Pour chaque mélange de matériaux granulaires, 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 $M(t) > M_{lim}$ [24].

Une quatrième 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 (III.1)).

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 σ strictement positif, si cette variable aléatoire réelle X admet pour densité de probabilité la fonction $p(x)$ définie, pour tout nombre réel x , par [24] :

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

III.1. Elaboration du modèle numérique pour un séparateur tribo-aéro-électrostatique a faible débit en régime intermittent

En régime dit « intermittent », une quantité de matériau est introduite dans le lit fluidisé au début du cycle, le processus de séparation finit au moment où la masse restante est inférieure à la masse limite M_{lim} définie au paragraphe précédent.

III.1.1. Equations de base

La masse totale $M(t)$ des matériaux se trouvant dans le lit fluidisé à un instant t est exprimée comme suit [52]:

$$M(t) = M_A(t) + M_B(t) + M_C(t) \quad (\text{III.2})$$

Les concentrations respectives des matériaux A , B et C peuvent être exprimées en tant que:

$$c_A(t) = M_A(t)/M(t) , \quad c_B(t) = M_B(t)/M(t) , \quad c_C(t) = M_C(t)/M(t) \quad (\text{III.3})$$

Dans un lit fluidisé de géométrie connue et d'un débit d'air contrôlable. On suppose que le régime du lit fluidisé n'est pas significativement modifié par les changements de la masse $M(t)$, ce qui signifie que $N(t)$ est constant dans le temps, c'est-à-dire $N(t) = NI$. Pour le cas d'un mélange où les trois types de particules ont les concentrations $c_A(t)$, $c_B(t)$ et $c_C(t)$, chaque particule de type c subit $c_A(t) N$ contacts avec les particules de type A et $c_B(t)N$ contacts avec les particules de type B [53].

Supposant que le matériau C est situé entre A et B dans la série tribo-électrique, donc il existe deux coefficients λ_{CA} , $\lambda_{CB} < 1$ qui caractérisent respectivement l'effet des collisions $C-A$ et $C-B$. Par exemple, si une charge adimensionnelle unitaire est échangée à chaque collision $A-B$, la charge non dimensionnelle transférée au niveau d'un contact entre C et A serait λ_{CA} . Les coefficients λ_{AC} , $\lambda_{BC} < 1$ définissent de manière similaire l'effet des collisions $A-C$ et $B-C$.

Il convient de noter que $\lambda_{AC} = \lambda_{CA}$; $\lambda_{CB} = \lambda_{BC}$ avec $\lambda_{CA} + \lambda_{CB} = I$. Les valeurs du coefficient λ dépendent de la position des trois matériaux dans la série tribo-électrique [54]. Ainsi, au cours d'une période de temps t , le nombre de collision X_A échangé d'un granule A avec toutes les particules B et C par d'unité de temps est:

$$X_A(t) = \int_0^t [c_B(t) + \lambda_{AC} c_C(t)] N(t) dt \quad (\text{III.4a})$$

De même, le nombre de collisions X_B entre chaque granule B et les granules A et C peut être exprimé comme:

$$X_B(t) = \int_0^t [c_A(t) + \lambda_{BC} c_C(t)] N(t) dt \quad (\text{III.4b})$$

Le nombre de collisions X_C entre chaque granule C et les granules A et B est:

$$X_C(t) = \int_0^t [\lambda_{CA} c_A(t) - \lambda_{CB} c_B(t)] N(t) dt \quad (\text{III.4c})$$

Soit $P(X_A) = p(x_A)$, $x_A = X_A/N_I$, la probabilité que le granule A entre en collision avec les granules B et C , puis recueilli à l'électrode, dans des conditions bien définies (nature et taille des trois classes de granules, géométrie du lit fluidisé, flux d'air de ce dernier (Le lit fluidisé), la haute tension appliquée aux électrodes, etc ...). Les masses séparées des trois matériaux pendant une période de temps donnée par les formules suivantes:

$$M_{As}(t) = \int_0^t P(X_A(t)) M_A(t) dt = \int_0^t P(x_A(t)) M_A(t) dt \quad (\text{III.5a})$$

$$M_{Bs}(t) = \int_0^t P(X_B(t)) M_B(t) dt = \int_0^t P(x_B(t)) M_B(t) dt \quad (\text{III.5b})$$

$$M_{Cs}(t) = \int_0^t P(X_C(t)) M_C(t) dt = \int_0^t P(x_C(t)) M_C(t) dt \quad (\text{III.5c})$$

La probabilité $P(X_A)$, est donnée par la loi de Gauss :

$$P(X_A) = \Pi((X_A - X_{Aav})/\sigma_{X_A}) \quad (\text{III.6})$$

Où Π est la fonction de distribution normale standard. Cette expression peut être reformulée comme suit:

$$P(X_A) = \Pi((x_A - x_{Aav})/s_{x_A}) = p(x_A) \quad (\text{III.7})$$

Où: $x_A = X_A/N_1$, $x_{Aav} = X_{Aav}/N_1$, $s_{xA} = \sigma_{xA}/N_1$. On calcule les probabilités $P(X_B)$ et $P(X_C)$ avec les mêmes équations utilisées pour le granule A. On suppose qu'aucun granule n'est retiré du lit fluidisé jusqu'à ce que chaque particule obtient une charge suffisante pour être séparée. avec:

$$M_A(t) = M_{A1}, M_B(t) = M_{B1}, M_C(t) = M_{C1}, M(t) = M_1 = M_{A1} + M_{B1} + M_{C1},$$

$$N(t) = N_1, c_A = c_A(t) = c_{A1}, c_B(t) = c_{B1}, c_C(t) = c_{C1}$$

En remplaçant l'équation (III.4a) dans l'équation (III.7), on obtient:

$$X_A(t) = (c_B + \lambda_{AC} c_C)N_1 t \quad \text{(III.8)}$$

$$P(X_A) = p(X_A) = \Pi(((c_B + \lambda_{AC} c_C)t - x_{Aav})/s_{xA}) \quad \text{(III.9)}$$

Dans le cas où le temps $t_{50\%}$ (correspondant à la séparation de 50% des granules A) est connu, le nombre de collision moyen x_{Aav} , peut être calculé à partir de l'équation suivante:

$$(1 - c_{A1})t_{50\%} - x_{Aav} = 0 \quad \text{(III.10)}$$

Ainsi l'écart-type standard s_{xA} , peut être alors estimé comme suit:

$$s_{xA} = x_{Aav}/2 \quad \text{(III.11)}$$

Pour tenir compte des conditions des grandes dispersions des granules chargés, par le remplacement dans l'équations (III.8) les valeurs x_{Aav} , et s_{xA} , tirées respectivement à partir des équations (III.10)-(III.11), il est possible d'avoir des estimations de $P(X_A)$ ainsi de $P(X_B)$ et $P(X_C)$ en les calculant de la même façon. La masse des granules A, B et C récupérée accidentellement dans le collecteur A du lit fluidisé en raison de la turbulence de l'air peut être calculée comme suit:

$$M_{Asair(A)}(t) = \int_0^t (c_{airA} c_A(t))M(t)dt \quad \text{(III.12a)}$$

$$M_{Bsair(A)}(t) = \int_0^t (c_{airB} c_B(t))M(t)dt \quad \text{(III.12b)}$$

$$M_{Csair(A)}(t) = \int_0^t (c_{airC} c_C(t))M(t)dt \quad \text{(III.12c)}$$

En utilisant les mêmes équations, on calcule les masses récupérées dans le collecteur B d'une façon accidentelle comme suit:

$$M_{Asair(B)}(t) = \int_0^t (c_{airA} - c_A(t))M(t)dt \quad (III.13a)$$

$$M_{Bsair(B)}(t) = \int_0^t (c_{airB} - c_B(t))M(t)dt \quad (III.13b)$$

$$M_{Csair(B)}(t) = \int_0^t (c_{airC} - c_C(t))M(t)dt \quad (III.13c)$$

En utilisant les hypothèses citées précédemment: Si $x_C(t) > 0$, toutes les particules C sont récupérées dans le collecteur B. Si $x_C(t) < 0$, toutes les particules C sont récupérées dans le collecteur A. Les masses instantanées récupérées respectivement dans le collecteur A, notées $M_{coll(A)}(t)$ et dans le collecteur B, notées $M_{coll(B)}(t)$ sont formulées comme suit:

Si $x_C(t) > 0$:

$$M_{bac(-)}(t) = M_{As}(t) + M_{Asair(A)}(t) + M_{Bsair(A)}(t) + M_{Csair(A)}(t) \quad (III.14a)$$

$$M_{bac(+)}(t) = M_{Bs}(t) + M_{Bsair(B)}(t) + M_{Cs}(t) + M_{Asair(B)}(t) + M_{Csair(B)}(t) \quad (III.14b)$$

$x_C(t) < 0$:

$$M_{bac(-)}(t) = M_{As}(t) + M_{Cs}(t) + M_{Asair(A)}(t) + M_{Bsair(A)}(t) + M_{Csair(A)}(t) \quad (III.15a)$$

$$M_{bac(+)}(t) = M_{Bs}(t) + M_{Csair(B)}(t) + M_{Bsair(B)}(t) + M_{Asair(B)}(t) \quad (III.15b)$$

En régime intermittent la séparation du matériau granulaire est réalisée pendant des périodes de temps bien définies. Une fois que le matériau à séparer est récupéré, un nouveau processus commence. La pureté des produits collectés est une variable de sortie très importante, calculée à partir des équations (III.5), (III.14) et (III.15) comme suit:

$$P_A(\%) = [(M_{A(A)}(t)/M_{bac(-)}(t)].100 \quad (III.16a)$$

avec

$$M_{A(A)}(t) = M_{As}(t) + M_{Asair(A)}(t) \quad (III.16b)$$

$$P_B(\%) = [(M_{B(B)}(t)/M_{bac(+)}(t)].100 \quad (III.17a)$$

avec

$$M_{B(B)}(t) = M_{Bs}(t) + M_{Bsair(B)}(t) \quad (III.17b)$$

III. 1. 2. Algorithme de simulation

Un algorithme itératif peut être utilisé pour obtenir l'estimation $X_{Ae}(i)$, $X_{Be}(i)$ et $X_{Ce}(i)$ à partir des nombres de collisions respectives $X_A(t)$, $X_B(t)$ et $X_C(t)$. Les estimations des masses $M_{Ase}(i)$, $M_{Bse}(i)$ et $M_{Cse}(i)$ tirées à partir des masses séparées respectives $M_{As}(t)$, $M_{Bs}(t)$ et $M_{Cs}(t)$ à $t = i \Delta t$.

Où i est un entier positif ($i \geq 1$) et Δt est suffisamment petite par rapport à $M_A(t)$, $M_B(t)$, $M_C(t)$ et de $c_A(t)$, $c_B(t)$, $c_C(t)$ ainsi que la fréquence des collisions N , pour être considéré comme constant :

$$M_{Ae}(k) = M_A(k\Delta t), M_{Be}(k) = M_B(k\Delta t), M_{Ce}(k) = M_C(k\Delta t).$$

$$c_{Ae}(k) = c_A(k\Delta t), c_{Be}(k) = c_B(k\Delta t), c_{Ce}(k) = c_C(k\Delta t).$$

$$N_e(k) = N(k\Delta t) \text{ dans tout intervalle } k\Delta t \leq t < (k+1)\Delta t \text{ pour } k = 1, 2, \dots, i.$$

Etape 1:

L'estimation du nombre de collisions $X_A(I)$ de chaque granule A avec les granules B et C , ainsi l'estimation $X_B(I)$ de chaque granule B avec les granules A et C et l'estimation $X_C(I)$ de chaque granule C avec les granules A et B dans le lit fluidisé en tenant en compte des deux coefficients λ_{AC} et λ_{BC} , peuvent être calculées à partir des équations (III.4) comme suit:

$$X_{Ae}(1) = X_A(\Delta t) = [c_{Be}(1) + \lambda_{AC} c_{Ce}(1)]N_e(1)(\Delta t) = [c_{Be}(1) + \lambda_{AC} c_{Ce}(1)]N_1\Delta t \quad (\text{III.18a})$$

$$X_{Be}(1) = X_B(\Delta t) = [c_{Ae}(1) + \lambda_{BC} c_{Ce}(1)]N_e(1)(\Delta t) = [c_{Ae}(1) + \lambda_{BC} c_{Ce}(1)]N_1\Delta t \quad (\text{III.18b})$$

$$X_{Ce}(1) = X_C(\Delta t) = [|\lambda_{AC} c_{Ae}(1) - \lambda_{BC} c_{Be}(1)|]N_e(1)(\Delta t) = |[\lambda_{AC} c_{Ae}(1) - \lambda_{BC} c_{Be}(1)]| N_1\Delta t \quad (\text{III.18c})$$

Les masses séparées estimées $M_{Ase}(I)$, $M_{Bse}(I)$ et $M_{Cse}(I)$ des granules à A , B et C sont obtenues à partir des équations (III.5):

$$M_{Ase}(1) = p(X_{Ae}(1))M_{Ae}(1) = p(x_{Ae}(1))M_{A1} \quad (\text{III.19a})$$

$$M_{Bse}(1) = p(X_{Be}(1))M_{Be}(1) = p(x_{Be}(1))M_{B1} \quad (\text{III.19b})$$

$$M_{Cse}(1) = p(X_{Ce}(1))M_{Ce}(1) = p(x_{Ce}(1))M_{C1} \quad (\text{III.19c})$$

Etape i :

(Pour $i \geq 2$): Les concentrations: $c_{Ae}(i)$, $c_{Be}(i)$ et $c_{Ce}(i)$ des granules *A*, *B* et *C* au début de cet intervalle de temps peuvent être déterminées à partir de l'équation (III.3), en utilisant les estimations des masses des granules *A*, *B* et *C* notées $M_{Ae}(i)$, $M_{Be}(i)$ et $M_{Ce}(i)$ dans le lit fluidisé à la fin de l'étape ($i - 1$):

$$c_{Ae}(i) = M_{Ae}(i)/(M_{Ae}(i) + M_{Be}(i) + M_{Ce}(i)) \quad (\text{III.20a})$$

$$c_{Be}(i) = M_{Be}(i)/(M_{Ae}(i) + M_{Be}(i) + M_{Ce}(i)) \quad (\text{III.20b})$$

$$c_{Ce}(i) = M_{Ce}(i)/(M_{Ae}(i) + M_{Be}(i) + M_{Ce}(i)) \quad (\text{III.20c})$$

avec $M_{Ae}(i) = M_{A1} - M_{Ase}(i-1)$, $M_{Be}(i) = M_{B1} - M_{Bse}(i-1)$ et $M_{Ce}(i) = M_{C1} - M_{Cse}(i-1)$

Avec cette notation et en considérant la fréquence estimée des collisions $N_{e1} = N_1$, les nombres de collisions estimées par unité de temps $x_{Ae}(i)$, $x_{Be}(i)$ et $x_{Ce}(i)$ de chaque granule dans le lit fluidisé peuvent être exprimés comme suit:

$$x_{Ae}(i) = X_{Ae}(i)/N_1 \{ [c_B(1) + \lambda_{AC} c_C(1)] + [c_B(2) + \lambda_{AC} c_C(2)] N_e(2)/N_1 + \dots [c_B(i) + \lambda_{AC} c_C(i)] N_e(i)/N_1 \} \Delta t \quad (\text{III.21a})$$

$$x_{Be}(i) = X_{Be}(i)/N_1 \{ [c_A(1) + \lambda_{BC} c_C(1)] + [c_A(2) + \lambda_{BC} c_C(2)] N_e(2)/N_1 + \dots [c_A(i) + \lambda_{BC} c_C(i)] N_e(i)/N_1 \} \Delta t \quad (\text{III.21b})$$

$$x_{Ce}(i) = X_{Ce}(i)/N_1 = \{ [\lambda_{AC} c_A(1) - \lambda_{BC} c_B(1)] + [\lambda_{AC} c_A(2) - \lambda_{BC} c_B(2)] N_e(2)/N_1 + \dots [\lambda_{AC} c_A(i) - \lambda_{BC} c_B(i)] N_e(i)/N_1 \} \Delta t \quad (\text{III.21c})$$

Par conséquent, la masse séparée estimée $M_{Ase}(i)$, $M_{Bse}(i)$, $M_{Cse}(i)$ à l'instant ($t = i \Delta t$) est obtenue à partir des équations (III.5):

$$M_{Ase}(i) = p(x_{Ae}(1))M_{Ae}(1) + p(x_{Ae}(2))M_{Ae}(2) + \dots p(x_{Ae}(i))M_{Ae}(i) \quad (\text{III.22a})$$

$$M_{Bse}(i) = p(x_{Be}(1))M_{Be}(1) + p(x_{Be}(2))M_{Be}(2) + \dots p(x_{Be}(i))M_{Be}(i) \quad (\text{III.22b})$$

$$M_{Cse}(i) = p(x_{Ce}(1))M_{Ce}(1) + p(x_{Ce}(2))M_{Ce}(2) + \dots p(x_{Ce}(i))M_{Ce}(i) \quad (\text{III.22c})$$

Dans le cas où la probabilité de séparation des granules A , B et C après $x_{Ae}(i)$, $x_{Be}(i)$ et $x_{Ce}(i)$ collisions par unité de temps exprimée par la loi de distribution normale et en connaissant les nombres moyens de collision et les écarts-type moyens de chaque classes des granules, l'équation (III.22) devient:

$$p(x_{Ae}(i)M_{Ae}(i) = \Pi((x_A(i) - x_{Av})/s_{xA})M_{Ae}(i) \quad (\text{III.23})$$

Il existe aussi un pourcentage c_{air} de la masse des particules A , B et C dans le lit fluidisé qui se répartira d'une façon accidentelle dans les deux collecteurs à cause des courants d'air. Les masses récupérées dans le collecteur A sous cette forme peuvent se calculer avec les formules suivantes:

$$M_{Aseair(A)}(i) = [c_{airA} c_{Ae}(1)]M(1) + [c_{airA} c_{Ae}(2)]M(2) + \dots [c_{airA} c_{Ae}(i)]M(i) \quad (\text{III.24a})$$

$$M_{Bseair(A)}(i) = [c_{airB} c_{Be}(1)]M(1) + [c_{airB} c_{Be}(2)]M(2) + \dots [c_{airB} c_{Be}(i)]M(i) \quad (\text{III.24b})$$

$$M_{Cseair(A)}(i) = [c_{airC} c_{Ce}(1)]M(1) + [c_{airC} c_{Ce}(2)]M(2) + \dots [c_{airC} c_{Ce}(i)]M(i) \quad (\text{III.24c})$$

Les masses estimées récupérées accidentellement dans le collecteur B peuvent être calculées de la même manière. En conséquence et en utilisant les équations (III.22) et (III.24) on obtient:

Si $x_{Ce}(i) > 0$:

$$M_{bac(-)}(i) = M_{Ase}(i) + M_{Aseair(A)}(i) + M_{Bseair(A)}(i) + M_{Cseair(A)}(i) \quad (\text{III.25 a})$$

$$M_{bac(+)}(i) = M_{Bse}(i) + M_{Cse}(i) + M_{Aseair(B)}(i) + M_{Bseair(B)}(i) + M_{Cseair(B)}(i) \quad (\text{III.25 b})$$

Si $x_{Ce}(i) < 0$:

$$M_{bac(-)}(i) = M_{Ase}(i) + M_{Cse}(i) + M_{Aseair(A)}(i) + M_{Bseair(A)}(i) + M_{Cseair(A)}(i) \quad (\text{III.26 a})$$

$$M_{bac(+)}(i) = M_{Bse}(i) + M_{Aseair(B)}(i) + M_{Bseair(B)}(i) + M_{Cseair(B)}(i) \quad (\text{III.26 b})$$

Les puretés des produits A et B sont estimées à partir des équations (III.16), (III.17) comme suit:

$$P_{Ae}(\%) = [(M_{Ase}(i) + M_{Aseair(A)}(i))/M_{colle(A)}(i)]. 100 \quad (\text{III.27})$$

$$P_{Be}(\%) = [(M_{Bse}(i) + M_{Bseair(B)}(i))/M_{colle(B)}(i)]. 100 \quad (\text{III.28})$$

III. 2. Elaboration du modèle numérique pour un séparateur tribo-aéro-électrostatique a faible débit en régime continu

En tenant compte des hypothèses discutées précédemment 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. L'objectif de cette partie d'étude est de prédire l'évolution de la masse dans le lit fluidisé et l'influences de plusieurs facteurs sur la composition de celle-ci.

III. 2. 1. Equations de base

Le modèle mathématique est basé sur l'hypothèse que la probabilité de séparer un granule peut être exprimée en fonction du nombre d'impacts avec des granules appartenant à d'autre classe de matériaux et avec les parois du lit fluidisé. chaque granule subit $N(t_k)$ collisions par unité de temps : $t_k = k \cdot \Delta t$, avec $k=1,2,3 \dots j$, où i est un nombre entier positif ($j \geq 1$) [54].

A $t = 0$, la masse totale $M(t)$ des matériaux se trouvant dans le lit fluidisé est :

$$M(t) = M_A(t) + M_B(t) + M_C(t) + M_p \quad (\text{III.29})$$

Où M_p est la masse fictive des parois, qui est constante dans le temps. Dans ces circonstances, les concentrations respectives des matériaux A , B , C et la paroi p peuvent être exprimées en tant que:

$$c_A(t) = M_A(t)/M(t), \quad c_B(t) = M_B(t)/M(t), \quad c_C(t) = M_C(t)/M(t), \quad c_p = M_p/M(t) \quad (\text{III.30})$$

Dans un lit fluidisé de géométrie connue et d'un débit d'air contrôlable, on suppose que le régime du lit fluidisé n'est pas significativement modifié par les changements de la masse $M(t)$, ce qui signifie que $N(t)$ est constant dans le temps, c'est-à-dire $N(t) = N_I$. Pour le cas d'un mélange où les trois types de particules ont les concentrations $c_A(t)$, $c_B(t)$ et $c_C(t)$, chaque particule de type c subit $c_A(t) N$ contacts avec les particules de type A et $c_B(t) N$ contacts avec les particules de type B [18].

Dans cette étude on suppose que le matériau C est situé entre A et B dans la série tribo-électrique, donc il existe deux coefficients λ_{CA} , $\lambda_{CB} < 1$ qui caractérisent respectivement l'effet des collisions $C-A$ et $C-B$ [19].

De plus, il existe un échange de charge granule-parois, dans ce cas la aussi les collisions dépendent de la position relative du matériau de paroi P et des trois matériaux A, B et C dans la série triboélectrique. Si une unité de charge adimensionnelle a été échangée dans une collision entre les granules A, B et C, la charge adimensionnelle échangée entre un granule A (B ou C) et la paroi serait respectivement λ_{PA} , λ_{PB} et λ_{PC} . Plusieurs situations peuvent être rencontrées dans la pratique si on prend le cas de C comprise entre A et B, plus proche du B dans la série triboélectrique:

plusieurs situations qui peuvent être rencontrées dans cette étude (**Figure IV.5**):

- a) La paroi P est comprise entre A et C dans la série triboélectrique, alors $0 \leq \lambda_{PA} \leq 1$, $0 \leq \lambda_{PB} \leq 1$ et $\lambda_{PC} < 0$ (les collisions granule-parois ont moins d'effet que ceux entre deux granules);
- b) C est entre A et P alors $0 \leq \lambda_{PA} \leq 1$, $0 \leq \lambda_{PB} \leq 1$ et $0 \leq \lambda_{PC} \leq 1$ (les collisions granule-parois ont moins d'effet que celles entre deux granules).
- c) B et C sont comprises entre A et P, alors $\lambda_{PA} > 1$ (un granule A se charge mieux dans une collision avec la paroi P qu'avec un granule B ou C) et $0 \leq \lambda_{PB} \leq 1$ (la paroi a moins d'effet sur un granule B qui se charge mieux dans une collision avec A) et $\lambda_{PC} < 0$ (les échanges de charge C avec la paroi ont un signe opposé à celles échangées avec A).
- d) A et C sont comprises entre B et P, alors $\lambda_{PB} > 1$ (un granule B se charge mieux dans une collision avec la paroi P qu'avec un granule A) et $0 \leq \lambda_{PA} \leq 1$ (la paroi a moins d'effet sur un granule A qui se charge mieux dans une collision avec B ou C) et $\lambda_{PC} < 0$ (les échanges de charge d'un granule C avec la paroi ont un signe opposé à celles échangées avec A).

Ainsi, au cours d'une période de temps t , le nombre de collision X_A échangé d'un granule A avec toutes les particules B et C par d'unité de temps est:

$$X_A(t) = \int_0^t [c_B(t) + \lambda_{AC} c_C(t) + \lambda_{PA} c_P] N(t) dt \quad (\text{III.31})$$

De même, le nombre de collisions X_B entre chaque granule B et les granules A et C peut être exprimé comme:

$$X_B(t) = \int_0^t [c_A(t) + \lambda_{BC} c_C(t) + \lambda_{PB} c_P] N(t) dt \quad (\text{III.32})$$

Le nombre de collisions X_C entre chaque granule C et les granules A et B est:

$$X_C(t) = \int_0^t [(\lambda_{CA} c_A(t) - \lambda_{CB} c_B(t)) + \lambda_{PC} c_P] N(t) dt \quad (\text{III.33})$$

Soit $P(X_A) = p(x_A)$, $x_A = X_A/N_I$, la probabilité que le granulat A entre en collision avec les granules B et C , puis recueilli à l'électrode, dans des conditions bien définies (nature et taille des trois classes de granules, géométrie du lit fluidisé, flux d'air de ce dernier (Le lit fluidisé), la haute tension appliquée aux électrodes, etc...). La probabilité $P(X_A)$, est donnée par la loi de Gauss :

$$P(X_A) = P(x_A) = \Pi((x_A - x_{Aav})/s_{xA}) = p(x_A)$$

III. 2. 2. Algorithmes de simulation

Un algorithme itératif peut être employé pour obtenir l'estimation $X_{Ae}(i,j), X_{Be}(i,j)$ et $X_{Ce}(i,j)$ des nombres respectifs de collisions $X_A(t)$, $X_B(t)$ et $X_C(t)$ à l'étape j par les granules introduits dans le lit fluidisé à l'étape i et les estimations $M_{Ase}(j)$, $M_{Bse}(j)$ et $M_{Cse}(j)$ des masses respectives $M_{As}(t), M_{Bs}(t)$ et $M_{Cs}(t)$. Pour $t = j\Delta t$, où i et j sont des entiers positifs et Δt est suffisamment petits par rapport aux masses $M_A(t)$, $M_B(t)$ et $M_C(t)$, aux concentrations $c_A(t)$, $c_B(t)$, $c_C(t)$ et à la fréquence des collisions $N(t)$ à considérer constante:

$$M_{Ae}(k) = M_A((k-1)\Delta t), M_{Be}(k) = M_B((k-1)\Delta t), M_{Ce}(k) = M_C((k-1)\Delta t).$$

$$c_{Ae}(k) = c_A((k-1)\Delta t), c_{Be}(k) = c_B((k-1)\Delta t), c_{Ce}(k) = c_C((k-1)\Delta t).$$

$$N_e(k) = N((k-1)\Delta t) \text{ pour chaque intervalle } ((k-1)\Delta t \leq t < (k+1)\Delta t) \text{ for } k = 1, 2, \dots, i.$$

Étape 1: Le nombre estimé de charges $X_A(I)$ échangées par chaque granule A avec les granules B et C , $X_B(I)$ échangées par chaque granules B avec les granules A et C et $X_C(I)$ échangées par chaque granulé C avec les granulé A et B peuvent être calculée à partir des équations (III.30), (III.31) et (III.32) comme suit :

$$X_{Ae}(1,1) = [c_{Be}(1) + \lambda_{AC} c_{Ce}(1) + \lambda_{PA} c_P] N_{e1} \quad (\text{III.35a})$$

$$X_{Be}(1,1) = [c_{Ae}(1) + \lambda_{BC} c_{Ce}(1) + \lambda_{PB} c_P] N_{e1} \quad (\text{III.35b})$$

$$X_{Ce}(1,1) = [(\lambda_{AC} c_{Ae}(1) - \lambda_{BC} c_{Be}(1)) + \lambda_{PC} c_P] N_{e1} \quad (\text{III.35c})$$

Avec $x_{Ae}(1,1) = X_{Ae}(1,1)/N_{e1}$, $x_{Be}(1,1) = X_{Be}(1,1)/N_{e1}$ et $x_{Ce}(1,1) = X_{Ce}(1,1)/N_{e1}$, la masse estimée $M_{Ase}(1)$, $M_{Bse}(1)$ et $M_{Cse}(1)$ des granules séparés respectivement A, B et C à Δt , est obtenue à partir de l'équation (III.5)

$$M_{Ase}(1) = p(X_{Ae}(1,1))M_{Ae}(1) = p(x_{Ae}(1,1))m_{Ae}(1,1) \quad \text{(III.36a)}$$

$$M_{Bse}(1) = p(X_{Be}(1,1))M_{Be}(1) = p(x_{Be}(1,1))m_{Be}(1,1) \quad \text{(III.36b)}$$

$$M_{Cse}(1) = p(X_{Ce}(1,1))M_{Ce}(1) = p(x_{Ce}(1,1))m_{Ce}(1,1) \quad \text{(III.36c)}$$

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

$$m_{Ae}(1,2) = m_{Ae}(1,1) - p(x_{Ae}(1,1))m_{Ae}(1,1) \quad \text{(III.37a)}$$

$$m_{Be}(1,2) = m_{Be}(1,1) - p(x_{Be}(1,1))m_{Be}(1,1) \quad \text{(III.37b)}$$

$$m_{Ce}(1,2) = m_{Ce}(1,1) - p(x_{Ce}(1,1))m_{Ce}(1,1) \quad \text{(III.37c)}$$

Dans les formules ci-dessus, $m_{Ae}(1,2)$, $m_{Be}(1,2)$ et $m_{Ce}(1,2)$ sont les masses des particules qui ont des collisions subies dans la première étape et elles 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 :

$$m_e(j,j) = m; m_{Ae}(j,j) = m_A; m_{Be}(j,j) = m_B; m_{Ce}(j,j) = m_C \quad \text{(III.38)}$$

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

$$M_{Ae}(j) = \sum_{i=1}^j m_{Ae}(i,j) \quad \text{(III.39)}$$

Des formules similaires peuvent être écrites pour $M_{Be}(j)$ et $M_{Ce}(j)$. La masse totale estimée à l'étape j est:

$$M_e(j) = M_{Ae}(t) + M_{Be}(t) + M_{Ce}(t) + M_P$$

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

$$m_{Ae}(i,j) = m_{Ae}(i,j-1) - p(x_{Ae}(i,j-1)) * m_{Ae}(i,j-1) \quad (\text{III.41a})$$

$$m_{Be}(i,j) = m_{Be}(i,j-1) - p(x_{Be}(i,j-1)) * m_{Be}(i,j-1) \quad (\text{III.41b})$$

$$m_{Ce}(i,j) = m_{Ce}(i,j-1) - p(x_{Ce}(i,j-1)) * m_{Ce}(i,j-1) \quad (\text{III.41c})$$

Les concentrations $c_{Ae}(j)$, $c_{Be}(j)$ et $c_{Ce}(j)$ des granules A , B et C peuvent être déterminées à comme suit:

$$c_{Ae}(j) = M_{Ae}(j)/M(j), c_{Be}(j) = M_{Be}(j)/M(j), c_{Ce}(j) = M_{Ce}(j)/M(j) \quad (\text{III.42})$$

$$x_{Ae}(i,j) = X_{Ae}(i,j)/N_{e1}; x_{Be}(i,j) = X_{Be}(i,j)/N_{e1}; x_{Ce}(i,j) = X_{Ce}(i,j)/N_{e1} \quad (\text{III.43})$$

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

$$X_{Ae}(1,j) = \{[(c_{Be}(1) + \lambda_{AC}c_{Ce}(1)) + \lambda_{PA}c_{Pe}] + [(c_{Be}(2) + \lambda_{AC}c_{Ce}(2)) + \lambda_{PA}c_{Pe}]M_e(2)/M_e(1) + \dots + [(c_{Be}(j) + \lambda_{AC}c_{Ce}(j)) + \lambda_{PA}c_{Pe}]M_e(j)/M_e(1)\}\Delta t \quad (\text{III.44a})$$

$$X_{Be}(1,j) = \{[(c_{Ae}(1) + \lambda_{BC}c_{Ce}(1)) + \lambda_{PB}c_{Pe}] + [(c_{Ae}(2) + \lambda_{BC}c_{Ce}(2)) + \lambda_{PB}c_{Pe}]M_e(2)/M_e(1) + \dots + [(c_{Ae}(j) + \lambda_{BC}c_{Ce}(j)) + \lambda_{PB}c_{Pe}]M_e(j)/M_e(1)\}\Delta t \quad (\text{III.44b})$$

$$X_{Ce}(1,j) = \{[(\lambda_{AC}c_{Ae}(1) - \lambda_{BC}c_{Be}(1)) + \lambda_{PC}c_{Pe}] + [(\lambda_{AC}c_{Ae}(2) - \lambda_{BC}c_{Be}(2)) + \lambda_{PC}c_{Pe}]M_e(2)/M_e(1) + \dots + [(\lambda_{AC}c_{Ae}(j) - \lambda_{BC}c_{Be}(j)) + \lambda_{PC}c_{Pe}]M_e(j)/M_e(1)\}\Delta t \quad (\text{III.44c})$$

Les nouvelles particules introduites à chaque pas de temps Δt ont la possibilité de se charger en commençant par l'étape j :

$$X_{Ae}(j,j) = \{[(c_{Be}(j) + \lambda_{AC}c_{Ce}(j)) + \lambda_{PA}c_{Pe}]M_e(j)/M_e(1)\}\Delta t \quad (\text{III.45a})$$

$$X_{Be}(j,j) = \{[(c_{Ae}(j) + \lambda_{BC}c_{Ce}(j)) + \lambda_{PB}c_{Pe}]M_e(j)/M_e(1)\}\Delta t \quad (\text{III.45b})$$

$$X_{Ce}(j,j) = \{[(\lambda_{AC}c_{Ae}(j) - \lambda_{BC}c_{Be}(j)) + \lambda_{PC}c_{Pe}]M_e(j)/M_e(1)\}\Delta t \quad (\text{III.45c})$$

En général:

$$x_{Ae}(i, j) = \{[(c_{Be}(i) + \lambda_{AC}c_{Ce}(i)) + \lambda_{PA}c_{Pe}] + [(c_{Be}(i+1) + \lambda_{AC}c_{Ce}(i+1)) + \lambda_{PA}c_{Pe}]M_e(i+1)/M_e(1) + \dots + [(c_{Be}(j) + \lambda_{AC}c_{Ce}(j)) + \lambda_{PA}c_{Pe}]M_e(j)/M_e(1)\} \Delta t \quad (\text{III.46a})$$

$$x_{Be}(i, j) = \{[(c_{Ae}(i) + \lambda_{BC}c_{Ce}(i)) + \lambda_{PB}c_{Pe}] + [(c_{Ae}(i+1) + \lambda_{BC}c_{Ce}(i+1)) + \lambda_{PB}c_{Pe}]M_e(i+1)/M_e(1) + \dots + [(c_{Ae}(j) + \lambda_{BC}c_{Ce}(j)) + \lambda_{PB}c_{Pe}]M_e(j)/M_e(1)\} \Delta t \quad (\text{III.46b})$$

$$x_{Ce}(i, j) = \{[(\lambda_{AC}c_{Ae}(1) - \lambda_{BC}c_{Be}(1)) + \lambda_{PC}c_{Pe}] + [(\lambda_{AC}c_{Ae}(i+1) - \lambda_{BC}c_{Be}(i+1)) + \lambda_{PC}c_{Pe}]M_e(i+1)/M_e(1) + \dots + [(\lambda_{AC}c_{Ae}(j) - \lambda_{BC}c_{Be}(j)) + \lambda_{PC}c_{Pe}]M_e(j)/M_e(1)\} \Delta t \quad (\text{III.46c})$$

Par conséquent, les masses estimées des granules séparés A, B et C à une étape j sont obtenues à partir des équations suivantes:

$$M_{Ase}(j) = p(x_{Ae}(1, j))m_{Ae}(1, j) + p(x_{Ae}(2, j))m_{Ae}(2, j) + \dots p(x_{Ae}(i, j))m_{Ae}(i, j) \quad (\text{III.47a})$$

$$M_{Bse}(j) = p(x_{Be}(1, j))m_{Be}(1, j) + p(x_{Be}(2, j))m_{Be}(2, j) + \dots p(x_{Be}(i, j))m_{Be}(i, j) \quad (\text{III.47b})$$

$$M_{Cse}(j) = p(x_{Ce}(1, j))m_{Ce}(1, j) + p(x_{Ce}(2, j))m_{Ce}(2, j) + \dots p(x_{Ce}(i, j))m_{Ce}(i, j) \quad (\text{III.47c})$$

Les masses estimées récupérées dans le collecteur A sous l'effet du courant d'air peuvent se calculer avec les formules suivantes:

$$M_{Aseair(A)}(j) = [c_{airA} c_{Ae}(1)]M(1, j) + [c_{airA} c_{Ae}(2)]M(2, j) + \dots [c_{airA} c_{Ae}(i)]M(i, j) \quad (\text{III.48a})$$

$$M_{Bseair(A)}(j) = [c_{airB} c_{Be}(1)]M(1, j) + [c_{airB} c_{Be}(2)]M(2, j) + \dots [c_{airB} c_{Be}(i)]M(i, j) \quad (\text{III.48b})$$

$$M_{Cseair(A)}(j) = [c_{airC} c_{Ce}(1)]M(1, j) + [c_{airC} c_{Ce}(2)]M(2, j) + \dots [c_{airC} c_{Ce}(i)]M(i, j) \quad (\text{III.48c})$$

Les masses estimées récupérées accidentellement dans le collecteur B peuvent être calculées de la même manière:

$$M_{Aseair(B)}(j) = [c_{airA} c_{Ae}(1)]M(1, j) + [c_{airA} c_{Ae}(2)]M(2, j) + \dots [c_{airA} c_{Ae}(i)]M(i, j) \quad (\text{III.49a})$$

$$M_{Bseair(B)}(j) = [c_{airB} c_{Be}(1)]M(1, j) + [c_{airB} c_{Be}(2)]M(2, j) + \dots [c_{airB} c_{Be}(i)]M(i, j) \quad (\text{III.49b})$$

$$M_{Cseair(B)}(j) = [c_{airC} c_{Ce}(1)]M(1, j) + [c_{airC} c_{Ce}(2)]M(2, j) + \dots [c_{airC} c_{Ce}(i)]M(i, j) \quad (\text{III.49c})$$

Par conséquent et en utilisant les équations (III.47)-(III.48) et (III.49) on obtient:

$x_{Ce}(i,j) > 0$:

$$M_{bac(-)}(j) = M_{Ase}(j) + M_{Aseair(A)}(j) + M_{Bseair(A)}(j) + M_{Cseair(A)}(j) \quad (\text{III.50 a})$$

$$M_{bac(+)}(j) = M_{Bse}(j) + M_{Cse}(j) + M_{Aseair(B)}(j) + M_{Bseair(B)}(j) + M_{Cseair(B)}(j) \quad (\text{III.50 b})$$

Si $x_{Ce}(i) < 0$:

$$M_{bac(-)}(i) = M_{Ase}(i) + M_{Cse}(i) + M_{Aseair(A)}(i) + M_{Bseair(A)}(i) + M_{Cseair(A)}(i) \quad (\text{III.51 a})$$

$$M_{bac(+)}(i) = M_{Bse}(i) + M_{Aseair(B)}(i) + M_{Bseair(B)}(i) + M_{Cseair(B)}(i) \quad (\text{III.51 b})$$

III. 3. Elaboration du modèle numérique pour un séparateur tribo-aéro-électrostatique industriel

Dans les paragraphes (§ III.1 et § III.2), on a commencé par l'étude du séparateur tribo-aéro-électrostatique à faible débit dans les deux régimes: « intermittent et continu », dont l'intérêt est faire une modélisation numérique d'un séparateurs du laboratoire [55]. Dans le séparateur industriel, spécifique au fonctionnement des installations industrielles, à chaque instant t il existe un pourcentage $c_{op} = 1\%$ de la masse des particules A , B et C dans le lit fluidisé sera attiré par les particules de polarité opposée collées sur la surface des électrodes. Les masses séparées de cette façon d'un produit P (avec $P = A, B$ ou C), récupérées dans les collecteurs A et B jusqu'au moment t , sont notées respectivement $M_{P-A(op)s}(t)$ et $M_{P-B(op)s}(t)$. Elles se calculent avec les formules :

$$M_{A-B(op)}(t) = \int_0^t (c_{opA} c_A(t)) M_{Bs}(t) dt \quad (\text{III.52a})$$

$$M_{B-A(op)}(t) = \int_0^t (c_{opB} c_B(t)) M_{As}(t) dt \quad (\text{III.52b})$$

si $x_C(t) > 0$

$$M_{C-A(op)}(t) = \int_0^t (c_{opC} c_C(t)) M_{As}(t) dt, \quad (\text{III.53a})$$

si $x_C(t) < 0$,

$$M_{C-B(op)}(t) = \int_0^t (c_{opC} c_C(t)) M_{Bs}(t) dt \quad (\text{III.53b})$$

III. 3. 1. En régime intermittent:

En utilisant les hypothèses citées précédemment, si $x_C(t) > 0$, la majorité des particules C sont récupérées dans le collecteur B sauf quelques unes qui seront récupérées dans le collecteur A ($M_{C-A(op)}(t)$). Si $x_C(t) < 0$, la majorité des particules C sont récupérées dans le collecteur A sauf quelques unes qui seront récupérées dans le collecteur B ($M_{C-B(op)}(t)$), les masses instantanées récupérées respectivement dans le collecteur A notées $M_{coll(A)}(t)$ et dans le collecteur B notée $M_{coll(B)}(t)$ sont formulées comme suit:

Si $x_C(t) > 0$:

$$M_{bac(-)}(t) = M_{As}(t) + M_{B-A(op)}(t) + M_{C-A(op)}(t) \quad (\text{III.54a})$$

$$M_{bac(+)}(t) = M_{Bs}(t) + M_{Cse}(t) + M_{A-B(op)}(t) \quad (\text{III.54b})$$

Si $x_C(t) < 0$:

$$M_{bac(-)}(t) = M_{As}(t) + M_{Cs}(t) + M_{B-A(op)}(t) \quad (\text{III.55a})$$

$$M_{bac(+)}(t) = M_{Bs}(t) + M_{A-B(op)}(t) + M_{C-B(op)}(t) \quad (\text{III.55b})$$

III.3 .2 . En régime continu

Par conséquent, les masses estimées des granules séparés A, B et C à une étape j sont obtenues à partir des équations suivantes :

$$M_{Ase}(j) = p(x_{Ae}(1,j))m_{Ae}(1,j) + p(x_{Ae}(2,j))m_{Ae}(2,j) + \dots p(x_{Ae}(i,j))m_{Ae}(i,j) \quad (\text{III.56a})$$

$$M_{Bse}(j) = p(x_{Be}(1,j))m_{Be}(1,j) + p(x_{Be}(2,j))m_{Be}(2,j) + \dots p(x_{Be}(i,j))m_{Be}(i,j) \quad (\text{III.56b})$$

$$M_{Cse}(j) = p(x_{Ce}(1,j))m_{Ce}(1,j) + p(x_{Ce}(2,j))m_{Ce}(2,j) + \dots p(x_{Ce}(i,j))m_{Ce}(i,j) \quad (\text{III.56c})$$

Les masses opposées estimées récupérées dans le collecteur A peuvent se calculer avec les formules suivantes:

$$M_{A-B(op)}(j) = [c_{opA} c_{Ae}(1)]M_{Bse}(1,j) + [c_{opA} c_{Ae}(2)]M_{Bse}(1,j) + \dots [c_{opA} c_{Ae}(i)]M_{Bse}(1,j) \quad (\text{III.57a})$$

$$M_{B-A(op)}(j) = [c_{opB} c_{Be}(1)]M_{Ase}(1,j) + [c_{opB} c_{Be}(2)]M_{Ase}(1,j) + \dots [c_{opB} c_{Be}(i)]M_{Ase}(1,j) \quad (\text{III.57b})$$

si $x_C(t) > 0$

$$M_{C-A(op)}(j) = [c_{opC} c_{Ce}(1)]M_{Ase}(1, j) + [c_{opC} c_{Ce}(2)]M_{Ase}(1, j) + \dots [c_{opC} c_{Ce}(i)]M_{Ase}(i, j) \quad (\text{III.57c})$$

si $x_C(t) < 0$

$$M_{C-B(op)}(j) = [c_{opC} c_{Ce}(1)]M_{Bse}(1, j) + [c_{opC} c_{Ce}(2)]M_{Bse}(1, j) + \dots [c_{opC} c_{Ce}(i)]M_{Bse}(i, j) \quad (\text{III.57d})$$

Par conséquent et en utilisant les équations (III.56) et (III.57) on obtient:

$x_{Ce}(i, j) > 0$.

$$M_{bac(-)}(j) = M_{Ase}(j) + M_{B-Ae(op)}(j) + M_{C-Ae(op)}(j) \quad (\text{III.58a})$$

$$M_{bac(+)}(j) = M_{Bse}(j) + M_{Cse}(j) + M_{A-Be(op)}(j) \quad (\text{III.58b})$$

Si $x_{Ce}(i) < 0$:

$$M_{bac(-)}(i) = M_{Ase}(i) + M_{Cse}(i) + M_{B-Ae(op)}(i) \quad (\text{III.59a})$$

$$M_{bac(+)}(i) = M_{Bse}(i) + M_{A-Be(op)}(i) + M_{C-Be(op)}(i) \quad (\text{III.59b})$$

Conclusion

Le modèle probabiliste adopté dans le présent travail a permis la modélisation de deux processus de séparation tribo-aéro-électrostatique impliquant trois sortes de matériaux granulaires dans les deux régimes intermittent et continu.

L'objectif de la première et la deuxième parties est de modéliser le fonctionnement intermittent et continu du dispositif de séparation tribo-aéro-électrostatique à débit faible, en prenant en compte l'effet des forces aérodynamiques et l'effet des parois sur l'efficacité du processus de séparation électrostatique. L'évolution dans le temps de la masse de granules séparés par les électrodes a été estimée pour différentes compositions du mélange granulaire.

La troisième partie a été consacrée pour la simulation du dispositif de séparation tribo-aéro-électrostatique industriel, où nous avons pris en compte les masses des particules de charge de signe opposé collectées sur la surface des électrodes et récupérées par conséquent dans les mauvais bacs.

Chapitre IV : Simulation numérique de la séparation tribo-aéro électrostatique d'un mélange granulaire ternaire

IV. Simulation numérique de la séparation tribo-aéro-électrostatique d'un mélange granulaire ternaire

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 chapitre II. Les résultats expérimentaux présentés dans le § II.2 et § II.3 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 [24].

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulations obtenues en utilisant les codes de calculs expliqués dans le chapitre précédent (chapitre III). La simulation est caractérisée par l'étude de l'influence des variables tels que l'effet de la nature des matières à séparer, l'effet des forces aérodynamiques et l'effet de la présence d'une troisième espèce dans le mélange à séparer pour le régime intermittent (§IV.1). La deuxième partie est consacrée pour l'étude de l'influence d'autres variables tels que l'effet des parois et le débit de matière introduite dans le dispositif de séparation tribo-aéro-électrostatique en régime continu (§IV.2). Enfin, nous présenterons les résultats de simulation du séparateur tribo-aéro-électrostatique industriel en régime intermittent qui mettent le point sur les facteurs qui influent d'avantage sur le rendement d'un tel dispositif.

IV.1. Chargement triboélectrique d'un mélange ternaire dans un dispositif à lit fluidisé à faible débit en régime intermittent

L'étude porte sur le comportement des mélanges de trois matériaux plastiques granulaires dans un lit fluidisé parallélépipédique. Une caractéristique particulière de ce lit fluidisé étant que deux des parois opposées de la chambre de fluidisation sont couvertes de plaques métalliques reliées à deux sources à haute tension de polarités opposées, les particules chargées par effet triboélectrique seront attirées par ces électrodes et séparées (étant encore en état fluidisé). Le but de cette étude est d'évaluer les facteurs qui influencent l'efficacité du processus de charge triboélectrique [58,59], en vue de l'application éventuelle d'un tel dispositif à la séparation électrostatique des mélanges granulaires [60].

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 de trois matériaux granulaires caractérisés par des proportions des constituants qui peuvent être aléatoires. Les simulations numériques sont censées fournir des moyens pour évaluer les différentes solutions d'optimisation du processus [61].

En utilisant les hypothèses cités précédemment dans le chapitre (III), si $x_C(t) > 0$, toutes les particules C sont récupérées dans le collecteur B , Si $x_C(t) < 0$, toutes les particules C sont récupérées dans le collecteur A . Les masses instantanées récupérées sont calculées à partir des équations (III.13) et (III.14).

L'échange de charge après chaque collision granule-granule dépend de la position relative de la matière C et des deux matériaux A et B dans la série triboélectrique. La charge échangée entre un granule A (ou B) et C serait respectivement λ_{AC} (ou λ_{BC}). Il y a plusieurs situations qui peuvent être rencontrées dont on va citer qui est ce qui nous intéresse le plus dans cette étude (**Figure IV.1**):

- C est comprise entre A et B , plus proche de A dans la série triboélectrique, alors $0 \leq \lambda_A \leq 1$, $0 \leq \lambda_B \leq 1$ avec $\lambda_A < \lambda_B$ et $\lambda_A + \lambda_B = 1$ (toutes les particules C vont être collectées avec les particules A)
- C est comprise entre A et B , plus proche de B dans la série triboélectrique alors $0 \leq \lambda_A \leq 1$, $0 \leq \lambda_B \leq 1$ avec $\lambda_A > \lambda_B$ et $\lambda_A + \lambda_B = 1$ (toutes les particules C vont être collectées avec les particules B)

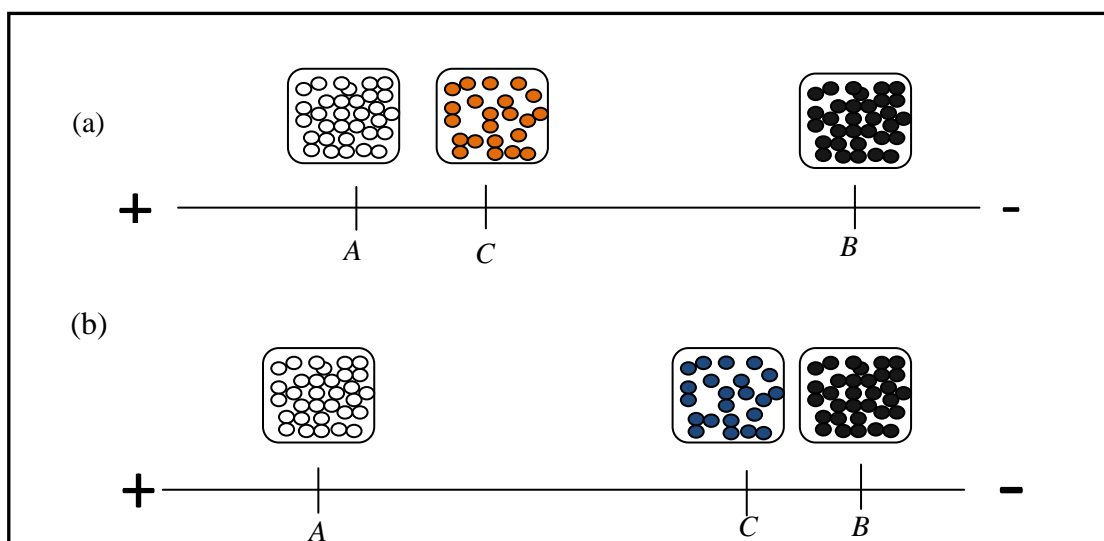


Figure IV.1: Série triboélectrique montrant les positions de A, B et C

IV.1.1 Nature des matières à séparer

En supposant qu'aucun granule n'est retiré du lit fluidisé jusqu'à ce qu'il acquiert suffisamment de charge pour être séparé. La quantité de charge électrique créée par la mise en contact inter-granulaire dépend de la nature des matériaux définis à séparer par des séries triboélectriques: la position relative définit le signe des charges et la distance donne une idée sur l'importance de l'échange. Dans ce paragraphe, la nature des matériaux à séparer a été prise en considération car on va prendre le cas de C comprise entre A et B , plus proche de B dans la série triboélectrique. Donc presque toutes les particules de C et B seront chargées négativement et collectées dans le bac (+). La concentration du mélange est $33\%A+33\%B+33\%C$, la masse initiale était $M_1 = 240$ g (avec $M_{Lim} = 40$ g). Les charges échangées entre les particules A , B et C sont respectivement $\lambda_{AC}=0,8$ et $\lambda_{BC}=0,2$. En tenant compte des équations (III-9) et (III-10) pour le calcul du nombre moyen de collision x_{Av} et l'écart type s_{xA} , la figure IV.2 montre l'évolution de la masse récupérée pour différentes valeurs de x_{Av} et de l'écart type s_{xA} .

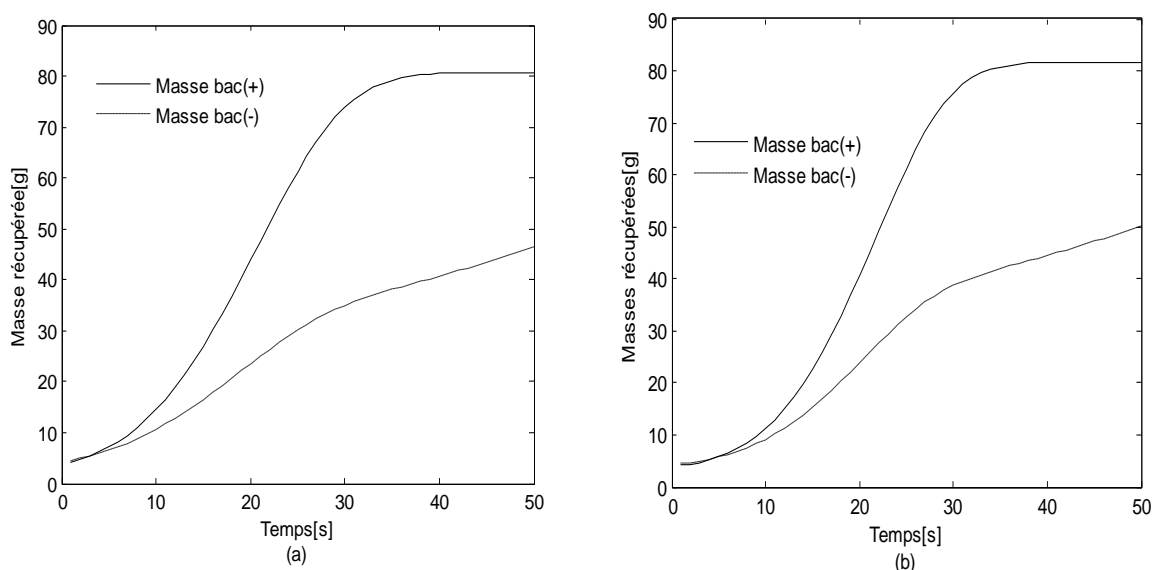


Figure IV. 2: Evolution des masses estimées récupérées dans les deux bacs du collecteur en régime intermittent pour

a) $x_{av}=12$; $s_x=6$

b) $x_{av}=24$; $s_x=12$

IV.1.2 Composition du mélange granulaire

Pour cette étude, il a été appliqué l'algorithme présenté dans le §III.1.1. Les calculs ont été effectués pour la séparation de trois types de matières isolantes. L'étape d'itération est $\Delta t = 1s$, la masse initiale était $M_1 = 240$ g. La figure IV. 3 montre l'évolution de la masse récupérée en fonction de la position de la troisième matière C par rapport à la position des

granules A et B dans la série tribo-électrique. 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 (III-10) et (III-9), les valeurs des masses récupérées dans les deux bacs ont été calculés à partir des équations (III-13a) et (III-13b) pour les concentrations suivantes des trois matériaux 60% A + 30 % B +10% C et 30%A + 60 % B +10% C .

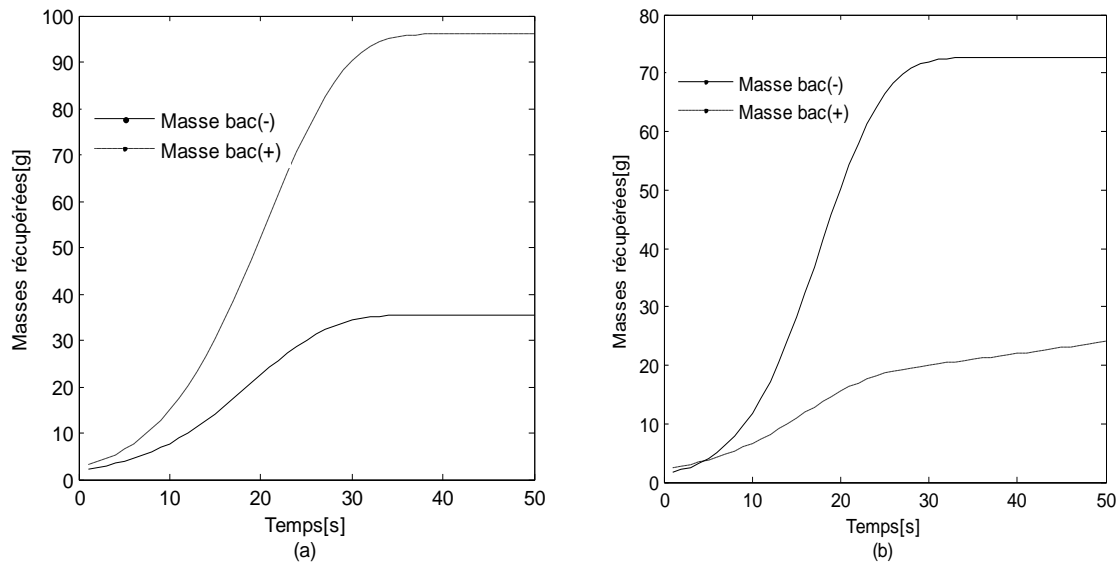


Figure IV. 3: Evolution des masses estimées récupérées dans les deux bacs du collecteur en régime intermittent pour un mélange granulaire qui se compose:

a) 60% A + 30 % B +10% C

b) 30%A + 60 % B +10% C

La figure (IV. 3.a) montre que tous les granules de type A sont collectés à un rythme plus rapide, car elles sont minoritaires dans la composition du mélange granulaire. En effet, les granules de B et de C ont une probabilité plus faible qu'un granule de A d'entrer en collision avec un granule 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.

La figure (IV. 3.b) montre que les granules de type B et C sont collectés à un rythme plus rapide que les granules de A , vu qu'elles sont minoritaires par rapport aux granules de A dans le mélange granulaire.

IV.1.3 Effet des forces aérodynamiques:

Il existe des masses des granules A , B et C récupérées accidentellement dans les deux bacs du collecteur du lit fluidisé en raison de la turbulence de l'air calculée à partir des équations III.11 et III.12.

Le fonctionnement du dispositif a été vérifié par l'algorithme développé dans le §III.1.1. L'étape d'itération est $\Delta t = 1s$. La masse initiale était $M_1 = 240$ g et $M_{lim} = 40g$.

La figure IV. 4 représente l'évolution de la masse récupérée en fonction de différentes concentrations des masses récupérées sous l'effet des courants d'air $c_{airA}=2\%$; $c_{airB}=2\%$; $c_{airC}=2\%$ et $c_{airA}=5\%$; $c_{airB}=5\%$; $c_{airC}=5\%$.

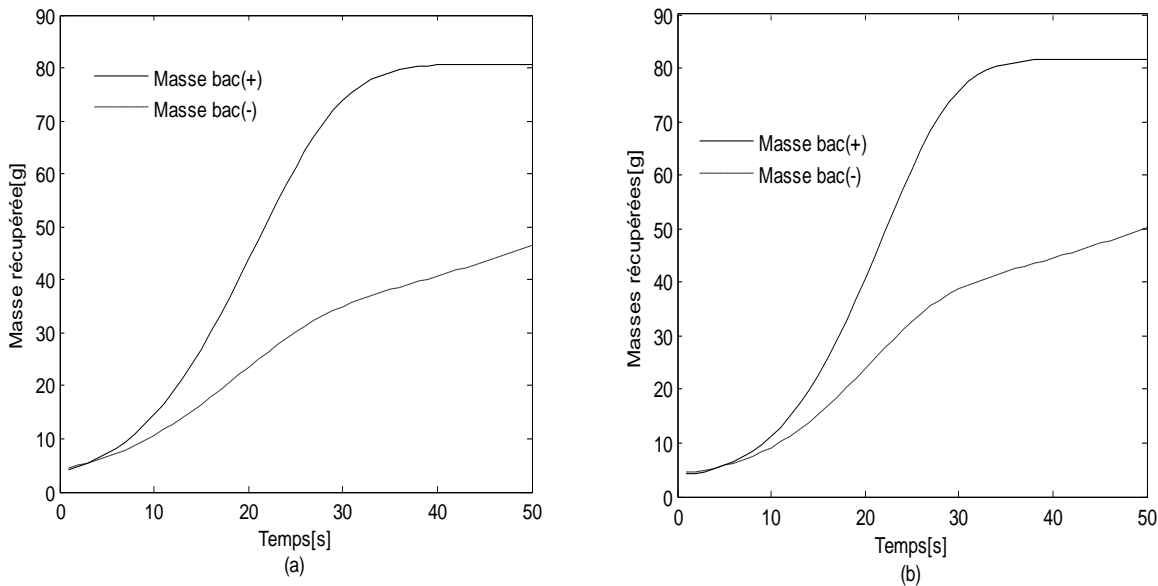


Figure IV. 4: Evolution des masses estimées récupérées dans les deux bacs du collecteur pour différents c_{air} en régime intermittent.

a) $c_{airA}=2\%$; $c_{airB}=2\%$; $c_{airC}=2\%$

b) $c_{airA}=5\%$; $c_{airB}=5\%$; $c_{airC}=5\%$.

La figure IV. 4) montre qu'en augmentant le débit d'air, les concentrations granulaires collectées sous l'effet des courants d'air augmente et les masses récupérées dans les deux bacs du collecteur augmente aussi mais l'inconvénient, est qu'on obtiendra plus d'impuretés dans les deux cotés.

IV.2. Chargement triboélectrique d'un mélange ternaire dans un dispositif à lit fluidisé à faible débit en régime continu

A partir de l'étude du fonctionnement intermittent du dispositif, il a été remarqué certaines difficultés qui peuvent être évitées et améliorées en optant pour un fonctionnement du dispositif en régime continu. Une première constatation importante se réfère au fait que les masses des matières séparées sont importantes dans les 40 premières secondes après le début du processus. Une autre observation se rapporte à la quantité de matière séparée.

Le fonctionnement du dispositif en continu assure la séparation d'une quantité importante de matière (20-25 kg / h).

Dans le but de simuler le fonctionnement en flux continu, le dispositif est alimenté par un convoyeur vibrant (**Figure II.10**). 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.

IV.2.1 Effet de parois

Le but de cette étude a été dans un premier temps d'observer si les parois du lit fluidisé influent sur le processus de séparation électrostatique pour un mélange de trois matériaux granulaires notés A , B et C en régime continu. Les particules A , B et C 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 granule 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 granule-parois est similaire à un contact entre $A-C$ ou $B-C$, car il dépend de la position relative de la matière des parois P et des trois matériaux A , B et C dans la série triboélectrique. Si on prend toujours le cas étudié en régime intermittent où le matériau C est compris entre A et B plus proche de B dans la série triboélectrique, la charge échangée entre un des trois granules A , B ou C et la paroi serait respectivement λ_{PA} , λ_{PB} et λ_{PC} . Il y a plusieurs situations qui peuvent être rencontrées dans cette étude :

- a) La paroi P est comprise entre A et C dans la série triboélectrique, alors $0 \leq \lambda_{PA} \leq 1$, $0 \leq \lambda_{PB} \leq 1$ et $\lambda_{PC} < 0$ (les collisions granule-parois ont moins d'effet que celles entre deux granules);

- b) C est entre A et P alors $0 \leq \lambda_{PA} \leq 1$, $0 \leq \lambda_{PB} \leq 1$ et $0 \leq \lambda_{PC} \leq 1$ (les collisions granule-parois ont moins d'effet que celles entre deux granules).
- c) B et C sont comprises entre A et P , alors $\lambda_{PA} > 1$ (un granule A se charge mieux dans une collision avec la paroi P qu'avec un granule B ou C), et $0 \leq \lambda_{PB} \leq 1$ (la paroi a moins d'effet sur un granule B , qui se charge mieux dans une collision avec A) et $\lambda_{PC} < 0$ (les échanges de charge d'un granule C avec la paroi ont un signe opposé par rapport ceux échangés avec A).
- d) A et C sont comprises entre B et P , alors $\lambda_{PB} > 1$ (un granule B se charge mieux dans une collision avec la paroi P qu'avec un granule A), et $0 \leq \lambda_{PA} \leq 1$ (la paroi a moins d'effet sur un granule A qui se charge mieux dans une collision avec B ou C) et $\lambda_{PC} < 0$ (les échanges de charge d'un granule C avec la paroi ont un signe opposé à ceux échangés avec A).

Toutes les particules ayant une dimension similaire, il n'y a pas d'échange de charge entre les particules de la même nature.

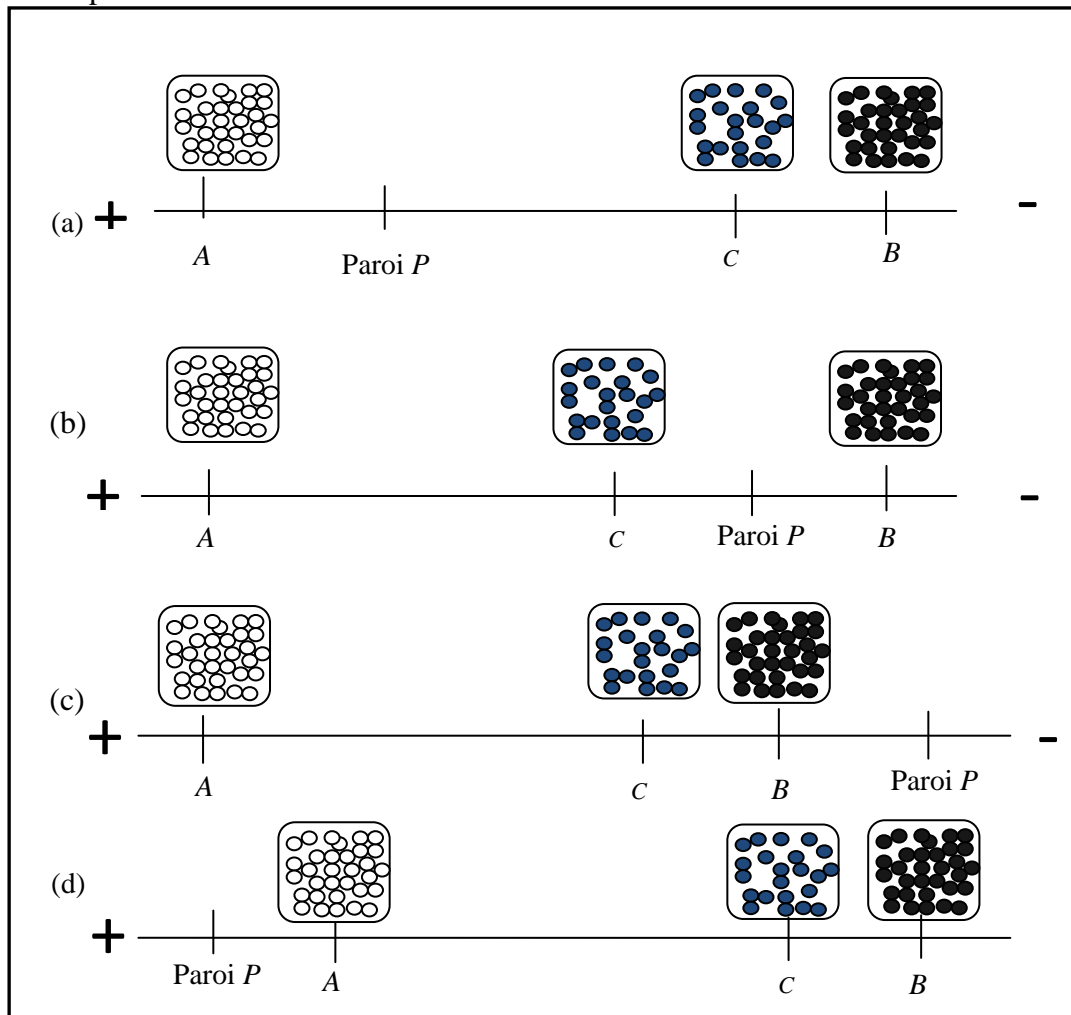
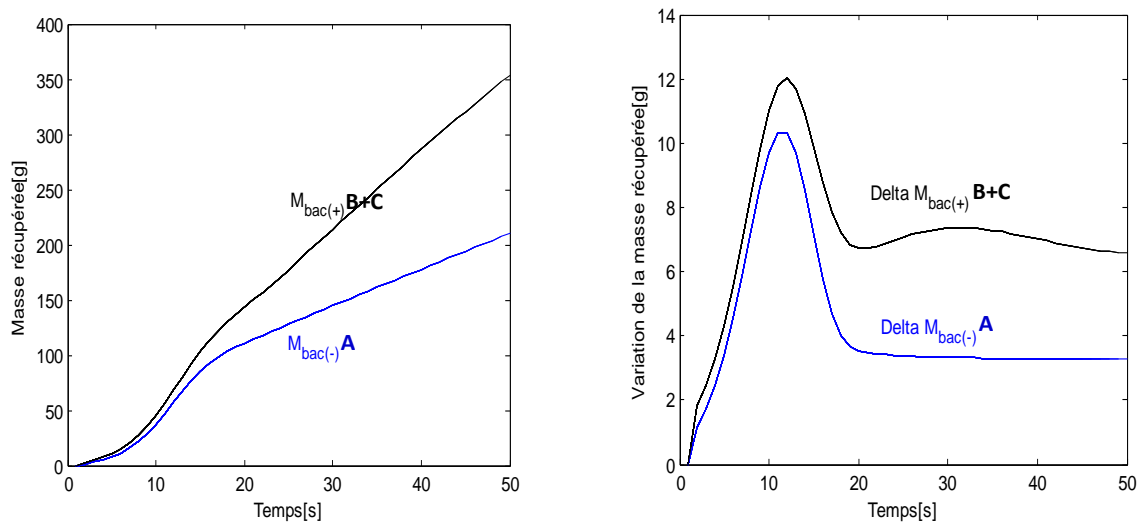
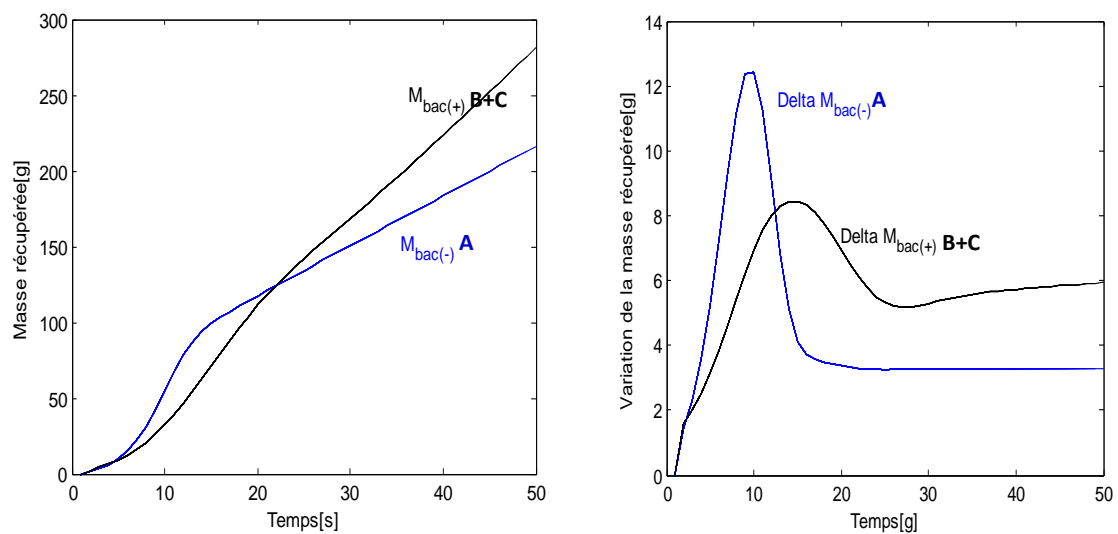


Figure I.V.5 : Série triboélectrique montrant les positions de A , B et C par rapport à la paroi P en régime continu

Pour cette étude, il a été appliqué l'algorithme présenté dans § III.1.1.2. Les calculs ont été effectués avec un programme écrit en MATLAB 7.8. L'étape d'itération est $\Delta t = 1s$, la masse initiale a été prise $M_1 = 240g$ (avec $M_{Lim} = 40 g$), avec un débit de matière $d = 10g/s$ et $c_{airA} = 0,2\%$; $c_{airB} = 0,2\%$; $c_{airC} = 2\%$. Les valeurs de x_{Aav} , s_{xA} , x_{Bav} et s_{xB} ont été choisies à la suite d'une procédure expérimentale décrite au troisième chapitre. La **figure IV.5** montre l'évolution de la masse récupérée pour quatre exemples de la position des parois par rapport à la position des granules dans la série tribo-électrique pour un mélange de trois matériaux granulaire $33\%A + 33\%B + 33\%C$.



(a)



(b)

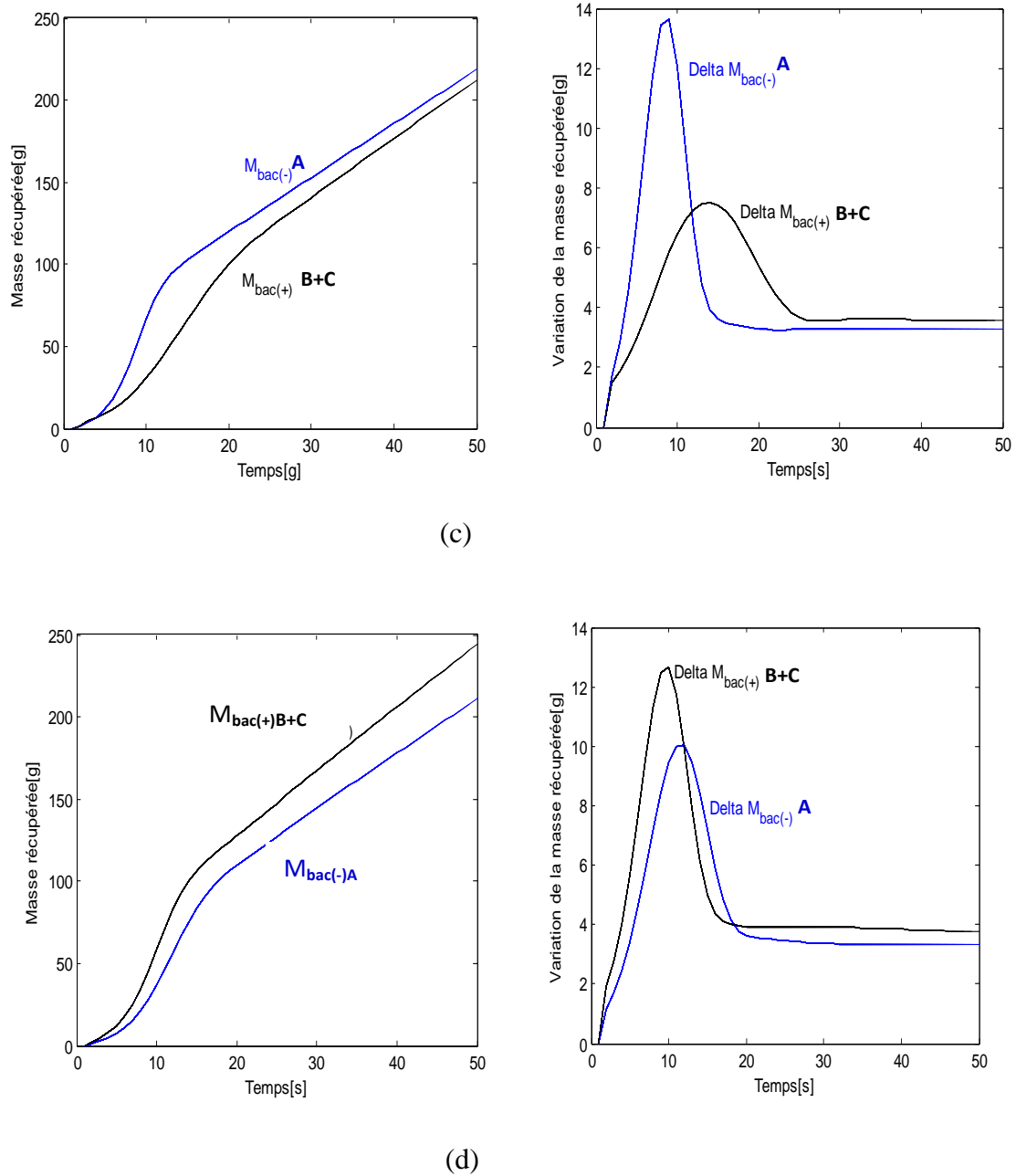


Figure IV.6: Evolution des masses estimées récupérées $M_{bac(-)}$, $M_{bac(+)}$ et des variations instantanées

$\Delta M_{bac(-)}$, $\Delta M_{bac(+)}$ en régime continu pour:

- a) $\lambda_{PA} = 0,2$; $\lambda_{PB} = 0,6$ et $\lambda_{PC} = 0,2$ b) $\lambda_{PA} = 0,8$ $\lambda_{PB} = 0,1$ et $\lambda_{PC} = 0,1$
 c) $\lambda_{PA} = 1,2$; $\lambda_{PB} = 0,2$ et $\lambda_{PC} = -0,4$ d) $\lambda_{PA} = 0,2$ $\lambda_{PB} = 1,2$ et $\lambda_{PC} = -0,4$

Les résultats de la **figure (IV.6.a)** montrent la première simulation exécutée où la paroi P étant comprise entre A et C est plus proche de A dans la série triboélectrique, les charges échangées entre les particules A , B et C et la paroi sont respectivement $\lambda_{PA}=0,2$; $\lambda_B=0,6$ et $\lambda_{PC}=0,2$. Cependant, pour la présente étude, nous avons pris le cas étudié en régime intermittent (C est situé entre A et B plus proche de B dans la série triboélectrique) et que les trois classes de particules ont des caractéristiques similaires.

Les granules de B et C récupérés dans le bac (+) sont collectés à un rythme légèrement rapide par rapport aux granules de A récupérés dans le bac (-). Ceci explique que les collisions granule-parois ont moins d'effet que celles inter-granulaires.

la **figure (IV.6.b)** illustre le cas où le granule A est compris entre le granule C et la paroi P , les charges échangées entre les particules A , B , C et la paroi sont respectivement $\lambda_{PA}=0,8$ $\lambda_{PB}=0,1$ et $\lambda_{PC}=0,1$; les granules A se chargent mieux après une collision avec la paroi P qu'avec les granules B et C . Ce qui explique la quantité récupérée importante des particules A dans le bac (-).

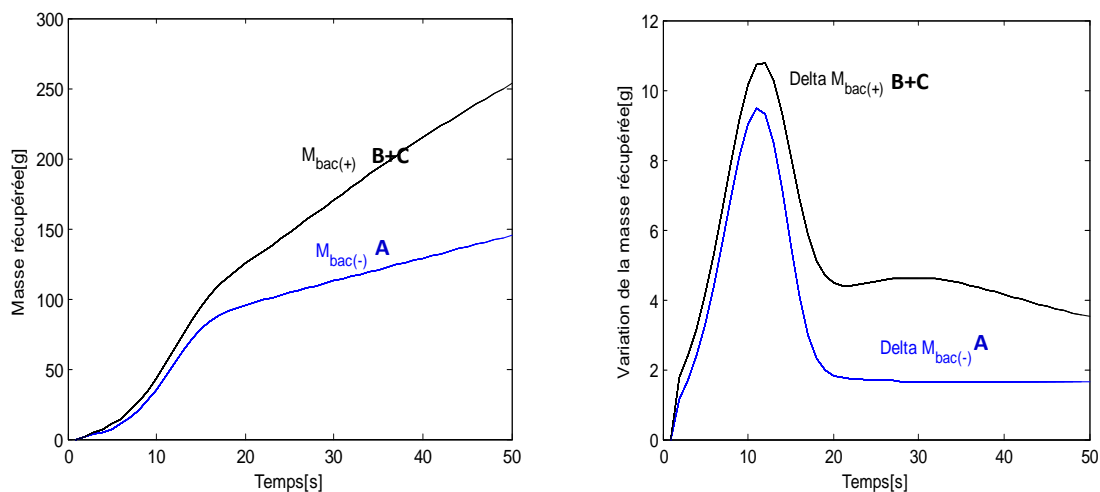
Les résultats de la **figure (IV.6.c)** montrent la quatrième simulation exécutée où la paroi P étant comprise entre A et C est plus proche de P dans la série triboélectrique, les charges échangées entre les particules A , B et C et la paroi sont respectivement $\lambda_{PA}=1,2$, $\lambda_{PB}=0,2$ et $\lambda_{PC}=-0,4$. La quantité récupérée des particules A et dans le bac (-) est importante par rapport à celle collectée dans le bac (+) car les granules A se chargent mieux après une collision avec la paroi P qu'avec les granules B et C . De plus, les échanges de charge des granules C avec la paroi P ont un signe opposé, ce qui va réduire légèrement la quantité de charge récupérée dans le bac (+).

La **figure (IV.6.d)** représente le cas où le granule B est compris entre le granule C et la paroi P , dans ce cas les charges échangées entre les particules A , B , C et la paroi sont respectivement $\lambda_{PA}=0,2$; $\lambda_B=1,2$ et $\lambda_{PC}=-0,4$. Les granules B se chargent mieux après une collision avec la paroi P qu'avec les granules A . Ce qui explique la quantité récupérée importante des particules B et C dans le bac (+) par rapport aux particules A collectés dans le bac (-), malgré que les échanges de charge des granules C avec la paroi ont un signe opposé, ce qui va réduire légèrement la quantité des granules récupérés dans le bac (+).

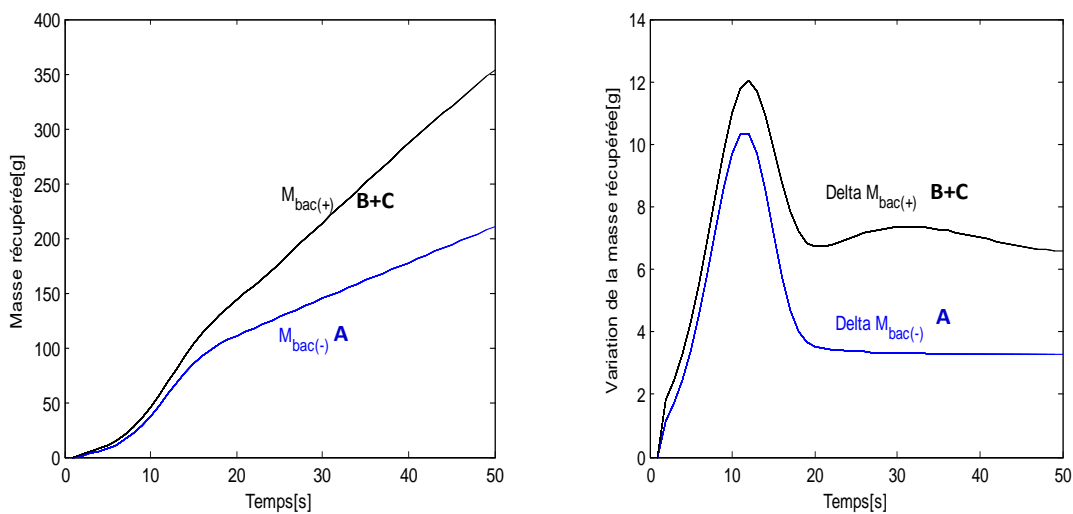
IV.2.2 Effet du débit de matière

Afin d'étudier l'effet du débit de matière, un algorithme de simulation a été développé dans le §III.1.1.2. En utilisant les mêmes caractéristiques triboélectriques décrites précédemment, les charges échangées entre les particules A , B , C et la paroi sont respectivement $\lambda_{PA}=0,2$ et $\lambda_{PB}=0,6$, $\lambda_{PC}=0,2$. La masse initiale du mélange introduite dans le lit fluidisé était de 240 g pour un mélange granulaire de 33% A + 33% B + 33% C et les concentrations des particules récupérées sous l'effet des courants d'air sont : $c_{airA}=0,2\%$; $c_{airB}=0,2\%$; $c_{airC}=2\%$.

La figure IV.7 montre l'évolution de la masse récupérée et ses variations par rapport au temps pour quatre valeurs du débit de matière.



(a) Débit $d=5g/s$



(b) Débit $d=10g/s$

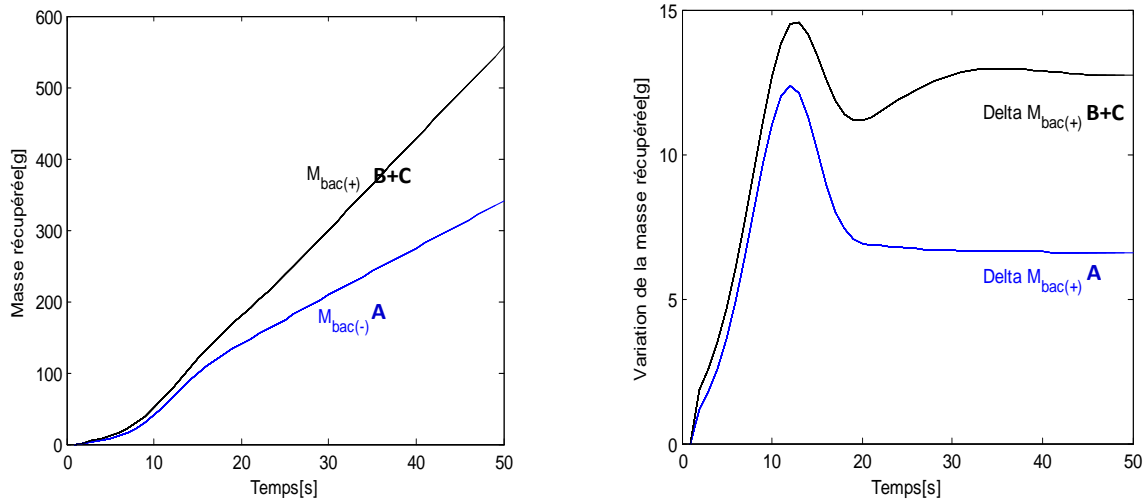
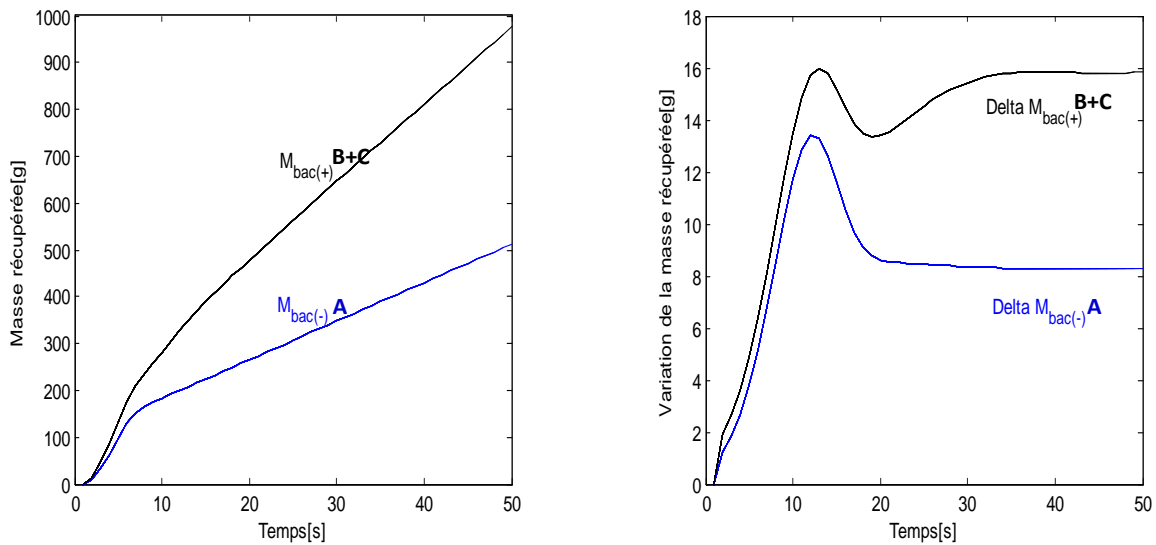
(c) Débit $d = 20$ g/s(d) Débit $d = 25$ g/s

Figure IV.7: Evolution des masses estimées et la variation des masses récupérées estimées en régime continu pour : a) Débit $d=5$ g/s ; b) Débit $d=10$ g/s ; c) Débit $d=20$ g/s; c) Débit $d=25$ g/s

La **figure IV.7** illustre les masses récupérées et ses variations par rapport au temps pour quatre valeurs du débit de matière $d = 5$ g/s; $d = 10$ g/s; $d = 20$ g/s; $d = 25$ g/s. Une augmentation progressive de cette masse est observée avec l'augmentation du débit d'air. A partir des **figures (IV.7. a, b et c)**, on peut noter que la valeur de la masse récupérée ne dépasse pas la valeur maximale introduite dans le dispositif durant toute la durée de séparation. Par contre pour un débit de matière $d = 25$ g/s, la somme des masses récupérées après 50s du

introduite dans le séparateur. Par conséquent, il peut être spécifié que la variation du débit maximal d'entrée (entre 5-20 g/s) pour lequel le séparateur fonctionne à paramètres nominaux.

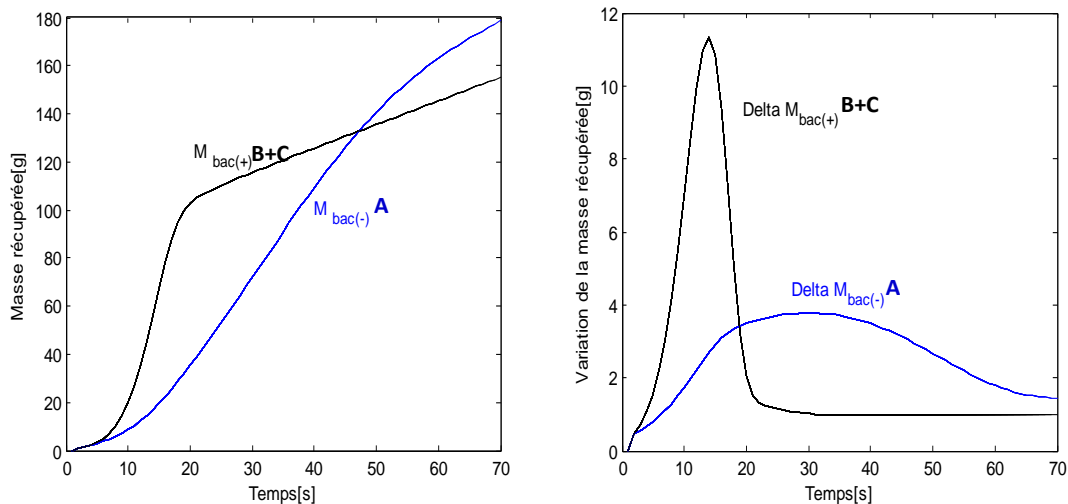
IV.2.3 Effet de la composition du mélange

Pour cette étude, il a été appliqué l'algorithme présenté dans le §III.1.2.2. Les calculs ont été exécutés à l'aide d'un programme écrit en MATLAB 7.8. L'étape d'itération est $\Delta t = 1s$, la masse initiale était $M_1 = 240$ g (avec $M_{lim} = 40$ g)

Les charges échangées entre les particules A , B , C et la paroi sont respectivement $\lambda_{PA}=0,2$, $\lambda_{PB}=0,6$ et $\lambda_{PC}=0,2$. La masse initiale du mélange introduite dans le lit fluidisé était de 240g. L'objectif pour ceci est d'évaluer la faisabilité du processus de charge triboélectrique pour différentes compositions du mélange de trois matériaux granulaires. Le débit choisi de l'alimentation en matière était 5 g/s.

La figure IV.8 montre l'évolution de la masse récupérée en fonction de la concentration des mélanges granulaires. Plusieurs cas ont été analysés: Afin d'étudier l'influence de la composition granulaire du mélange sur le processus de séparation. On a utilisé des mélanges synthétiques ternaires A , B et C dans les proportions suivantes:

- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| a) 60% A + 30% B + 10% C , | b) 30% A + 60% B + 10% C |
| c) 50% A + 30% B + 20% C , | d) 33% A + 33% B + 33% C |



(a)

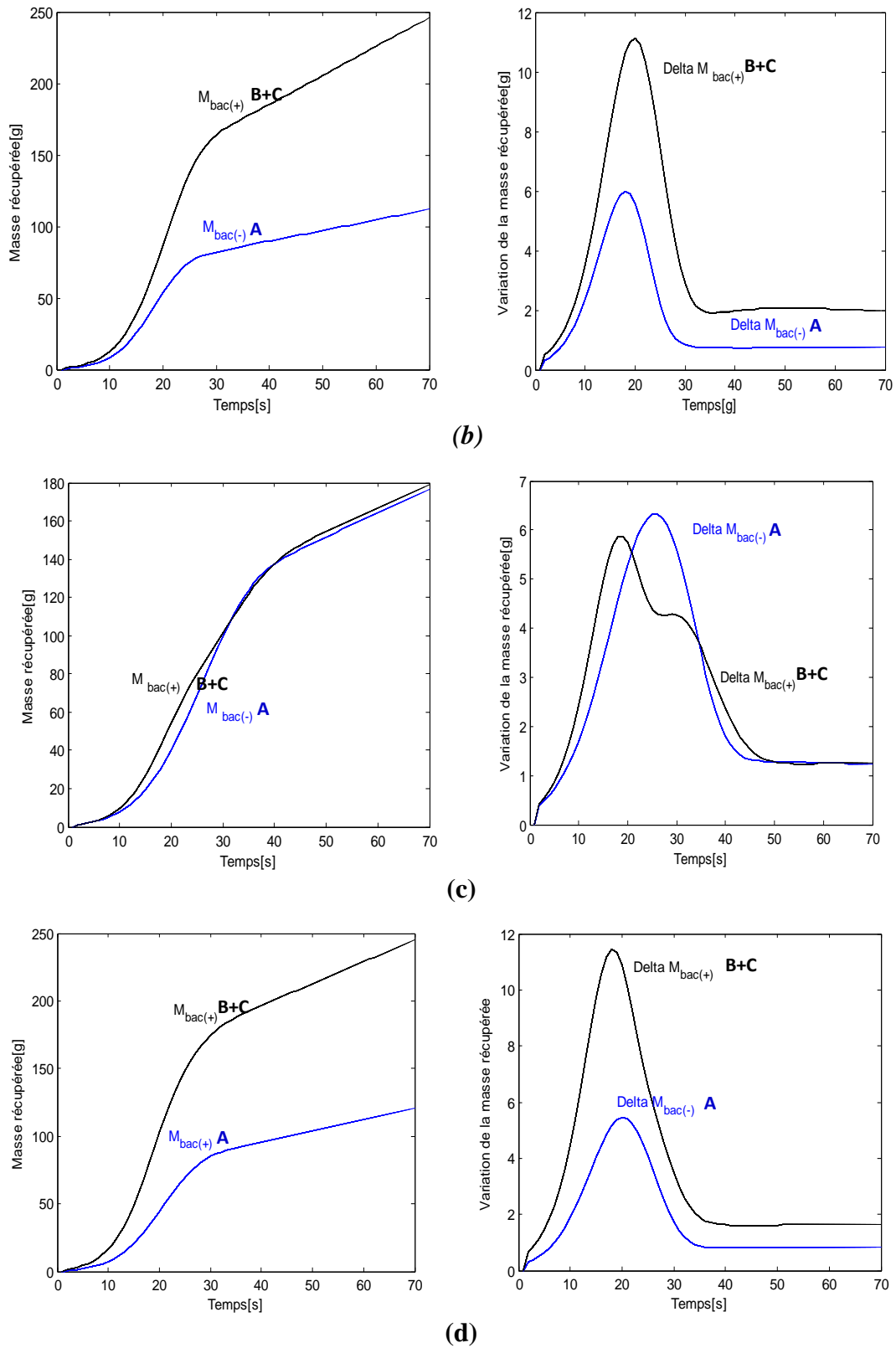


Figure IV.8 : Evolution des masses estimées et ses variations en régime continue pour:

- a) 60% A + 30 % B + 10% C
- b) 30% A + 60 % B + 10% C
- c) 50% A + 20% B + 30% C
- d) 33% A + 33% B + 33% C

La **figure (IV.8.a)** représente l'évolution de la masse et la variation de la masse récupérée pour un mélange de 60% A+ 30 % B +10% C, on remarque que les granules récupérés dans le bac (+) sont collectés à un rythme plus rapide que ceux récupérés dans le bac (-) de B jusqu' à un temps $t=18s$, car elles sont minoritaires dans la composition du mélange granulaire. En effet, un granule de A à une probabilité plus faible qu'un granule de B d'entrer en collision avec un granule 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 $t=18s$, les granules de A sont collectés à une quantité plus grande que les granules de B et C, cela est expliqué par le fait que les matériaux B et C existent en petites quantités dans le lit fluidisé.

La **figure (IV. 8. b)** illustre que pour un mélange de 30%A+ 60%B+ 10% C où les granules A sont minoritaires et ne représentent que 30% du mélange granulaire ($M_A=80$ g), on remarque que presque tous les granules A sont récupérés après $t =25$ s dans le bac (-), car elles sont minoritaires dans la composition du mélange granulaire. Au-delà de $t=25s$, les granules de B et C sont collectés à une quantité plus grande que les granules A, cela est veut dire que le matériau A existe en petites quantités dans le lit fluidisé.

La **figure (IV. 8 c)** représente l'évolution de la masse et la variation de la masse récupérée pour un mélange de 50%A+ 20%B+ 30% C, on remarque que les masses récupérées dans les deux bacs du collecteur sont identiques, cela s'explique aussi que le mélange contient 50% de A qui va tomber dans le bac (-) indique (20% B+30% C), qui est sensée être récupérée dans le bac(+). C'est comme si on a un mélange équilibrer.

Pour un mélange granulaire de 33% A+33% B+33% C (**figure IV. 8.d**), on remarque que la masse récupérée dans le bac(+) représente le double de la quantité récupérée dans le bac(-), car toutes les particules C seront récupérées dans le bac (+) avec les granules B.

IV.3. Charge d'un mélange de trois matériaux plastiques granulaires dans un dispositif à lit fluidisé industriel en régime intermittent

L'état de charge des particules pourrait être amélioré en augmentant la durée du processus de charge au détriment de la productivité du procédé [62]. 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[63,64]

Dans le séparateur industriel spécifique au fonctionnement des installations industrielles, nous avons supposé qu'à chaque instant un pourcentage $c_{op}=1\%$ de la masse des particules A , B et C dans le lit fluidisé sera attiré par les particules de polarité opposées collées sur la surface des électrodes. Les masses séparées de cette façon d'un produit P (avec $P = A$, B ou C), récupérées dans les collecteurs A et B jusqu'au moment t , sont notées respectivement $M_{P-A(op)s}(t)$ et $M_{P-B(op)s}(t)$.

IV.3.1 Nature du mélange granulaire

Pour cette étude, il a été appliqué l'algorithme présenté dans le § III.2.1. Les calculs ont été effectués avec un programme écrit en MATLAB 7.8. L'étape d'itération est $\Delta t = 1s$, la masse initiale a été prise $M_1 = 3000$ g (avec $M_P = 200$ g) et $c_{opA}=1\%$; $c_{opB}=1\%$; $c_{opC}=1\%$. Les valeurs de x_{Aav} , s_{xA} , x_{Bav} et s_{xB} ont été choisies à la suite de la procédure expérimentale décrite au troisième chapitre. La **figure IV .9** représente l'évolution de la masse récupérée pour deux exemples de la position des parois par rapport à la position des granules dans la série tribo-électrique pour un mélange de trois matériaux granulaire $33\%A+33\%B+33\%C$:

- C est comprise entre A et B , plus proche de A dans la série triboélectrique, alors $0 \leq \lambda_{AC} \leq 1$, $0 \leq \lambda_{BC} \leq 1$ avec $\lambda_{AC} < \lambda_{BC}$ et $\lambda_{AC} + \lambda_{BC} = 1$ (toutes les particules C vont être collectées avec les particules A)
- C est comprise entre A et B , plus proche de B dans la série triboélectrique, alors $0 \leq \lambda_{AC} \leq 1$, $0 \leq \lambda_{BC} \leq 1$ avec $\lambda_{AC} > \lambda_{BC}$ et $\lambda_{AC} + \lambda_{BC} = 1$ (toutes les particules C vont être collectées avec les particules B).

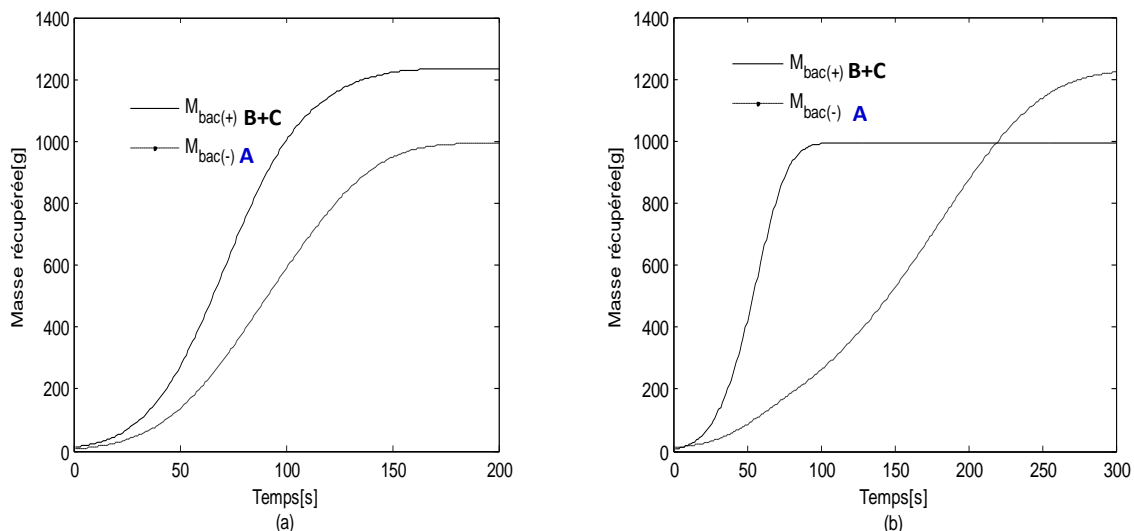


Figure IV. 9: Evolution des masses estimées récupérées dans les deux bacs du collecteur d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique industriel pour

a) $\lambda_{AC}=0,6$; $\lambda_{BC}=0,4$

b) $\lambda_{AC}=0,4$; $\lambda_{BC}=0,6$

Les résultats de la **figure IV.9** montrent les résultats de simulations pour un dispositif tribo-aéro-électrostatique en régime intermittent, exécuté pour deux cas de la position des granules C dans la série triboélectrique. La **figure (IV.9.a)** illustre les masses récupérées dans les deux bacs du collecteur dans le cas où C étant comprise entre A et B et plus proche de B dans la série triboélectrique. Les charges échangées entre les particules A (ou B) et C sont respectivement $\lambda_{AC}=0,6$ et $\lambda_{BC}=0,4$. Les granules de B et C récupérés dans le bac (+) sont collectés à un rythme légèrement rapide que les granules de A récupérés dans le bac (-).

La **figure IV.9 (b)** des masses récupérés dans les deux bacs du collecteur dans le cas où C 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 C sont respectivement $\lambda_{AC}=0,4$ et $\lambda_{BC}=0,6$. Les granules C sont récupérés avec les granules A dans le bac (-) sont collectés à un rythme légèrement rapide que les granules B récupérés dans le bac (+).

Il convient à noter que la somme des masses des produits collectés après 300s: $M_{Bac(+)}+M_{Bac(-)} < M = 3000g$. 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 $t > 300$ s, car le lit fluidisé est de plus en plus dilué.

IV.3.2 Composition du mélange granulaire

En tenant compte des équations (III. 57.a) et (III.57.b) dans cette partie, l'étude va porter sur le comportement des mélanges de trois matériaux plastiques granulaires de nature différente dans le lit fluidisé industriel. La quantité de charge électrique créée par la mise en contact inter-granulaire dépend de la nature des matériaux définis à séparer par des séries triboélectriques: 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 car on va prendre le cas de C comprise entre A et B plus proche de B dans la série triboélectrique. Donc presque toutes les particules de C et B seront chargées négativement et collectées dans le bac (+), la masse initiale était $M_1 = 3000$ g (avec $M_{Lim} = 200$ g). Les charges échangées entre les particules A , B et C sont respectivement $\lambda_{AC}=0,6$ et $\lambda_{BC}=0,4$.

La figure **IV. 10** représente l'évolution des masses récupérées dans les deux bacs du collecteur d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique, pour un mélange granulaire qui se compose: **a)** 33% A+ 33% B +33% C, **b)** 20%A + 50 %B +30% C, **c)** 50% A+ 30 % B +20% C, **d)** 20%A + 30 % B +50% C

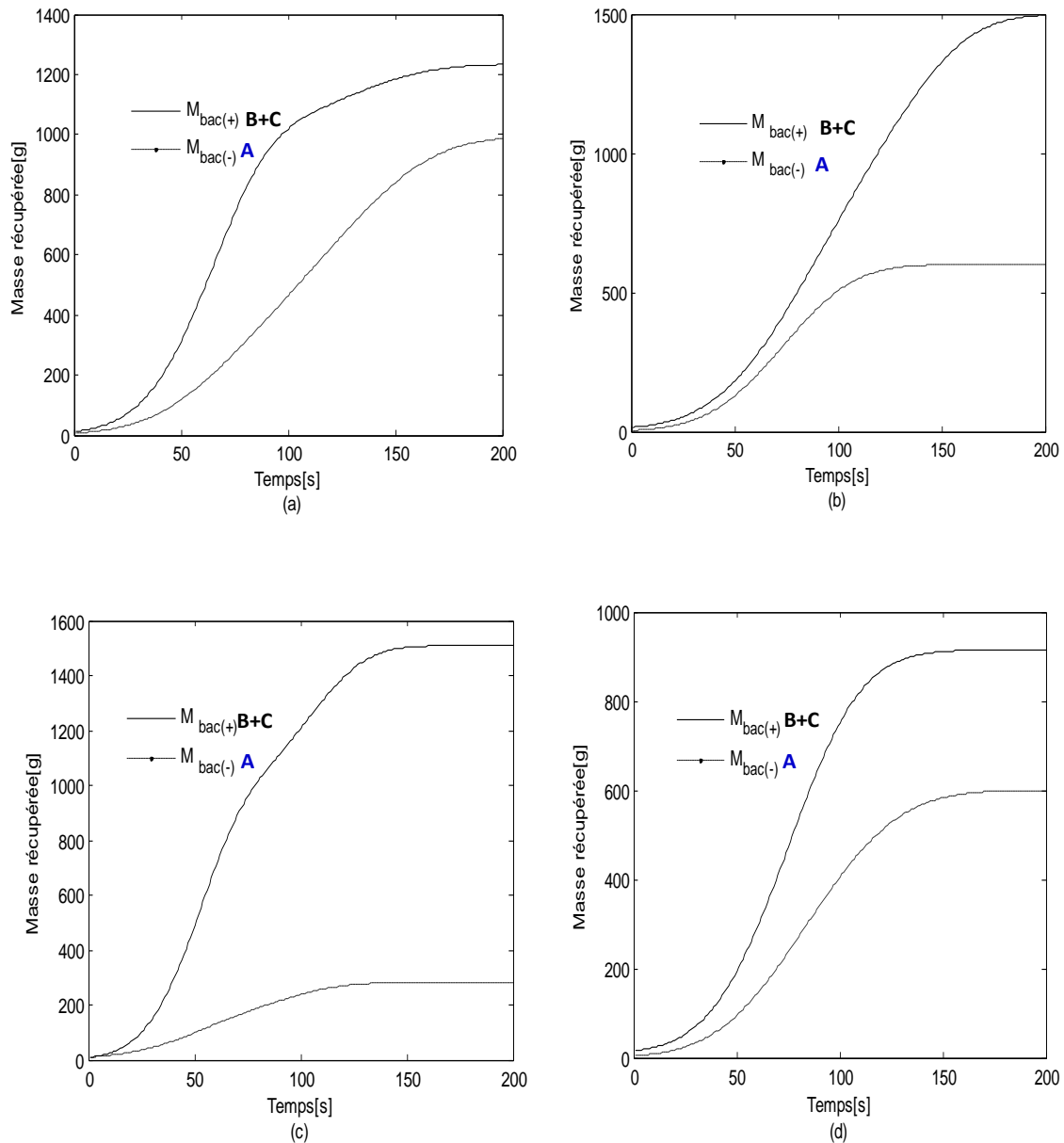


Figure IV. 10: Evolution des masses estimées récupérées dans les deux bacs du collecteur d'un lit fluidisé industriel pour un mélange granulaire qui se compose:

a) 33% A + 33 % B + 33% C

b) 20%A + 50 % B + 30% C

c) 50% A + 30 % B + 20% C

d) 20%A + 30 % B + 50% C

La **figure (IV. 10. b)** montre que tous les granules de type *A* sont collectés à un rythme plus rapide après 120 s du début de la séparation, car elles sont minoritaires dans la composition du mélange granulaire. En effet, les granules de *B* et de *C* ont une probabilité plus faible qu'un granule de *A* d'entrer en collision avec un granule 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.

Les **figures (IV. 10.c et IV. 10.d)** montrent que les granules de type *B* et *C* sont collectés à un rythme plus rapide que les granules de *A*, vu qu'elles sont minoritaires par rapport aux granules de *A* dans le mélange granulaire.

Conclusion

Les résultats des calculs numériques ont montré que le fonctionnement d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique dans les deux régimes (intermittent et continu) peut être prédit avec précision par la simulation numérique, basée sur un modèle mathématique simple présenté et décrit au chapitre III.

Les simulations numériques indiquent que le fonctionnement du séparateur dépend de:

- La composition du mélange et la nature des matériaux séparés. Les particules minoritaires se chargent plus rapidement et elles sont facilement séparées du mélange, tandis que les particules majoritaires ont besoin de plus de temps pour être suffisamment chargées et entraînées vers les collecteurs.
- La distribution des trois sortes de granules dans les deux collecteurs est liée à leurs positions respectives dans la série tribo-électrique. Le signe de la charge acquise par les deux matériaux qui sont proches dans cette série est la même, par conséquent ces matériaux seront recueillis dans le même collecteur.
- La présence de trois classes de particules recueillies sous l'effet du flux d'air dans les deux collecteurs dépend de la densité volumique des granules à séparer. Les plus légers peuvent être plus facilement conduits dans le mauvais compartiment.
- Le débit introduit instantanément (le débit maximal d'entrée est d'environ 20 g/s pour lequel le séparateur fonctionne à paramètres nominaux).

- L'effet de paroi dépend de sa position dans la série triboélectrique par rapport aux matériaux à séparer.

Enfin, on a présenté les résultats de simulation, on utilisons le modèle mathématique présenté dans le chapitre III, qui assure le fonctionnement intermittent du processus de la séparation tribo-aéro-électrostatique industriel des mélanges ternaires pour diverses concentrations des constituants.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion Générale et Perspectives

L'objectif de ce travail était la simulation du fonctionnement d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique pour un mélange constitué de trois matériaux plastiques granulaires. Les aspects électrostatiques liés à la charge triboélectrique des particules doivent également être pris en compte. Dans un contexte plus général, ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux qui sont effectués depuis plusieurs années au sein des laboratoires APELEC et IRECOM, sur la charge par effet triboélectrique et sur la séparation électrostatique des matériaux granulaires.

Cette thèse présente une synthèse sur l'état de l'art dans ce domaine, les équipements de laboratoire conçus et mis au point par les chercheurs, les résultats expérimentaux que nous avons obtenu, la tribo-électrisation en lit fluidisé des matériaux plastiques et la séparation tribo-aéro-électrostatique. Aussi, nous avons présenté les résultats des simulations numériques du lit fluidisé des matériaux plastiques qui ont été obtenus et validés par la suite par les données expérimentales.

Les résultats des calculs numériques ont montré que le fonctionnement d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique pour un mélange constitué de trois matériaux granulaires plastiques peut être prédit avec précision par la simulation numérique, basée sur un modèle mathématique simple, et ce après identification des problèmes scientifiques et techniques à résoudre dans ce domaine. Le fonctionnement du séparateur dans les deux régimes (intermittent et continu) dépend de plusieurs facteurs qui influent sur le rendement du dispositif tels que :

- La composition du mélange à séparer : les particules minoritaires se chargent plus rapidement et sont facilement séparées du mélange.
- L'effet des forces aérodynamiques : En augmentant le débit d'air, les masses récupérées sous l'effet des courants d'air provoquent beaucoup d'impuretés dans les deux bacs du collecteur.
- Le débit de masse introduite instantanément (variation de 5-20 [g/s]).
- La nature du matériau utilisé pour les parois : Etude de l'effet des parois sur les matériaux à séparer d'après leurs positions respectives dans la série triboélectrique.

Perspectives de recherche

La thèse ouvre des perspectives sur de nouveaux domaines de recherche dans la séparation électrostatique des matériaux plastiques provenant d'équipements informatiques, en utilisant la tribo-électrisation par lit fluidisé :

- ✓ Elaboration d'un modèle mathématique simple du processus du chargement triboélectrique des matériaux granulaires par lit fluidisé, basé sur d'autres lois (loi de poisson, éléments finis, éléments de frontières.....)
- ✓ Simulation d'autres dispositifs à lit fluidisé tel que le séparateur à disques.
- ✓ 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 la matière à l'entrée et à la sortie.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] L. F. Calin, "Séparation électrostatique des matériaux plastiques provenant d'équipements informatiques en utilisant la triboélectrisation en lit fluidisé", Thèse pour l'obtention de grade docteur de l'Université de Poitiers, 2008.
- [2] T. Hammi, "Etude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatique des textiles", Thèse pour l'obtention de grade Docteur de l'Université des Sciences et Technologie de Lille, 2005.
- [3] I. Holme, J. E. McIntyre and Z. J. Shien, "Electrostatic charging of textile The Textile Institute" 1998, 28, 1.
- [4] http://gps.ijl.univlorraine.fr/Groupe_Physique_Statistique/PDF/elect.pdf, "Historique vers la Charge Electrostatique".
- [5] L. S. McCarty and G. M. Whitesides, "Electrostatic Charging Due to Separation of Ions at Interfaces": Contact Electrification of Ionic Electrets .
- [6] E. Durand, "Electrostatique – I", les distributions Masson, 1964.
- [7] E. Durand, "Electrostatique – II", Problèmes généraux, conducteurs Masson, 1966.
- [8] H. Zaïdi¹, C. Richard², J. Frêne¹, "La triboélectricité dans les contacts dynamique"
- [9] D. Savostianoff, "Quelle seconde vie pour les plastiques ?, caoutchoucs & plastiques", 1993 vol. 722, p. 45–49
- [10] G. Bertolini, "La Double Vie de l'Emballage", Paris : Economica, 1995, 112, p.8.
- [11] K. Fukunaga and T. Maeno, "Measurement of space charge distribution in a polyimide film", Trans. IEE Japan, Vol. 114-A. pp. 560-561, 1994.
- [12] E. Duguet, J. L. Pariente, P. Conort, "Chapitre II ,Aspects physico- chimiques des biomatériaux utilisés en Urologie " Progrès en Urologie, n°15, p. 865-886 (2005).
- [13] A. Kahlouche, "Contribution à la modélisation des mécanismes de transport de charges électriques dans les polyéthylènes" Thèse de Magister, Université de Constantine (2000).
- [14] G. Jarrouse, " Adhésion des polymères semi-cristallins entre leur température de transition vitreuse et leur température de fusion", Thèse de doctorat de l'université Paris VI, (2004).
- [15] F. Ghanem, " Procédés d'obtention des matériaux plastiques et composites", <https://fr.slideshare.net/ahmedmanai900/copier-cours-plasturgie-version-00-44502178>
- [16] Dossier Enseignant, "Voyage en industrie", CAP SCIENCES 2006 http://colleges.ac-rouen.fr/signoret/IMG/pdf/differents_plastiques.pdf

- [17] "Matières plastiques": [http://www.achatsresponsables.ch/pdf/leguide_2015/ version_appfondie/D/D03-Matieres_plastiques_version_appfondie.pdf](http://www.achatsresponsables.ch/pdf/leguide_2015/version_appfondie/D/D03-Matieres_plastiques_version_appfondie.pdf)
- [18] J. Houtmeyers, <http://www.societechimiquedefrance.fr> "Le Livre blanc du chlore", 2006,
- [19] Department of Polymer Science, "Polyethylene", University of Southern Mississippi (1995,1996) Pslc.ws/French/pe.htm
- [20] Société Française de Chimie, " Données industrielles, économiques, géographiques sur le principaux produits chimiques, métaux et matériaux", 8^{ème} édition, 2009 – www.sfc.fr
- [21] W. R. Harper, Contact and Frictional Electrification, Laplacian, Morgan Hill, 1998.
- [22] J. Quentin, " Polyéthylène téréphtalate (PET): aspects économiques", Techniques de l'ingénieur, 2004 > www.techniques-ingenieur.fr Annuaire des produits recyclés, un site du cercle national du recyclage (France) et de l'ADEME > www.produits-recycles.com
- [23] Polyamide-Nylon-6,6 (PA 6,6), <http://www.goodfellow.com/F/Polyamide-Nylon-6,6.html>
- [24] F. Rahou " Modélisation du fonctionnement d'un séparateur tribo-airo électrostatique pour matériaux plastiques granulaires ", l'obtention de grade docteur de l'Université de Djilali Liabes SBA, 2015
- [25] A. Tilmatine, K. Medles, M. Younes, A. Bendaoud, L. Dascalescu, "Roll-type versus Free-fall Electrostatic Separation of Tribocharged Plastic Particles". September 2010
- [26] L. Dascalescu, O. Fati, M. Bilici, F Z. Rahou, , C. Dragan A. Samuila, A.Iuga, " 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.
- [27] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, A. Samuila, " Factors that influence the efficiency of a fluidized-bed-type tribo-electrostatic separator for mixed granular plastics ", IEEE Transact on Dielect and Elect Insul, Octob(2011) .
- [28] 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.
- [29] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, M. F. Boukhoulda, "Two Stage Electrostatic Separator for the Recycling of Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment ", Journal of Electrostatics, Volume 71, Issue 4, Pages 603-828 (August 2013)

- [30] L. Calin, A. Mihalcioiu, A. Iuga, L. Dascalescu, "Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification", In: *Particulate Science and Technology* 25(2) 205-211(2007).
- [31] M. Lungu, "Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect". In *Minerals Engineering*. 17 (1), 69-75 (2004).
- [32] S. L. Escalante, G. Touchard, G. Dominguez, "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).
- [33] D. Geldart, "Types of gas fluidization", In: *Powder Technology*, 7,19, 285,133, (1978)
- [34] F.S. Ali, I. I. Inculet, A. Tedoldi, "Charging of polymer powder inside a metallic fluidized bed". In: *Journal of Electrostatics*. 45, 199-211 (1999).
- [35] F.S. Ali, I. I. Inculet, A "Electric field analysis of the tribocharged fluidized bed powder coating process". In: *IEEE Transactions on Industry Applications*. 36 (5), 1247-1250 2000).
- [36] **C. Mimouni**, A. Tilmatine, F. Rahou, L. Dascalescu, "**Numerical simulation of a tribo-aero-electrostatic separation of a ternary plastic granular mixture**" *Journal of Electrostatics*, Vol 88 (2017)pp. 2-9
- [37] W.D Greason, I. M. Oltean, Z. Kucerovski, A.C. Ieta, "Triboelectric charging between polytetrafluoroethylene and metals". In: *IEEE Transactions on Industry Applications*. 40(2), 442-449 (2004).
- [38] M. D. Hogue, C. R. Buhler, C. I. Calle, T. Matsuyama, W. Luo, E. E. Groop, "Insulator-insulator contact charging and its relationship to atmospheric pressure" In: *Journal of Electrostatics* 61, 259-268,(2004).
- [39] I.I. Inculet, G.S.P Castle, J.D. Brown, "Electrostatic separation of mixed plastic waste". US Patent No. 5 289 922, 1994.
- [40] S. Masuda, M. Toragushi, T. Takahashi, K. Haga, "Electrostatic beneficiation of coal, using a cyclone- tribocharger", *IEEE Trans. Ind. Appl.* 19 (1983) 789e793.
- [41] W.V. Titow, "PVC technology", Springer, 31 December 1984, 6– p.
- [42] J. Dumont et J. Guignard, "Le PVC et ses application"s, p. 19, Nathan, 1996.

- [43] Project founded by the European Community under the Industrial & Materials Technologies Program. "Electrostatic recovery of paper and plastic packaging wastes" 2001
- [44] P. Costner , "PVC: A primary contributor to the U.S. dioxin burden", [archive][PDF], Greenpeace, février 1995 (6 décembre 2015).
- [45] H. Kama, Y. Kiyomura, N. Seki, "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.
- [46] R.J. Crawford, "Plastic Engineering", London, Butterworth Heinemann, 1998.
- [47] F. Roussel, " 260 000 tonnes de déchets en PVC ont été recyclées en 2010 en Europe "sur actu-environnement.com, 12 février 2011 .
- [48] J.M. Crowley, "Fundamentals of Applied Electrostatics" , California, Laplacian Press, 1999.
- [49] T. B. Jones and J. L. King, , "Powder Handling and Electrostatics", Lewis Publishers ,Chelsea, MI, 1991.
- [50] Y. Higashiyama, K. Asano, "Recent progress in electrostatic separation technology". In: Particulate Science and Technology, 16 (1), 77-90, (1998).
- [51] M. J. Pearse and T.J. Hickey, "The separation of mixed plastics using a dry triboélectricité technique", Resour. Conserv. Recy. 3, 1978, pp. 179–190..
- [52] F. Rahou, A. Tilmatine, M. Bilici, L. Dascalescu, "Numerical Simulation of Tribo-Aero- Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids", IEEE Transation Application, Vol.48, N^o.2, Mars /Avril 2012, pp. 816-822.
- [53] Y. Higashiyama, Y. Ujiie, and K. Asano, "Triboelectrification of plastic particles on a vibrating feeder laminated with a plastic film", J. Electrostat. 42, 1997, pp. 63–68.
- [54] F. Rahou. A. Tilmatine. M. Bilici. L. 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.
- [55] L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila and L. Dascalescu, "Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation", IEEE Trans. Ind. Appl. 44, 2008, pp. 1045-1051.

- [56] G. Buda, M. Bilici, A. Samuila and L. Dascalescu, "Triboelectrification of Plasticlar Materials on an Electromagnetic Vibratory Feeder Device", 8^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrostatique, 3-5 juillet 2012, Cherbourg Octeville, France.
- [57] G. Buda, M. Bilici, A. Samuila and L. Dascalescu, "Triboelectrification of Plasticlar Materials on an Electromagnetic Vibratory Feeder Device", 8^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrostatique, 3-5 juillet 2012, Cherbourg Octeville, France
- [58] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, and A. Samuila, "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices", IEEE Trans. Diel. Electr. Insul. 18, 2011, pp. 1476 1483.
- [59] R. K. Dwari and K. Hanumantha Rao , "Novel Fluidised-bed Tribo-electrostatic Separator for Dry Coal Preparation", Conference in Minerals Engineering 2008, Luleå, Sweden, pp. 15 – 29.
- [60] V. Gente, F.L. Marca ,F. Lucci and P. Massacci, "Electrical separation of plastics coming from special waste" ,Waste Management 23, 2003, pp. 951–958.
- [61] M. Younes, A. Tilmatine, M. Medles, M. Rahli, and L. Dascalescu, "Numerical modeling of conductive particle trajectories in roll-type corona-electrostatic separators", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 43, no. 5, pp. 1130–1136, Sep./Oct. 2007.
- [62] L. Calin, A. Mihalcioiu, S. Das, V. Neamtu, C. Dragan, L. Dascalescu, and A. Iuga, "Controlling particle trajectory in free-fall electrostatic separators", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no. 4, pp. 1038–1044, Jul./Aug. 2008.
- [63] S. Vlad, A. Iuga, and L. Dascalescu, "Modelling of conducting particle behaviour in plate-type electrostatic separators", J. Phys. D, Appl. Phys., vol. 33, no. 2, pp. 127–133, 2000.
- [64] K. M. Forward, D. J. Lacks, and R. M. Sankaran, "Methodology for studying particle-particle triboelectrification in granular materials", J. Electrostatic., vol. 67, no. 2/3, pp. 178–183, 2009.