

## II . 1. Introduction :

La séparation électrostatique d'un mélange de matériaux pulvérulents est possible si ses composants portent des charges électriques différentes, de sorte que la charge électrostatique des matériaux granulaires est nécessaire pour les séparer dans un champ électrique intense créé par plusieurs mécanismes physiques différents

### II . 1. Chargement par effet triboélectrique

La charge électrique de friction, également appelée électrophorèse de friction, se produit dès Lorsque deux solides entrent en contact puis se séparent. Selon la nature des deux matériaux Inclus, le transfert de charge entre les deux substances peut effectivement se produire, Entraînant globalement une augmentation des charges positives à la surface de l'un d'eux Excès de matière et charges négatives à la surface de la seconde. Une des difficultés Le principe dans l'étude de ce phénomène est qu'il consiste principalement dans l'étude cas de déséquilibre. Lors d'une expérimentation sur la charge électrique propriétaire, le Les niveaux de charge mesurés sont le résultat de deux processus distincts décrits dans Illustration :

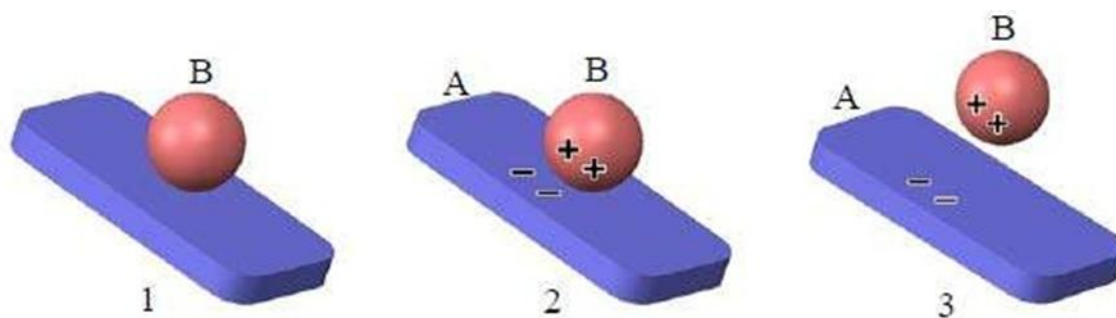
Le transfert de charge entre les deux matériaux pendant qu'ils sont en contact. lorsque Deux solides en contact, des charges électriques sont échangées entre

Deux substances jusqu'à ce qu'elles atteignent un nouvel état d'équilibre thermodynamique. Ceci est incroyable Le nouvel équilibre n'est pas forcément atteint si le temps de contact est insuffisant. En effet, le transfert de charge est interrompu dès que les deux surfaces se séparent.

Desserrer les charges accumulées sur les surfaces de contact. Aimer Chaque surface a un excès de charge par rapport à son état neutre isolé Électriquement, les charges commencent à se dérouler dès qu'elles sont séparées Par tous les mécanismes physiquement accessibles. En particulier, le processus Le regroupement des frais dans l'interface tend à réduire le montant des frais qui reste sur chaque surface après séparation. Ceci explique pourquoi la charge électrique mono polaire est difficilement observable lors du contact avec les matériaux. Conducteurs où la recombinaison de charge se produit presque instantanément. Le La relaxation des charges se poursuit également après séparation complète des deux surfaces, par exemple au moyen d'un milieu de décharge électrique, par conductivité

De la surface au sol, en s'écoulant vers le volume de matière ou en interagissant avec l'atmosphère environnante. Cette détente se poursuit jusqu'à La surface du matériau redevient électriquement neutre. Quantités d'expéditions Il a été étudié dans le cadre de l'expérience de charge électrostatique encore en voie de relaxation. Les propriétés physiques et chimiques locales de sa surface ou Interaction mécanique lors du contact. De plus, la relaxation des charges dépend de Caractéristiques de l'environnement dans lequel l'expérience a été menée et les caractéristiques de surface aussi.

Ces niveaux de complexité rendent souvent impossible la modélisation Phénomène de charge électrostatique par frottement strict qui se produit dans la nature ou dans l'industrie. Étudier ce phénomène dans la littérature scientifique à cet effet Raison essentiellement expérimentale. Chargement électrique monopole distinctif du couple de matériaux en contact, et ne présente pas les mêmes propriétés selon La nature électrique du matériau étudié. Définition précise des concepts de matériaux Les conducteurs et les isolants seront d'abord donnés pour présenter ces propriétés [16]



**Figure II.1 :** L'échange de la charge électrique entre deux surfaces par effet triboélectrique:

1. Surface « A » et la particule « B » sont neutres; 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 [17]

### II . 1.1Série triboélectrique

On appelle série triboélectrique un classement des corps selon leur tendance à se charger positivement ou négativement, un corps est placé avant un autre dans la série s'il a tendance à lui céder des électrons (à se charger positivement) quand les deux corps sont mis en contact ou frottés l'un contre l'autre. Cette série est déterminée par la permittivité, les

---

permittivités les plus élevées appartenant aux polymères les plus fortement donneurs. D'une manière plus rigoureuse, le caractère donneur ou accepteur peut être lié au travail d'extraction, les polymères donneurs étant ceux dont le travail d'extraction est le plus faible[18]. A travers les années, plusieurs séries triboélectriques ont été établies et par exemple développées et récemment une méthode expérimentale permettant de construire une série triboélectrique en mettant en contact des matériaux avec du mercure liquide. Même si le mercure n'est pas sous état solide, une charge triboélectrique peut être mesurée. Cela leur permet de mettre en place une méthodologie particulièrement robuste avec des mesures hautement reproductibles, car leurs mesures ne sont pas impactées par les propriétés de rugosités de surface, qui déterminent en grande partie la surface réellement mise en contact dans une expérience réalisée avec deux solides. L'un des objectifs des séries triboélectriques est de trouver des corrélations entre l'ordre des matériaux et les propriétés physiques liées aux mécanismes physiques responsables du chargement triboélectrique., le chargement triboélectrique des métaux est expliqué par une différence entre le travail de sortie de chaque métal, et le positionnement des métaux dans les séries triboélectriques montre une forte corrélation avec le travail de sortie. Le concept de travail de sortie, de manière analogue au niveau de Fermi, n'est en revanche pas clairement défini pour les isolants. [19]

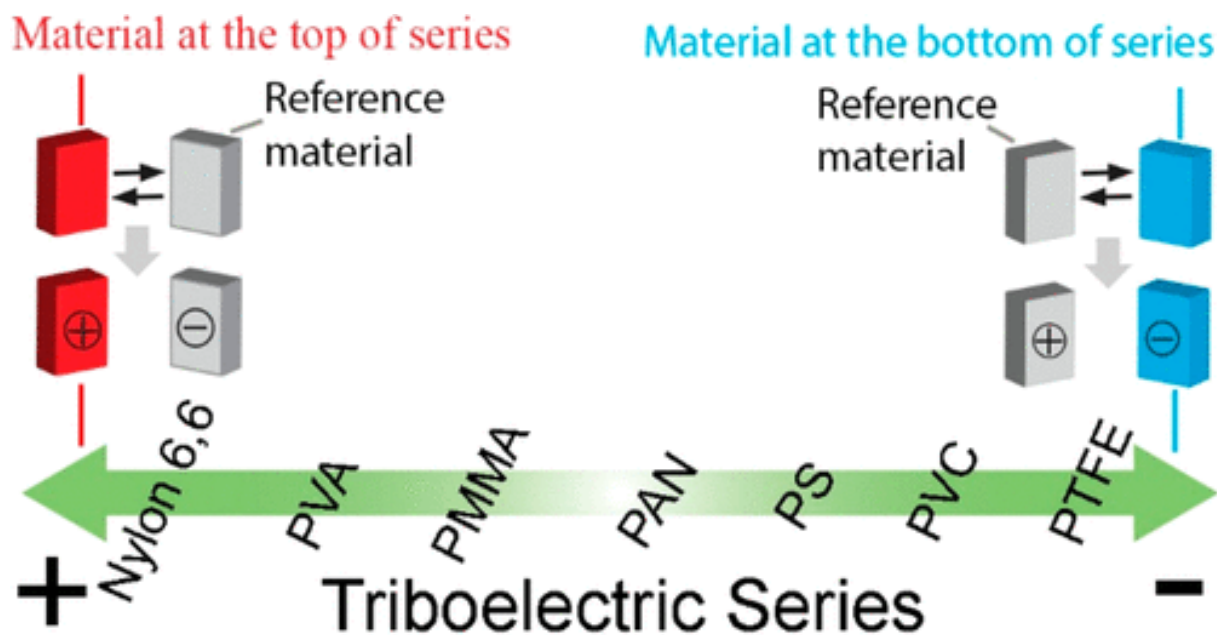


Figure II . 2..Illustration de série triboélectrique [20]

Nom d'isolant	Rapport de la charge [nC/J]	Charge acquise si frotté avec du métal (F:faible, N:normal)	Remarques
Polyuréthane solide	+40	+N	Un peu conducteur
Dynatron (nylon +)	+28	+N	/
Verre	+25	+N	Un peu conducteur
Papier	+10	-F	Un peu conducteur
Bois (pin)	+7	-F	/
Silicone	+6	+N	/
Coton	+5	+N	Légèrement
Caoutchouc nitrile	+3	-F	/
Laine	0	-F	/
Polycarbonate	-5	-F	/
ABS	-5	-N	/

Acrylique (Polyméthacrylate)	-10	-N	/
Époxy (circuit)	-32	-N	/
Caoutchouc en styrène butadiène	-35	-N	/
PET (mylar) solide	-40	+F	/
Polystyrène	-70	-N	/
Polyamide	-70	-N	/
Silicone	-72	-N	/
Oléfines (alcènes) : LDPE, HDPE, PP	-90	-N	/
PVC (vinyle rigide)	-100	-N	/
Latex (naturel) en caoutchouc	-105	-N	/
Caoutchouc en EPDM, remplie	-140	-N	Unpeuconducteur
Téflon	-190	-N	Très électronégatif

**Tableau I : Série triboélectrique [21]**

## II . 1.2 Dispositifs de chargement triboélectrique :

Les procédés de charge photovoltaïque sont principalement utilisés : ventilateurs, tubes tournants, lits fluidisés (créés par soufflantes ou compresseurs), micro-cyclones ou chargeurs statiques

## II . 1.2.1 Dispositif de charge à lit fluidisé:

L'un des procédés les plus utilisés pour recharger l'électricité. l'appareil contient sur un tube cylindrique isolant [22], en position perpendiculaire. Mélange de particules Il est posé sur un support, situé au fond du cylindre. Air La liquéfaction est produite par une soufflante fixée au fond du cylindre. Particules Les cellules fluidisées acquièrent des charges électriques de signes opposés par des collisions entre elles. L'action du lit fluidisé dans ces dispositifs est déterminée par six phénomènes [23]

### La vibration :

Pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le disperseur sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.

### Le bullage:

À une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage  $U_{mb}$ , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse permettant la distribution du gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide en ébullition.

### La formation :

le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques des fluides : ondes, petites bulles, viscosité) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation  $U_{mf}$ , le lit montre une certaine expansion de la couche, on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules

### Le renardage:

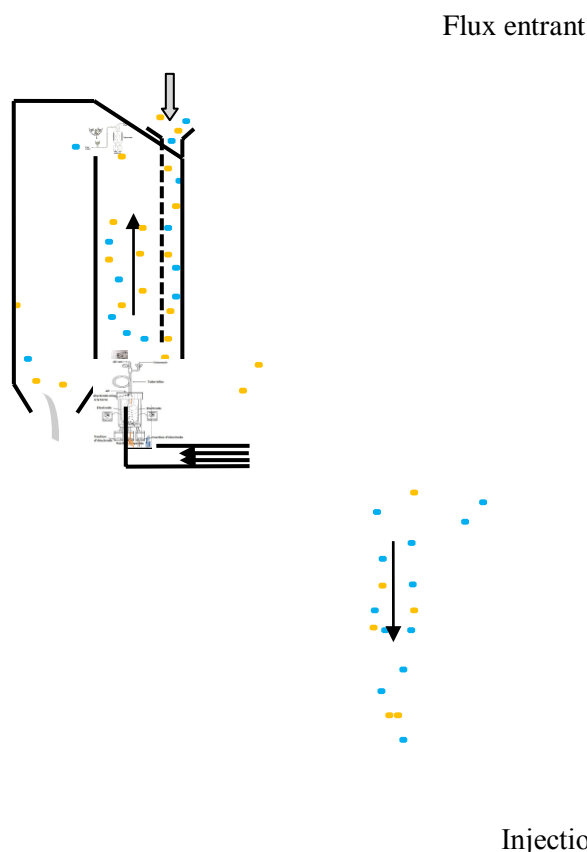
Les particules s'accrochent et créent des passages préférentiels pour le gaz.

### Le pistonnage :

En excès au-delà de  $U_{mb}$ , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière

### L'entraînement:

Quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos  $U_t$ , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation.

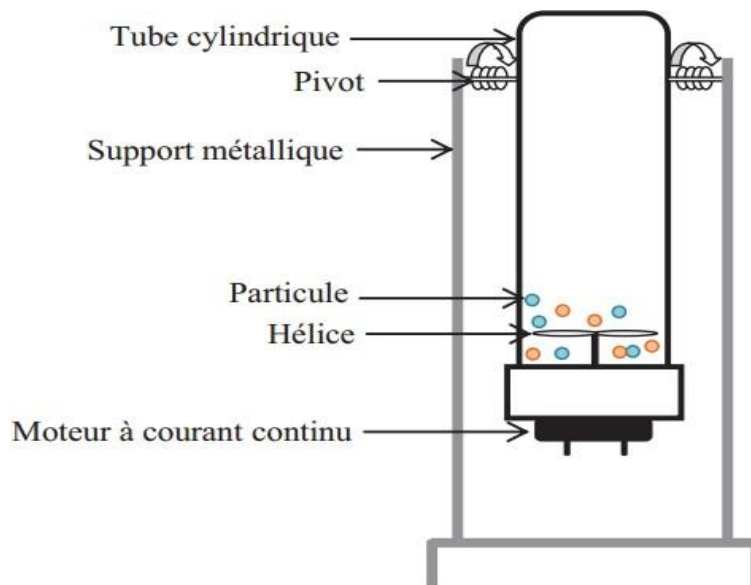


**Figure II . 3:** Représentation schématique de dispositif d'acquisition de charge électrique par lit fluidisé [24]

### II . 1.2.2 Dispositif de charge par ventilateur:

Les principaux éléments de cette installation sont (Figure II . 4) : le tube cylindrique isolant en PVC, le moteur à courant continu qui entraîne l'hélice isolante et le support métallique. Le dispositif utilise l'air ascendant qui donne naissance à des turbulences dans le tube contenant le mélange de particules, provoquant ainsi leur triboélectrification lorsque celles-ci entrent en collisions entre-elles ou avec les parois du tube. Le mélange chargé est récupéré en pivotant le cylindre sans procéder à l'arrêt du moteur afin d'éviter l'adhérence des

particules aux parois et permettre la récupération complète du contenu. Notons ici que le matériau du cylindre joue un rôle important dans ce mécanisme de charge et peut être choisi judicieusement en fonction du mélange à traiter, car le nombre de collisions entre particule-paroi est important à cause de la force centrifuge qui tente de projeter les particules entre les parois du dispositif [26]

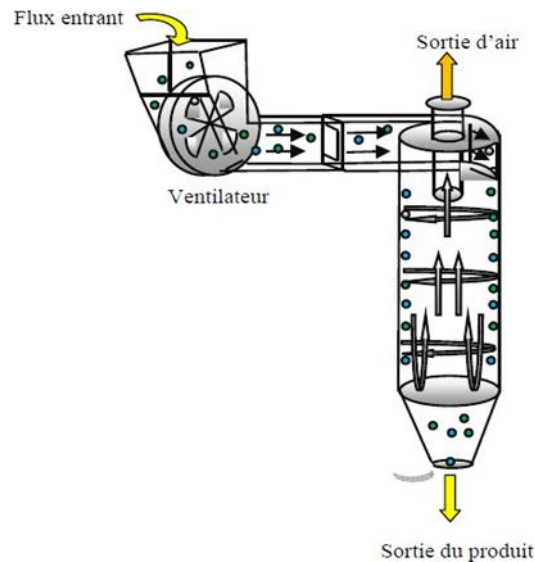


**Figure II. 4** : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur [27]

### II . 1.2.3 Dispositif de charge par cyclone

Le dispositif est constitué d'un cylindre isolant disposé en position verticale et un ventilateur dont la vitesse de rotation peut être modifiée (Figure.5) [28]. Il permet de souffler les particules à charger par frottement avec les parois internes du dispositif [29] [30]

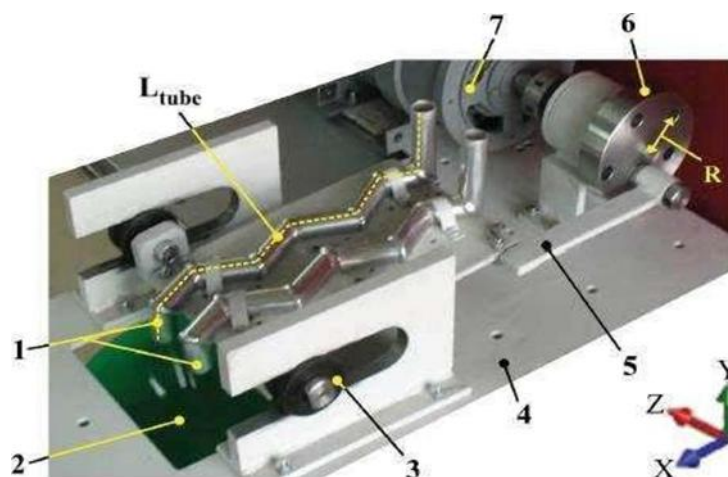




**Figure II . 5** : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [31]

### II . 1.2.4 Dispositif de charge par vibrations :

Une autre solution pour charger les particules est obtenue par le dispositif à vibrations [32]. Une installation de ce type a été développée par Blajan et al (Figur.6). Le matériau à charger glisse dans des canaux en zigzag mis en mouvement vibratoire, selon les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique et un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif. [33]



**Figure II . 6**: Dispositif à vibrations; 1: tubes de décharge, 2: sortie des particules chargées; 3

: Glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ; R : rayon ; X, Y, Z : direction du mouvement ;  $T_{\text{tube}}$ : longueur du tube [34]

### II .1.2.5 Dispositif de charge à cylindre rotatif

Le dispositif consiste en un tube isolant utilisé comme installation de chargement triboélectrique. Le mélange granulaire est mis en mouvement à l'intérieur du cylindre, qui tourne autour d'un axe horizontal légèrement incliné (Figure.7), les particules passent à travers le tube par la force de la pesanteur. Afin de créer l'agitation du mélange granulaire, dans le tube il y a des nervures faites de la même matière que le tube lui-même. Ils se prolongent radialement vers l'intérieur de la paroi du tube[35]. L'accumulation de la charge par les particules est due aux deux mécanismes: la collision entre particules et entre particules et la paroi du cylindre. [36] [37]

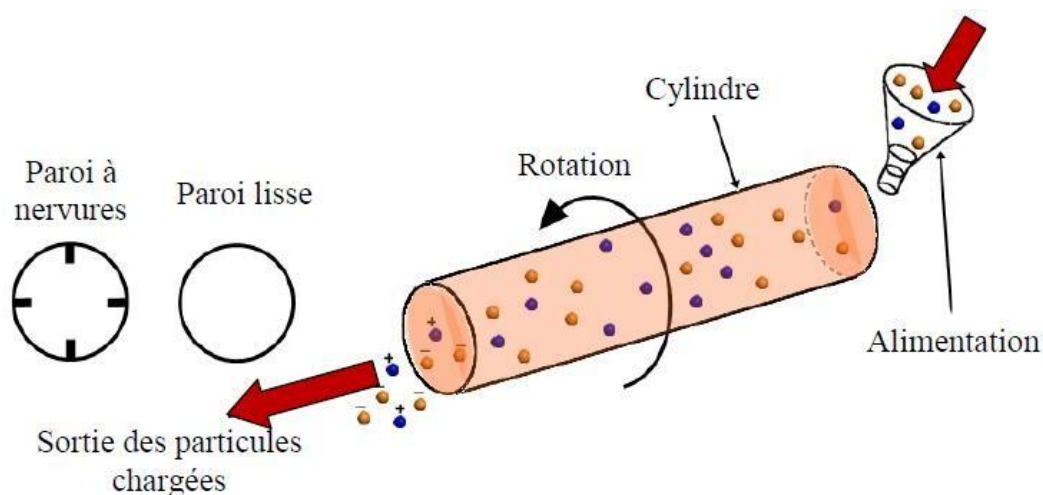
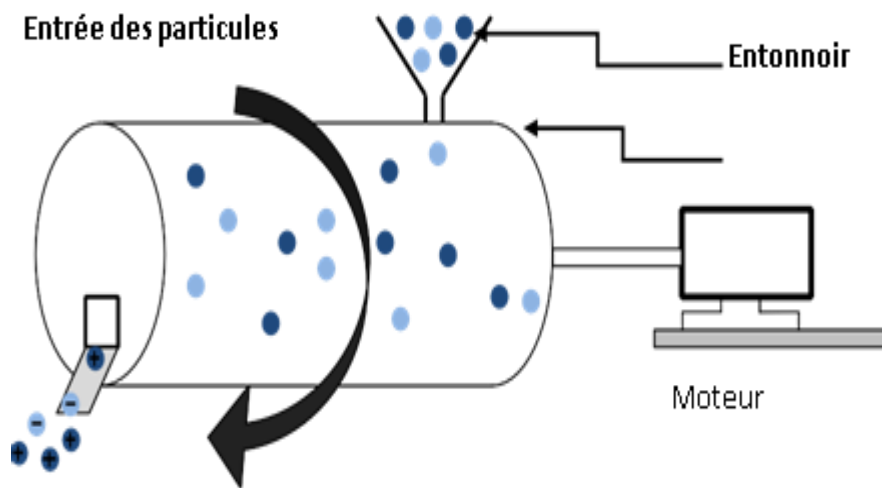


Figure . II .7 : Dispositif de chargement à cylindre rotatif. [38]

### II . 1.2.6 Dispositif de charge à tambour tournant:

Les dispositifs de chargement cités précédemment (vibrations, cyclones, lit fluidisé etc.) peuvent avoir dans certains cas deux inconvénients majeurs : la non-homogénéité de la charge et la formation d'agglomérats de particules fines. Dans un champ électrique intense, les particules qui ne sont pas suffisamment chargées sont mal déviées, et au lieu de tomber dans le compartiment qui leur est destiné, elles se retrouvent dans le secteur médian du collecteur, réduisant ainsi le taux de récupération des produits. Dans le cas où les agglomérats sont composés d'un nombre équivalent de particules chargées positivement et négativement, ils

sont quasi neutres et se comportent de façon similaire [39]. La situation est pire lorsqu'ils ont une charge globale positive ou négative. Ces agglomérats sont attirés par une électrode et altèrent la pureté des produits collectés, car ils contiennent des particules de différents types. Différents dispositifs ont été imaginés pour améliorer l'effet de la charge et éliminer les agglomérats. En faisant tourner un tambour équipé d'ailettes au niveau de sa surface intérieure] (Figure II. 8), il pourra fournir non seulement une plus grande probabilité de collisions particule-particule, en raison de l'agitation, mais aussi une plus grande surface de contact pour les collisions particule-paroi par rapport au modèle à surface interne lisse [40]



**Figure II.8:** tambour tournant [41]

### II. 1.2.7. Charge par décharge couronne :

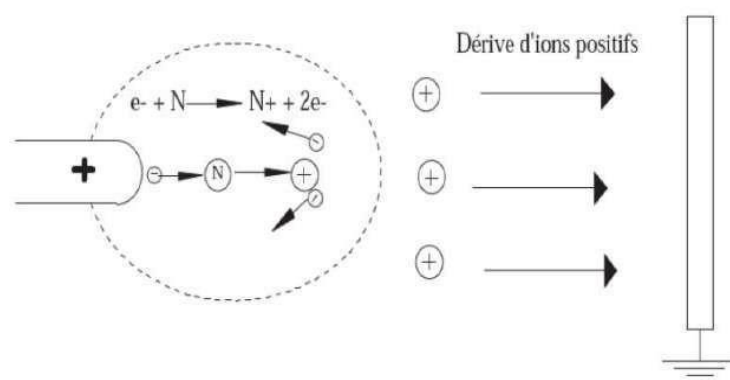
La création des charges sur la surface des isolants polymères peut être réalisée par plusieurs procédés : décharge couronne, triboélectricité, piézoélectricité ou par faisceaux d'électrons. Dans la plupart des applications électrostatiques actuelles, le chargement est réalisé soit par décharge couronne soit par triboélectricité, en raison de leur simplicité, sûreté et faible coût. La décharge couronne est une décharge autoentretenue non destructive qui peut apparaître lorsqu'une différence de potentiel suffisamment élevée est appliquée entre des électrodes asymétriques, tels que fil – plan ou pointe – plan. La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique inhomogène dans l'espace inter-électrodes. Au voisinage de l'électrode pointue, le champ peut être suffisamment élevé pour provoquer l'ionisation de l'air et les charges qui en résultent sont entraînées vers l'électrode à faible champ où se situe la

surface à charger. L'intervalle d'aire entre électrodes comporte deux zones : une zone ionisée et une zone de dérive

### II . 1.2.8. Décharge couronne positive :

La décharge couronne positive se produit quand l'électrode pointue est portée à un potentiel positif et la plaque reliée à la terre . Dans ce cas, des électrons sont produits par photo ionisation autour de la pointe où le champ est intense et sont accélérés vers l'anode (l'électrode de petit rayon de courbure). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieur au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque). Il existe différents régimes pour la décharge couronne. En augmentant la tension, la décharge couronne positive devient une décharge luminescente continue, cette

décharge se transforme en claquage si la tension est très élevée [43]. Lorsque *Figure .*

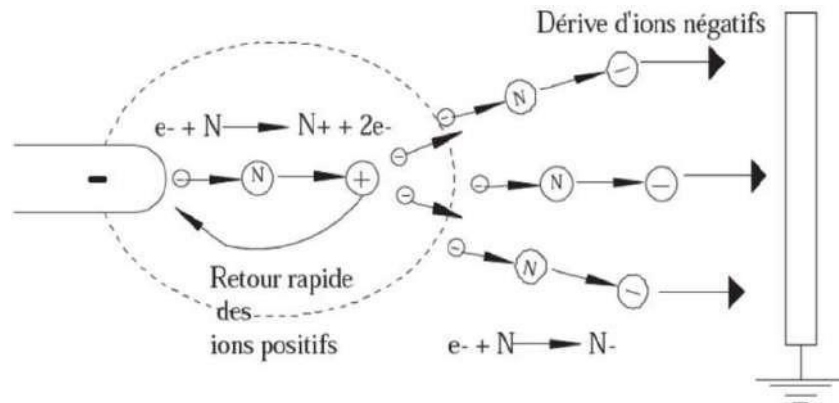


**Figure I.9 :** Description de la décharge couronne positive

### II . 1.2.9. Décharge couronne négative

La décharge couronne négative se produit quand l'électrode pointue est portée à un potentiel Négatif. Quelle que soit la polarité, il y a toujours création d'électrons. Dans ce cas, les ions positifs créés (dans la zone d'ionisation autour de la pointe) reviennent rapidement à la cathode. Tandis que, les ions négatifs sont repoussés par l'électrode sous tension vers la zone où le champ est plus faible (zone de dérive) et peuvent migrer vers la plaque reliée à la masse. En augmentant la tension, la décharge couronne négative atteint le régime d'impulsions de *Triche* à une fréquence qui dépend du courant moyen. Ces impulsions sont

régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. [44]



*Figure II . 9:* Description de la décharge couronne négative.

### II . 1.2.10. Décharge couronne alternative

En plus des décharges en régime continu, on peut également créer une décharge en régime alternatif en appliquant une tension sinusoïdale à la pointe. Dans ce cas, les processus de la décharge soumise à une excitation alternative sont identiques à ceux décrits pour une excitation continue, dans la mesure où l'intervalle de temps entre les inversions de polarité est suffisamment long pour que toutes les charges résiduelles de l'alternance précédente soient écoulées. Ceci implique l'existence d'une fréquence  $f$  et d'une distance inter-électrodes  $d$  limites

Avec  $\mu$  la mobilité des ions et  $E$  l'amplitude du champ électrique

Si l'excitation est supérieure à cette fréquence  $f_{max}$ , la charge d'espace va osciller et augmenter à chaque période entre les électrodes. Par contre, si la fréquence est inférieure à  $f_{max}$  la décharge

Couronne alternative se comporte comme en continu. Cet effet cumulatif aura pour conséquence des passages à l'arc pour des potentiels plus faibles qu'en continu. [45]

### II . 1.2.11. Charge par induction :

Le phénomène d'influence correspond à l'apparition de charges électrostatiques sur un corps conducteur dû à la proximité d'un corps déjà chargé, sans qu'il y ait contact entre les deux. En effet la [1] présence du corps chargé induit un champ électrique à l'intérieur du corps

influencé produisant ainsi des forces qui vont s'exercer sur les porteurs de charges libres, ayant pour conséquence une redistribution de ceux-ci. La charge ainsi induite sera de signe opposé à la charge du corps influençant.

En fait, en présence d'un champ électrique le matériau se polarise, une charge surfacique sera induite, dite de polarisation [46]

## II . 2. Forces aérodynamiques et électrostatiques :

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

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

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

### II . 2.A. Forces de la pesanteur:

Cette force de pesanteur est caractérisée par une origine : le centre de gravité G (ou centre d'inertie) du corps , e poids d'un objet est égal à la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre. une direction : la verticale passant par G, un sens : vers le bas et une valeur , un sens : vers le bas et une valeur  $P = m.g$  avec P en Newton (N), m en kg et  $g = 9.81 \text{ N.kg}^{-1}$  . [47]

### II . 2.B. Forces de London-Van der Waals:

Ce sont des forces attractives. Si l'on considère deux atomes éloignés de r, alors

La force d'interaction F [N] entre les moments dipolaires instantanés s'écrit :

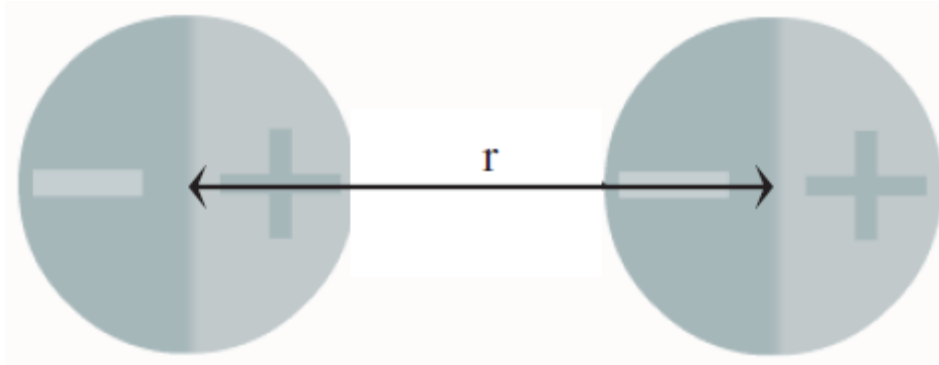
$$\mathbf{F} = -\frac{\alpha^2 4hc}{r^7 3\lambda_i}$$

Où  $\alpha$  est la polarisabilité de l'atome,  $hc\lambda_i$  l'énergie d'ionisation, tel que :

**h** : constante de Planck ;

**c** : vitesse de la lumière ( $\approx 3 \times 10^8$  m/s) ;

**$\lambda_i$** : longueur d'onde. **[48]**



*Figure II . 10:* La force attractive de London-Van der Waals

### II . 1.C.Force de Coulomb

Il a été découvert expérimentalement pour exprimer la force électrique agissant sur deux charges électriques stationnaires disposées sur des sphères. Coulomb se rend compte que le facteur de force électrique dépend des paramètres suivants :

- La force électrique est proportionnelle au produit des deux charges **q1** et **q2** en attraction ou en répulsion.

- La force électrique est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges **1/r<sup>2</sup>**.

- La force électrique est proportionnelle à une constante k afin d'évaluer la force électrique en newton.

Voici l'expression scalaire de la loi de Coulomb en électrostatique :

$$\mathbf{F}_e = \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

Où :

**F<sub>e</sub>** : Force électrique en newton (N) ;

**q1** : première Charge qui applique la force électrique sur la deuxième charge en coulomb (C) ;

**q2** : deuxième Charge qui applique la force électrique sur la première charge en coulomb (C) ;



$r$  : distance entre les deux charges ponctuelles en mètre (m) ;

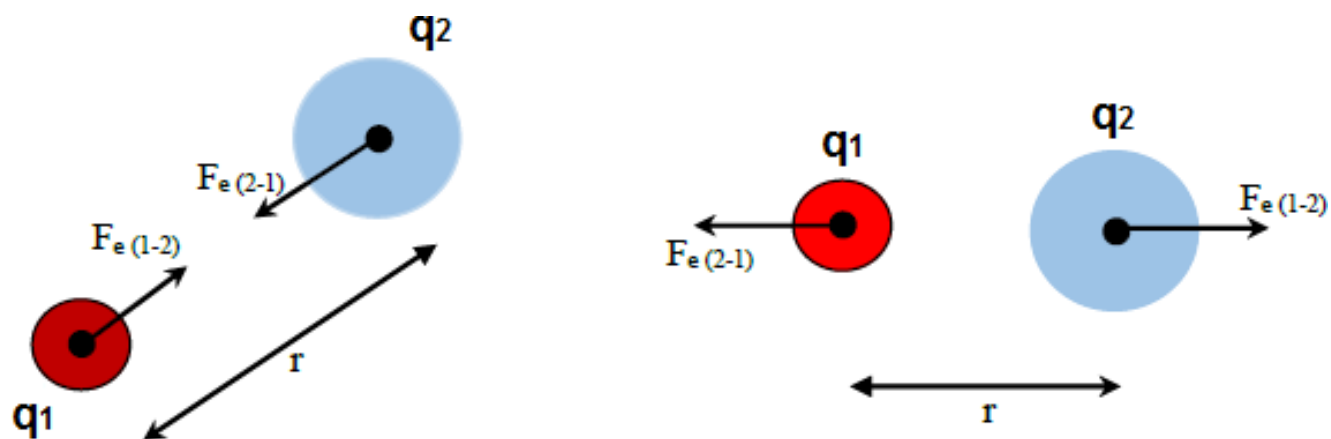
$K$  : Constante de la loi de Coulomb,  $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{c}^2$  et  $\epsilon_0$  étant la permittivité du vide. [49]

**Tableau II. 2** :Forces d'interaction électrostatique entre deux sphères chargées . [50]

Rayon (cm)	Forces (dynes)	Poids (g.cm/s <sup>2</sup> ); Densité =1
$10^{-4}$	$9 \square 10^6$	$4,1 \square 10^9$
$10^{-3}$	$9 \square 10^4$	$4,1 \square 10^6$
$10^{-2}$	$9 \square 10^2$	$4,1 \square 10^3$
$10^{-1}$	9	4,1
1	$9 \square 10^2$	$4,1 \square 10^3$

Entre deux particules de 1 $\mu$ m de diamètre, avec le même maximum de charges, s'exerce une force 1000 fois supérieure à celle de la pesanteur. En analysant les deux tableaux, on peut tirer les conclusions suivantes :

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



**Figure II. 11:** Force de coulomb entre deux sphères chargées. (a): attraction, charges de signes opposées ( $q_1q_2 < 0$ ), (b): répulsion, charges de mêmes signes ( $q_1q_2 > 0$ ).

### II. 2.C. Forces aérodynamiques :

Lors de l'étude de mouvement des particules dans un procédé de chargement triboélectrique en présence ou en l'absence de champ électrique, il faut étudier les forces aérodynamiques agissant sur ces particules.

Une particule chargée sous un champ électrostatique a pour équation de force la formule suivante:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_{el}(\mathbf{Q}, \mathbf{E}_0, \mathbf{x}) \pm \mathbf{F}_a - \mathbf{F}_g$$

où  $\mathbf{F}_i$  est la force d'inertie,  $\mathbf{F}_{el}$  est la force exercée par un champ électrique uniforme d'intensité  $\mathbf{E}_0$  sur une particule chargée, de charge  $\mathbf{Q}$ , située à une distance  $x$  de l'électrode.

$\mathbf{F}_a$  est la force aérodynamique et  $\mathbf{F}_g$  la force gravitationnelle.

La force d'inertie  $F_i$  est donnée par la relation:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{w}(\rho_s - \mathbf{K}\rho) \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

Où :  $v$  est la vitesse de particule,  $K$  est le coefficient de forme (pour les particules sphériques  $K = 0,5$ ),  $W$  est le volume d'une particule ayant la densité  $\rho_s$  et  $\rho$  la densité de l'air.

La force aérodynamique s'exprime par la relation:

$$c_d = \pi R^2 \rho \frac{V_r^2}{2}$$

où  $c_d$  est une constante en fonction du nombre du Reynolds,  $V_r$  est la vitesse relative d'une particule dans l'air.

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

$$F_f = -bv$$

où le signe négatif implique qu'il est directement opposé à la vitesse[51]

## II . d. Force diélectrophorétique

De nombreux travaux ont été effectués sur la force diélectrophorétique (DEP) agissant sur des particules allant des poussières aux cellules biologiques. Cette force s'exerce sur une particule non chargée dans un gradient de champ électrique. Elle est proportionnelle au volume de la particule ( $\propto d_p^3$ ) et au gradient du champ électrique qui lui est appliqué ( $\nabla E$ )<sup>2</sup>. Pour une sphère diélectrique de diamètre  $d_p$ , l'expression est :

$$\overrightarrow{AF_{DEP}} = \frac{\pi}{4} \epsilon_m d_p^3 k (\nabla \vec{E})^2.$$

La constante  $K$  est définie par :

$$K = \frac{\epsilon_s - \epsilon_m}{\epsilon_s + 2\epsilon_m}$$

Où  $\epsilon_s$  et  $\epsilon_m$  sont les permittivités respectives de la sphère et du milieu [52]

**Conclusion :**

Plusieurs travaux de recherche ont été effectués sur des dispositifs de chargement triboélectrique et des séparateurs triboélectriques des déchets d'équipements électrique et électronique, dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières. En effet, la triboélectricité est très complexe, mal interprétée et influencée par de nombreux facteurs externes et internes.