



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département de Maintenance en Electromécanique**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière : Electromécanique**

**Spécialité : Electromécanique Industrielle**

### **Thème**

**Etude d'un séparateur tribo-aéro-  
électrostatique des matériaux granulaire binaire**

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom : **Dellaa/Boularaf** Prénom : **Oussama/Meysa**

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
<b>Djelghoum Farida</b>	<b>MAA</b>	<b>IMSI d'univ d'Oran2</b>	<b>Présidente</b>
<b>Mimouni Chahinez</b>	<b>MAB</b>	<b>IMSI d'univ d'Oran2</b>	<b>Encadreuse</b>
<b>Labair Hakima</b>	<b>MAB</b>	<b>IMSI d'univ d'Oran2</b>	<b>Examinatrice</b>

**2020/2021**

---

## REMERCIEMENTS

*Avant tout, nous remercions DIEU le tout puissant pour nous avoir aider à réaliser ce travail.*

*En premier lieu, nous tenons à remercier très chaleureusement notre encadreur Mme : Mimouni Chahinez pour ses précieux conseils, son aide et sa disponibilité, pour son écoute, pour sa rigueur scientifique ainsi que judicieux conseils, qui a bien su communiquer pour mener au mieux cette étude..*

*Et aussi a : Mme. Djelghoum Farida pour nous avoir fait l'honneur de présider ce jury et Mme. Labair Hakima pour avoir accepté d'examiner ce travail nous les remercions vivement.*

*Nos remerciements et notre reconnaissance à tout ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*Finalement, nous remercions tous nos enseignants qui nous ont suivi le long de nos études.*

*Veillez agréer nos professeurs l'expression de nos sentiments très respectueusement dévoués.*

*Enfin Nous voudrions également remercier et exprimer nos gratitudes envers nos collègues de l'étude et tout le groupe Electromécanique industrielle*

---

---

# Tables des matières

---

## Tables des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
------------------------------	----------

### **Chapitre I : Etat de l'art**

1.1. Charge triboélectrique des matériaux granulaires	3
1.1.1. Modes d'électrisation :	
1.1.2. Bases physiques du phénomène de charge triboélectrique	6
1.1.3. Facteurs influents	6
1.2. Dispositif de charge	8
1.3. Procédés et installations de séparation tribo-électrostatiques	12
1.3.1. Séparateurs « classiques » à chute libre	12
1.3.2. Dispositif de triboélectricité à faible débit et électrodes verticales	14
1.3.3. Dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées	15
1.3.4. Procédé et installation de séparation tribo-aéro-électrostatique	15
1.4. Modélisation des procédés de séparation tribo-électrostatique	18
1.4.1. Modélisation physique	18
1.4.2. Modélisation expérimentale	19
1.4.3. Modélisation numérique	20

<b>Conclusion</b>	<b>22</b>
-------------------	-----------

### **Chapitre II : Séparation électrostatique des mélanges de granules plastiques**

2.1. Procédés de séparation électrostatique d'un mélange de granules plastiques	23
2.1.1. Charge d'un mélange binaire de matériaux plastiques granulaires dans un séparateur tribo-aéro-électrostatique	23
2.1.2. Dispositif de séparation à faible débit	24
2.2. Le recyclage des déchets plastiques :	
2.2.1. Les différents types de déchets	25
2.2.2. Définition d'un polymère	26
2.2.3. Différents types de polymères :	
2.2.3.1. Les monomères	26
2.2.3.2. Les macromolécules	26
2.2.4. Catégories de matières plastiques	27
2.2.4.1. Les thermoplastiques	27
2.2.4.2. Les thermodurcissables	31
2.2.4.3. Les élastomères	31
2.2.4.4. Les bio-polymères	31
2.2.5. Production mondiale de matières plastiques en 2007	32
2.3. Techniques de mesure	
2.3.1. Mesure de charge	33
2.3.2. Mesure de l'humidité relative	34
2.3.3. Mesure de la masse granulaire	35

---

## Tables des matières

---

2.4. Etude du régime intermittent	36
2.5. Etude du régime continu	37
<b>Conclusion</b>	<b>38</b>
<b>Chapitre III : Elaboration du modèle numérique</b>	
3.1. Modèle mathématique	39
3.1.1. Hypothèses	39
3.1.2. Equations du régime intermittent	41
3.1.1.1 Equations de base	42
3.1.1.2 Algorithmes de simulation	45
3.1.3. Equations du régime continu	46
3.1.3.1 Equations de base	47
3.1.3.2 Algorithmes de simulation	49
3.2 Code de calcul	52
3.2.1 Algorithme de base	53
<b>Conclusion</b>	<b>55</b>
<b>Chapitre IV : Résultats et discussions</b>	
4.1. Simulation du régime de fonctionnement intermittent	56
4.1.1. Effet des parois	57
4.1.2. Effet de la composition du mélange granulaire	58
4.2. Simulation du régime de fonctionnement continue	60
4.2.1. Effet de la composition du mélange granulaire	60
4.2.2. Effet du débit de matière	63
<b>Conclusion</b>	<b>66</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>67</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>68</b>
<b>La liste des figures et tableaux</b>	<b>77</b>
<b>Annexe</b>	<b>80</b>

---

---

## Résumé

### Résumé

Outil d'aide à la décision en matière de conception industrielle, la simulation numérique bénéficie d'un nouvel élan du fait de l'arrivée sur le marché d'ordinateurs superpuissants qui permettent des calculs plus intensifs et plus rapides. Dans le monde industriel, la simulation numérique mobilise des expertises croisées que ce soit en informatique scientifique et industrielle, en mathématiques appliquées ou en physique. Cette dernière compétence s'avère essentielle pour pouvoir simuler différents types de phénomènes et tester, par exemple, la résistance de certains matériaux face à différentes contraintes (phénomènes d'usure, de force, de pression...)

L'objectif du présent travail est de simuler le fonctionnement intermittent et continu d'un processus de séparation tribo-aéro-électrostatique pour un mélange binaire de matériaux granulaires par le développement d'un modèle mathématique simple, dont on a 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..

**Mots clés** : Séparation électrostatique - Mélange granulaires binaire - simulation numérique - Triboélectricité.

---

---

## Nomenclature

---

### NOMENCLATURE

$A, B$	matières à séparer.
$C_A, C_B$	Concentration des matériaux $A$ and $B$
$M$	Masse totale à séparer
$M_A, M_B$	Masse de $A$ et $B$ dans le lit fluidisé
$N$	nombre de collision par unité de temps
$P$	fonction de probabilité
$\Pi$	fonction de distribution normal standard
PA	Polyamide
PC	Polycarbonate
$X_{AB}$	Nombre de collisions
$x_{AB}$	Nombre moyen de collisions de $A-B$
$s_{x_{AB}}$	Ecart type moyen
$\sigma_{x_{AB}}$	Ecart type standard
$t_{50\%}$	Temps de séparation de 50% des granules A
$\lambda_A, \lambda_B$	Charge échangée entre un granule $A$ (ou $B$ ) et la paroi

---

---

## Introduction Générale

---

### Introduction Générale

Les déchets d'équipements informatiques sont composés d'une grande diversité de matériaux plastiques dont le recyclage nécessite la recherche et le développement de nouvelles technologies de séparation physique. 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. 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'analyse des problèmes présentés dans les paragraphes précédents permettrons de dégager comme but de ce manuscrite « **Etude d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges plastiques binaire** ». L'objectif de ce mémoire, est d'améliorer les méthodes de séparation électrostatique actuelles et de proposer des solutions fiables à des nouvelles applications industrielles baser sur des modèles mathématiques simples.

En s'appuyant sur l'étude de l'état de l'art, présentée dans le **chapitre 1**, une synthèse bibliographique a été faite sur la triboélectricité, les différents séparateurs triboélectriques utilisés dans l'industrie, les méthodes appliquées à la séparation triboélectrique mise au traitement des déchets plastique, quelques concepts sur l'effet tribo-électrique.

Les études présentées dans le cadre du **2<sup>ème</sup> chapitre** ont comme objectif, la description de quelque polymères, la description du séparateurs électrostatiques (isolant/isolant). 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, en présence d'un champ électrique.

## Introduction Générale

---

Nous nous sommes ensuite concentrés sur le couplage des différents modèles. 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 deux modèles numériques. Le premier était consacré pour la séparation des mélanges granulaires binaire en régime intermittent du séparateur tribo-aéro-électrostatique à faible débit. Le deuxième était consacré à un séparateur tribo-aéro-électrostatique en régime continu afin de pouvoir l'appliquer dans l'industrie.

Les données présentées dans le **4<sup>ème</sup> chapitre** ont été calculées à l'aide de deux 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 pour le régime intermittent, et par la suite nous allons aborder les effets des parois du séparateur et le débit de la matière instantanément introduite dans le dispositif sur l'efficacité de processus de la séparation triboélectrique en régime continu.

Le manuscrit sera terminé par une **conclusion générale**, qui clôture d'une manière synthétique le mémoire, et présente un assemblage des principales **contributions** apportées dans les différents domaines étudiés.

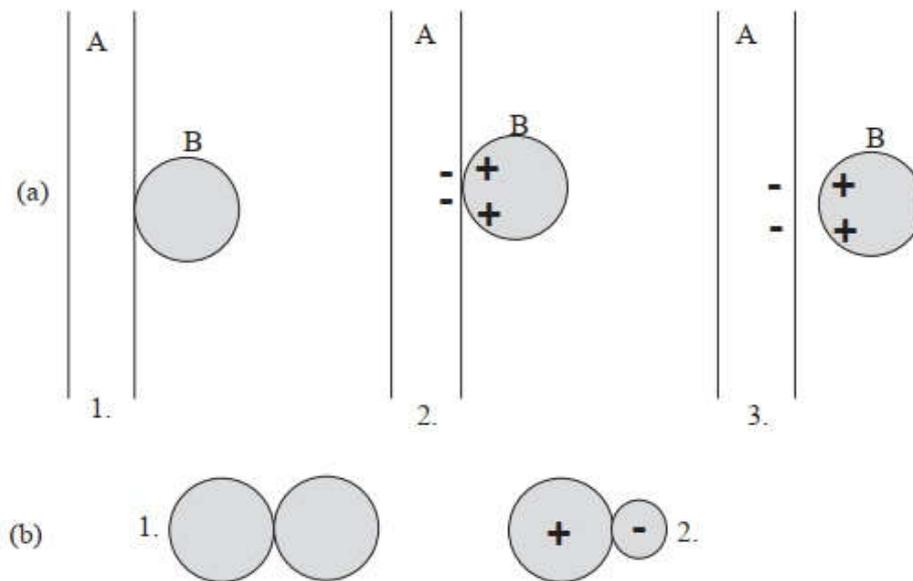
## **Etat de l'art**

La séparation électrostatique est le terme générique pour une classe importante de technologies de traitement des matériaux, largement utilisés pour le tri sélectif des matériaux solides par des forces électriques [01] ,[02] qui agissent sur les particules chargés ou polarisées [03,04] . Dans la plupart des cas, les champs électriques dans l'ordre de  $10^6 \text{ Vm}^{-1}$  sont nécessaires [05,06], et c'est pourquoi le développement des technologies et des équipements de séparation électrostatique [07] a toujours été synchronisé avec les progrès de l'ingénierie de haute tension. La gamme d'applications, se traduisant par des centaines de brevets, s'étend du traitement des minérales et de conditionnement des semences [08] jusqu'au recyclage des métaux et plastiques à partir de déchets industriels [09, 10, 11,12].

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique a été faite sur la triboélectricité, les différents séparateurs triboélectriques utilisés dans l'industrie, les méthodes appliquées à la séparation triboélectrique mise au traitement des déchets plastique, quelques concepts sur l'effet tribo-électrique.

### **I.1 Charge triboélectrique des matériaux granulaires :**

Deux mécanismes physiques sont couramment employés pour charger les matériaux granulaires en vue de leur séparation dans un champ électrique intense : l'effet couronne [13,14], assurant la charge par « bombardement ionique » et l'effet triboélectrique, impliquant le transfert de charge entre deux corps en contact. L'effet triboélectrique est utilisé pour la séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants, grâce à l'aptitude de ses matériaux à garder la charge obtenue par effet triboélectrique le plus longtemps possible. **(Figure I.1) :**



**(Figure I.1) :** L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux surfaces:

(a) :1.Surface A neutre, particule B est neutre ; 2. La surface A et la particule B sont en contact ; 3.Après la séparation, la surface A a la tendance de se charger négativement, et la particule B positivement ;(b) :1.Deux particules neutres de même taille en contact ; 2.les particules grandes ont la tendance de se charger positivement et les petites négativement.

### I.1.1 Modes d'électrisation :

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 [15].

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) [16].

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

### **I. 1 .1 .1 Electrification par frottement (triboélectricité) :**

Lorsqu'on frotte deux corps l'un contre l'autre, l'un arrache des électrons à l'autre. Le corps qui possède un excès d'électrons est chargé négativement et le corps qui a perdu des électrons est chargé positivement.

### **I. 1 .1 .2 Electrification par contact (transfert direct de charges) :**

Consiste en un transfert de charges électriques (migration d'électrons) lorsqu'un matériau électrisé est mis en contact avec un autre matériau. Celui-ci, initialement neutre, devient à son tour électrisé.

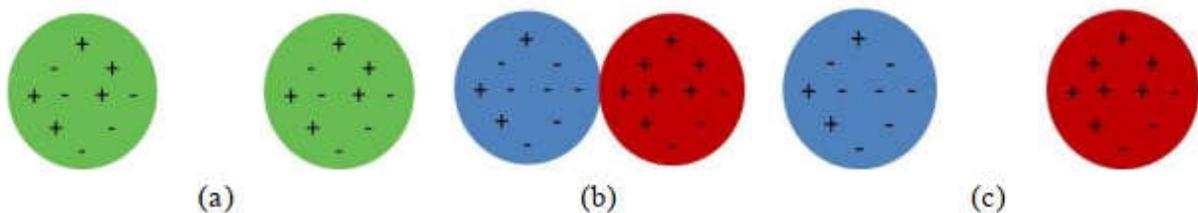
Un matériau conducteur électrique permet le passage des charges électriques (électrons), par opposition à un isolant électrique.

### **I. 1 .1 .3 Electrification par influence (à l'aide d'un champ électrique) :**

Consiste à approcher un matériau électrisé d'un autre, mais sans contact. Les charges à l'intérieur du matériau approché s'orientent et/ou se déplacent, même s'il est globalement neutre électriquement. Il y a attraction entre les charges électriques différentes (+ et -) et répulsion entre charges de même signe (+ et +, ou - et -), par interaction électrostatique (loi de Coulomb).

### I. 1 .2 .Bases physiques du phénomène de charge triboélectrique :

L'électrification par contact [17], [18], aussi appelée effet triboélectrique (du grec « tribein » signifiant frotter), désigne le phénomène électrostatique par lequel un transfert de charges électriques a lieu lorsque deux objets de natures différentes sont mis en contact, entrent en collision ou se frottent entre eux. Quand deux objets électriquement neutres, quels qu'ils soient, entrent en contact, un transfert surfacique de charges électriques s'effectue de l'un à l'autre. Lorsque le contact est rompu, les deux objets portent des charges électriques de polarités opposées (**Figure I.2**). La polarité et la quantité de charges acquises dépendent de la nature chimique du matériau, de la taille de l'objet, de son état de surface, de sa température, de son état de contrainte mécanique, des polluants gazeux, des champs électriques externes... [19-20]. Plusieurs mécanismes physiques ont été suggérés comme explications potentielles des échanges de charges : transfert d'électrons, d'ions ou de matières causés par des différences de propriétés de surface et/ou de volume des matériaux en contact. L'effet triboélectrique est majoritairement utilisé pour la charge de matières isolantes ou faiblement conductrices [17], [21-22]. C'est donc le mécanisme le plus utilisé pour charger des matières granulaires plastiques en vue de leur séparation électrostatique [20], [23-24].



(**Figure I.2**) : Charge triboélectrique de deux particules en contact. (a) Particules électriquement neutres sans contact entre elles ; (b) Contact et transfert de charge ; (c) Rupture du contact, particules chargées.

### I. 1 .3 Facteurs influents :

Dans la majeure partie des cas, l'électricité statique se forme suite au contact suivi de la séparation de deux corps ou du frottement entre ces deux corps. Les deux corps peuvent être des isolants ou bien l'un d'entre eux, un conducteur, qu'il soit ou non relié à la terre [25]. De nombreux facteurs jouent un rôle dans l'établissement de ces charges électriques: la nature des corps mis en jeu évidemment, mais aussi des facteurs externes tels que l'humidité de l'air environnant et la température. Dans ce paragraphe deux facteurs essentiels sont représentés : la surface de contact et la vitesse de frottement.

**I. 1 .3.1 Surface de contact :**

Dans des conditions industrielles simples, les surfaces de contact se réunissent d'une manière qui rend certaine quantité de frottements inévitables. L'expérience montre que, quand une surface isolante est frottée, soit par un conducteur ou un autre isolant, un transfert de charge peut être de plusieurs ordres de grandeur supérieur à une simple touche de contact [26]. Cela peut être rationalisé en notant que le frottement augmente l'intimité des surfaces de contact. La preuve de ce point de vue a été fournie par Coste et Pechery[27], qui ont montré que la charge était plus grande lorsque la rugosité de surface est faible et Haenan [28] qui a montré que le transfert de charge a augmenté avec la pression de frottement.

**I. 1 .3 .2 Vitesse de frottement :**

En règle générale, augmenter la vitesse de frottement va augmenter la charge transférée, bien des cas ont été cités où la charge passe par un maximum [29] et peut même changer de signe [30], lorsque la vitesse de frottement est accrue. Ces effets sont liés aux gradients de température locale apparaissant à travers le contact, résultant de la diffusion progressée des électrons de la surface la plus chaude vers la plus froide. Le frottement peut aussi causer des couches de surface du matériau à être "agités" de sorte que les charges préalablement à la surface sont injectées dans la masse [31].

Malgré la présence de ces facteurs de complication, un nombre de physiciens ont élaboré la série triboélectrique à partir de laquelle il est possible, dans certaines limites, de prédire la polarité de la charge qui est transféré d'une surface à l'autre. Deux des nombreuses séries qui existent [26] sont donnés dans le tableau 1.1, plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée.

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

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

Bill Lee [32] introduit aussi le concept d'« affinité » triboélectrique : le rapport entre la charge triboélectrique échangée et l'énergie dépensée dans le frottement (Tableau I-1).

+	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)
-	

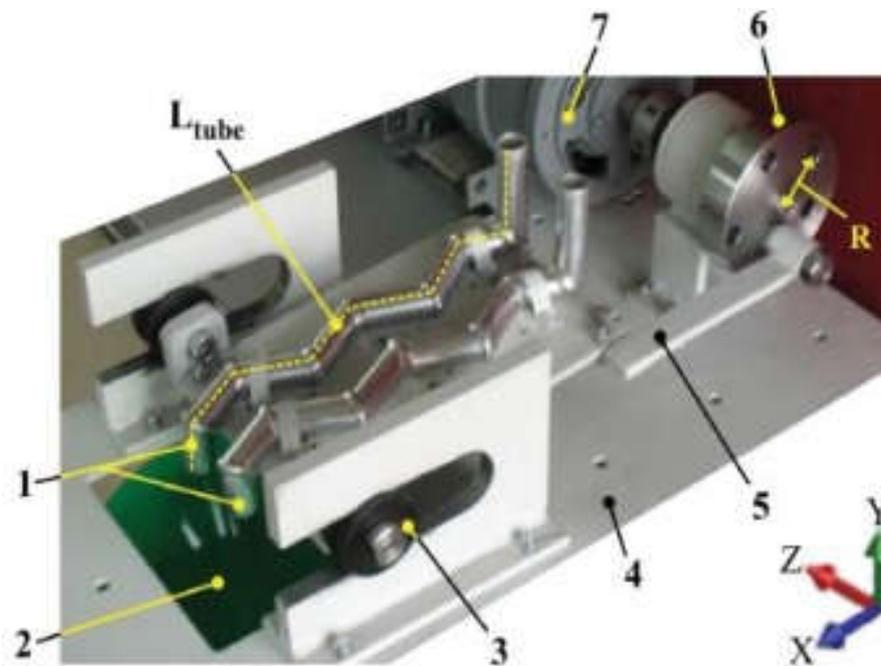
Figure I-3 : Série tribo-électrique qui combine différentes séries de la littérature [5]

## I. 2 Dispositifs de charge :

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

La première installation présentée par le dispositif à vibrations. Cette installation a été développée par Blajan et al [33] (**Figure I.4**). Le matériau à charger glisse dans des canaux en Zig-Zag mis en mouvement vibratoire [34,35] sur les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique associé à un système bielle-

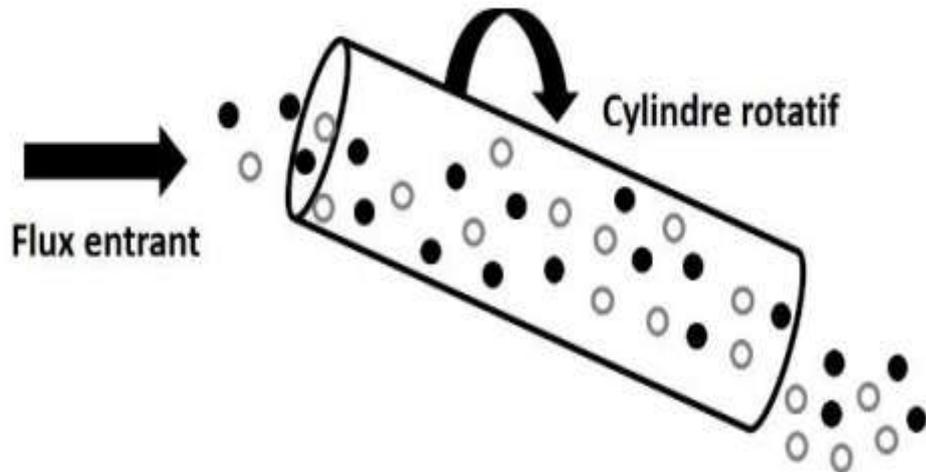
manivelle. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif. En changeant la vitesse du moteur, il est possible de modifier le mouvement oscillant du dispositif de charge.



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

Une deuxième solution pour charger les particules est représentée, par le dispositif de charge à cylindre rotatif. Ce dispositif consiste en un cylindre tournant où les particules entrent d'un côté du cylindre et sortent de l'autre côté totalement chargées, la rotation du cylindre à une vitesse bien définie provoque des collisions à l'intérieur du cylindre entre les particules et entre les particules et les parois, comme l'explique si bien (Figure I.5) qui résume le fonctionnement du chargement triboélectrique par cylindre rotatif.

Un flux de matériau granulaire isolant est introduit dans le cylindre en rotation où à l'intérieur duquel les particules culbutent ce qui engendre leur chargement par contacts répétés : c'est le phénomène de tribo-électrisation [36,37].



(Figure I.5) : Représentation schématique du chargement triboélectrique par cylindre tournant.

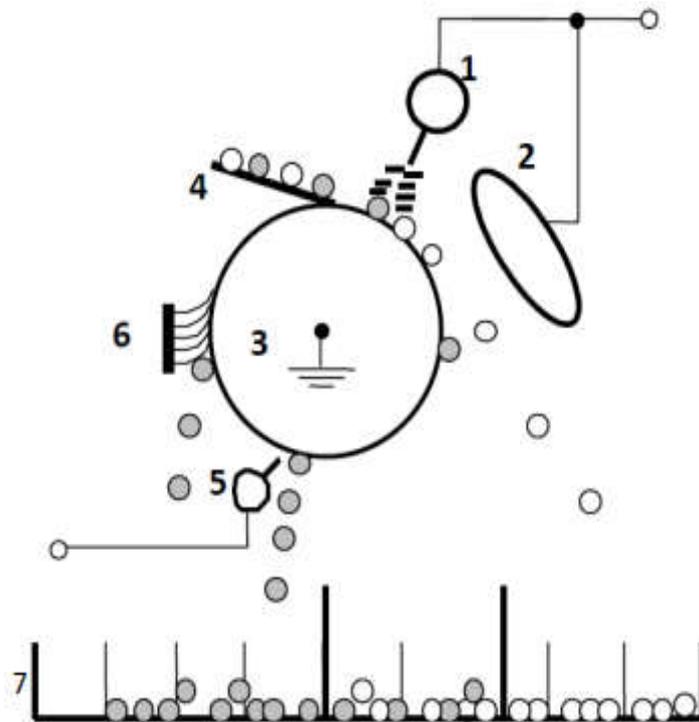
Un autre type de séparateur, beaucoup plus largement utilisé dans l'industrie, est le séparateur à tambour.

La (Figure I.6) montre les différents éléments composant le séparateur et le rôle de chacun d'eux. Les charges électriques sont créées par l'ionisation de l'air due à la décharge corona générée par une électrode à pointes (1) appelée «électrode corona», connectée à une source de courant continu haute tension. Les particules métalliques / plastiques sont déposées sur le cylindre tournant (3) par le vibro-transporteur (4) et acquièrent tous une charge électrique de même polarité que le potentiel de la haute tension continue. Les particules se comportent différemment selon qu'elles sont électriquement conductrices ou isolantes.

- Les granules isolants restent "collés" et adhèrent à la surface du tambour grâce à la force d'image électrique. Ils tombent dans la partie du collecteur (7) qui leur est réservée lorsque la force de pesanteur l'emporte sur la force d'image. Pour assurer la chute de ces particules, certains électro-séparateurs sont équipés d'une autre électrode à pointes, appelée électrode de neutralisation (5), pour éliminer la charge  $q$  par neutralisation. Les particules qui ne tombent pas et qui restent "collées" sont éliminées de la surface du tambour par une brosse (6).
- Les granules conducteurs, il se charge sous l'influence du flux ionique engendré par l'électrode couronne (1). Cependant, ces charges se dissipent rapidement au contact de l'électrode cylindrique tournante (3) reliée à la terre. Le champ électrique produit par l'électrode statique (2) charge les particules

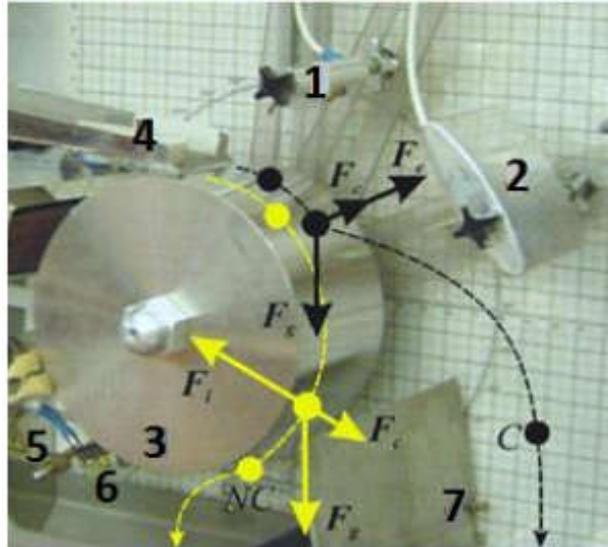
métalliques par induction électrostatique avec une charge de signe opposé au potentiel de la haute tension, et sont ensuite attirés par l'électrode elliptique et collectés dans la partie droite du collecteur.

Deux mécanismes de charge sont alors simultanément employés : la décharge couronne et l'induction électrostatique. Le premier affecte seulement les particules isolantes alors que l'induction électrostatique intervient uniquement dans le cas des particules conductrices [38],[39]



**(Figure I.6) :** Schéma descriptif de l'électro-séparateur et ses éléments constitutants : **(1)** Electrode couronne reliée à une source de HT ; **(2)** Electrode statique reliée à la même source de HT ; **(3)** Electrode cylindrique reliée à la terre ; **(4)** Vibro-transporteur ; **(5)** Electrode de neutralisation reliée à une source HT alternative ; **(6)** Brosse ; **(7)** Collecteur de particules [39].

L'action combinée de la décharge couronne et de l'induction électrostatique garantit une meilleure séparation des mélanges isolants – conducteurs.



(Figure I.7) : Séparateur électrostatique à tambour ; (1) Electrode couronne ; (2) Electrode statique ; (3) Electrode cylindrique tournante ; (4) Goulotte oscillante ; (5) Electrode couronne de neutralisation ; (6) Balais ; (7) Collecteur [40]

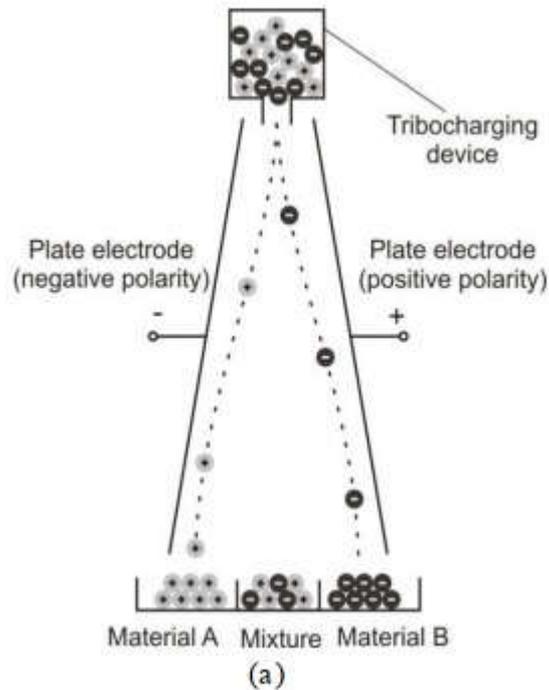
### I. 3 Procédés et installations de séparation tribo-électrostatiques :

Dans la plupart des applications industrielles, le mélange granulaire de plastiques, obtenu après l'élimination des contaminants métalliques, est déposé dans un dispositif de charge triboélectrique. Les particules ainsi chargées vont ensuite être traitées par un ou plusieurs séparateurs électrostatiques. En dépit du fait que la séparation tribo-électrostatique a longtemps été utilisée, son application industrielle à grande échelle est limitée par sa mauvaise efficacité. En effet, le chargement des particules est souvent hétérogène et sensible aux conditions ambiantes.

Toutefois, de multiples installations destinées à la séparation tribo-électrostatique des matériaux granulaires plastiques ont été conçues et construites. Le point commun entre ces dispositifs est de réaliser deux opérations successives, le chargement triboélectrique des particules et leur séparation [40].

#### I. 3.1 Séparateurs « classiques » à chute libre :

Dans ce type de séparateur le mélange granulaire à séparer chute librement dans un champ électrique généré par deux électrodes liées à la haute tension (Figure I.8), [41,42,43,44]. Les forces électrostatiques qui agissent sur les granules chargés les conduisent vers l'électrode de polarité opposée où ils sont collectés dans des bacs.



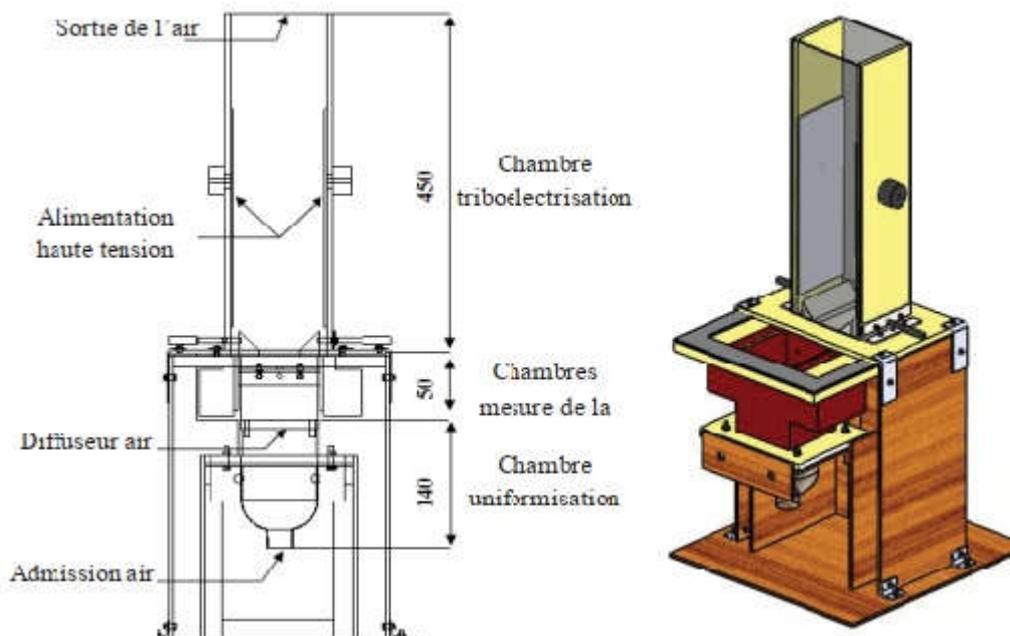
(Figure I.8) : Principe du séparateur tribo-électrostatique à chute libre

Le développement du séparateur TESS satisfait plusieurs besoins techniques:

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

### I. 3.2 Dispositif de triboélectricité à faible débit et électrodes verticales :

Le dispositif représenté sur **(Figure I.9)** est destiné aux études préliminaires de faisabilité, sur des petites quantités de matériaux. Il est composé de deux parties détachables la chambre de fluidisation et la partie d'alimentation et de mesure. La chambre de fluidisation de section rectangulaire est prévue avec deux parois transparentes pour permettre l'observation du mouvement des granules. Les autres deux parois ont à l'intérieur des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces. Les électrodes sont connectées à deux sources haute tension continue de polarités différentes, afin de créer un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules et faire la séparation entre les composants du mélange. A l'extrémité supérieure, la chambre est prévue d'un filtre qui empêche les granules de sortir à l'extérieur. La chambre est fixée sur un support plastique qui lui-même est fixé sur un support en bois, afin d'assurer la verticalité du dispositif entier. L'autre partie détachable est composée d'une enceinte d'alimentation, où le matériau est posé et de deux cages de Faraday. Cette enceinte est séparée de la chambre d'alimentation d'air par un diffuseur, qui a le rôle d'assurer une distribution uniforme d'air. Les cages de Faraday sont prévues avec un orifice à l'extrémité supérieure pour permettre l'entrée des granules et mesurer leur charge électrique à l'aide d'un électromètre Keithley 6415 [45].



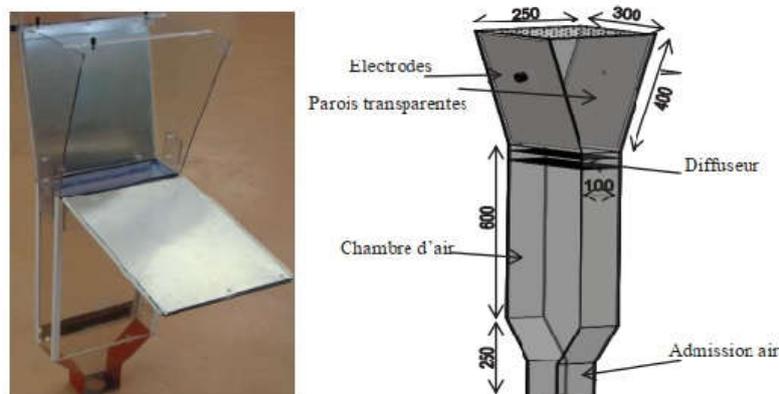
**(Figure I.9)** : Dispositif de tribo-électrisation à faible débit et électrodes verticales.

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 [46].

### I. 3.3 Dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées :

Ce deuxième dispositif expérimental a des dimensions plus proches de celles envisagées pour l'installation industrielle, afin de pouvoir mieux étudier aussi les aspects aérodynamiques. Il a été construit en PMMA transparent pour faciliter l'observation des processus de fluidisation et de séparation électrostatique [47].

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



(Figure I.10) : Dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées.

### 1.3.4 Procédé et installation de séparation tribo-aéro-électrostatique :

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

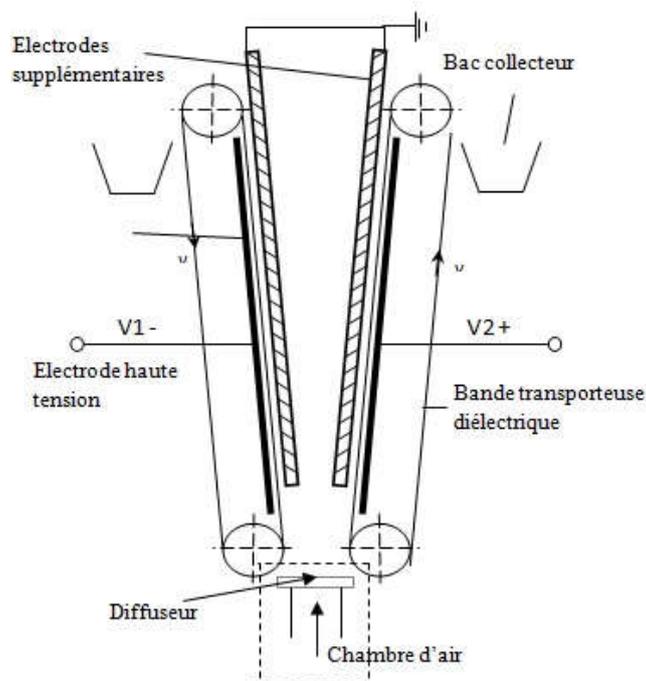
Deux problèmes particuliers concernant la conception de cette installation seront abordés en concertation avec les partenaires du LCEI (Laboratoire des Champs Electriques Intenses) de l'Université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie : la construction optimale des électrodes haute tension et la mise au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

Les procédés de séparation électrostatique [48,49,50] sont déjà utilisés pour le tri des matériaux isolants granulaires mélangés, provenant du broyage des déchets industriels [51]. Le plus souvent, les matériaux broyés sont chargés par effet triboélectrique [52] dans des dispositifs à vibrations, rotatifs ou à lit fluidisé. La charge acquise par les particules dans les dispositifs utilisés actuellement n'est pas homogène: certaines particules arrivent à se charger convenablement et pourront donc être séparées dans un champ électrique assez intense, d'autres sortent des dispositifs de charge triboélectriques avec un niveau de charge insuffisant. L'état de charge des particules pourrait être amélioré en augmentant la durée du processus de charge, au détriment de la productivité du procédé [53]. 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.

L'efficacité du processus de charge pourrait être améliorée en introduisant des opérations de conditionnement thermique des matériaux et en contrôlant l'atmosphère ambiante, mais ces opérations augmenteraient le coût du procédé. Dans tous les cas, les granules chargés sont ensuite séparés dans le champ électrique d'une installation de tri électrostatique dite « à chute libre », comportant deux électrodes parallèles en position verticale. La productivité des installations utilisées pour la séparation des matériaux isolants granulaires est assez faible et la qualité des produits obtenus ne répond pas toujours aux exigences des clients. Les procédés actuels sont très peu robustes aux variations aléatoires des conditions ambiantes et des propriétés physico-chimiques des matériaux à séparer[54,55]. Le procédé original mis au point au laboratoire, en collaboration avec l'Université Technique de Cluj, permet de remédier ces inconvénients, en utilisant en même temps l'effet triboélectrique, la force de Coulomb et la force image électrique. Ainsi, l'effet triboélectrique assure l'homogénéité de la charge électrique acquise par les matériaux isolants granulaires [54] dans le lit fluidisé en ébullition générée par un gradient négatif de pression en direction verticale, dans une chambre de séparation ayant la forme d'un tronc de pyramide renversé.

Les granules ayant des charges électriques de polarités opposées se déplacent sous

l'action de la force de Coulomb dans le champ électrique horizontal créé entre deux électrodes de type tapis roulant métallique, parallèles aux parois de la chambre de séparation, et sont soumis ensuite à la force d'image électrique qui les attache à la surface des électrodes ; ceux-ci assurent aussi l'évacuation des granules chargés de la zone de charge et de séparation, vers le collecteur de produits. Le débit des matériaux granulaires introduits dans la chambre de séparation est réglé à une valeur égale à la somme des quantités de granules collectés par unité de temps. Les granules non-chargés ne peuvent pas quitter la zone de charge, ce qui garantit la pureté absolue des produits collectés. D'autre part, chaque granule ne reste dans la zone de charge que le temps minimum nécessaire pour accueillir une charge suffisante pour qu'il soit attiré par l'une des électrodes, ce qui assure aussi l'optimisation du débit des matériaux traités. Si les conditions environnantes et l'état de surface des matériaux granulaires sont favorables au processus de charge triboélectrique, les granules sont rapidement dirigés vers les électrodes et récupérés dans le collecteur de produits, ce qui permet le fonctionnement à des débits de matière élevés. Dans le cas contraire, le débit des matériaux granulaires introduits dans l'installation sera réduit, afin de s'adapter au temps plus long que les granules doivent passer dans la zone de charge. **(Figure I.11)** Représente en coupe, l'installation de séparation électrostatique.



**(Figure I.11)** : Dispositif de séparation tribo-aéro-électrostatique.

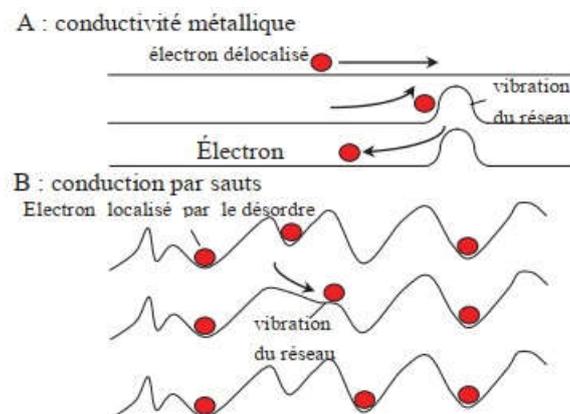
## I.4. Modélisation des procédés de séparation tribo-électrostatique :

Le phénomène triboélectrique est extrêmement complexe et difficile à expliquer. Les méthodes expérimentales et les modèles numériques sont essentiels pour étudier les applications possibles dans le domaine de la séparation des matériaux granulaires [46].

### I.4.1. Modélisation physique :

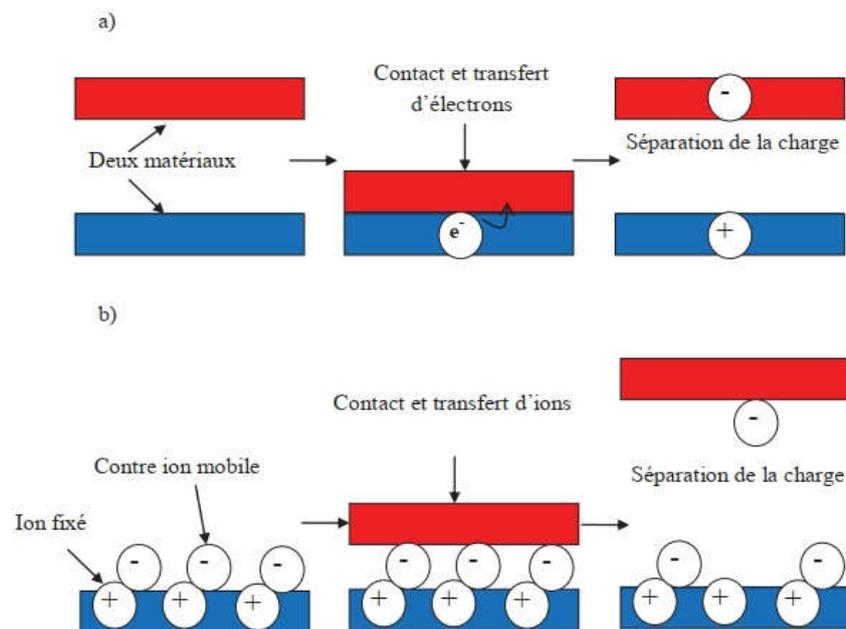
L'effet triboélectrique est associé à l'apparition de charges électriques lorsque deux surfaces initialement neutres entrent en contact.

A l'échelle atomique, le mouvement des électrons obéit aux lois de la mécanique quantique. Il est caractérisé par le module au carré de la fonction d'onde de l'électron, représentant la probabilité de présence d'un électron en chaque point du milieu. Le concept de localisation ou délocalisation a des conséquences sur la conductivité du matériau. Elles sont montrées dans **(Figure I.12)**. Les vibrations thermiques des atomes d'un cristal parfait entravent le déplacement des électrons et diminuent la conductivité ou augmentent la résistivité. Lorsque les électrons occupent des états localisés dans un matériau désordonné, les vibrations thermiques peuvent fournir une énergie suffisante à l'électron, pour quitter son site par l'effet tunnel. Ici la conduction augmente avec la température ( $T$ ), contrairement à celle des solides ordonnés, c'est ce que l'on appelle la conduction par sauts. Comme Touchard [56] le précise, ce processus de conduction par saut résulte d'un transfert d'électrons entre les états localisés, dans la bande interdite ( $E_g$ ) au voisinage du niveau Fermi ( $E_f$ ). En particulier, lorsque la densité d'états près du niveau Fermi est élevée, la mobilité des porteurs augmente de façon importante. Ce mécanisme s'observe parfaitement dans les solides isolants.



**(Figure I.12) :** Effets de la localisation et de la délocalisation des électrons.

L'effet triboélectrique est associé à l'apparition de charges électriques lorsque deux surfaces initialement neutres entrent en contact. Un transfert de charge s'opère et aboutit à des matériaux chargés positivement et négativement les uns par rapport aux autres (**Figure I.13**). [57][58]. Si le matériau n'est pas conducteur (cas des isolants), ces charges générées persisteront dans le temps et autoriseront une séparation en soumettant les granules chargés à un champ électrique à fort potentiel qui attirera les particules de charges opposées et repoussera celles de même signe que le champ.



(**Figure I.13**) : Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ; b) Transfert d'ions

#### I.4. 2 Modélisation expérimentale :

La plupart des chercheurs ont supposé que la tribo électrisation des isolants implique également le transfert d'électrons, [59,60], mais les observations expérimentales semblent contredire ce point de vue. La tribo électrisation des isolants n'est pas en corrélation avec les propriétés électroniques des matériaux, tels que la constante diélectrique, ou des propriétés atomiques, tels que l'énergie d'ionisation, affinité électronique, ou électronégativité.[61,62].

Plusieurs chercheurs ont remarqué que le processus de tribo-électrisation est en corrélation avec l'acidité ou la basicité des matériaux isolants. En 1902, Knoblauch a fait

observer que les solides organiques acides tendent se charger négativement, et les solides organiques bases tendent à se charger positivement ; Il a proposé un mécanisme de transfert d'ion pour l'effet tribo. Medley a fait des observations similaires en 1953 [63], et Diaz a proposé qu'un mécanisme de transfert d'ion puisse expliquer la tribo électrisation d'un large éventail de matériaux isolants [64,65]. Ces observations, que les propriétés acides ou basiques des matériaux sont en corrélation avec leurs propriétés tribo électriques, sont difficiles à concilier par un mécanisme qui implique le transfert d'électrons.

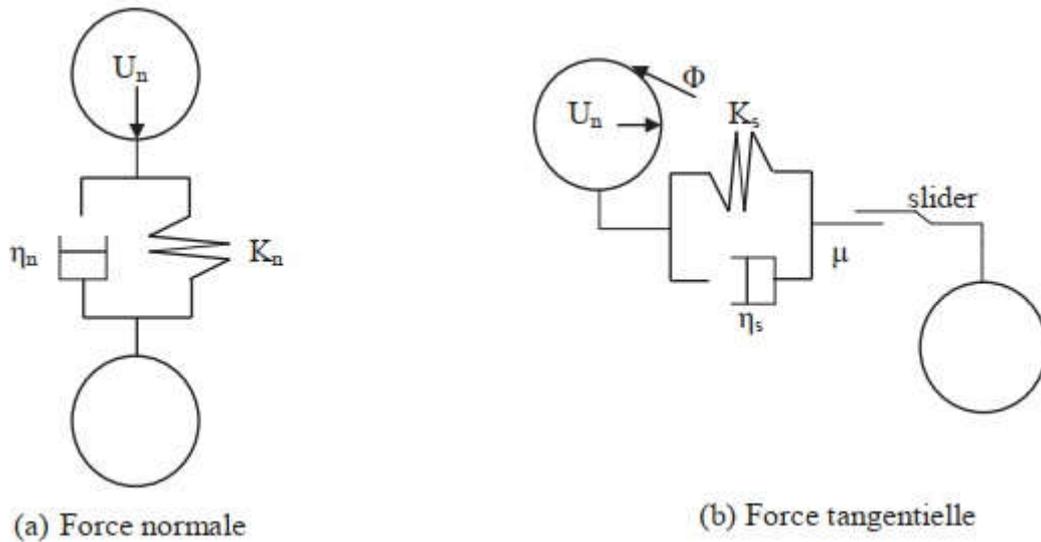
Dans sa monographie sur la tribo-électrisation, Harper analyse les éléments de preuve pour le mécanisme de transfert d'électrons. Ses arguments contre le mécanisme de transfert d'électrons sont convaincants, bien que sa rationalisation mécaniste de mécanisme de transfert d'ions soit moins.

En particulier, il n'a jamais expliqué de façon convaincante l'origine des ions mobiles (ce qui serait nécessaire pour un mécanisme impliquant le transfert d'ions) à la surface des polymères non ioniques. Le livre de Harper (1967, réédité en 1998) n'a pas convaincu d'autres chercheurs que la tribo-électrisation des isolants implique le transfert d'ions et non pas d'électrons: l'article par Lowell et Rose-Innes atteint la conclusion inverse [66], en dépit de citation complète du travail de Harper. Quarante ans après la publication de la monographie de Harper, la question de l'ion contre le transfert d'électrons pour matériaux isolants non ioniques reste sans réponse.

### **I.4 .3.Modélisation numérique :**

Depuis 1979 avec Cundall et Strack [67], de nombreux chercheurs se sont penchés sur les méthodes numériques pour calculer les mouvements de particules solides formant un ensemble. Ces simulations sont notamment utiles pour prédire le mouvement d'un ensemble de roches par exemple, mais elles permettent également de calculer des vidanges de trémies ou de tamis. Associées à des calculs de la mécanique des fluides, les méthodes de simulation « DEM » (discrete element method) permettent de simuler des transports pneumatiques de poudres ou de granulés, dans l'industrie agroalimentaire, dans l'industrie chimique ou pharmaceutique. La base de cette méthode consiste à calculer les forces générées par tous les chocs (chocs entre particules et avec les parois). Une fois les forces calculées, on en déduit les vitesses et donc les positions des particules au pas de temps suivant. La méthode est étudiée au sein du Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques, à Poitiers, par Traore et al. [68] Les modèles de contacts entre particules peuvent prendre en compte (soft model) ou non (hard

model) la déformation des corps en contact, ainsi que la forme des particules (cylindres, sphères, polygones), et la cohésion entre elles. L'interaction entre deux particules est la résultante d'une force normale et d'une force tangentielle, décrite par le modèle Kelvin-Voigt (**Figure I.14**)



**(Figure I.14) :** Représentation d'un contact viscoélastique par des éléments de type Kelvin-Voigt.  $k^n$  et  $k^t$  sont respectivement les coefficients de raideur normale et tangentielle.  $\gamma^n$  et  $\gamma^t$  sont les coefficients d'amortissement normaux et tangentiels,  $\mu$  est le coefficient de frottement.

Ce modèle peut être complété par la prise en compte de l'effet triboélectrique. L'échange de charge au contact entre particules de polymère a été étudié par Castle et al [69]. En s'appuyant sur cette étude, Laurentie a réalisé des simulations numériques basées sur l'hypothèse que l'échange de charge  $q$  par unité de surface lors d'une collision entre deux particules sphériques isolantes dépend des propriétés physiques des matériaux en contact et peut être exprimée comme suit [70]

$$q = \frac{\epsilon_0 \dot{\delta}}{\delta_e} (\Phi_i - \Phi_j - E \delta_e) \tag{1.1}$$

Où:  $\epsilon_0$ , la permittivité de l'espace libre;  $\delta$ , la distance de coupure du transfert de charge [71] (typiquement 500 nm);  $e$ , la charge de l'électron;  $\Phi$ , la fonction de la surface de travail, le représentant de l'énergie nécessaire pour extraire un électron de la surface d'une particule;  $E$ , le champ électrique au point d'impact [72] des deux particules.

**Conclusions :**

Les phénomènes tribo-électriques étant extrêmement complexes et mal expliqués, l'approche expérimentale est indispensable à l'étude des applications possibles dans le domaine de la séparation des matériaux granulaires en utilisant les forces des champs électriques.

Il existe une multitude de dispositifs de charge triboélectrique (rotatifs, à vibrations, à lit fluidisé) dont l'efficacité a déjà été prouvé pour des applications particulières.

Les études réalisées par d'autres chercheurs sur des modèles de laboratoires montrent que les lits fluidisés pourraient représenter une solution viable pour la charge tribo-électrique des matériaux plastiques granulaires.

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.

### **II. Séparation électrostatique des mélanges de granules plastiques**

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'embaras 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 technologies électrostatiques se sont imposées comme la solution de choix pour le recyclage des matériaux plastiques contenus dans ces déchets [73]. A travers ce chapitre, différents domaines ont été abordés, tels que le recyclage des déchets plastiques, les mélanges de polymères, la description du séparateurs électrostatiques (isolant/isolant) [74].

#### **II.1. 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 avale 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 [75].

##### **II. 1.1. Charge d'un mélange binaire de matériaux plastiques granulaires dans un séparateur tribo-aéro-électrostatique :**

L'étude porte sur le comportement des mélanges binaires de plusieurs matériaux plastiques granulaires dans le lit fluidisé parallélépipédique. Dans ce cas, la hauteur du lit est à peu près deux fois la longueur ou la largeur de la chambre de fluidisation, de sorte que les collisions entre les granules deviennent le mécanisme principal de charge. Une caractéristique

particulière de ce lit fluidisé étant que deux des parois opposées de la chambre de fluidisation sont couvertes de plaques métalliques reliées à deux sources à haute tension de polarités opposées, les particules chargées par effet triboélectrique seront attirées par ces électrodes et séparées, étant encore en état fluidisée. Le but de cette étude est d'évaluer les facteurs qui influencent l'efficacité du processus de charge triboélectrique [43,51] en vue de l'application éventuelle d'un tel dispositif à la séparation électrostatique des mélangés granulaires [56].

### **II.1.2. Dispositif de séparation à faible débit :**

Ce dispositif est destiné aux études de laboratoire [76,77], 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 II.1**) 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 attirées par des forces électriques à une électrode de polarité opposée et ils ne participeront plus au processus de charge triboélectrique [78].

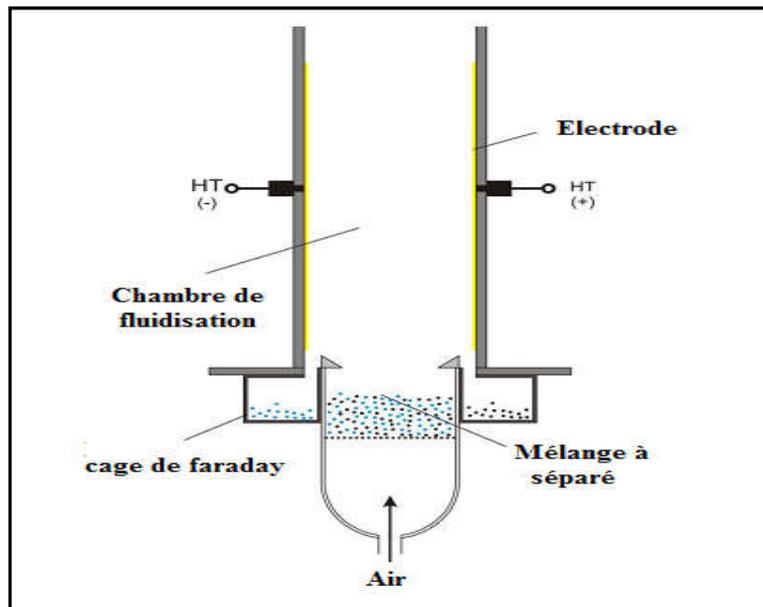


Figure II.1 : Dispositif de séparation à faible débit et électrodes verticales [77]

## II.2. Le recyclage des déchets plastiques :

### II.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 [79].

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.

### II.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 [80].

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 [81]. Le nom des polymères est généralement dérivé de celui du monomère en ajoutant le préfixe poly Exemple : polyéthylène, poly (acide glycolique)...etc [82]. 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.

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

Où  $m_0$  est la masse molaire de l'unité de la répétition [83].

### II.2.3. Différents types de polymères :

Il existe deux types de polymères :

#### II.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)[84].

#### II.2.3.2. Les macromolécules :

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.

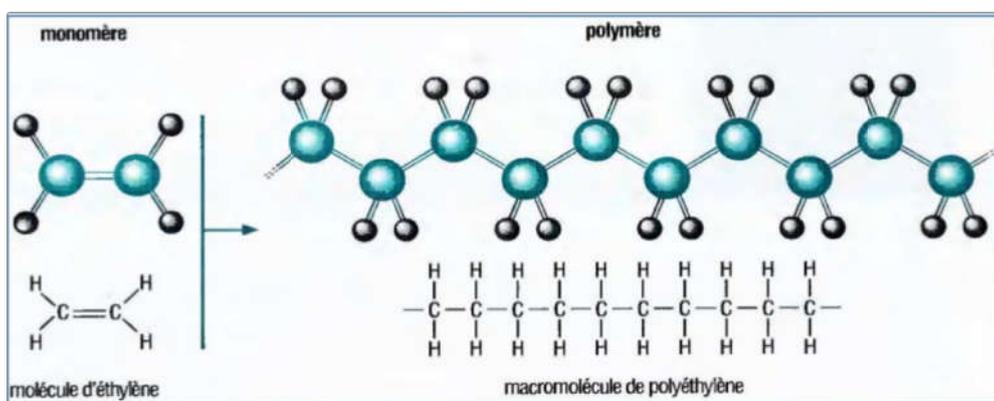


Figure II.2 : Représentation d'un polymère (Polyéthylène) [85]

### **II.2.4. Catégories de matières plastiques :**

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

#### **II.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 [86].

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.) [87]. 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 [88].

## **Chapitre II Séparation électrostatique des mélanges de granules plastiques**

---

- 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 [87].

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. [89].

### **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 [90].

## **Chapitre II Séparation électrostatique des mélanges de granules plastiques**

---

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 yoghourts en «PS choc»), matériel de calage pour

objets fragiles (électronique) à l'intérieur des boîtes en carton, isolants pour glacières, 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 [91].

Le PET se distingue par les propriétés suivantes : transparence, brillance, bonne résistance aux chocs, à la pression et aux produits chimiques, étanchéité aux gaz [92]. 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 [93]: 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. [94].

### **II.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 [86].

### **II.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 [86].

### **II.2.4.4. Les bio-polymères :**

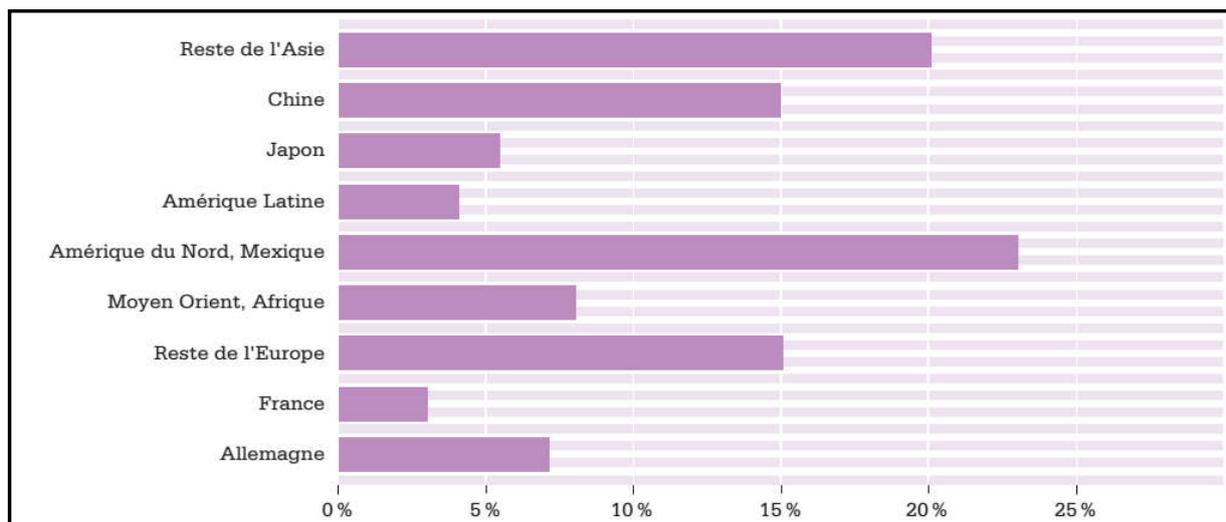
Les bio-polymères (ou bioplastiques) sont des produits à base de ressources végétales au lieu de pétrole : cellulose de plantes, protéines, lignine ou amidon. Ils ne sont pas encore d'un usage très fréquent. On s'en sert avant tout pour les emballages, mais leurs possibilités d'applications sont bien 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

## Chapitre II Séparation électrostatique des mélanges de granules plastiques

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 [94].

### II.2.5. Production mondiale de matières plastiques en 2007 :



*Figure II.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 [94].

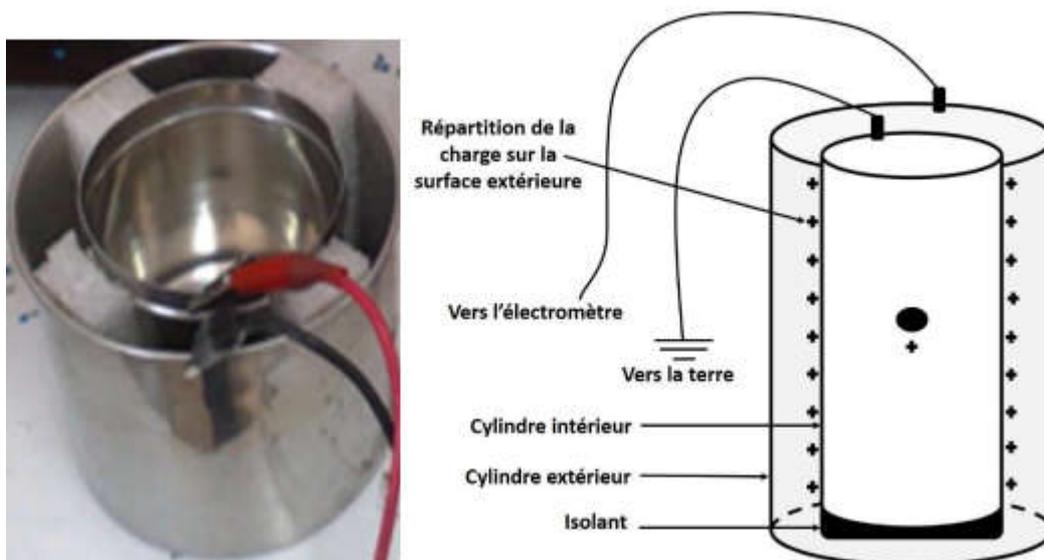
### 2.3. Techniques de mesure :

#### 2.3.1. Mesure de charge :

Il est primordial de disposer de méthodes permettant de qualifier et/ou quantifier la polarité et le niveau des charges électrostatiques présentes au sein des particules. Cet objectif peut être atteint par différents dispositifs parmi eux la cage de Faraday [95].

Une cage de Faraday [96,97,98] ou un bouclier de Faraday est une enceinte formée par un matériau conducteur, ou par une maille de ce matériau. Une telle enceinte est utilisée pour bloquer les champs électriques statiques externes. Les cages de Faraday sont nommées d'après le scientifique anglais Michael Faraday, qui les a inventées en 1836. L'opération de la cage de Faraday dépend du fait qu'un champ électrique statique externe amènera les charges électriques dans le matériel conducteur de la cage à se redistribuer afin d'annuler l'effet champ à l'intérieur de la cage. Ce phénomène est utilisé, par exemple, pour protéger les équipements électroniques contre les coups de foudre et les autres décharges électrostatiques.

Lorsque la cage de Faraday est utilisée pour la mesure, elle est constituée de deux cylindres concentriques conducteurs séparés par un isolant, le cylindre extérieur est relié à la terre qui fait office de blindage pour réduire les perturbations électriques extérieures et le second est connecté à un électromètre pour mesurer la charge électrique de l'objet introduit dans la cage. [96]



(Figure II.3) : Aspect de la cage de Faraday utilisée pour mesurer la charge électrique : Photo du dispositif (a) et représentation schématique (b).

## Chapitre II Séparation électrostatique des mélanges de granules plastiques

---

La mesure de la charge électrique acquise a été effectuée à l'aide d'un électromètre numérique Keithley model 6514 [99] (**Figure II.4**) qui possède les caractéristiques suivantes :

- Mesure de charge de 10fC à 20 $\mu$ C.
- Mesure Rapide - jusqu'à 1200 mesures/seconde.
- Interfaces facilement avec les commutateurs, les ordinateurs et les gestionnaires de composants.
- Annule les décalages de tension et courant facilement.
- Impédance d'entrée 200T $\Omega$  pour les mesures de tension.



(**Figure II.4**) : Electromètre Keithley model 6514.

### 2.3.2. Mesure de l'humidité relative :

La mesure de l'humidité relative est un élément essentiel et un des paramètres principaux avant chaque série d'expériences pour une étude expérimentale en utilisant un thermo hygromètre numérique [100] (Amprobe TH-3) (**Figure II.5**), qui présente les caractéristiques principales suivantes :

- Double fonction : mesure d'humidité et de température.
- Sonde allongée qui permet d'effectuer des mesures à des endroits difficiles d'accès.
- Mesure de la température en degré Celsius et en fahrenheit.
- Mémoire de mesures intégrées (Data Hold).
- Mémorisation des valeurs minimales et maximales.
- Coupure automatique de l'alimentation.



(Figure II.5) : Thermo hygromètre numérique Amprobe (TH-3).

### 2.3.3 Mesure de la masse granulaire :

La masse granulaire est mesurée avant chaque expérience à l'aide d'une balance électronique de précision de marque CAS MWP-600H [101] qui présente les caractéristiques suivantes :

- Haute précision.
- 8 unités de mesure.
- Fonction comptage, pesage et pourcentage.
- Affichage rétro éclairé.
- Interface RS-232.
- Alarme de surcharge.
- Mise hors tension automatique.
- Calibration automatique.
- Capacité x précision : 600 x 0.01 g.



Figure II.6 : Balance numérique CAS MWP-600H.

### 2.4. Etude du régime intermittent :

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

#### ✓ Efficacité de la collecte

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

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

$m_t$  : Quantité totale de matière introduite dans le séparateur.

#### ✓ Pureté du produit collecté

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

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 :

$$n (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \cdot 100 \quad (\text{II.4})$$

## Chapitre II Séparation électrostatique des mélanges de granules plastiques

Où  $m_{ic}$  : quantité de matière  $i$  recueillie dans le compartiment au produit  $i$   
 $m_{it}$  : Quantité totale de matière  $i$  introduite dans le séparateur.

L'état de charge des particules pourrait être amélioré en augmentant la durée du processus de charge au détriment de la productivité du procédé [102]. 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 [103,104].

### 2.5. Etude du régime continu :

A partir de l'étude du fonctionnement intermittent du dispositif, ont été remarqués certains problèmes qui peuvent être évités et améliorés en optant pour un fonctionnement du dispositif en régime continu. Ils ont constaté que les matières séparées sont importantes dans les 5 à 10 premières secondes après le début du processus ; au-delà, de cette valeur, la séparation diminue. Une autre observation se rapporte à la quantité de matière séparée, le fonctionnement du dispositif en continu assure la séparation de plus grandes quantités de matière.

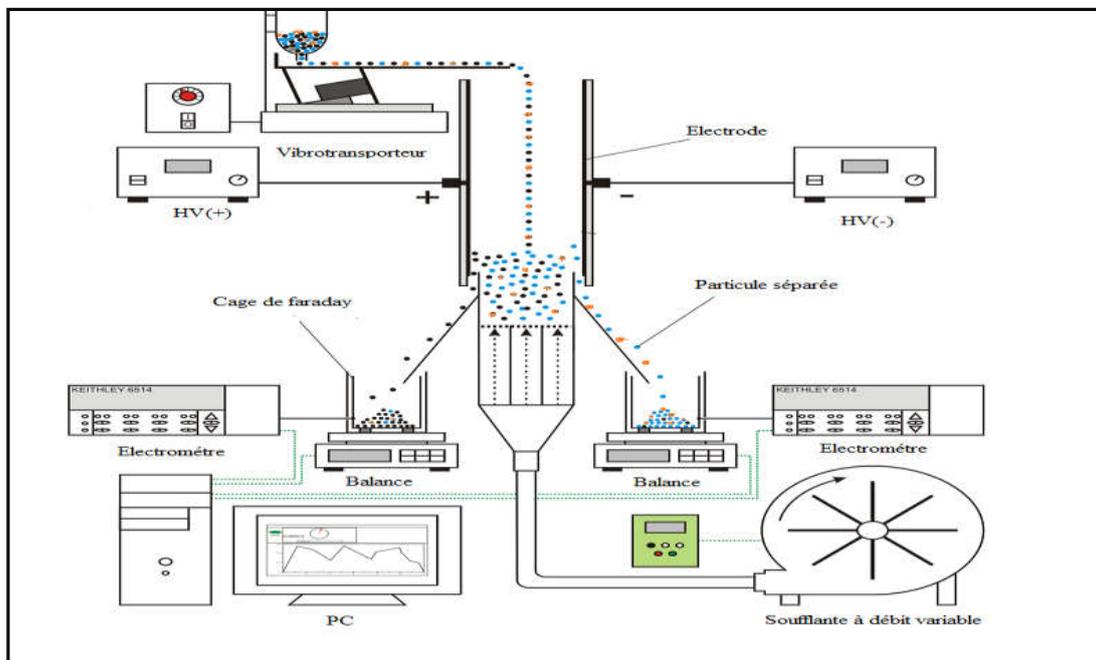


Figure. II.6 Séparateur tribo- aéro-électrostatique à électrodes plaques parallèles

(en régime continu)

### **Conclusion :**

A travers de ce chapitre nous avons donné 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 le dispositif de charge triboélectrique en régime intermittent et continue, dont l'efficacité a déjà été prouvé pour des applications particulières.

### III Elaboration du modèle numérique

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

L'objectif du présent modèle est de prédire le fonctionnement d'un système de séparation triboélectrique des mélanges en utilisant le procédé à lit fluidisé, qui comporte une étude détaillée de calcul du nombre moyen de collisions échangées entre les différentes particules par intervalle de temps. Dans un système à lit fluidisé, les particules sont triboélectriquement chargées grâce principalement aux interactions entre les particules. En partant des hypothèses simplificatrices données au § III.1.1, ce chapitre décrit les équations de bases ainsi que l'algorithme de simulation du modèle numérique.

#### III.1. Modèle mathématique :

Le modèle considère un intervalle de temps constant  $\Delta t$  par cycle, au cours duquel les particules subissent un nombre moyen de collision afin d'être séparées. Les particules suffisamment chargées sont attirées par les plaques tandis que celles qui sont moins chargées auront une autre chance dans la chambre de fluidisation. Dans ce chapitre, nous avons considéré le modèle intermittent étudié au § III.2 et le modèle continu au § III.3.

##### III.1.1. Hypothèses :

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

- ✓ L'utilisation de ce modèle suppose que l'on se place dans le cas de collisions parfaitement élastiques. D'une manière générale, cela signifie que les déformations des solides dues aux impacts seront suffisamment faibles et surtout qu'elles ne sont pas durables au point d'être conservées après la collision. Les particules retrouveront

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

- ✓ Toutes les particules utilisées sont supposées initialement électriquement neutres, ont une taille identique, et les mêmes formes et densités de masse, mais ont des caractéristiques triboélectriques différentes. Le modèle ne prendra pas non plus compte de la rugosité de surface.

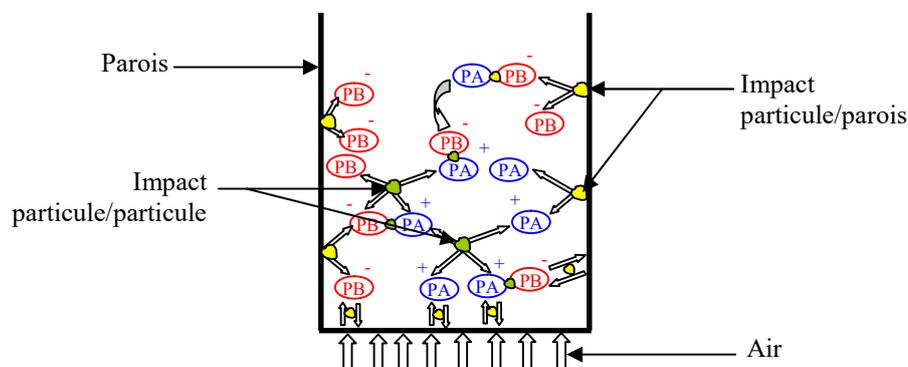
Les masses des deux classes de granules à tout instant  $t$  étant  $M_A(t)$  et  $M_B(t)$ , pour un total:

$$M(t) = M_A(t) + M_B(t) \quad (\text{III.1})$$

Les concentrations respectives peuvent être exprimées comme :

$$c_A(t) = M_A(t)/M(t), \quad c_B(t) = M_B(t)/M(t) = 1 - c_A(t) \quad (\text{III.2})$$

- ✓ Dans le cas des mélanges de deux matériaux différents, quatre types de collisions peuvent se produire. Le premier type est celui qui est utile à la séparation électrostatique, parce qu'il se produit entre une particule de matériau A et une particule de matériau B. Les autres collisions, considérées comme "parasites", se produisent entre les particules de matériau A ou B et la paroi, ainsi qu'entre deux particules de même matériau (voir figure III.1).



**Figure III.1** : Charge triboélectrique en lit fluidisé, mélange de particule A et B

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

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (\text{III.3})$$

### III.1.2. Equations du régime intermittent :

Les particules minoritaires se chargent plus rapidement que les particules majoritaires qui subissent moins de collisions avec les particules de signe opposé. En régime dit « intermittent », une quantité de matériau est introduite dans le lit fluidisé en début du cycle et le processus de séparation finit au moment où la masse restante est inférieure à la masse limite  $M_{lim}$  définie au paragraphe précédent. Le principe de ce régime est montré sur la figure III.2.

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

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

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

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

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

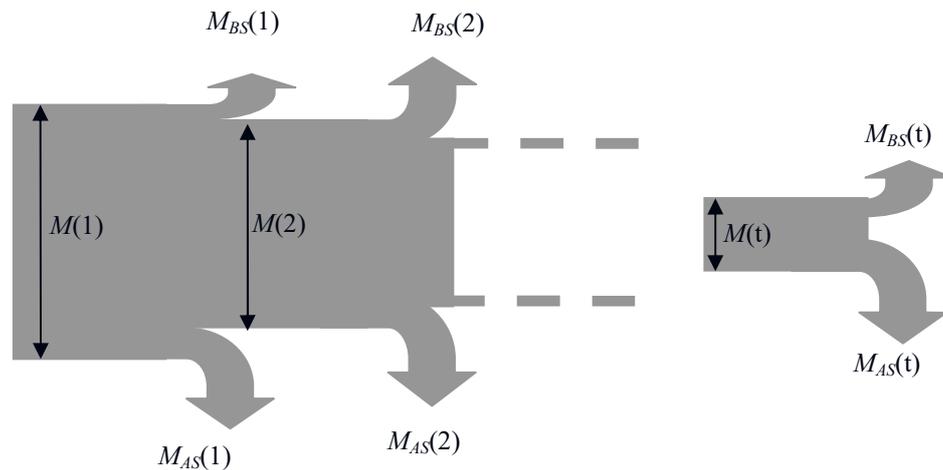


Figure 3.2 : Principe de fonctionnement en régime intermittent

### III.1.1.1. Equations de base :

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

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

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

$$X_{AB}(t) = \int_0^t c_B(t) N(t) dt = \int_0^t [1 - c_A(t)] N(t) dt \quad \text{(III.4a)}$$

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

$$X_{BA}(t) = \int_0^t c_A(t) N(t) dt = \int_0^t [1 - c_B(t)] N(t) dt \quad (\text{III.4b})$$

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

Soit  $P(X_{AB}) = p(x_{AB})$ , avec  $x_{AB} = X_{AB}/N_1$ ,

$P(X_{AB})$  est la probabilité pour qu'une particule de type  $A$  subisse dans l'unité de temps  $X_{AB}(t) \geq X$  collisions, afin de pouvoir être collectée à l'électrode de polarité opposée, dans des conditions de fonctionnement bien définies (nature et taille des deux classes de granulés, géométrie du lit fluidisé, pression d'air fluidisé, haute tension appliquée aux électrodes, etc...). Elle peut être exprimée par la loi de Gauss (voir § III.1.1):

$$P(X_{AB}) = \Pi((X_{AB} - X_{ABav})/\sigma_{x_{AB}}) \quad (\text{III.5})$$

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

$$P(X_{BA}) = \Pi((X_{BA} - X_{BAav})/\sigma_{x_{BA}}) \quad (\text{III.6})$$

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

$$M_{As}(t) = \int_0^t P(X_{AB}(t)) M_A(t) dt = \int_0^t p(x_{AB}(t)) M_A(t) dt \quad (\text{III.7a})$$

$$M_{Bs}(t) = \int_0^t P(X_{BA}(t)) M_B(t) dt = \int_0^t p(x_{BA}(t)) M_B(t) dt \quad (\text{III.7b})$$

$$P(X_{AB}) = \Pi((x_{AB} - x_{ABav})/s_{x_{AB}}) = p(x_{AB}) \quad (\text{III.8})$$

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

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

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

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

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

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

Puis (III.4 a) et (III.5) deviennent:

$$X_{AB}(t) = (1 - c_{A1}) N_1 t; \quad (III.9)$$

$$P(X_{AB}) = p(x_{AB}) = \Pi (((1 - c_{A1}) t - x_{ABav})/s_{xAB}) \quad (III.10)$$

Dans le cas où le temps  $t_{50\%}$  correspondant à la séparation de 50% des granules A, la valeur de  $x_{ABav}$  peut être calculée à partir de l'équation:

$$(1 - c_{A1}) t_{50\%} - x_{ABav} = 0 \quad (III.11)$$

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

$$s_{xAB} = x_{ABav} / 3 \quad (III.12)$$

pour tenir compte de la grande dispersion des conditions de charge de granules, en introduisant dans (III.8) les valeurs de  $x_{ABav}$  et  $s_{xAB}$  donnés respectivement par (III.11) et (III.12), il est possible d'avoir une estimation de  $p(x_{AB}(t))$  qui servira à calculer la masse de granules A séparés au temps  $t$  à l'aide de l'équation (III.7a). Des équations similaires peuvent être obtenues pour le calcul de la valeur instantanée de la masse de granules B séparés.

Pour tenir compte des conditions des grandes dispersions des granules chargés, par le remplacement dans l'équation (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 et B récupérée accidentellement dans le collecteur A du lit fluidisé en raison de la turbulence de l'air peut être calculée comme suit:

$$M_{A\text{safr}(A)}(t) = \int_0^t (c_{\text{air}A} c_A(t)) M(t) dt \quad (\text{III.13a})$$

$$M_{B\text{safr}(A)}(t) = \int_0^t (c_{\text{air}B} c_B(t)) M(t) dt \quad (\text{III.13b})$$

### III.1.1.2. Algorithmes de simulation :

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

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

$$c_A(k) = c_A(k\Delta t), \text{ et } N(k) = N(k\Delta t) \text{ dans l'intervalle } k \Delta t \leq t < (k + 1) \Delta t, k = 1, 2, \dots, i.$$

**Etape 1:** L'estimation du nombre de collisions  $N_{AB}(1)$  de chaque granulé A avec les granules B dans le lit fluidisé peut être effectuée à partir de l'équation (III.4a) comme suit:

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

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

$$M_{As}(1) = p(x_{AB}(1)) M_A(1) = p(x_{AB}(1)) M_{A1} \quad (\text{III.14})$$

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

$$c_A(i) = M_A(i) / (M_A(i) + M_B(i)) \quad (\text{III.15})$$

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

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

$$N(i) = N_1 (M_A(i) + M_B(i)) / M_1 = N_1 M(i) / M_1. \quad (\text{III.16})$$

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

$$X_{AB}(i) = \{[1 - c_A(1)]N(1) + [1 - c_A(2)]N(2) + \dots + [1 - c_A(i)]N(i)\} \Delta t \quad (\text{III.17})$$

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

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

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

$$x_{AB}(i) = \sum [1 - c_A(i)]M(i)/M_1 \quad (\text{III.18})$$

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

$$M_{As}(i) = p(x_{AB}(1)) M_A(1) + p(x_{AB}(2)) M_A(2) + \dots + p(x_{AB}(i)) M_A(i) \quad (\text{III.19})$$

Dans le cas où la probabilité d'une séparation de granules après  $X_{AB}(i)$  collisions est exprimée par la loi de distribution normale (III.7) des paramètres connus  $x_{ABav}$  and  $s_{xAB}$ , le terme général dans (III.19) est :

$$p(x_{AB}(i)) M_A(i) = \Pi((x_{AB}(i) - x_{ABav})/s_{xAB}) M_A(i) \quad (\text{III.20})$$

### III.1.3. Equations du régime continu :

Dans le § III.1.2, nous avons commencé par l'étude du régime « intermittent », dont l'intérêt est limité à la modélisation des séparateurs de laboratoire. Dans le régime continu, spécifique au fonctionnement des installations industrielles, comporte une alimentation non-interrompue du lit fluidisé à débit constant ou variable. L'objectif de la modélisation numérique et de prédire l'évolution de la masse dans le lit fluidisé et de la composition de

celle-ci.

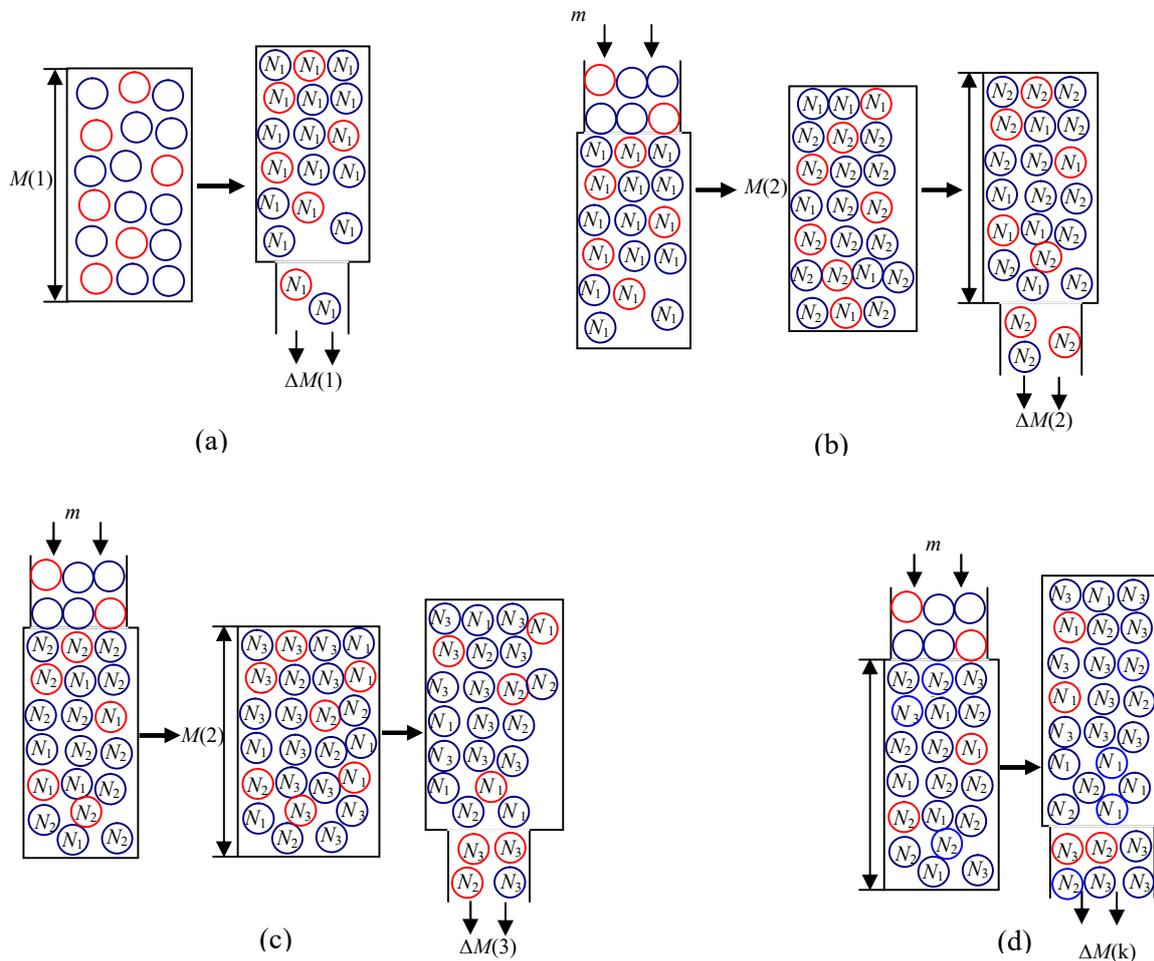


Figure III-3 : Principe de fonctionnement en régime continu, (a) premier pas, (b) deuxième pas, (c) troisième pas, (d) dernier pas. Avec  $1, 2, 3, \dots, k =$  nombre de pas.  $N_1, N_2, N_3 =$  nombre de ...

En tenant compte des hypothèses discutées dans le § III.1.1 et que les particules se chargent par impact avec les particules de nature différente, un mélange de masse  $m$  a été introduit par unité de temps par un vibro-transporteur à débit réglable. Le principe de ce régime est illustré par la figure III-3, et expliqué dans le § III.1.3.1

### III.1.3.1. Equations de base :

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

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

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

Les concentrations respectives peuvent être exprimées comme :

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

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

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

✓ **Premier pas** :  $t = t_1 = \Delta t$

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

$$\Delta M_{As}(t_1) = p(x_{AB}(t_1)) M_A(0) \quad (\text{III.21a})$$

$$\Delta M_{Bs}(t_1) = p(x_{BA}(t_1)) M_B(0) \quad (\text{III.21b})$$

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

$$m = m_A + m_B \quad (\text{III.22})$$

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

$$M_A(t_2) = [M_A(t_1) - \Delta M_{As}(t_1)] + m_A$$

$$M_B(t_2) = [M_B(t_1) - \Delta M_{Bs}(t_1)] + m_B$$

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

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

✓ **Deuxième pas** :  $t = t_2 = 2 * \Delta t$

Le terme  $[M_A(t_1) - \Delta M_{As}(t_1)]$  représente les particules qui ont déjà subi un nombre  $N_1$  de collisions ; elles ont beaucoup plus de chances pour être séparées, exprimées par la probabilité  $\Pi(((1 - c_A(t_2)) * 2\Delta t - x_{ABav})/s_{xAB})$ , tandis que les particules de la masse  $m_A$  qui vient d'être ajoutée subiront leurs premières collisions et leur probabilité de séparation est plus faible :  $\Pi(1 - c_A(t_2))\Delta t - x_{ABav}/s_{xAB}$ . La masse séparée pendant ce pas de temps est alors exprimée par :

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

**Le bilan de deuxième pas** :

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

### III.1.3.2. Algorithmes de simulation :

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

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

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

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

**Etape 1**: L'estimation du nombre de collisions  $N_{AB}(1)$  de chaque granulé  $A$  avec les granulés  $B$  dans le lit fluidisé peut être calculé à partir de (III.4a) comme suit:

$$X_{AB}(1,1) = [1 - c_A(1)]N(1) \tag{III.23}$$

Avec  $x_{AB}(1,1) = X_{AB}(1,1)/N(1)$ , la masse estimée  $\Delta M_{As}(1)$  des granules  $A$  séparée à  $\Delta t$  est obtenue à partir de (III.7a):

$$\Delta M_{As}(1) = p(x_{AB}(1,1)) M_A(1) = p(x_{AB}(1,1)) m_A(1,1) \tag{III.24}$$

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

$$X_{BA}(1,1) = [1 - c_B(1)]N(1) \quad (\text{III.25})$$

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

$$\Delta M_{Bs}(1) = p(x_{BA}(1,1)) M_B(1) = p(x_{BA}(1,1)) m_B(1,1) \quad (\text{III.26})$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$c_A(j) = M_A(j) / (M_A(j) + M_B(j)) \quad (\text{III.27})$$

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

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

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

$$x_{AB}(1,j) = \{[1 - c_A(1)] + [1 - c_A(2)]M(2)/M(1) + \dots + [1 - c_A(j)]M(j)/M(1)\}\Delta t \quad (\text{III.28})$$

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

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

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

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

$$x_{AB}(i,j) = \sum_{k=i}^j \{ [1 - c_A(k)]M(k)/M(1)\}\Delta t \quad (\text{III.30})$$

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

$$\Delta M_{As}(j) = p(x_{AB}(1,j)) m_A(1,j) + p(x_{AB}(2,j)) m_A(2,j) + \dots + p(x_{AB}(i,j)) m_A(i,j) \quad (\text{III.31})$$

Dans le cas où la probabilité d'une séparation de granules après  $X_{AB}(i,j)$  collisions est exprimée par la loi de distribution normale (III.8) des valeurs connues  $x_{ABav}$  et  $s_{x_{AB}}$ , le terme général dans (III.30) est :

$$p(x_{AB}(i,j)) m_A(i,j) = \Pi((x_{AB}(i,j) - x_{ABav})/s_{x_{AB}}) m_A(i,j) \quad (\text{III.32})$$

### III.2. Code de calcul :

Le modèle mathématique suppose que la probabilité d'un granulé à être séparé peut être exprimée en fonction du nombre de chocs avec des granules appartenant à l'autre classe de matériaux. Le procédé est caractérisé par le fait que le chargement des granules est réalisé dans un appareil à lit fluidisé, en présence d'un champ électrique. L'évolution dans le temps de la masse de granules recueillis sur les électrodes a été calculée pour différentes compositions du mélange granulaire sans prendre en considération l'effet des parois du séparateur à débit faible.

Dans un premier programme, la probabilité  $p(x_{ABe}(i))$  a été estimée par la loi de distribution normale de l'équation (III.7), avec le nombre de collisions moyen  $x_{ABav}$  par l'équation (III.11) pour  $c_{A1} = 0.5$  et  $t_{50\%} = 20$  s:

$$x_{ABav} = (1 - c_{A1}) t_{50\%} = 0.5 \times 20 = 10 \quad (\text{III.33})$$

L'écart type  $s_{x_{AB}}$  donné par (3.12)

$$s_{x_{AB}} = x_{ABav} / 3 = 10/3 = 3.33 \quad (\text{III.34})$$

La figure III.4 montre l'évolution de la masse récupérée et la masse séparée à chaque instant  $\Delta t = 1s$ , pour un mélange de deux matière  $A$  et  $B$  de compositions  $50\%A+50\%B$ . La masse optimale choisie introduite dans le séparateur est  $m = 170$  g de matière totale à séparer.

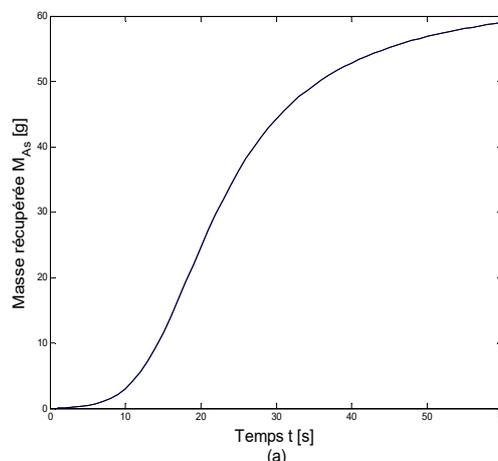


Figure III-4 : Résultats estimés pour un mélange de 50% A + 50%B

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

### III.2.1. Algorithme de base :

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

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

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

$$M(t) = M_A(t) + M_B(t) + M_P \quad (\text{III.35})$$

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

$$c_A(t) = M_A(t)/M(t), \quad c_B(t) = M_B(t)/M(t), \quad c_P = M_P/M(t) \quad (\text{III.36})$$

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

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

$$X_A(t) = \int_0^t [c_B(t) + \lambda_A c_P(t)] N(t) dt \quad (\text{III.37})$$

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

$$X_B(t) = \int_0^t [c_A(t) + \lambda_B c_P(t)] N(t) dt \quad (\text{III.38})$$

Soit  $P(X_A) = p(x_A)$ , avec  $x_A = X_A/N_1$ , la probabilité pour qu'un granulé de A soit collecté à l'électrode après un échange de charges unitaires  $X_A(t)$ , dans des conditions d'exploitation bien définies (nature et taille des deux classes de granulés, géométrie du lit fluidisé, pression d'air fluidisé et la haute tension appliquée aux électrodes, etc.), la probabilité  $P(X_A)$  peut être supposée donnée par la loi de Gauss (III.5).

Les expressions des masses de matières séparées  $M_{As}(t)$  et  $M_{Bs}(t)$  à tout instant  $t$  sont données respectivement par les équations (III.7a) et (III.7b).

**Conclusion :**

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

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

## IV. Résultats et discussions

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 [105]. Elles ne remplaceront pas complètement les essais expérimentaux mais elles peuvent permettre de mieux les cibler afin d'en réduire leur cout [106]. 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 processus de triboélectricité en régime continu (§IV.2)

### IV.1 Simulation du régime de fonctionnement intermittent :

Le procédé est caractérisé par le fait que la charge des particules est produite dans un dispositif à lit fluidisé en forme de parallélépipède, en présence d'un champ électrique. Ce champ horizontal, perpendiculaire à la direction de l'air de fluidisation, est produit par la métallisation des deux parois verticales opposées de la chambre de tribo-chargement et en les reliant à deux alimentations à courant continu de haute tension de polarités opposées. En dépit de la simplicité de son principe de fonctionnement, la demande de l'industrie pour ce type de dispositif est entravée par la difficulté de traiter des mélanges granulaires binaires caractérisés par des proportions des constituants qui peuvent être aléatoires [107]. Les simulations numériques sont censées fournir des moyens pour évaluer les différentes solutions d'optimisation du processus.

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

### IV.1.1 Effet des parois :

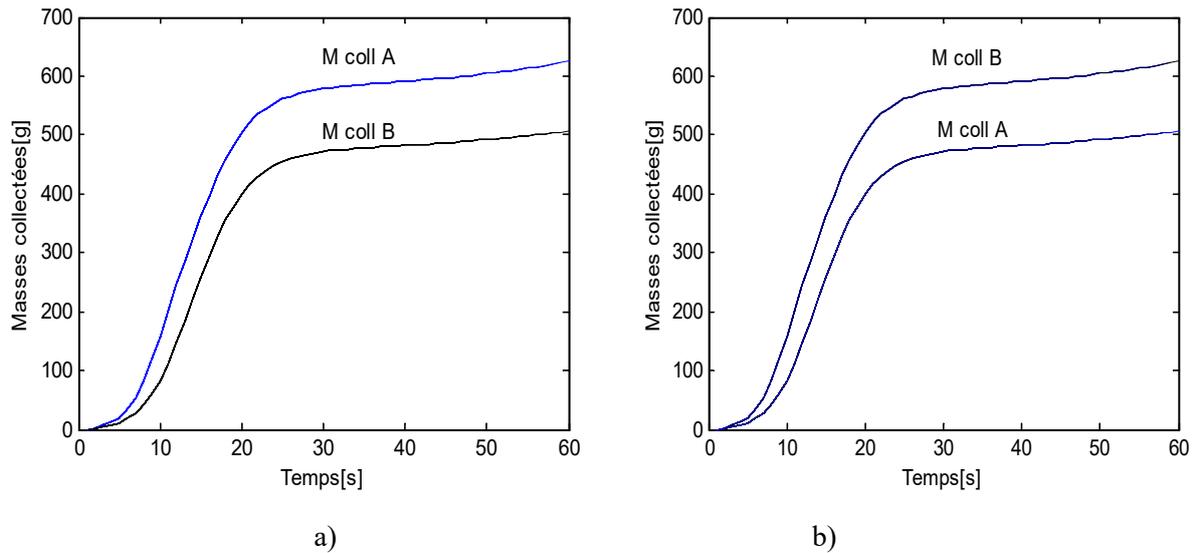
Le but de cette étude a été dans un premier temps d'observer si les parois du lit fluidisé influent sur le processus de séparation électrostatique pour un mélange de trois matériaux granulaires notés A, B en régime intermittent. Les particules A, B et s'électrisent par le contact avec les parois selon leurs places dans la série triboélectrique.

Dans un lit fluidisé de géométrie et de vitesse d'air connu, chaque granulé subit  $N(t)$  collisions par unité de temps. Pour la composition initiale des matériaux dans le lit fluidisé, à l'instant  $t = 0$ , nous posons  $N(0) = N1$ . L'échange de charge après chaque collision granulé-parois est différent par rapport au cas d'un contact entre deux granules, car il dépend de la position relative de la matière des parois  $P$  et des deux matériaux  $A$  et  $B$  dans la série triboélectrique. Si une unité de charge a été échangée dans une collision entre deux granules  $A$  et  $B$ , la charge échangée entre un granule  $A$  (ou  $B$ ) et la paroi serait respectivement  $\lambda_A$  (ou  $\lambda_B$ ). Il ya plusieurs situations qui peuvent être rencontrées dans cette étude :

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

Les résultats de la figure IV.1 (a) montrent la première simulation exécutée où la paroi  $P$  étant comprise entre  $A$  et  $B$  est plus proche de  $B$  dans la série triboélectrique, les charges échangées entre les particules  $A$  ou  $B$  et la paroi sont respectivement  $\lambda_A=0.7$  et  $\lambda_B=0.3$ . Cependant, pour la présente simulation, on a supposé que les deux classes de particules ont des caractéristiques similaires.

Sur la figure IV.1 (b) le granulé  $B$  est plus proche de la paroi  $P$  dans la série triboélectrique, dans ce cas les charges échangées entre les particules  $A$  ou  $B$  et la paroi sont respectivement  $\lambda_A=0,3$  et  $\lambda_B=-0,7$ .



**Figure IV.1:** Masses collectées en régime continue pour un mélange 45%A+45%B+10%C et 1%  $C_{op}$  et une masse initiale introduite  $M=1000g$ .

a-  $\lambda_A=0.3, \lambda_B=0.7$

b-  $\lambda_A=0.7, \lambda_B=0.3$

Pour les deux cas cités précédemment, on remarque une légère différence entre les masses séparées de A et B est due à l'intensité différente de l'effet des collisions entre ces dernières avec les parois du séparateur, elle est plus forte pour A que pour B, comme  $\lambda_A=0.7$  et  $\lambda_B=0.3$  : **les granule B sont plus proche dans la série triboélectrique du paroi P que les particule A et plus fort pour B que pour A.**

Pour  $\lambda_A=0.3$  et  $\lambda_B=0.7$  : **les granule A sont plus proche dans la série triboélectrique du paroi P que les particule B**

Cependant, après une trentaine de secondes, la somme des masses des produits A et B collectées dans une unité de temps est égale au débit d'alimentation.

#### IV.1.2. Effet de la composition du mélange granulaire :

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

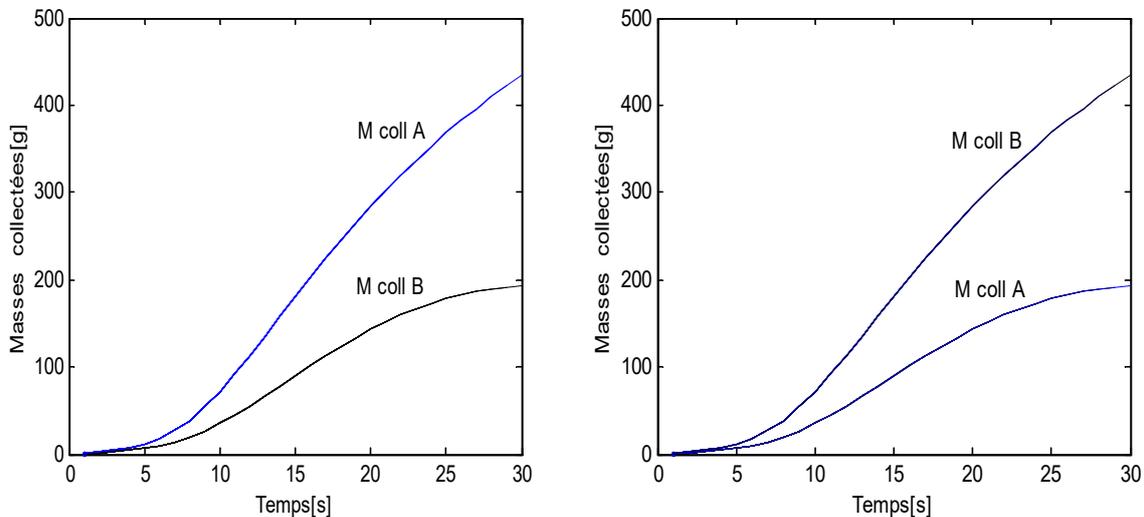
la nature des matériaux à séparer a été prise en considération en tenant compte des équations (III-11) et (III-12) pour le calcul du nombre moyen de collision  $X_{ABav}$  et l'écart type  $S_{xAB}$ .

Les calculs ont été effectués avec un autre programme écrit en « **MATLAB.7.0** ». Le pas d'itération est  $\Delta t = 1$  s, la masse initiale a été prise  $M_1 = 700$  g.

Les masses  $M_{As}(t)$  et  $M_{Bs}(t)$  sont représentées par les courbes des figures suivantes. Deux cas sont étudiés dans ce paragraphe.

Les charges échangées entre les particules  $A$ ,  $B$  et la paroi sont respectivement  $\lambda_A=0,3$  et  $\lambda_B=0,7$ . La masse initiale du mélange introduite dans le lit fluidisé était de 700 g. L'objectif pour ceci est d'évaluer la faisabilité du processus de charge triboélectrique pour différentes compositions du mélange binaire granulaires. Le débit choisi de l'alimentation en matière était 5 g/s.

La figure IV.2 montre l'évolution de la masse récupérée en fonction de la concentration des mélanges granulaires. Deux cas ont été analysés: Afin d'étudier l'influence de la composition granulaire du mélange sur le processus de séparation.



**Figure IV.2 :** Masses collectées en régime intermittent pour une masse initiale introduite  $M=700$ g et  $M_{lim}=50$ g. pour  $\lambda_A=0.3$   $\lambda_B=0.7$

**a) 35%A +65%B**

**b) 65%A +35%B**

La figure (IV. 2.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  $B$  ont une probabilité plus faible que les granules 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. 2.b) montre que les granules de type  $B$  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.2 Simulation du régime de fonctionnement continue :

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.

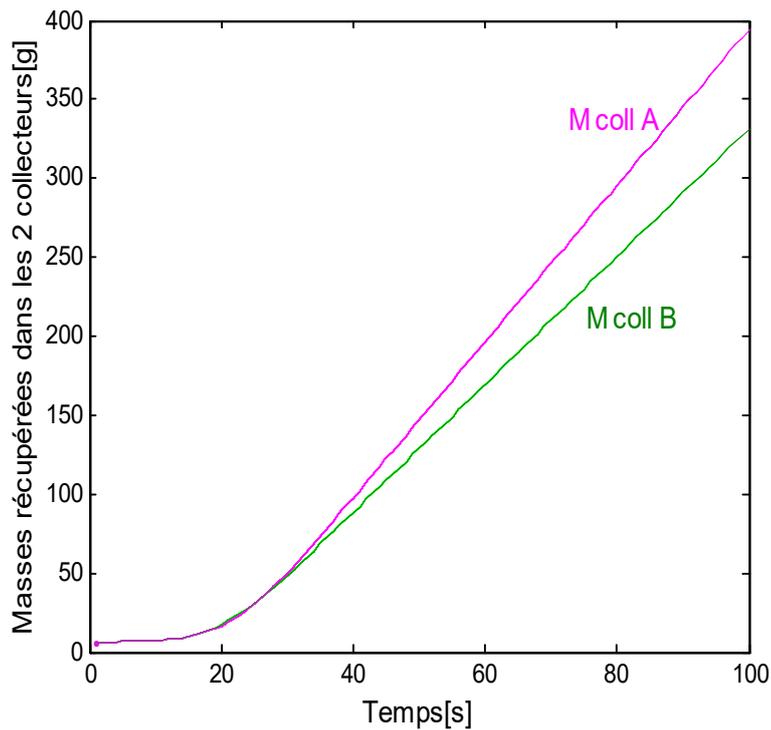
Le fonctionnement du dispositif en continu assure la séparation d'une quantité importante de matière

Dans le but de simuler le fonctionnement en flux continu, le dispositif est alimenté par un convoyeur vibrant. 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.2.2. Effet de la composition du mélange granulaire :

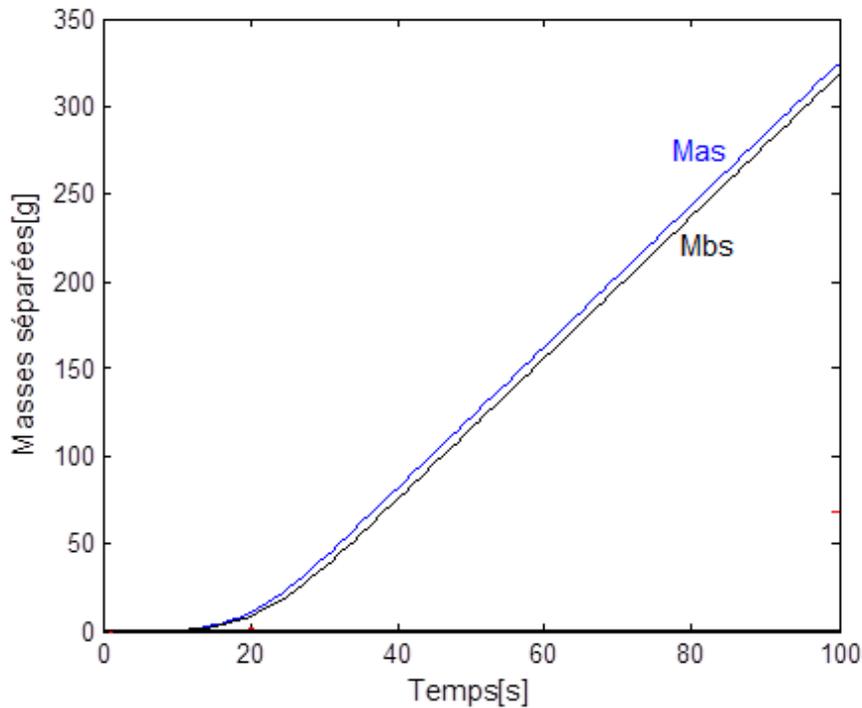
Deux calculs ont été effectués avec un autre programme écrit en « MATLAB.7.0 ». Le pas d'itération est  $\Delta t = 1$  s, la masse initiale a été prise  $M_1 = 350$  g.

- 1) Dans le premier programme, la masse  $m(j, j)$  introduite à chaque étape a été successivement fixée à 10 g/s. Les masses  $M_{As}(j)$  et  $M_{Bs}(j)$  sont représentées par les courbes des figures suivantes. Dans ce cas, on considère que le mélange granulaire est constitué de 40%  $A$ +60%  $B$   $C_{air}=2\%$



**Figure IV. 3:** Masses collectées en régime continu pour une masse initiale introduite  $M=350\text{g}$ ,  $60\%A+40\%B$   
 $C_{air}=2\%$ ,  $m(j,j)=10\text{g/s}$  et  $\lambda_{AC}=0.3, \lambda_{BC}=0.7$

- 2) Un deuxième programme a été effectué, la masse  $m(j,j)$  introduite à chaque étape a été successivement fixée à  $6\text{g/s}$ . Les masses  $M_{As}(j)$  et  $M_{Bs}(j)$  sont représentées par les courbes des figures suivantes. Dans ce cas, on considère que le mélange granulaire est constitué de  $50\% A+50\% B$   $C_{air}=2\%$



**Figure IV. 4:** Masses collectées en régime continu pour une masse initiale introduite  $M=350\text{g}$ ,  $50\%A+50\%B$   
 $C_{air}=2\%$ ,  $m(j,j)=10\text{g/s}$  et  $\lambda_A=0.3, \lambda_B=0.7$

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 7.0** L'étape d'itération est  $\Delta t = 1\text{s}$ , la masse initiale était  $M_1 = 350\text{ g}$  (avec  $M_{lim} = 50\text{ g}$ )

Les charges échangées entre les particules  $A$ ,  $B$ , et la paroi sont respectivement  $\lambda_A=0,7$ ,  $\lambda_B=0,3$ . La masse initiale du mélange introduite dans le lit fluidisé était de  $350\text{g}$ . L'objectif pour ceci est d'évaluer la faisabilité du processus de charge triboélectrique pour différentes compositions du mélange granulaires binaire.

Les figures **IV.3** et **IV.4** montre l'évolution de la masse récupérée en fonction de la concentration des mélanges granulaires. Deux 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:

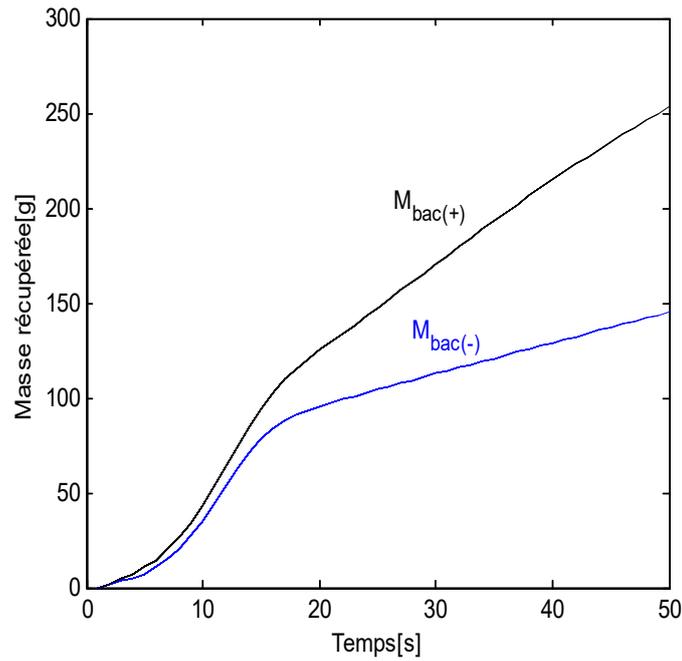
a)  $60\% A + 40\% B$ ,

b)  $50\% A + 50\% B$

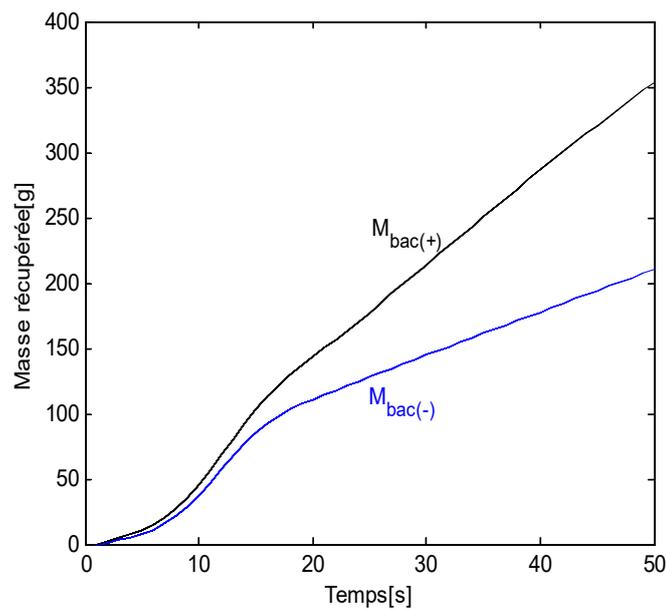
- a) on remarque que les granules récupérés dans le bac (+) sont collectés de même rythme plus que ceux récupérés dans le bac (-) de  $B$  jusqu' à un temps  $t=35s$ , malgré qu' elles sont minoritaires dans la composition du mélange granulaire. En effet, un granule de  $A$  à une probabilité plus faible 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  $t=40s$ , les granules de  $A$  sont collectés à une quantité plus grande que les granules de  $B$ , cela est expliqué par le fait que les matériaux  $B$  existent en petites quantités dans le lit fluidisé.
- b) La **figure (IV. 4 b)** représente l'évolution de la masse et la variation de la masse récupérée pour un mélange de  $50\%A+ 50\%B$ , on remarque que les masses récupérées dans les deux bacs du collecteur sont presque identiques, cela s'explique aussi que le mélange contient  $50\%$  de  $A$  qui va tomber dans le bac (-) indique ( $50\% B$ ), qui est censé être récupérée dans le bac(+). C'est parce que on a un mélange équilibrer. La différence est dans les masses séparées sous l'effet des courants d'air (provoque des impuretés dans les deux compartiments du collecteur).

#### IV.2.2 Effet du débit de matière :

Afin d'étudier l'effet du débit d'air, un algorithme de simulation a été développé. En utilisant les mêmes caractéristiques triboélectriques décrites précédemment, les charges échangées entre les particules  $A$ ,  $B$  et la paroi sont respectivement  $\lambda_A=0,3$  et  $\lambda_B=0,7$ . La masse initiale du mélange introduite dans le lit fluidisé était de  $350$  g pour un mélange granulaire de  $65\% A + 35\% B$  et les concentrations des particules récupérées sous l'effet des courants d'air sont :  $c_{airA}=0,2\%$  ;  $c_{airB}=0,2\%$ ; La figure IV.5 montre l'évolution de la masse récupérée pour deux valeurs du débit de matière.



a)  $m(j, j) = 5 \text{ g/s}$



b)  $m(j, j) = 10 \text{ g/s}$

**Figure IV. 5:** Masses collectées en régime continu pour une masse initiale introduite  $M=300\text{g}$ ,  $65\%A+35\%B$   
 $C_{air}=2\%$ ,  $e$   $\lambda_A=0.3$ ,  $\lambda_B=0.7$

La **figure IV.5** illustre les masses récupérées et ses variations par rapport au temps pour quatre valeurs du débit de matière  $d = 5 \text{ g/s}$ ;  $d = 10 \text{ g/s}$ . Une augmentation progressive de cette masse est observée avec l'augmentation du débit d'air. A partir des **figures (IV.7. a et b)**,

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. Par conséquent, il peut être spécifié que la variation du débit maximal d'entrée (entre 5..10 g/s) pour lequel le séparateur fonctionne à paramètres nominaux.

**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:

- L'effet de paroi dépend de sa position dans la série triboélectrique par rapport aux matériaux à séparer.
- 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 deux sortes de granules dans les deux collecteurs est liée à leurs positions respectives dans la série tribo-électrique.
- Le débit introduit instantanément (le débit maximal d'entrée est d'environ 10 g/s pour lequel le séparateur fonctionne à paramètres nominaux).

---

## Conclusion Générale

---

### Conclusion Générale

L'objectif de ce travail était la simulation du fonctionnement d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique pour un mélange constitué de deux matériaux plastiques granulaires. Les aspects électrostatiques liés à la charge triboélectrique des particules doivent également être pris en compte..

Ce manuscrit 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 granulaires binaire 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..10 [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.

## Références Bibliographiques

---

1. Lawver, J.E., Dyrenforth, W.P. "Electrostatic separation". In: *Electrostatics and Its Applications*. A.D. Moore (Editor). New York, John Wiley&Sons, 221-249, 1973.
2. Lee, L.H. "Dual mechanism for metal polymer contact electrification". In: *Journal of Electrostatics*. 32(1), 1-29 (1994).
3. Nicoara, Simona, Calin, L., Iuga, A., Serban, N. "Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose". In: *Environment and Progress*. 6, 341-346, (2006).
4. Ralston, O.C. *Electrostatic Separation of Mixt Granular Solids*. Amsterdam, Elsevier, pp.162-172, (1961).
5. Schmoutziguer, W.S., MCGovern, J.J. "Tribocharging in separating apparatus". Outokumpu, Patent No: GB 2 351 928, 2001.
6. Stencil, J.M., Schaefer, J.L., Neathery, J.K., Ban, H., Finseth, D. "Electrostatic particle separation system, apparatus, and related method". US Patent No: 6 498 313, 2002.
7. Taylor, D.M., Secker, P.E. *Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements*. New York, John Wiley&Sons, pp. 82-104, (1994).
8. Dascalescu, L., **Dragan, C.**, Bilici, M., Belega, R., Hemery, Y., Rouau, X., "Electrostatic Bases for Separation of Wheat Bran Tissues". In: *IEEE Transactions and Industry Applications*, 46, 659 – 665, (2010).
9. \*\*\* American Plastics Council. "Plastics from residential electronics recycling". In: The report analyzes the types of plastics found in consumer electronics and the current technologies available to recycle these plastics. (2000).
10. \*\*\* Association of Plastics Manufactures in Europe. "Insight into consumption and recovery in Western Europe 2000".
11. \*\*\* HG 448/2005 on Waste Electric and Electronic Equipment. Romanian Government Decision.
12. Inculet, I.I., Castle, G.S.P., Brown, J.D. "Electrostatic separation of plastics for recycling". In: *Particulate Science and Technology*, 16(1), 91-100, (1998).
13. Das, S., Samuila, A., **Dragan, C.**, Dascalescu, L. "Behaviour of charges insulating particles in contact with a rotating roll electrode". In: *Journal of Electrostatics*, 69, 189-192, (2009).
14. Dascalescu, L., Samuila, A., Das, S., **Dragan, C.**, Medles, K., Gauthier., M., "Etude expérimentale des procédés de séparation électrostatiques en vue de leur utilisation au recyclage des matières plastiques présentes dans les déchets électriques et électroniques", Contrat WKO 730/2006, Bénéficiaire : APR2

## Références Bibliographiques

---

15. **Diaz, A.F., “Contact electrification of materials: The chemistry of ions on polymer surfaces”. In: The Journal of Adhesion, 67, 111 (1998)**
16. 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.
17. W. R. Harper. « Contact and Frictional Electrification », Oxford University Press, London, 1967.
18. W. D. Greason. « Investigation of a test methodology for triboelectrification », Journal of Electrostatics, vol. 49, pp. 245–256, 2000.
19. D. K. Davies. « Charge generation on dielectric surfaces », Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 2, pp. 1533-1537, 1969.
20. G. S. P. Castle. « Contact charging between insulators », Journal of Electrostatics, vol. 40/41, pp. 13-20, 1997.
21. A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu and L. Dascalescu. « Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device », Journal of Electrostatics, vol. 63, pp. 937-942, 2005.
22. S. Nicoara, L. Calin, A. Iuga and N. Serban. « Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose », Environment and Progress, vol. 6, pp. 341-346, 2006.
23. E.G. Kelly and D.J. Spottiswood. « The theory of electrostatic separations: a review, part 1, Fundamentals », Minerals Engineering, vol. 2, pp. 33-46, 1989.
24. R.D. Pascoe and B.O. Connel. « Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation », Minerals Engineering, vol. 16, pp. 1205-1212, 2003.
25. **D.M Taylor, P.E. Secker «Industrial electrostatics fundamentals and measurements » RSP Edition England, 1994.**
26. **S. Trigwell, N. Grable, C.U. Yurteri, R.Sharma, M.Mazumder «Effects of Surface Properties on the Tribocharging Characteristics of Polymer Powder as Applied to Industrial Processes». IEEE, Transactions on Industry Applications, VOL. 39, NO. 1, January/February [2003].**

## Références Bibliographiques

---

27. Coste. J et pechery P «Influence of surface profile in polymer-metal contact charging» *Journal Electrostatics* May1981, Volume 10 pages 129-136.
28. Haenan H.T.M. «Experimental investigation of the relationship between generation and decay of charges on dielectrics». *Journal Electrostatics*, June 1976, Volume 2 pages 151- 173.
29. Ohara.K “Contribution of molecular motion of polymer to frictional electrification” *Journal Electrostatics* May 1978 pages 249-256
30. E. Nemeth, V. Albercht, G. Schubert. F.Simon polymer tribo-elctric charging, dependence on thermodynamic surface properties and relation humidity *Journal Electrostatics* May 2003, Volume 58 pages 3-16.
31. Lowell J the electrification of polymer by metals *Journal physiques Application physics* 1978 Volume 9 pages 1571-1585.
32. Trifield, "Tribo-electric series." [En ligne], Disponible sur: <https://www.trifield.com/content/tribo-electric-series/>.
33. M. Blajan, A. Samuila, V. Neamtu, R. Beleca, L. Caliap, D. Vadan, A. Iuga, and L. Dascalescu, “experimental modeling of particle electrification in vibrated zigzag shaped metallic tubes”. In: *Proceedings of ESA/IEJ/IEEE-IAS/SFE Joint Conference on Electrostatics*, University of California, and Berkeley. California, pp. 538-543, 2006. ISBN-0-7803-9209-4
34. L. Dascalescu, A. Urs, S. Bente, M. Huzau, and A. Samuila, “charging of mm size insulating particles in vibratory devices”. In: *Journal of Electrostatics*, vol. 63, pp. 705-710, 2005
35. G. Buda, M. Bilici, A. Samuila, and L. Dascalescu, ”experimental study of the tribocharging proces of plastic garnular materials on a vibratory feeder device,” *IEEE Trans. Diel. Elect. Insul.*, vol. 20, pp. 1489-1496, 2013.
36. A. Tilmatine, S. E. Bendimerad, K. Medles, A. Bendaoud, M. Younes, L. Dascalescu. (2008). Set-Point Identification and Robustness Testing of a Free-Fall Triboelectrostatic Separation Process. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*. 1 - 7. 10.1109/08IAS.2008.102.
37. S. Leon Escalante, G. Touchard, G. Dominguez. Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes. *Electrical Insulation and Dielectric*

## Références Bibliographiques

---

- Phenomena, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2002.
38. A. Tilmatine, S. Bendimerad, F. Boukhoulda, K. Medles and L. Dascalescu. « Electrostatic separators of particles. Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures », *Waste Management*, vol. 29, pp. 228-232, 2009.
39. Dascalescu L., « Numerical analysis of the electric field of roll type electrostatic separators », *J. of electrostatics*, vol.29, pp.255-267, 1993.
40. Gontran Richard, « Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires », thèse Pour l'obtention du grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS UFR des sciences fondamentales et appliquées Pôle poitevin de recherche pour l'ingénieur en mécanique, matériaux et énergétique - PPRIMME (Poitiers) 2018
41. A. Tilmatine, K. Medles, M. Younes, A. Bendaoud and L. Dascalescu. « Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles ». *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, pp. 1564–1569, 2010.
42. I. I. Inculet, G. S. P. Castle and J. J. Brown. « Electrostatic separation of plastics for recycling », *Particulate Science and Technology*, vol. 16, pp. 77-90, 1998.
43. C. R. Hicks and K. V. Turner Jr. « Fundamental concepts in the design of Experiments », Oxford university press, Oxford, 1999.
44. S. Trigwell, N. Grable, C. U. Yurteri, R. Sharma and M. K. Mazumder. « Effects of surface properties on the tribocharging characteristics of polymer powder as applied to industrial processes », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, pp. 79-86, 2003.
45. Ciprian Dragan « modelisation du processus de charge et separation tribo-aero-electrostatique de materiaux plastiques granulaires », thèse Pour l'obtention du Grade de docteur de l'universite de poitiers faculté des sciences fondamentales et appliquées 2010
46. Rahou Fatima Zohra « modélisation du fonctionnement d'un séparateur tribo-aero-électrostatique pour matériaux plastiques granulaires », thèse Pour l'obtention du diplôme de doctorat en-sciences en électrotechnique option : électrostatique de l'université Djilali Liabès di Sidi Bel Abbes 2015
47. Dascalescu, L., Samuila, A., Mihalcioiu, A., Bente, S., Tilmatine, A. "Robust design of electrostatic separation processes", In: *IEEE Transaction on Industry Applications*, 41 (3), 715-720 (2005).
48. Crowley, J.M. *Fundamentals of Applied Electrostatics*. Morgan Hill, California, Laplacian Press, 1999.

## Références Bibliographiques

---

49. Kama, H., Kiyomura, Y., Seki, N. "Method and apparatus for feeding and carrying ground plastic and electrostatic separator for ground plastic". Matsushita Electric Co Ltd. Patent No: JP 2002 177 820, 2002.
50. Project founded by the European Community under the Industrial & Materials Technologies Programme."Electrostatic recovery of paper and plastic packaging wastes". Synthesis report. Project No. BE96 – 3243, 2001.
51. Crawford, R.J. Plastic Engineering. London, Butterwoth Heinemann, 1998.
52. Jones, T.B., and King, J.L., Powder Handling and Electrostatics, Lewis Publishers, Chelsea, MI, 1991.
53. Higashiyama, Y., Asano, K. "Recent progress in electrostatic separation technology". In: Particulate Science and Technology, 16 (1), 77-90, (1998).
54. Hughes, J.F. Electrostatic Particle Charging. New York, Wiley, 1997.
55. \*\*\* Encyclopedia of Chemical Technology. Fourth Edition. A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, 1998.
56. Touchard, G., Zergouni, A., Watanabe, S., Borzeix, J., "Evolution de la charge électrique d'une particule heurtant une paroi solide" In : Journal of Physics III, France, 1, 1233-1241, (1991).
57. M. K. Forward, D. J. Lacks and R. Mohan Sankaran. Triboelectric Charging of Granular Insulator Mixtures Due Solely to Particle-Particle Interactions. Ind. Eng. Chem. Res. 2009, 48, 2309–2314.
58. M. Miloudi. (2012). Application de la charge par effet triboélectrique des matériaux granulaires dans la séparation Electrostatique. Thèse de Doctorat. Université de Sidi Bel Abbes, Algérie
59. Mazumder, K., M. "Electrostatic Processes". In: Wiley Encyclopedia of Electrical Electronics Engineering. Volume 7. John Wiley&Sons, Inc, 15-39, (1999).
60. Schein, L.B., Castle, G.S.P. "Triboelectricity". In: Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. John G. Webster (Editor). 22, 574-585.
61. Castle, G.S.P., Schein, L.B. "General model of sphere–sphere insulator contact electrification". In: Journal of Electrostatics. 36(2), 165-173 (1995).
62. Castle, G.S.P. "Contact charging between insulators". In: Journal of Electrostatics. 40-41, 13-20 (1997).
63. Medley, J.A., "Fractional Electrification of Polar Polymers". In: Nature, 171, 1077 (1953).

## Références Bibliographiques

---

64. Diaz, A.F., "Contact electrification of materials: The chemistry of ions on polymer surfaces". In: *The Journal of Adhesion*, 67, 111 (1998)
65. Diaz, A.F., Guay, J., "Contact charging of organic materials: Ion vs. electron transfer". In: *IBM Journal of Research and Development*, 37, 249 (1993).
66. Harper, W.R. *Contact and Frictional Electrification*. Morgan Hill, California, Laplacian Press, 1998.
67. Cundall, P.A., Strack, O.D.L., "A discrete numerical model for granular assemblies". In: *Geotechnique*, 29, 47–65, (1979).
68. Traoré, P., Eynaud, F., Herbreteau, C., and Bouard, R., "An Eulerian-Lagrangian approach for the numerical simulation and visualization of two dimensional fluidized beds," In: *Proceedings of ASME*, (2002)
69. Ali, F.S., Adnan Ali, M., Castle, G.S.P., Inculet, I.I., "Charge exchange model of a disperse system of spherical powder particles". In: *Transactions on Industry Applications*, 3 (10), 1884-1891, (1998).
70. Laurentie, J.C., Traoré, P., **Dragan, C.**, Dascalescu, L. "Elaboration d'un modèle de charge électrostatique de matériaux granulaires dans des lits vibrants". In: *Proceedings of the 7th Conference of French Society of Electrostatics*. Montpellier, France, August 30-31, September 1, 2010.
71. Touchard, G., "Computation of charge and field in a metallic sphere-dielectric flat plate configuration". In: *Journal of Electrostatics*, 40, 41, (1997).
72. Matsuyama, T., Yamamoto, H. "Impact charging of particulate materials". In: *Chemical Engineering Science*. 61, 2230-2238 (2006).
73. 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 Avril 2005.
74. I. Holme, J. E. McIntyre and Z. J. Shien, "Electrostatic charging of textile The Textile Institute" 1998, 28, 1.
75. Rahou "Modélisation du fonctionnement d'un séparateur tribo-aéro électrostatique pour matériaux plastiques granulaires", Thèse de Doctorat 2015
76. 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", 13<sup>th</sup> International Conference on Electrostatics. IOP Publishing, *Journal of Physics*: 2011.

## Références Bibliographiques

---

77. 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) .
78. Dragan, " modélisation du processus de charge et séparation tribo- electrostatique de matériaux plastiques granulaires ", Thèse pour Obtention de grade de Docteur de l'université de Poitiers.
79. D. Savostianoff, " Quelle seconde vie pour les plastiques ?, caoutchoucs & plastiques", 1993 vol. 722, p. 45–49
80. G. Bertolini, "La Double Vie de l'Emballage", Paris : Economica, 1995, 112, p.8.
81. K. Fukunaga and T. Maeno, "Measurement of space charge distribution in a polyimide film", Trans. IEE Japan, Vol. 114-A. pp. 560-561, 1994.
82. 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).
83. A. Kahlouche, "Contribution à la modélisation des mécanismes de transport de charges électriques dans les polyéthylènes" Thèse de Magister, Université de Constantine (2000).
84. G. Jarrousse, " 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).
85. 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<sup>o</sup>.2, Mars /Avril 2012, pp. 816-822.
86. 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.
87. 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.
88. F. Ghanem, " Procédés d'obtention des matériaux plastiques et composites", <https://fr.slideshare.net/ahmedmanai900/copier-cours-plasturgie-version-0044502178>
89. Department of Polymer Science, "Polyethylene", University of Southern Mississippi (1995,1996) Pslc.ws/French/pe.htm
90. Société Française de Chimie, " Données industrielles, économiques, géographiques sur le principaux produits chimiques, métaux et matériaux", 8<sup>ème</sup> édition, 2009 –www.sfc.fr
91. W. R. Harper, Contact and Frictional Electrification, Laplacian, Morgan Hill, 1998.

## Références Bibliographiques

---

92. H. Zaïdi<sup>1</sup>, C. Richard<sup>2</sup>, J. Frêne<sup>1</sup>, "La triboélectricité dans les contacts dynamique"
93. Quentin, "Polyéthylène téréphtalate (PET): aspects économiques", Techniques de l'ingénieur, 2004 > [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr) Annuaire des produits recyclés, un site du cercle national du recyclage (France) et de l'ADEME > [www.produits-recycles.com](http://www.produits-recycles.com)
94. Polyamide-Nylon-6,6 (PA 6,6), <http://www.goodfellow.com/F/Polyamide-Nylon-6,6.html>
95. Trifield, "Tribo-electric series." [En ligne], Disponible sur: <https://www.trifield.com/content/tribo-electric-series/>.
96. E. Nemeth, V. Albercht, G. Schubert. F.Simon polymer tribo-electric charging, dependence on thermodynamic surface properties and relation humidity Journal Electrostatics May 2003, Volume 58 pages 3-16.
97. Lowell J the electrification of polymer by metals Journal physiques Application physics 1978 Volume 9 pages 1571-1585.
98. A. Tilmatine, S. Bendimerad, F. Boukhoulda, K. Medles and L. Dascalescu. « Electrostatic separators of particles. Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures », Waste Management, vol. 29, pp. 228-232, 2009.
99. Tennal, M., Mazumder, K., Lindquist, D., Zhang, J., Tendeku, F. "Triboelectric separation of granular materials". In: *Conference Record IEEE/IAS Annual Meeting*. 3, 1724-1729 (1997).
100. Touchard, G., "Computation of charge and field in a metallic sphere dielectric flat plate configuration". In: *Journal of Electrostatics*, 40, 41, (1997).
101. Touchard, G., Benmadda, M, Humeau, P., Borzeix, J., "Static electrification by dusty gas flowing through polyethylene pipes." In: *Inst. Phys. Conf.*, 85, 97-102, (1987)
102. 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.
103. 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.
104. 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, Jan. 2000.

## Références Bibliographiques

---

105. G. Buda, M. Bilici, A. Samuila and L. Dascalescu, "Triboelectrification of Plasticlar Materials on an Electromagnetic Vibratory Feeder Device", 8<sup>eme</sup> Conférence de la Société Française d'Electrostatique, 3-5 juillet 2012, Cherbourg Octeville, France.
106. S. Masuda, M. Toragushi, T. Takahashi and K. Haga "Electrostatic beneficiation of coal, using a cyclone-tribocharger" , IEEE Trans. Ind. Appl. 19: 789-793.
107. C. Dragan, " modélisation du processus de charge et séparation tribo- electrostatique de matériaux plastiques granulaires ", Thèse pour Obtention de grade de Docteur de l'université de Poitiers.

### Figures

#### Chapitre I

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

**Figure I.2 :** Charge triboélectrique de deux particules en contact. (a) Particules électriquement neutres sans contact entre elles ; (b) Contact et transfert de charge ; (c) Rupture du contact, particules chargées.

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

**Figure I.4 :** Représentation schématique du chargement triboélectrique par cylindre tournant.

**Figure I.5 :** Schéma descriptif de l'électro-séparateur et ses éléments constitutifs : **(1)** Electrode couronne reliée à une source de HT ; **(2)** Electrode statique reliée à la même source de HT ; **(3)** Electrode cylindrique reliée à la terre ; **(4)** Vibro-transporteur ; **(5)** Electrode de neutralisation reliée à une source HT alternative ; **(6)** Brosse ; **(7)** Collecteur de particules [39].

**Figure I.6 :** Séparateur électrostatique à tambour ; (1) Electrode couronne ; (2) Electrode statique ; (3) Electrode cylindrique tournante ; (4) Goulotte oscillante ; (5) Electrode couronne de neutralisation ; (6) Balais ; (7) Collecteur [40]

**Figure I.7 :** Principe du séparateur tribo-électrostatique à chute libre.

**Figure I.8 :** Dispositif de tribo-électrisation à faible débit et électrodes verticales.

**Figure I.9 :** Dispositif pré-pilote industriel à débit moyen et électrodes inclinées.

**Figure I.10 :** Dispositif de séparation tribo-aéro-électrostatique.

**Figure I.11 :** Effets de la localisation et de la délocalisation des électrons.

## La liste des figures et tableaux

---

**Figure I.12** : Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ; b) Transfert d'ions

**Figure I.13** : Représentation d'un contact viscoélastique par des éléments de type Kelvin-Voigt.  $k_n$  et  $k_t$  sont respectivement les coefficients de raideur normale et tangentielle.  $\gamma_n$  et  $\gamma_t$  sont les coefficients d'amortissement normaux et tangentiels,  $\mu$  est le coefficient de frottement.

### Chapitre II

**Figure II.1** : Dispositif de séparation à faible débit et électrodes verticales [77]

**Figure II.2** : Représentation d'un polymère (Polyéthylène) [85]

**Figure II.3** : consommation mondiale de matières plastiques en 2007

**Figure II.4** : Aspect de la cage de Faraday utilisée pour mesurer la charge électrique : Photo du dispositif (a) et représentation schématique (b)

**Figure II.5** : Electromètre Keithley model 6514.

**Figure II.6** : Thermo hygromètre numérique Amprobe (TH-3).

**Figure II.7** : Balance numérique CAS MWP-600H.

**Figure. II.6 Séparateur** tribo- aéro-électrostatique à électrodes plaques parallèles (en régime continu).

### Chapitre III

**Figure III.1** : Charge triboélectrique en lit fluidisé, mélange de particule A et B.

**Figure III.2** : Principe de fonctionnement en régime intermittent.

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

**Figure III.4** : Résultats estimés pour un mélange de 50%A + 50%B.

### Chapitre IV

**Figure IV.1:** Masses collectées en régime continue pour un mélange 45%A+45%B+10%C et 1% Cop et une masse initiale introduite  $M=1000g$ . a-  $\lambda_A=0.3, \lambda_B=0.7$  b-  $\lambda_A=0.7, \lambda_B=0.3$

## La liste des figures et tableaux

---

**Figure IV .2 :** Masses collectées en régime intermittent pour une masse initiale introduit  $M=700\text{g}$  et  $M_{\text{lim}}=50\text{g}$ . pour  $\lambda_A=0.3$   $\lambda_B=0.7$  **a) 35%A +65%B b) 65%A +35%B**

**Figure IV. 3:** Masses collectées en régime continu pour une masse initiale introduite  $M=350\text{g}$ , 60%A+40%B  $C_{\text{air}}=2\%$ ,  $m(j, j) = 10\text{g/s}$  et  $\lambda_{AC}=0.3$ ,  $\lambda_{BC}=0.7$

**Figure IV. 4:** Masses collectées en régime continu pour une masse initiale introduite  $M=350\text{g}$ , 50%A+50%B  $C_{\text{air}}=2\%$ ,  $m(j, j) = 10\text{g/s}$  et  $\lambda_A=0.3$ ,  $\lambda_B=0.7$

**Figure IV. 5:** Masses collectées en régime continu pour une masse initiale introduite  $M=300\text{g}$ , 65%A+35%B  $C_{\text{air}}=2\%$ , e  $\lambda_A=0.3$ ,  $\lambda_B=0.7$

### Tableaux

**Tableau I.1 :** Série tribo-électrique qui combine différentes séries de la littérature [5]

**Annexe 1**  
**La loi normale (ou loi de Laplace-Gauss ou loi de Gauss)**

**A1. 1 Les fondamentaux**

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

**a- Sa forme : la courbe en cloche**

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

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

Dont la représentation graphique est la suivante :

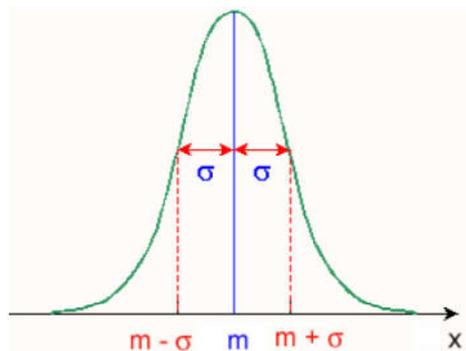


Figure A.1 Représentation graphique de la loi normale

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

**b- Le théorème Central-limite**

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

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

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

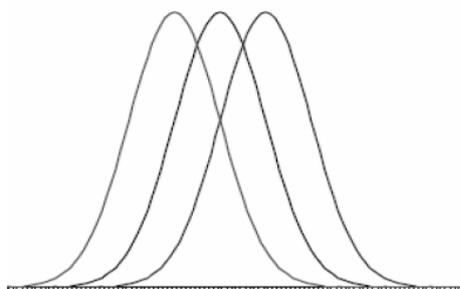
Cela reste possible même quand on ne connaît pas loi des variables  $X_i$ . de l'addition d'un grand nombre de causes de fluctuation indépendantes

### A1. 2 Espérance et variance

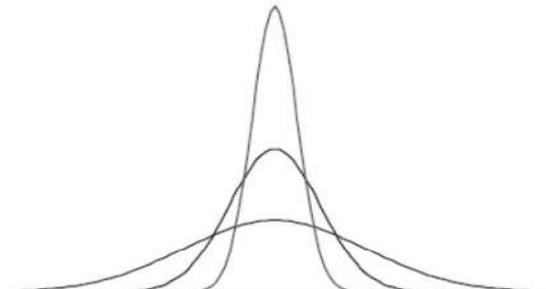
Soit  $X$  une valeur aléatoire qui suit la loi  $N(m,s)$ . Par raison de symétrie:  $E(X) = m$  et on montre facilement que

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

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



*Différentes valeurs de  $m$*



*Différentes valeurs de  $\sigma$*

*Figure A.2 Distribution normale pour différentes valeurs de  $m$  et  $\sigma$*

### A1. 3 La loi normale centrée-réduite

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

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

#### Propriétés

$$P(0)=0,5$$

$$P(-x)=1- P(x)$$

Méthode des plans des expériences

Cette méthode permet la modélisation et l’optimisation d’un processus. Le comportement d’un système peut être défini par exprimant les  $n$  variables de sortie  $y_i, i = 1, \dots, n$ , comme fonctions des variables d’entrée  $u_i, i = 1, \dots, m$ , qui peuvent être contrôlées (figure A.3).

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

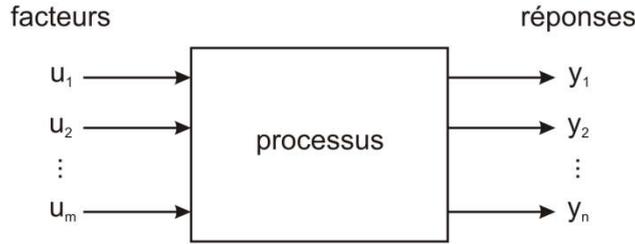


Figure A.3. : Représentation schématique d’un processus quelconque

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

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

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

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

où

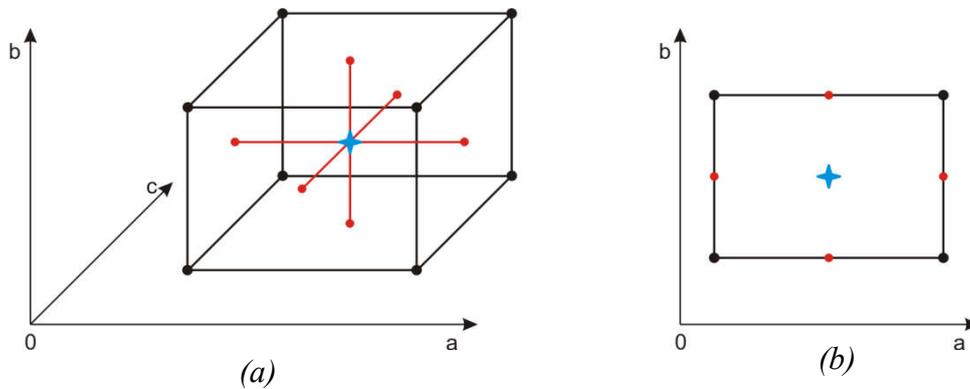
$$u_{i0} = \frac{(u_{i\max} + u_{i\min})}{2}; \quad \Delta u_i = \frac{(u_{i\max} - u_{i\min})}{2} \tag{A.5}$$

La fonction de réponse devient :

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

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

Le problème d'optimisation d'un processus ne peut être abordé qu'en utilisant des plans d'expériences permettant d'exprimer la réponse par un modèle polynomial de second degré. Les plans composites centrés sont inclus dans cette catégorie ; leur construction consiste à rajouter des points en étoile à partir d'un plan factoriel complet (Fig. A.4). Ces points en étoile sont positionnés à une distance  $\pm\alpha$  du centre du domaine suivant les axes des facteurs. L'ensemble de ces points constitue un dispositif au sein duquel on ne fait varier qu'un seul facteur à la fois. Il y a donc  $2k$  points en étoile,  $k$  étant le nombre des variables du plan d'expériences.



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

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

$$N = 2^k + 2 \cdot k + 3 \tag{A.6}$$