

I.1. Introduction

La séparation électrostatique est une technique non polluante appropriée pour le recyclage des matériaux granulaires préalablement chargés électriquement. Ce processus nécessite globalement deux étapes : une étape de chargement du mélange granulaire, puis, l'application d'un champ intense afin de séparer les particules selon leur signe de charge grâce à la force électrique.

I.1.1 Séparation électrostatique

I.1.2 Séparation électrostatique des DEEE :

Actuellement, les processus de séparation électrostatiques sont considérés comme les processus du premier choix dans le tri et la classification des mélanges granulaires en fonction de leur conductivité électrique. Cette technique utilise les forces qui agissent sur les particules chargées ou polarisées soumises à un champ électrique intense généré entre deux électrodes alimentées en haute tension. La tension des sources utilisées dans ce type de processus varie de 10 à 100kV DC. Dans n'importe quel processus de séparation électrostatique, il faut ajuster d'une façon appropriée l'intensité et la durée de l'application des forces électriques agissant sur les particules du mélange traité. Il est avantageux aussi, d'exploiter des forces mécaniques tel que la force gravitationnelle ; la force centrifuge et la force de frottement pour effectuer un tri sélectif [01]

Il existe plusieurs types de séparateurs électrostatiques, traitant différentes catégories de mélanges, ils sont présentés ci-après.

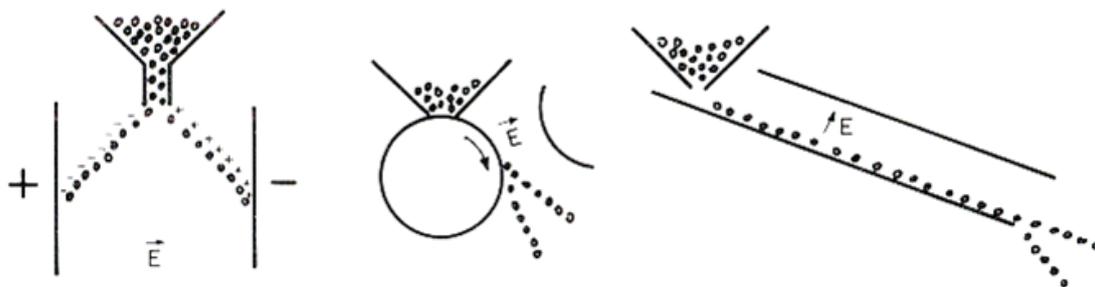


Figure I-1 : Installation utilisée dans la séparation électrostatique des mélanges granulaires ;[01] de gauche à droite : -a- séparateur à chute libre ; -b- cylindre tournant ; -c- à plaque inclinées

La figure (i1) nous présente des techniques importantes et de base commune utilisées dans le domaine de la séparation électrostatique. Ces figures (i . 1) nous ont montré la possibilité de contrôler indépendamment le système des forces électriques et spatiales appliquées aux particules du mélange granulaire. La distance entre les points de collecte et les particules de nature différente

est augmentée et ce type est exploité et utilisé dans la dans la séparation des mélanges qualifié en tant que : Conducteur/Conducteur ; Conducteur/Isolant et Isolant/Isolant

I.2.1. Exemple Séparation de matériaux conducteurs

Il n'ya pas eu beaucoup d'études sur ce sujet en raison de la difficulté de séparer deux conducteurs électriques en raison de la convergence de leurs propriétés électriques, cependant, et . ont étudié numériquement la séparation simultanée de particules isolantes, d'aluminium et de cuivre (de tailles sous-millimétriques) par un séparateur se rapprochant du séparateur à plaque (figure I.2)

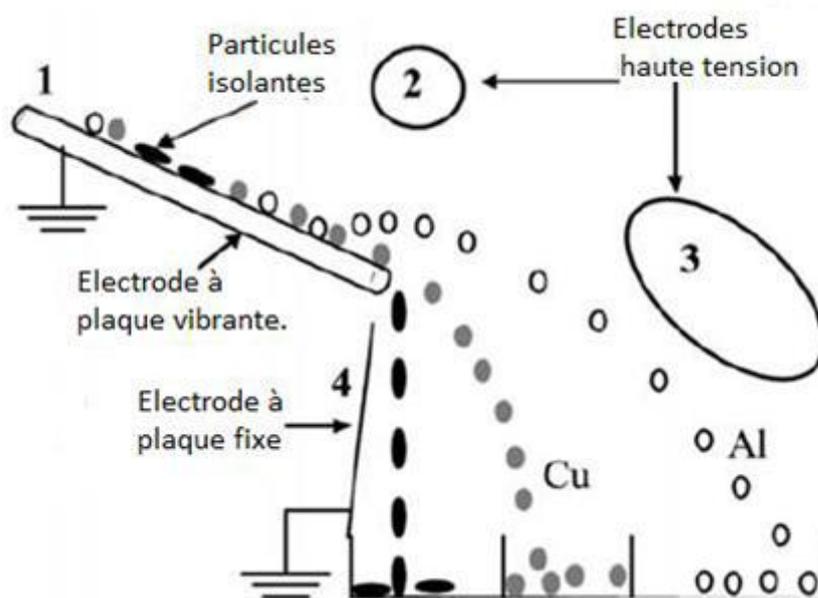


Figure I.2 : Représentation schématique du séparateur électrostatique (1) Plaque vibrante métallique reliée à la terre ; (2) Electrode cylindrique reliée à la haute tension ; (3) Electrode elliptique reliée à la haute tension ; (4) Electrode plaque reliée à la terre

I.3 Les différents types de séparateur électrostatique :

I.3.1 Séparateur à chute libre

La première configuration de base (figure I.3.) est connue en tant que séparateur à chute libre. La figure I.4 nous montre un dispositif réel de cette configuration utilisé comme un banc expérimentale exploité dans la séparation des mélanges granulaire Isolant/Isolant.

Dans cette installation les particules chargées différemment par effet triboélectrique sont introduit dans le séparateur par un entonnoir installé dans la partie supérieure du dispositif. Sous l'effet de leurs poids les particules tombent en chute libre dans une zone du champ électrostatique intense généré entre deux électrodes alimenté en haute tension.[02]

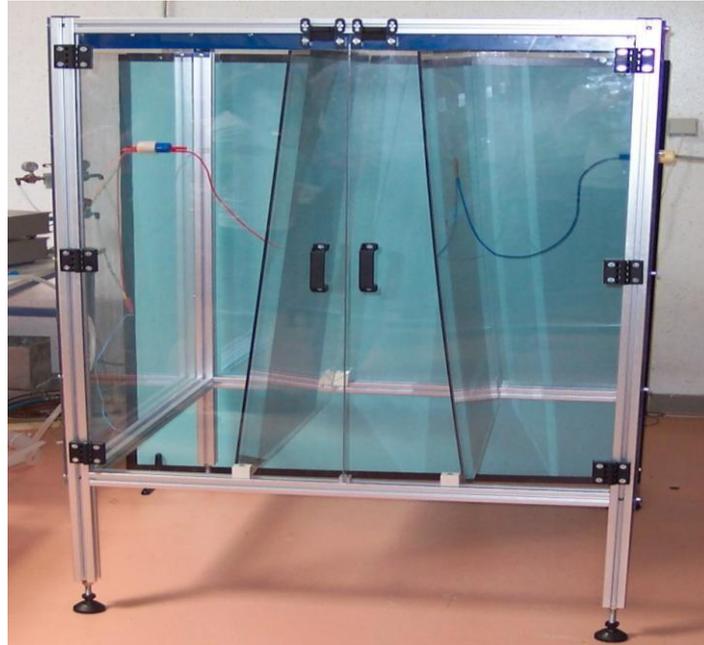


Figure I.3 : séparateur à chute libre [02]

Au cours de leur mouvement une particule chargée est soumise à plusieurs forces en même temps à savoir :

- (3/une force due à l'action de la gravité terrestre sur la masse de la particule \mathbf{F}_g (v-1) ;
- Une force électrostatique \mathbf{F}_{el} (v-2) due à l'action du champ électrostatique E sur la charge Q_{ac} qui se par la particule ;
- une force due à la réaction du milieu de séparation (c'est-à-dire l'air) sur les particules en mouvement \mathbf{F}_{air} ((V-3) (figure I.4) [03]

$$f_g = \left(\frac{3}{4}\right) \rho g \pi (r_p)^2 \quad \text{V.1}$$

$$F_e = Q E \quad \text{V-2}$$

$$F_{air} = \rho_{air} V^2 C_D \pi r^2 \quad \text{V.3}$$

Avec :

- Q la charge électrique portée par la particule ;
- E l'intensité du champ électrostatique ;
- ρ la densité volumique de la particule ;
- $\rho_{air} = 1.2 \text{ kg/m}^3$ la densité volumique de l'air ;
- v : la vitesse de la particule relative par rapport à la vitesse du milieu ;

- C_D : Coefficient de frottement qui est fonction du nombre de Reynold Re .

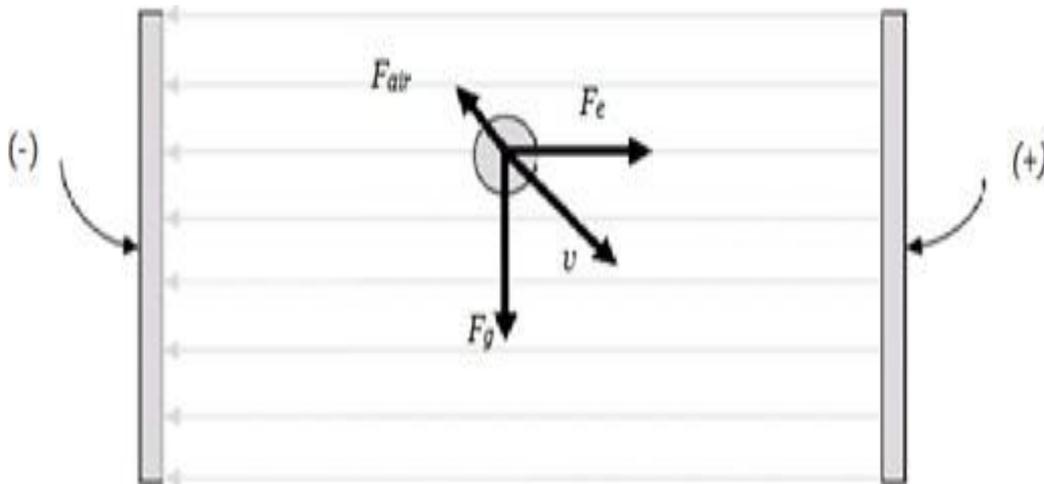


Figure I-4: forces agissent sur une particule chargée négativement sur un séparateur à chute libre [04]

Le déplacement horizontal de la particule par rapport à l'axe de symétrie de l'installation dépend de l'intensité et la durée de l'application de la force électrique. Donc, pour avoir un déplacement horizontal important on a deux possibilités différentes : la première consiste à augmenter l'intensité de la force électrique appliquée sur la particule par l'augmentation de l'intensité du champ électrostatique et/ou la charge acquise par la particule. La deuxième consiste à augmenter la durée de l'application de la force électrique par l'augmentation de la hauteur des électrodes. L'application de l'ensemble de ces solutions nous permet d'augmenter l'écart entre les points de collecte des particules chargé différemment. [04]

I.3.1.1 Fonctionnement d'un séparateur chute libre :

Ce séparateur est constitué de deux électrodes verticales situées dans une chambre isolante, et connectées à des alimentations en haute tension opposée, créant un champ électrique horizontal. Le mélange granulaire est chargé par la triboélectricité, il tombe ensuite dans la chambre de séparation dans laquelle le champ électrique va dévier la trajectoire des particules grâce à la force électrostatique, en attirant les particules positives vers la cathode et les particules négatives vers l'anode où ils sont collectés dans des bacs. Le type du séparateur à chute libre dû [05] au mode de chargement, sinon la deuxième partie de l'installation (la séparation) est la même, dont on distingue :

- Séparateur à chute libre à vibration en zig zag ,
- Séparateur à chute libre à cylindre tournant .
- Séparateur à chute libre à cyclone .
- Séparateur à chute libre à lit fluidisé

Nous présentons ci-dessous deux installations différentes de ce type de séparateur à lit fluidisé.

I.3.1.2.Première installation :

Le séparateur électrostatique de la figure I.5 (a), est utilisé par l'Institut National de la Recherche Agronomique de Montpellier (INRA), et a la particularité que les mélanges pulvérulents subissent un chargement triboélectrique dans un tube isolant, grâce à l'injection d'air par une soufflante. Une fois chargées, les particules sortent vers le séparateur à chute libre à travers un clapet commandé [05]

Les particules à l'alimentation (figure I.5(b)) vont se charger lors de leur convoyage à travers le tuyau de charge. L'air sec va permettre le transport à travers le conduit de charge et ainsi charger les particules par effet triboélectrique. Suivant le matériau du tuyau de convoyage (PVC, TEFLON, INOX), des particules différentes peuvent se retrouver avec des charges négatives ou positives, et vont ensuite passer dans une cellule de séparation dans laquelle un champ électrique va dévier la trajectoire des particules en mouvement, en attirant les particules positives vers la cathode et les particules négatives vers l'anode. Les particules vont ensuite être décantées dans un cyclone (centrifugation aérodynamique) et être collectées dans les baux de récupération.[06]

(a)



(B)

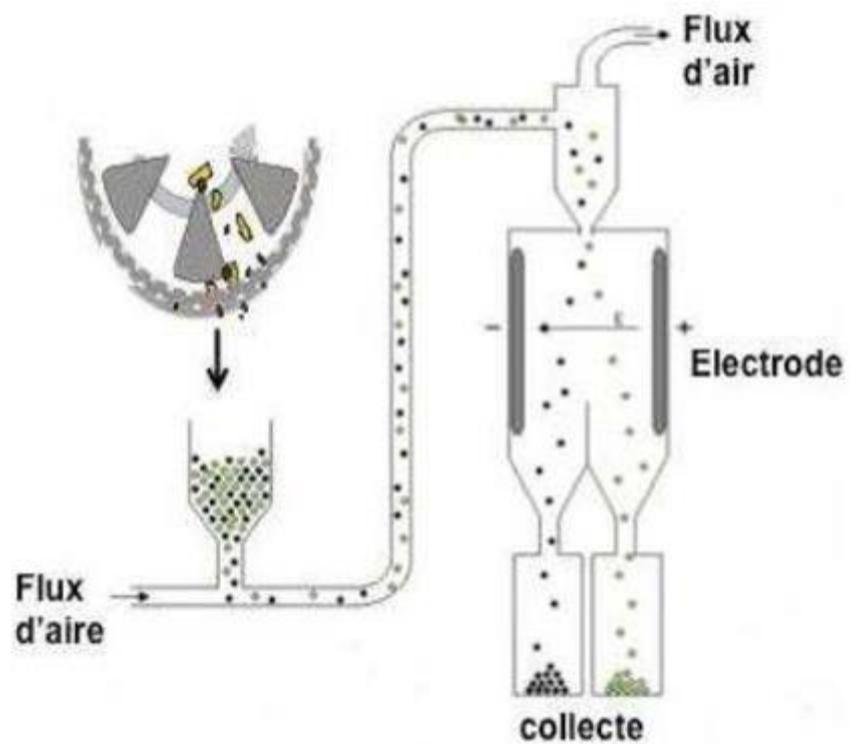


Figure I.5 : (a) Photographie et (b) Schéma descriptif d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique (INRA) [05]

I.3.1 .3. Deuxième installation :

Ce séparateur tribo-électrostatique, est constitué d'un entonnoir en verre qui sert à l'alimentation du matériau, d'un tube en Poly-tétra-fluoro-éthylène (PTFE) pour la charge triboélectrique, d'une chambre de séparation électrostatique avec deux électrodes plaques reliées à des alimentations en haute tension réversibles, et d'une autre électrode reliée à la terre (figure I.6) qui permet d'empêcher l'accumulation des charges dans le tube en PTFE. [07]

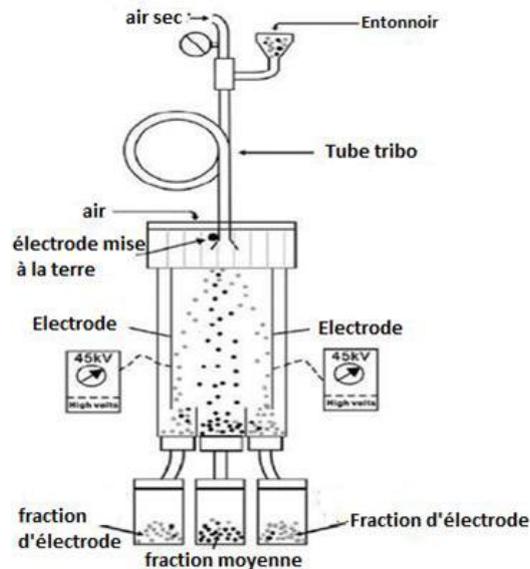


Figure I. 6: Schéma descriptif du séparateur tribo-électrostatique [07]

Lors de la séparation triboélectrique, les particules sont introduites dans l'entonnoir en verre à raison de 50 g/min et sont ensuite chargées par un dispositif triboélectrique en forme de tube où la circulation de l'air est de $3,0 \pm 0,05$ m/s. Des collisions vont être créées, particule-particule ou bien particule-paroi, ce qui leur permettra d'acquérir des charges électriques de signe opposé. Puis ces particules sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge.

Trois bacs de collecte sont situés à l'extrémité inférieure de la chambre de séparation, utilisés pour la récupération des particules, Les deux bacs situés à l'extrémité gauche et droite sont conçus pour collecter les particules déjà attirées par les deux électrodes et celui du milieu est destiné pour la collecte des particules qui n'arrivent pas à acquérir une charge suffisante [08]

I. 3.2. Séparateur chute libre triboélectrique

Le mélange granulaire est chargé par un des différents dispositifs de chargement triboélectrique, il tombe ensuite dans une zone inter électrodes où un champ électrique intense est créé par les électrodes reliées à des sources de haute tension de polarités opposées.. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode du signe

opposé à leur charge acquise. La figure (1.7) représente un séparateur à chute libre associé à un dispositif de chargement à cylindre tournant . [09]

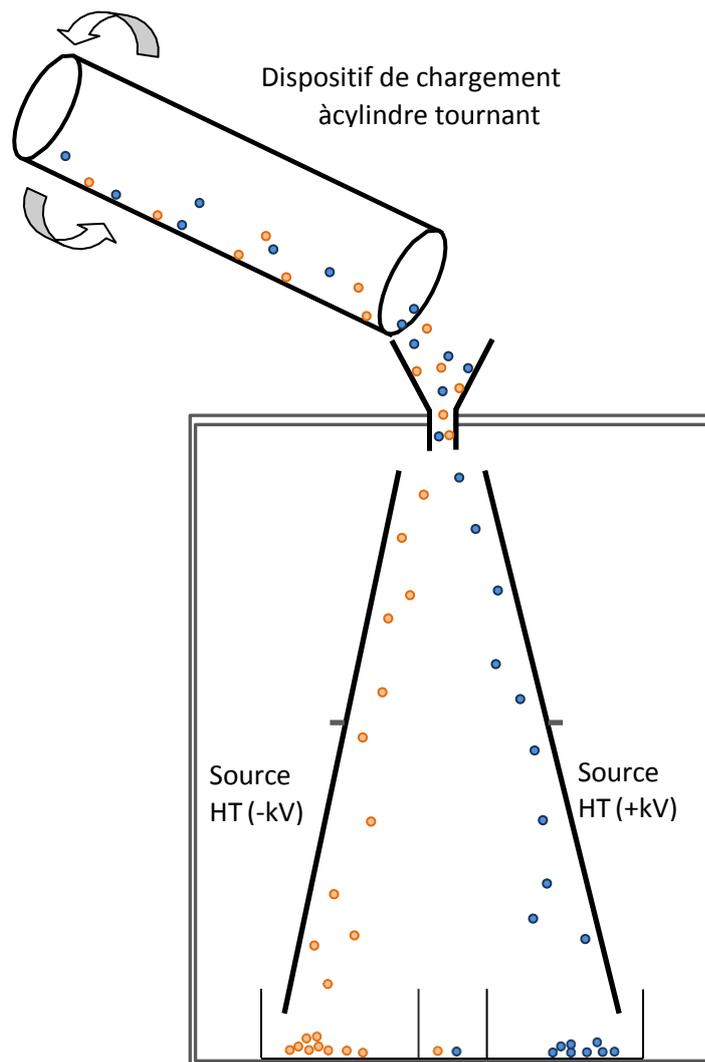


Figure I.7 séparateur à chute libre triboélectrique [09]

I.4. Séparateur électrostatique à convoyeur

Le séparateur électrostatique à convoyeur (figure I.8), conçu par l'Institut PPRIME, à Angoulême, France, il est capable de trier des matériaux micronisés. Pour cela, un des dispositifs de charge par effet tribo-électrique cités précédemment (lit fluidisé, ventilateur ou

Vibro-transporteur, etc.), viendra se positionner en amont du séparateur. Ainsi, après le chargement des particules, celles-ci sont déposées en monocouche sur la surface du convoyeur à

bande métallique (1) (longueur : 700 mm ; largeur : 70 mm), qui est connecté à la terre et entraîné en par un moteur (2) lui-même relié à un variateur de vitesse électronique

Même remarque pour (3) et (4) Une électrode cylindrique tournante (3) (acier inoxydable ; diamètre : 30 mm ; longueur : 70 mm) est connectée à un générateur de haute tension (4) réversible (positive ou négative) [10].

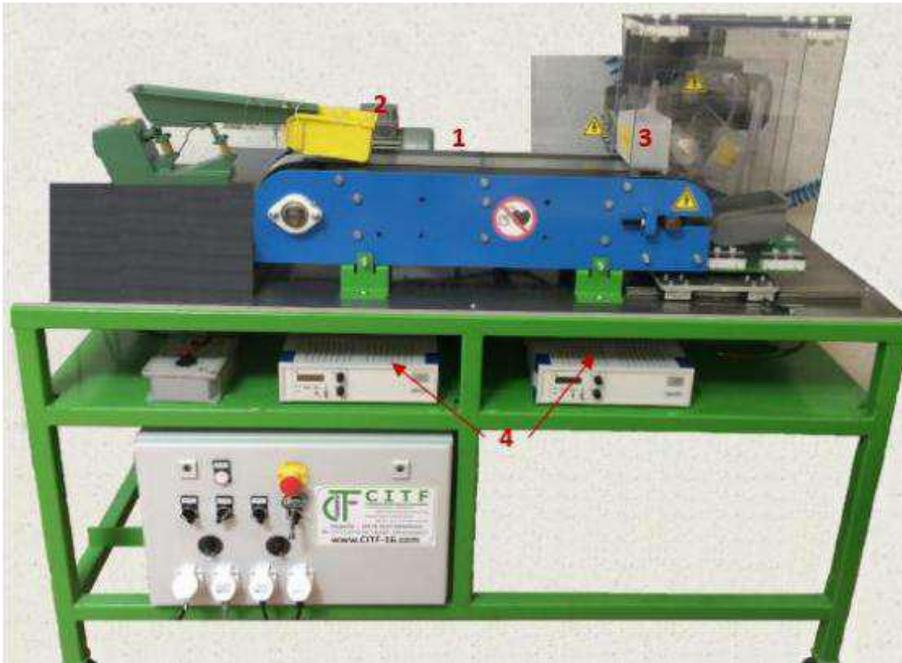


Figure I.8 : Séparateur électrostatique à tapis roulant (convoyeur métallique) [10]

Une zone de champ électrique intense est créée entre cette électrode et la bande métallique du convoyeur reliée à la terre (figure I.9). L'électrode haute tension attire les particules d'une polarité (produit B) et repousse les particules de polarité opposée (produit A), permettant ainsi la séparation. [10]

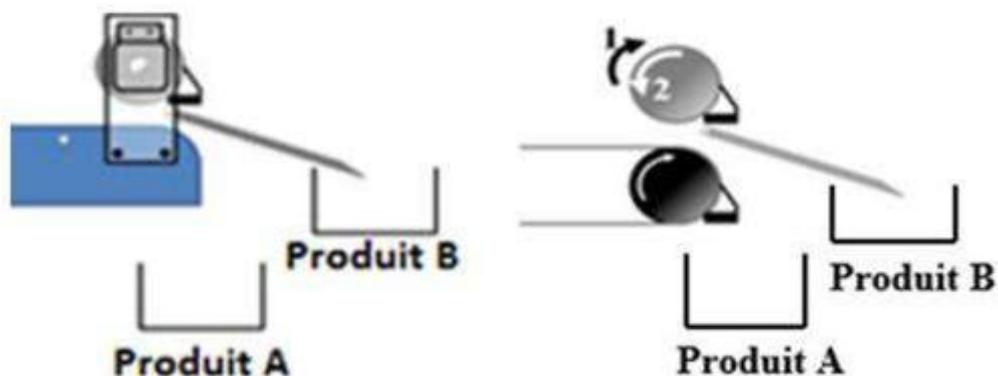


Figure I.9 Schéma descriptif du collecteur de produits. [10]

I.5. Séparateur à cylindre tournant

Dans cette étude est connue sous le nom du séparateur électrostatique a cylindre tournant (figure I.10). Dans cette installation le produit à séparer : est déposé d'une façon continue et uniforme par un vibro transporteur, sur la surface d'une électrode tournante relié à la terre. Cette électrode forme avec l'électrode couronne, une zone de décharge couronne ; et avec l'électrode statique, une zone de séparation électrostatique. Le produit déposé sur la surface de l'électrode tournante est entraîné par cette dernière dans les deux zones l'une après l'autre.

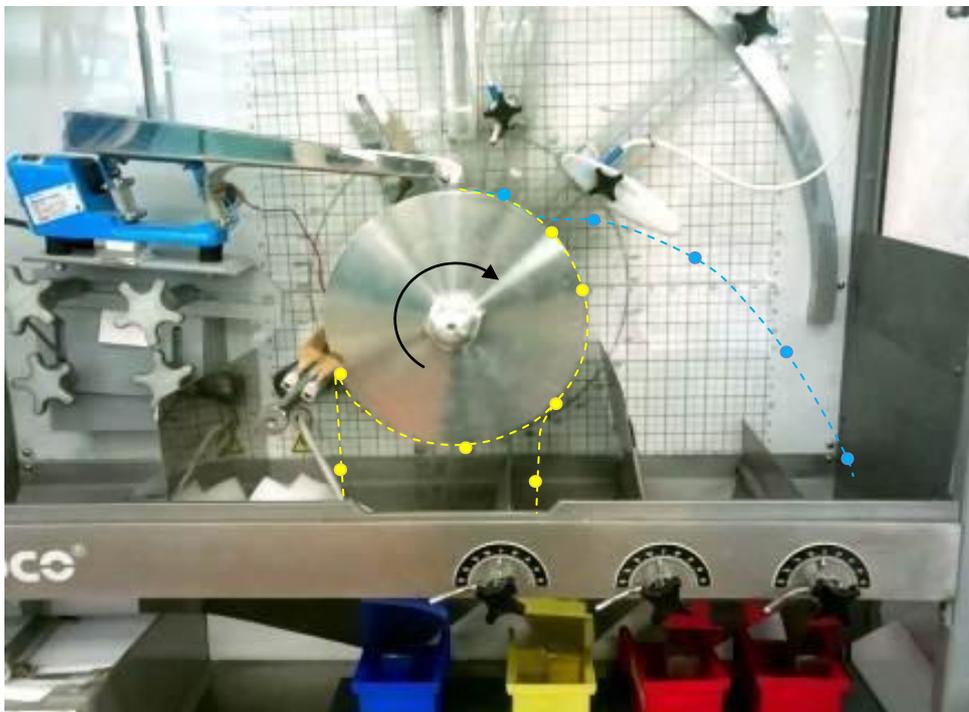


Figure I-10 : Trajectoire des particules dans un séparateur a cylindre tournant[11]

Dans la zone de la décharge couronne les particules du mélange granulaire sont exposés à un bombardement ionique. Seules les particules isolantes sont capables de maintenir la charge électrique acquise dans cette zone. La quantité de la charge acquise par une particule de forme sphérique peut être évaluée par la relation (v .4)

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{((Q-Q_{im})^2)}{\tau Q} \quad \text{v .4}$$

$$Q_{im} = 4(\epsilon_0)\pi r^2 \left[\frac{3\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \right] E \quad \text{v.5}$$

$$\text{ET} \quad \tau = 4 \frac{\epsilon_0}{\sigma_0} \quad \text{v.6 [12]}$$

Tel que ϵ_0 la permittivité de l'air ;

$\sigma_0 = J/E$ densité de la décharge couronne dans le point considéré ;

Les particules conductrices perdent rapidement la charge acquise par bombardement ionique à travers le cylindre mis à la terre. Entraîné dans la zone de séparation électrostatique ces particules se chargent par induction électrostatique et ils seront soumis à une force électrostatique F_{el} (v-7) qui contribue avec une force centrifuge F_c (V-7) pour projeter ces particules vers la partie droite du collecteur.

$$f_{el} = 0.832Q E$$

$$F_c = \left(\frac{4}{3}\right)w^2 \rho \pi R_{cylindre} R_p^3 \quad \text{V.8}$$

Tel que w et $R_{cylindre}$ représentent respectivement la vitesse angulaire et le rayon du cylindre tournant.

Les particules non conductrices chargées par bombardement ionique sont soumis à une force d'image F_i (v.8) proportionnelle au carré de leur charge. Dans le cas d'une particule sphérique, l'intensité de la force d'image peut être évaluée par la relation (v-9)

$$F_i = \frac{Q^2}{16\pi\epsilon R^2} \quad \text{V.9}$$

Avec($R= r$ et $R_p = r_p$)

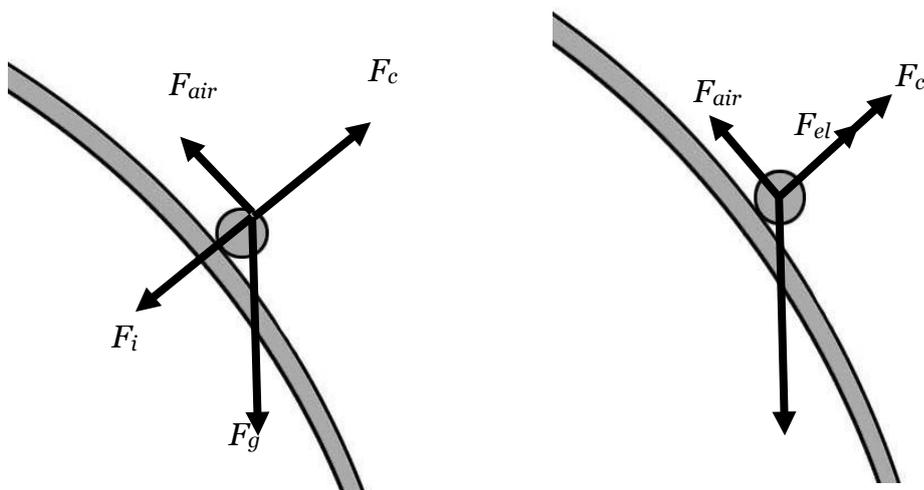


Figure I-11 : Forces agissant sur les particules conductrices et isolantes en contact avec le cylindre tournant[13]

Cette force permet aux particules d'adhérer à la surface du cylindre tournant au cours de sa rotation. Donc ils sont entraînés vers le côté gauche du collecteur là où leur force d'image est annulée par neutralisation naturel ou forcé de leur charge acquise par bombardement ionique. La figure I.13 nous montre la trajectoire des particules conductrice et isolante dans un séparateur électrostatique à cylindre tournant.



Figure I-12 : Trajectoire réel des particules dans un séparateur a cylindre tournant[14]

Nous nous concentrerons également principalement dans notre étude sur la catégorie de séparateur électrostatique à tapis roulant

Séparation électrostatique à tapis roulant

Conçu en 2009 au laboratoire IRECOM, le séparateur électrostatique à tapis est composé d'une bande transporteuse en néoprène, d'une longueur de 90 cm et une largeur de 15 cm.

La bande est entraînée par un moteur à courant continu pour un éventuel control de vitesse. A l'extrémité du tapis, est placée une électrode statique elliptique (axe 15 cm et 5 cm), alimentée à partir d'une alimentation à haute tension continue dont le rôle est de créer un champ électrique polarisé.

Le chargement triboélectrique des mélanges granulaires est assuré par le chargeur à ventilateur à flux descendants placé sur l'autre extrémité du tapis roulant. La difficulté de commande et de réglage des paramètres de l'électro séparateur réside dans le fait que la séparation électrostatique est un processus multifactoriel interdépendant, il est donc très important de formuler l'ensemble des paramètres qui ont une grande influence sur les critères de performance du dispositif. Les différents paramètres du séparateur électrostatique à tapis roulant sont principalement :

- La tension appliquée à l'électrode statique (elliptique).
- La position angulaire « α » de l'électrode statique.
- La position radiale « d » de l'électrode statique par rapport à l'extrémité du tapis.

Ce type de séparateur électrostatique a déjà fait l'objet d'une étude , qui a identifié les conditions de fonctionnement optimal suivantes : vitesse du tapis, 10 cm/s ; distance interélectrode, $d = 6.2$ cm ; haute tension appliquée, $U = 30$ kV; position angulaire de l'électrode haute tension $\alpha = 33^\circ$

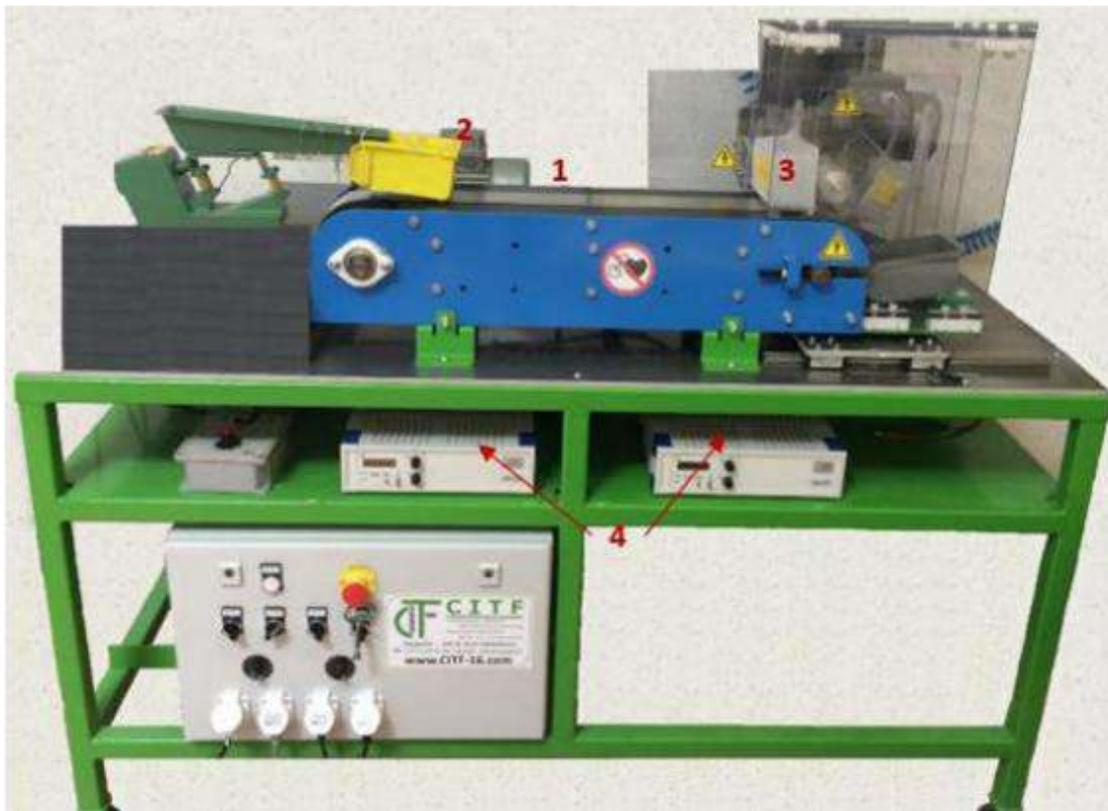


Figure I.13 : photo du séparateur à tapis roulant

Exemple séparateur a tapis roulant déferrent

I-2.1.1. Séparateur tribo-électrostatique à tapis roulant :

Le schéma de la Figure I-20 explique le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant TBS (Tribocharged Belt Separator) . Les particules sont triboélectrisées par un

dispositif de chargement statique, puis elles tombent sur un tapis roulant et sont transportées vers la zone de séparation. Les particules se séparent sous l'action des forces du champ électrique généré entre l'électrode haute tension et le tapis relié à la terre. Cette électrode attire les particules d'une polarité et repousse les particules de polarité opposée, grâce aux forces électriques de Coulomb, permettant ainsi la séparation [15]

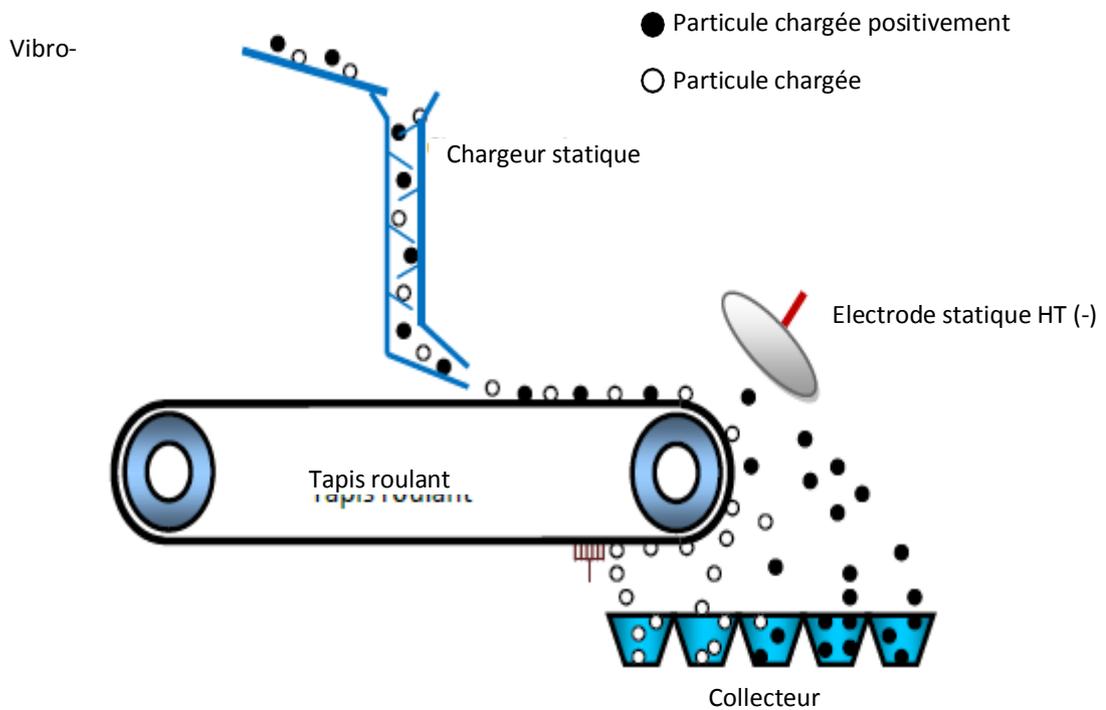


Figure I-14: Représentation schématique d'un séparateur tapis roulant TBS [15]

Conclusion

Nous avons rappelé dans ce chapitre, les différents types de séparateurs électrostatiques et leur fonctionnement. Ainsi il existe une multitude d'installations électrostatiques qui traitent différents types de mélange de matériaux granulaires et les déchets des équipements électriques et électroniques (DEEE).