

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'Electrotechnique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
Filière : Électrotechnique.  
Spécialité : Commandes Electriques.  
Thème

## Etude de simulation d'un séparateur électrostatique rotatif

Présenté Par :

- 1) Mr. CHAIBI MOUAADH
- 2) Mr. BENAHMED DAHO ABDERRAHMANE

Devant le jury composé de :

TOUHAMI Aicha	MAA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
YOUNES Mohamed	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent )	Examineur
ZELMAT Samir	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent )	Encadrant

Année universitaire 2021/2022

---

## Remerciements

*Avant de rédiger ce mémoire, je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué au bon déroulement de ma formation à l'université.*

*Au terme de ce travail Je veux aussi exprimer ma profonde gratitude à M<sup>re</sup>. Zalmat Samir pour son encadrement et pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant de diriger mon travail mais aussi pour ses conseils judicieux, ses suggestions pertinentes, son disponibilité et ses précieux conseils au cours de mon projet de fin d'études.*

*Il est indispensable de ne pas rater cette occasion pour exprimer ma gratitude et mon respect à tous les enseignants à l'université qui ont contribué à ma formation solide. J'espère que serai à la hauteur de cette confiance et je les remercie vivement pour la sollicitude qu'ils m'ont procurée et pour l'intérêt qu'ils ont accordé à mon travail.*

*Mes vifs remerciements vont également à mon binôme M<sup>re</sup>. BENAHMED DAHO ABDERRAHMANE et à mes camarades du groupe commande électrique de l'année universitaire 2021/2022.*

# Liste des figures

## Chapitre I: Notions Fundamentals sur l'électrostatique

<i>Figure I.1 : Expérience d'électrisation.</i> .....	03
<i>Figure I.2 : champ électrique produit par une charge</i> .....	04
<i>Figure I.3 : Lignes de champ électrique créées par des charge + (a)et – (b)</i> .....	05
<i>Figure I.4 : Lignes de champ créées par deux électrodes parallèles</i> .....	06
<i>Figure I.5 : Lignes Effet de pointe</i> .....	06
<i>Figure I.6 : mécanisme d'une décharge couronne</i> .....	07
<i>Figure I.7 : Représentation schématique d'un procédé de séparation électrostatique</i> .....	08
<i>Figure I.8 : l'effet couronne sur des particules conductrices</i> .....	09
<i>Figure I.9 : l'effet couronne sur des particules isolantes</i> .....	09
<i>Figure I.10 : Charge par influence ou induction</i> .....	10
<i>Figure I.11 : Transfert de charge à partir de la terre vers le corps</i> .....	11
<i>Figure I.12 : Charge triboélectrique de deux particules en contact</i> .....	11

## Chapitre II: Convoyeurs a ondes mobiles

<i>Figure II.1 : Convoyeur à ondes mobiles (à 4 phases)</i> .....	14
<i>Figure II.2 : Représentation schématique d'un convoyeur biphasé</i> .....	15
<i>Figure II.3 : Schéma descriptif de différents types de convoyeurs (biphasé et triphasé)</i> .....	16
<i>Figure II.4 : Schéma descriptif du convoyeur biphasé</i> .....	17
<i>Figure II.5 : Schéma descriptif du convoyeur triphasé</i> .....	17
<i>Figure II.6 : Schéma descriptif du convoyeur à quatre phases</i> .....	17
<i>Figure II.7 : Quelques exemples de convoyeurs à configuration 2D A) parallèles ou inter.. digitées, B) crénelées, C) obliques, D) matricielles, E) quadripôle, F)</i> .....	18
<i>Figure II.8 : Quelques exemples de convoyeurs à configuration 3D</i> .....	19
<i>Figure II.9 : Représentation schématique d'un séparateur</i> .....	20

**Chapitre III: Présentation du module étudié**

*Figure III.1 : Forme géométrique de l'électrode supérieure et inférieure..... 22*

*Figure III.2 : Présentation de l'axe de la coupe 2D..... 22*

*Figure III.3.a : Présentation d'une coupe 2D du convoyeur rotatif à ondes mobiles..... 23*

*Figure III.3.b : dimensions dans une vue en coupe du convoyeur. .... 23*

*Figure III.4 : Interface de logiciel flux 2D..... 24*

*Figure III.5 : Les étapes processus de Flux 2D. .... 25*

*Figure III.6 : Géométrie du modèle en 2D..... 25*

*Figure III.7 : Vue sur le menu des paramètres de maillage dans Flux 2D..... 26*

*Figure III.8 : Vue sur le maillage global de la géométrie..... 26*

*Figure III.9 : Maillage fin (350) sur les coins des électrodes..... 27*

*Figure III.10 : Menu des propriétés physiques dans Flux 2D..... 27*

*Figure III.11 : Menu Flux 2D des matériaux utilisés dans le model..... 28*

*Figure III.12 : Matériaux affectés aux faces du model..... 28*

*Figure III.13 : Menu Flux 2D de la région linéique..... 29*

*Figure III.14 : Tensions appliquées aux électrodes..... 29*

**Chapitre IV: Analyse de l'étude de simulation**

*Figure IV.1 : Mise en évidence de la zone étudiée du séparateur électrostatique..... 31*

*Figure IV.2 : Effet de bord aux deux extrémités de la géométrie..... 31*

*Figure IV.3 : La variation du potentiel électrique des dix électrodes centrale. .... 32*

*Figure IV.4 : Répartition des lignes équipotentiels sur les 10 électrodes centrales..... 32*

*Figure IV.5 : Les lignes équipotentiels se resserrent autour des coins des électrodes.. 33*

*Figure IV.6 : Chemin 1 utilisés pour tracer la variation du champ électrique..... 33*

*Figure IV.7 : Chemin 2 utilisés pour tracer la variation du champ électrique. .... 34*

*Figure IV.8 : Chemin 3 utilisés pour tracer la variation du champ électrique. .... 34*

*Figure IV.9 : Champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes..... 34*

*Figure IV.10 : Champ électrique dans l'isolant en bas des électrodes..... 35*

*Figure IV.11 : Champ électrique sur la surface entre l'isolant et le support..... 35*

*Figure IV.12 : Chemin tracé à l'intérieur du support..... 36*

*Figure IV.13 : Courbe de variation du champ électrique à l'intérieur du support..... 36*

*Figure IV.14 : Courbe de variation du potentiel électrique à l'intérieur du support..... 37*

# Liste des Tableaux et Acronymes

## Liste des tableaux

**Tableau III.1** *Permittivité relative des matériaux utilisés.*

**Tableau IV.1** *Le tableau qui rassemble les valeurs maximale du champ électrique en forme 2D et en forme axisymétrique.*

## Liste des acronymes

**$E^{\rightarrow}$**  : Champ électrique.

**FR4**: Le FR4 (abréviation de l'anglais Flame Retardant 4) est un matériau couramment utilisé pour la fabrication de circuit imprimé. C'est un composite de résine époxyde renforcé de fibre de verre.

**Kapton** : est un film de polyimide (polymère à base d'imide) développé par DuPont qui peut rester stable dans une plage étendue de température, de -269 °C à 400 °C.

**2D**: Un système de coordonnées cartésiennes permet de déterminer la position d'un point dans un plan.

# Sommaire

Liste des figures .....	I
Liste des tableaux et acronymes .....	II
Introduction générale .....	01

## **CHAPITRE I :**

### **NOTIONS FONDAMENTALES SUR L'ELECTROSTATIQUE**

I.1 Introduction .....	03
I.2 Phénomènes électrostatiques .....	03
I.2.1 Charge électrique .....	03
I.2.2 Notion de champ électrique .....	04
I.2.3 Vecteur de champ électrique .....	04
I.2.4 Lignes de champ électrique .....	05
I.3 Physique impliquée dans la séparation électrostatique .....	07
I.3.1 Effet couronne .....	07
I.3.2 L'induction électrostatique .....	10
I.3.3 Effet tribo-électrique .....	11
I.4 Séparation des matériaux pulvérulents .....	12
I.5 Conclusion .....	12

## **CHAPITRE II :**

### **CONVOYEURS A ONDES MOBILES**

II.1 Introduction .....	14
II.2 Technique des ondes mobiles .....	14
II.3 Convoyeurs à ondes mobiles .....	15
II.4 Types des convoyeurs à ondes mobiles .....	16
II.4.1 Le nombre de phases .....	16
II.4.2 La géométrie des électrodes .....	18
II.5 Applications industrielles de la technique des ondes mobile .....	19
II.6 Conclusion .....	20

## **CHAPITRE III :**

### **PRESENTATION DU MODULE ETUDIE**

III.1 Introduction .....	22
III.2 Présentation du logiciel Flux2D .....	24
III.3 Géométrie du modèle .....	25

III.4 Maillage .....	25
III.5 Paramètres physiques .....	27
III.5.1 Matériaux .....	28
III.5.1.1 Régions linéiques .....	29
III.5.1.2 Régions surfaciques .....	29
III.6 Conclusion .....	29

## **CHAPITRE IV :**

### **ANALYSE DE L'ETUDE DE SIMULATION**

IV.1 Introduction .....	31
IV.2 Distribution des lignes équipotentiellles .....	31
IV.2.1 Effet de bord .....	31
IV.2.2 Variation du potentiel électrique .....	32
IV.3 Calcul du champ électrique .....	33
IV.3.1 Création des chemins .....	33
IV.3.2 Champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes .....	34
IV.3.3 Champ électrique dans l'isolant en bas des électrodes .....	35
IV.3.4 Champ électrique à la surface du support .....	35
IV.3.5 Champ électrique dans le volume du support .....	36
IV.4 Comparaison des résultats avec un modèle axisymétrique.....	37
IV.5 Conclusion .....	39
Conclusion générale .....	41
Bibliographie .....	43
Résumé .....	44

***INTRODUCTION  
GENERALE***



# Introduction générale

Le monde industriel a vite évolué avec les nouvelles technologies dans différents domaines, la création de nouvelles techniques telle que la séparation électrostatique. Cela a permis donc la transformation de tous produits pour en donner d'autres afin de satisfaire le besoin de l'homme. De là, le procédé de séparation électrostatique représente une technologie économique, moins coûteuse, viable surtout pour la préservation de l'environnement car elle offre une meilleure efficacité pour la récupération des matériaux par rapport aux méthodes conventionnelles du traitement des déchets comme les déchets d'équipements électroniques, câbles électriques défilants etc.....

Nous insistons dans ce projet sur la simulation d'un séparateur électrostatique rotatif à savoir l'effet de pointe qui provoque un claquage électrique entre les électrodes de séparateur ce qui nous permet de déterminer le type d'isolant qu'on doit adapter au séparateur. Pour cela, il faut absolument calculer la valeur du champ électrique dans le convoyeur à ondes mobiles afin de s'assurer du concept tout en évitant le risque de claquage entre les différentes électrodes du séparateur.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres, commençant par des rappels de champ électrostatique d'une manière générale ainsi que les différentes techniques de chargement des particules granulaires. Dans le deuxième chapitre, on a présenté les convoyeurs à ondes mobiles en citant leurs définitions et leurs différents types ainsi que leur principe de fonctionnement. Dans le troisième chapitre on a présenté notre modèle de simulation 2D réalisé avec le logiciel «Flux2D» et on a expliqué les étapes qui ont servi à la création de sa géométrie ainsi que son maillage. Enfin, le dernier chapitre présente l'analyse des résultats de calculs réalisés par le logiciel « Flux 2D ». En effet, ce mémoire a pour but aussi de comparer les résultats déjà obtenus auparavant selon la simulation en axisymétrique.

**CHAPITRE I:**  
***NOTIONS FONDAMENTALES***  
***SUR L'ELECTROSTATIQUE***

## I.1 Introduction:

La séparation électrostatique est une nouvelle technique qui permet de séparer les matériaux granulaires issus des déchets industriels qui ont une nature électrique différente. Malgré que l'électrostatique relève d'une ancienne discipline de la physique. Cette science nous facilite également l'étude des forces électriques agissant sur les particules qui sont chargés ou polarisés, ainsi le calcul du champ électrique.

Dans ce premier chapitre, on décrira les notions de l'électrostatique et l'étude des interactions électriques entre des charges constantes et immobiles ainsi les principaux phénomènes physiques impliqués dans la séparation électrostatique.

## I.2 Phénomènes électrostatiques:

### I.2.1 Charge électrique :

Faisant approcher un bâton de verre après qu'on a soigneusement passé la main ferme sur toute sa surface, à un ensemble de coupures de papier, rien ne peut être observé. Mais si on frotte ce bâton de verre avec une peau de chat ou de soie, l'attraction des coupures de papier devienne particulièrement visible. Cela nous montre que le bâton est chargé par frottement. On observe que deux corps frotté par le même objet se repousse, tandis que dans le cas contraire s'attirent. On décrit dans ce phénomène que l'un des deux objets a absorbé des électrons périphériques de l'autre, donc le deuxième a acquis par conséquent une charge positive. Par conclusion, les corps portant des charges de mêmes signes se repoussent, ceux qui portent des charges opposées s'attirent. Cette classification revient au physicien **Benjamin Franklin (1706-1790)** : « Deux corps qui portent une charge électrique de même signe se repoussent, et s'attirent s'ils portent deux charges électriques de signes contraires » [1].

#### I.2.1.1 Expérience fondamentale :

On suspend à un fil une boule faite de sureau ou de polystyrène par exemple (Figure I.1). On fait approcher à cette boule une tige de verre ou d'ambre préalablement frottée donc les deux tiges chacune de son côté attire puis repousse juste après l'avoir touché ce qui nous explique qu'une force mécanique d'origine électrique est apparue.

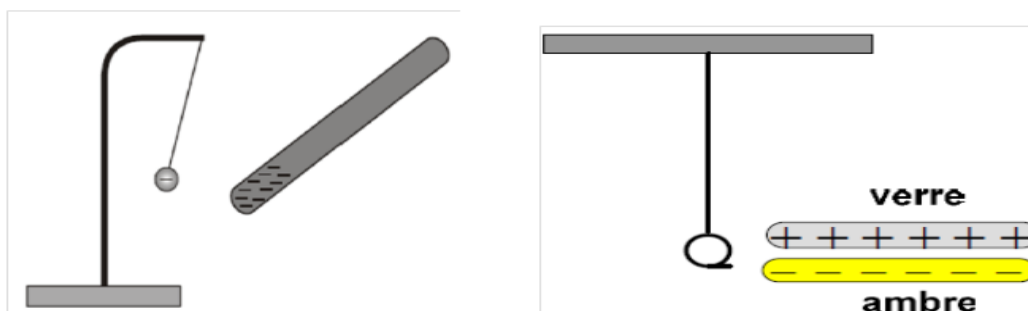


Fig I.1- Expérience d'électrisation [1].

Nous déduisons de cette expérience que ces matériaux ont acquis une nouvelle propriété qu'on appelle « électrisation ». Cette propriété crée une attraction beaucoup plus intense que l'attraction universelle produite entre deux masses. Les physiciens décrivent et expliquent cette propriété par la notion de champ électrique.

### I.2.2 Notion de champ électrique :

Le fait que deux charges voisines sont soumises à deux forces d'attraction ou de répulsion nous entraîne à dire que toute charge électrique modifie les propriétés physiques du champ spatial qui l'entoure. Autrement dit cette modification explique que toute charge électrique crée dans son champ spatial un champ électrique.

### I.2.3 Vecteur de champ électrique :

Une particule chargée électriquement ( $m, q_0$ ) est placée en un point  $M$  où règne un champ électrique créé par une autre charge ( $M, Q$ ). Elle serait soumise à une force électrique  $\vec{F}$  qui dépend de la valeur de la charge  $q$ . (Figure I.2).

Selon la loi de Coulomb, cette force est proportionnelle à la charge  $q$ .

$\vec{F}/q$  est constant au point  $P$ .

Le vecteur champ électrique en  $P$  est défini par :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1.1)$$

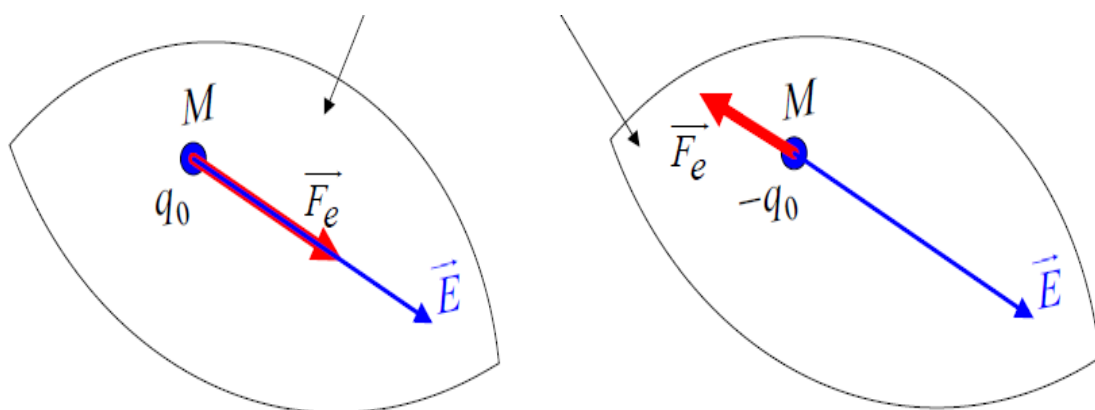


Fig I.2- Champ électrique produit par une charge ponctuelle [1].

### I.2.4 Les Lignes de champ électrique :

Une ligne de champ est une courbe tel que chacun de ses points défini le champ électrostatique indiqué par une tangente à la courbe. Puisque le champ électrique est un phénomène microscopique qui est représenté par une infinité de lignes de champ dans l'espace. Pour cela ils ont crée une simulation d'approche pour identifier les lignes de champ dans chaque point de l'espace. On oriente chaque ligne de champ dans le sens du vecteur. Les lignes de champ s'éloignent des sources chargées positivement et se dirigent vers les sources chargées négativement. La figure I.3 explique brièvement la convergence et la divergence des lignes de champs qui entourent des particules chargées différemment.

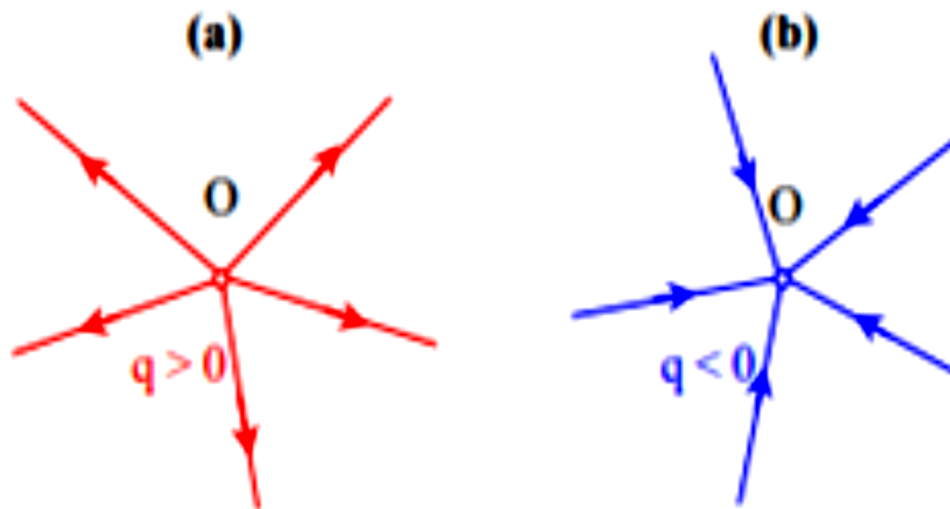


Fig I.3- Lignes de champ électrique créées par des charge + (a) et - (b) [2].

#### I.2.4.1 Propriétés des lignes de champ électrique :

- Les lignes de champ ne se coupent jamais.
- Les lignes de champ sont orientées dans le sens du champ électrique  $\vec{E}$ .
- La direction du champ  $\vec{E}$  en un point est tangente à la ligne de champ.
- L'intensité du champ  $\vec{E}$ , notée  $E$ , est proportionnelle à la densité des lignes de champ.
- Si le champ électrique est créé par des conducteurs chargés, les lignes de champ sortent et entrent perpendiculairement sur leurs surfaces. Ces lignes peuvent être observées par l'orientation des grains de semoules polarisés sous l'effet d'un couple de charges ( $q_1 < 0; q_2 > 0$ ). En effet, dans un espace entre deux électrodes différemment chargées, les grains se polarisent sous l'effet du champ électrique créé par le couple de charges, cette polarisation électrique les fait orienter selon la force exercée, ainsi elle prend des lignes appelées spectre électrique.

On peut déterminer dans un système d'électrodes chargées planes et parallèles, un spectre uniforme. Cette uniformité ne touchera que l'espace interne du système car un effet de bord qui influencera les lignes du champ les faisant courber vers l'extérieur (Figure I.4).

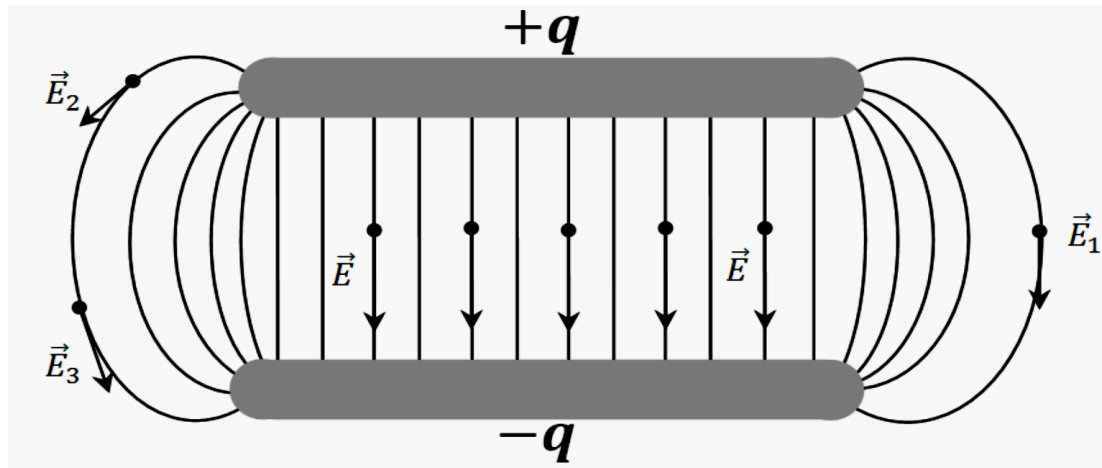


Fig I.4- Lignes de champ électrique créées par deux électrodes parallèles [1].

Une charge ponctuelle crée un champ radial, au voisinage d'une pointe, les lignes de champs se resserrent donnant naissance à un champ électrique intense qu'on appelle physiquement effet de pointe. C'est en ce voisinage que le courant est intense (Figure I.5).

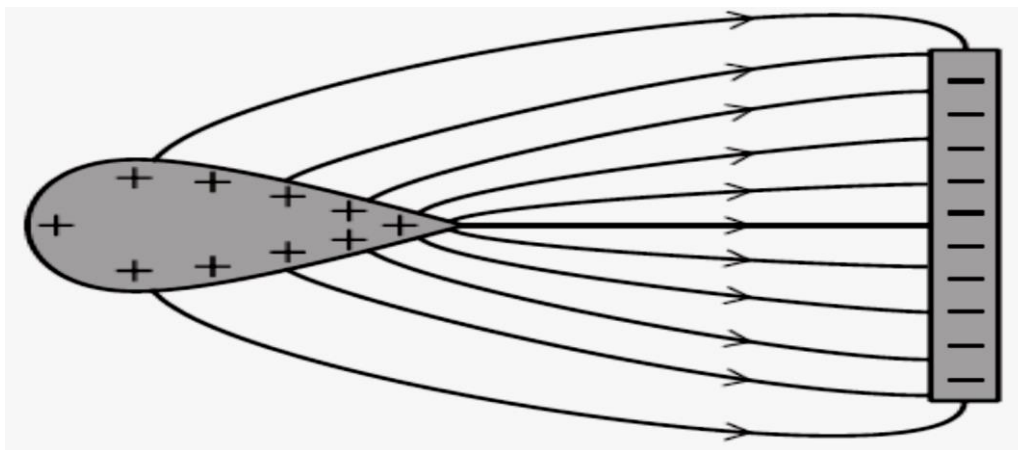


Fig I.5- Effet de pointe [1].

### I.3 Physique impliquée dans la séparation électrostatique :

La séparation électrostatique d'un mélange de matériaux pulvérulents est possible si les constituants de celui-ci portent des charges électriques différentes. Ces charges peuvent être engendrées par trois mécanismes physiques différents. Il s'agit de l'effet couronne, de l'induction électrostatique et de l'effet tribo-électrique [3].

#### I.3.1 Effet couronne :

L'effet couronne est lié à l'ionisation de l'air au voisinage d'un champ électrique intense créé entre deux électrodes métalliques : une électrode dite active, généralement sous la forme d'une pointe ou d'un fil de petit diamètre, qui est reliée à une alimentation haute tension de plusieurs milliers de volts, et une autre source passive est une plaque métallique ou une grille reliée à la terre. A proximité de l'électrode active (Figure I.6), la tension varie fortement sur une courte distance, créant un fort champ électrique chargé d'accélérer les quelques électrons produits par l'ionisation naturelle de l'air. Des avalanches d'électrons se produisent à proximité de l'électrode active, quelle que soit sa polarité [3].

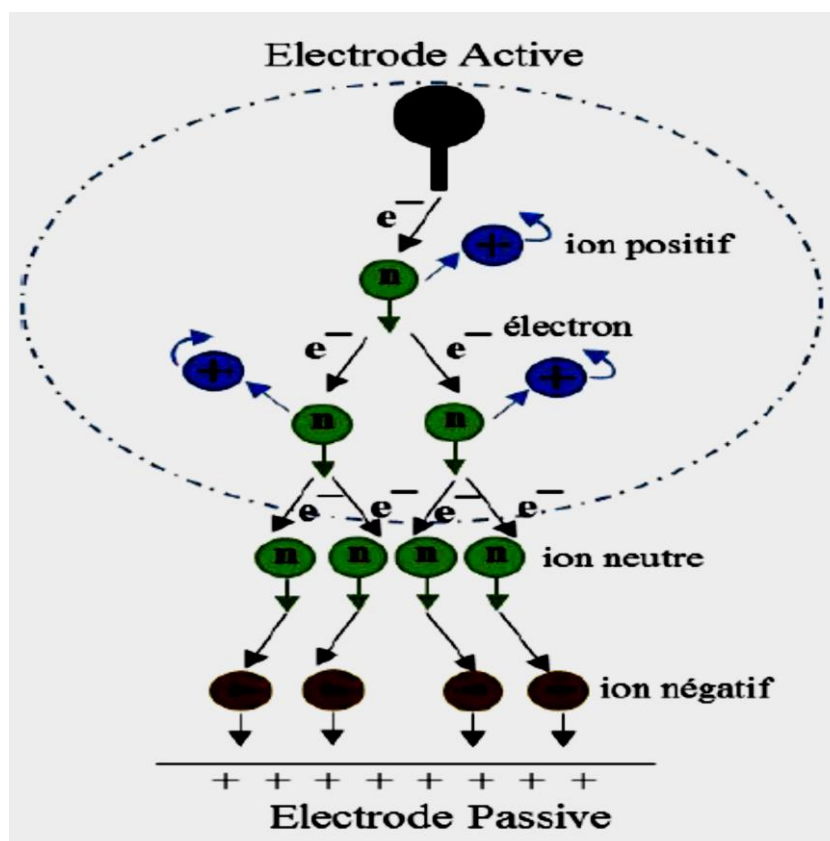


Fig I.6- Mécanisme d'une décharge couronne [3].

Les électrons libérés vont se heurter aux molécules d'air, donc ils facilitent la libération d'un ou plusieurs électrons. Ces derniers vont continuer leur trajet vers l'électrode passive, de polarité opposée, vers laquelle ils sont attirés, tout en heurtant d'autres molécules de gaz et ainsi, en multiplient leur nombre. Ces molécules deviennent positifs quand elles se libèrent un électron. De cette façon, elles regagnent un électron et redeviennent neutres. Ce phénomène est délimité dans l'espace (quelques micromètres de l'électrode) dans une zone caractérisée par une forte intensité du champ électrique : la zone d'ionisation. Au-delà de cette dernière, le champ électrique n'est plus suffisamment fort pour que les électrons aient assez d'énergie pour heurter les molécules d'air de façon à ce qu'elles cèdent un autre électron. Ils vont alors s'associer aux molécules d'air et former des ions négatifs. Ces ions entrent en contact avec les particules et leurs durées de vie sont suffisamment longues pour que la séparation des matériaux ait lieu. Les particules, soumises au flux ionique, vont se charger négativement. Lors de l'utilisation de l'effet couronne comme mécanisme de charge pour la séparation électrostatique des mélanges isolant/conducteur (Figure .I.7) les particules sont positionnées sur la surface de l'électrode passive et acquièrent des charges positives ou négatives selon la polarité de l'électrode active qui produit un nuage ionique mono-polaire [3].

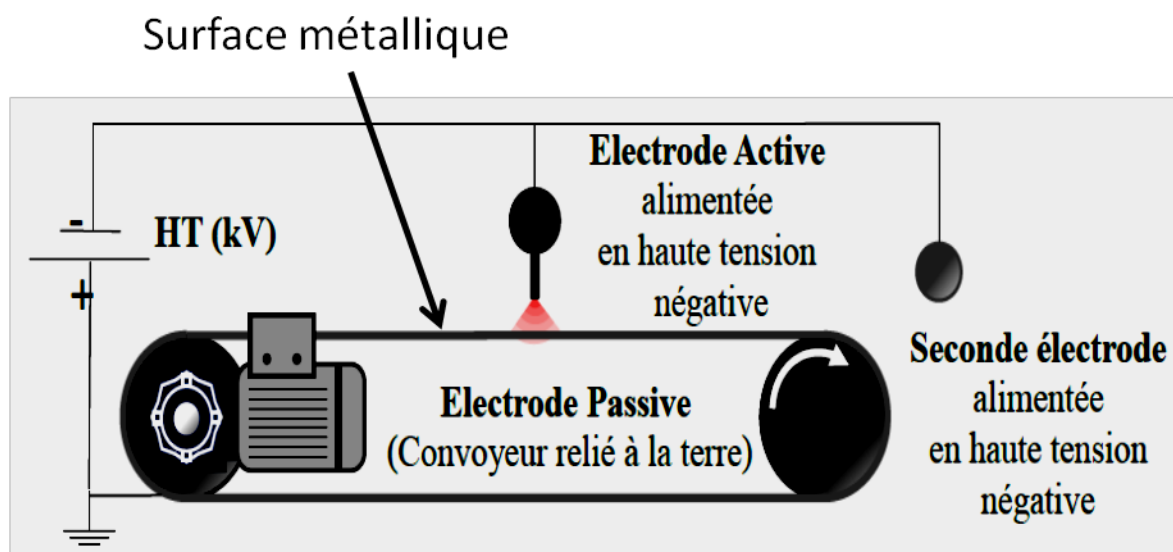


Fig I.7- Représentation schématique d'un procédé de séparation électrostatique [3].

Les particules vont acquièrent une charge ionique, cependant ces mêmes particules perdent cette charge au premier contact avec la terre et redeviennent neutre (Figure. I.8. a, b, c, d). Hors les particules isolants la gardent plus longtemps et permettent la séparation de l'isolant du conducteur (Figure. I.9. e, f). Des particules, et justifie son utilisation dans plusieurs installations électrostatiques [3].



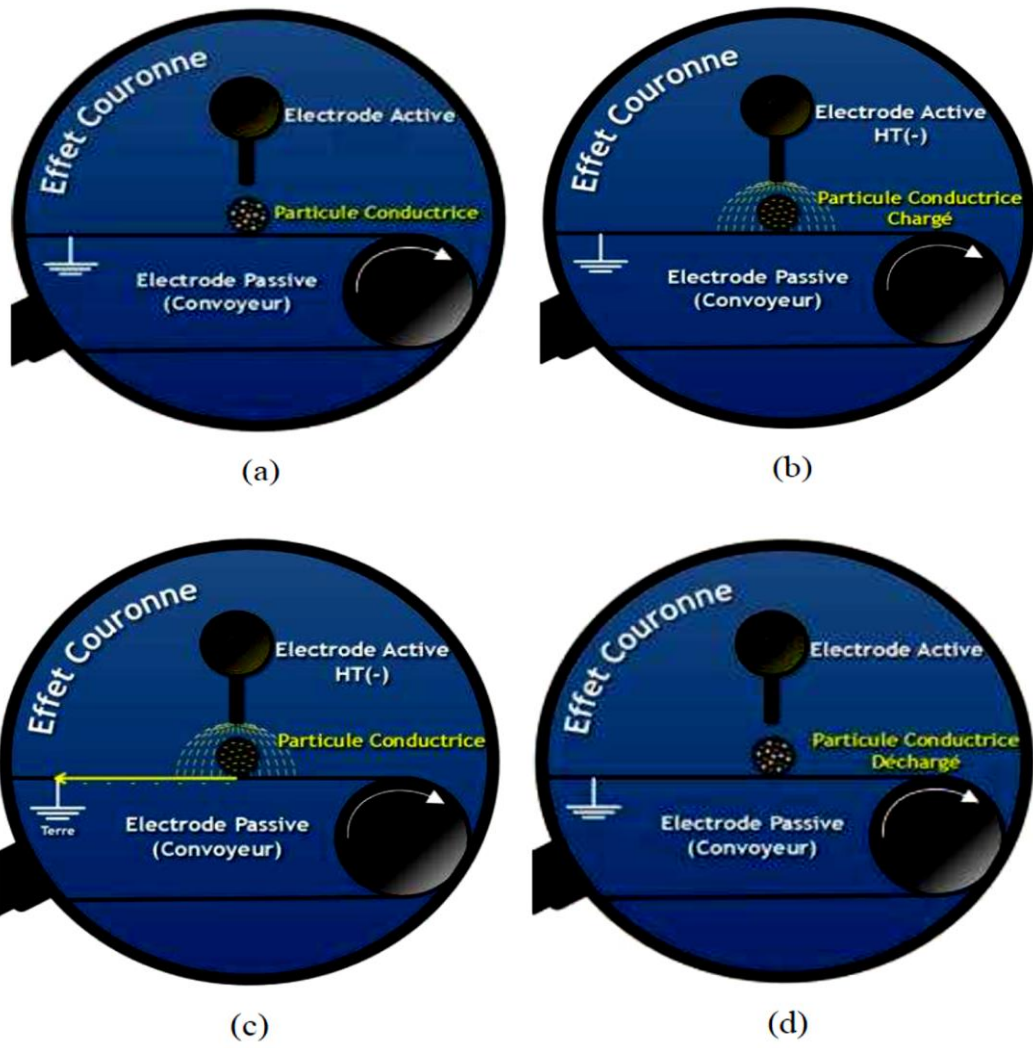


Fig I.8- L'effet couronne sur des particules conductrices [3].

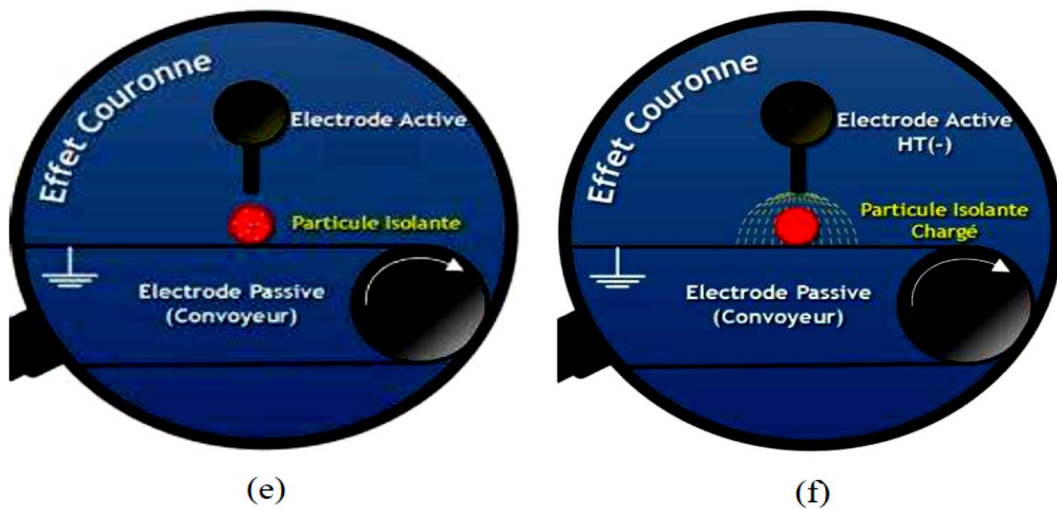


Fig I.9- L'effet couronne sur des particules isolantes [3].

Cependant, les décharges couronne créent également un vent ionique du fait de l'accélération des ions qui, au cours de leur déplacement dans le champ électrique, entrent en collision avec des molécules de gaz, leur transmettant non seulement une énergie sous forme de chaleur, appelé énergie cinétique d'où on relève plusieurs application notamment le contrôle des écoulements aérodynamiques mais qui reste néfaste au processus de séparation électrostatique, puisqu'il peut perturber le parcours des particules les plus fines et être à l'origine d'une dispersion voire d'une perte de matière [3].

### I.3.2 L'induction électrostatique :

Un objet (M) électriquement chargé (Figure I.10 a) crée dans son espace un champ électrostatique. Si un tel objet (M) est amené à proximité d'un conducteur (P) neutre (Figure I.10. b), le champ électrostatique fera pousser les électrons vers l'autre côté du conducteur (P) le rendant polarisé (Figure I.10 c).

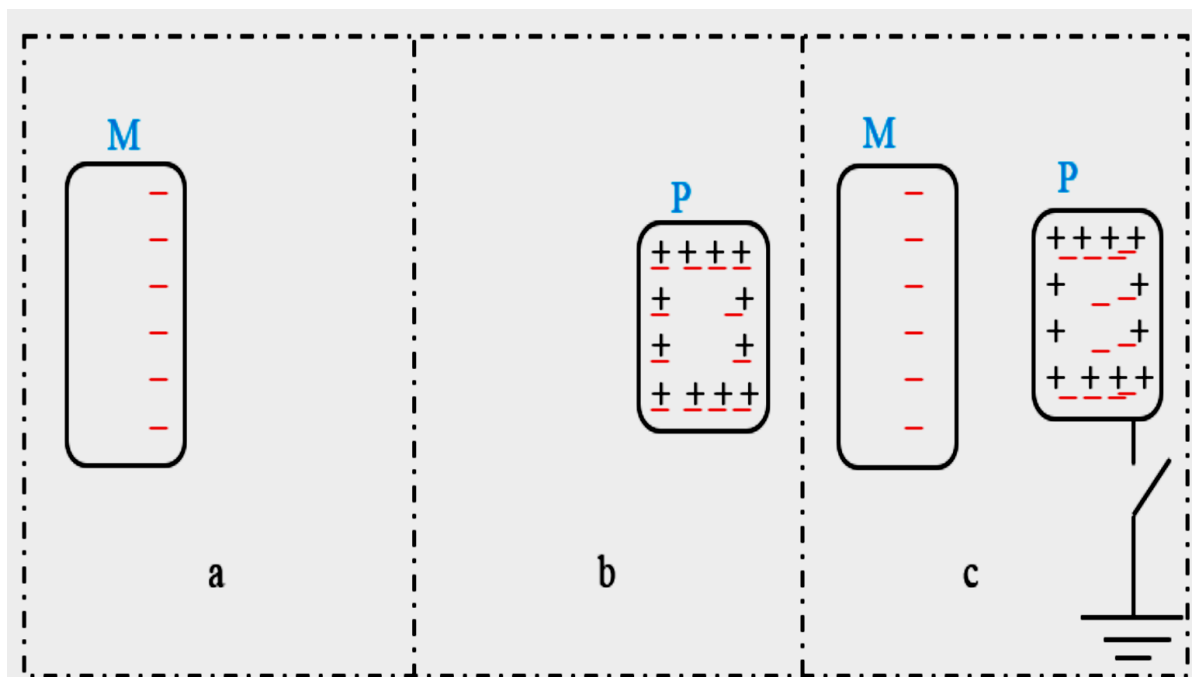


Fig I.10- Charge par influence ou induction [4].

Si on établit une connexion temporaire à la terre à partir de la situation (Figure I.11 a), le conducteur se déchargera (Figure I.11 b). En isolant ce conducteur de la terre avec la présence du corps chargé la situation reste conservée (Figure I.11 c), en éloignant le corps chargé, les électrons se répartissent sur le conducteur d'une façon homogène (Figure I.11 d).

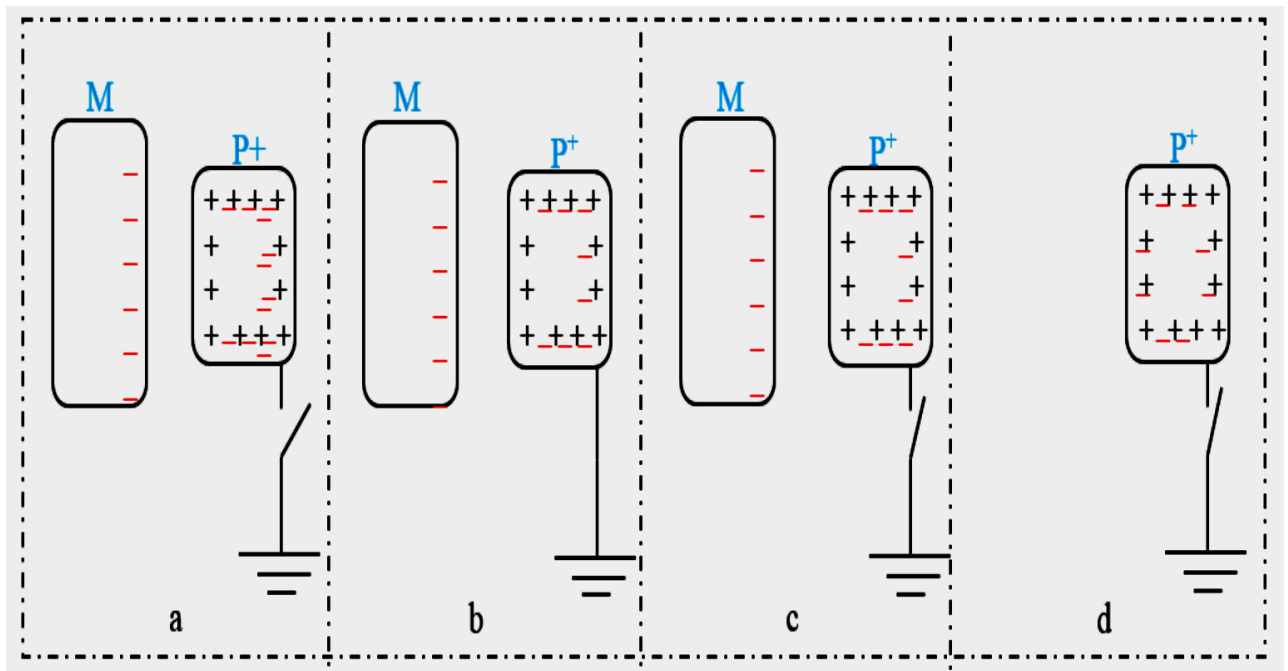


Fig I.11- Transfert de charge à partir de la terre vers le corps A sous l'effet de l'induction du corps chargé B sur le corps A [4].

### I.3.3 Effet tribo-électrique :

La triboélectricité du grec « tribein » signifie le frottement entre deux matériaux de nature différentes afin d'obtenir au niveau surfacique une charge statique elle persiste même après séparation des particules (Figure I.12). C'est le mécanisme physique le plus utilisé pour charger des matériaux granulaires ou micronisées plastiques en vue de leur séparation dans un champ électrique intense [5].

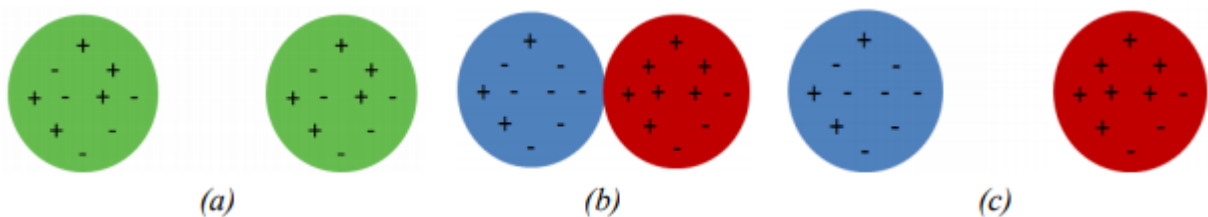


Fig I.12- Charge triboélectrique de deux particules.  
 a) Particules électriquement neutres avant le frottement,  
 b) Transfert de charge par frottement,  
 c) Séparation des particules [5].

### **I.4 Séparation électrostatique des matériaux pulvérulents :**

La séparation électrostatique est une technique qui sert à séparer des matériaux de différentes natures qu'ils soient isolants ou conducteurs. Le processus de recyclage des matériaux usagés, vient juste après le broyage des déchets d'équipements électriques fournissant finalement des matériaux sous forme de petites particules. Une fois ces particules introduites dans le séparateur électrostatique, elles acquièrent une charge électrique et se comportent différemment selon leurs caractéristiques conductrices ou isolantes.

A nos jours, ce procédé technique a contribué positivement à une technologie viable et moins coûteuse économiquement ; ainsi qu'à une amélioration constante et progressive du respect de l'environnement. Puisque la technique de séparation électrostatique est plus ou moins récente, les recherches dans ce sens sont fructueuses pour l'instant et exigent une amélioration continue. La séparation des particules de tailles millimétriques dites granulaires de taille inférieure à 1 mm, pour cela les recherches sont toujours en cours afin d'obtenir des résultats satisfaisants. Puisque les procédés de séparation de ces particules fines se heurtent souvent à la difficulté de contrôler leurs trajectoires, en raison de l'influence des forces aérodynamiques.

### **I.5 Conclusion :**

Il existe une multitude d'installations de séparateurs électrostatiques qui traitent différents types de mélanges de matériaux de taille plus fine dont l'efficacité a déjà été prouvée, mais les recherches dans ce sens sont en cours. Dans cette partie, nous avons présenté les concepts du mécanisme de charge utilisé dans le processus de séparation électrostatique des matériaux. Une grande partie du chapitre suivant décrit les forces qui s'exercent en champ électrique intense et les principes de base de l'électrostatique, aussi les techniques de chargement des particules granulaires, la séparation électrostatique et leurs domaines dans l'étude des convoyeurs à ondes mobiles. Les points mis en évidence dans le présent chapitre seront utiles pour la compréhension des étapes suivantes des travaux de ce mémoire.

**CHAPITRE II :**  
***CONVOYEURS A ONDES***  
***MOBILES***

## II.1 Introduction :

Les convoyeurs à ondes mobiles sont les nouvelles techniques, utilisées pour la séparation de différents types de particules de taille millimétrique. Cette technique qui a été proposée en premier lieu par F. B. Tatom et ses collaborateurs de l'Administration Nationale Aéronautique et Spatiale (NASA) en 1967 et le Professeur Senichi Masuda de l'université de Tokyo (Japon) dans les années 1970 [6]. Les ondes mobiles est un mouvement unidirectionnel provoqué par les interactions entre plusieurs champs électriques qui sont produits par des électrodes. Le convoyeur à ondes mobiles a eu plusieurs appellations différentes, appelé rideau électrique, Par ailleurs, Mazumder a appelé ce phénomène « Electrodynamic screens » EDS, d'autres ont défini le convoyeur comme un ensemble de trois peignes pour un convoyeur triphasé (deux peignes pour le Biphasé) [7]. Cette méthode a fait ces preuves avec des résultats satisfaisants dans plusieurs domaines d'application (biochimie, agriculture, dépoussiérage des panneaux solaires.....), elle se base sur l'impact qu'apporte la force diélectrophorétique.

## II.2 Technique des ondes mobile :

Les ondes mobiles, en anglais « travelling waves », est un phénomène électrique qui provoque le déplacement de particules grâce à l'interaction entre une particule polarisée et un champ électrique polyphasé. Celui-ci est produit par un système d'électrodes parallèles, situées dans un même plan et portées à des potentiels alternatifs à 2, 3 ou 4 phases (Figure II.1).

La technique des ondes mobiles est une technologie bien établie qui a été proposée en premier lieu par F.B. Tatom et ses collaborateurs de l'Administration Nationale Aéronautique et Spatiale (NASA) en 1967 et le Professeur Senichi Masuda de l'université de Tokyo (Japon) dans les années 1970.

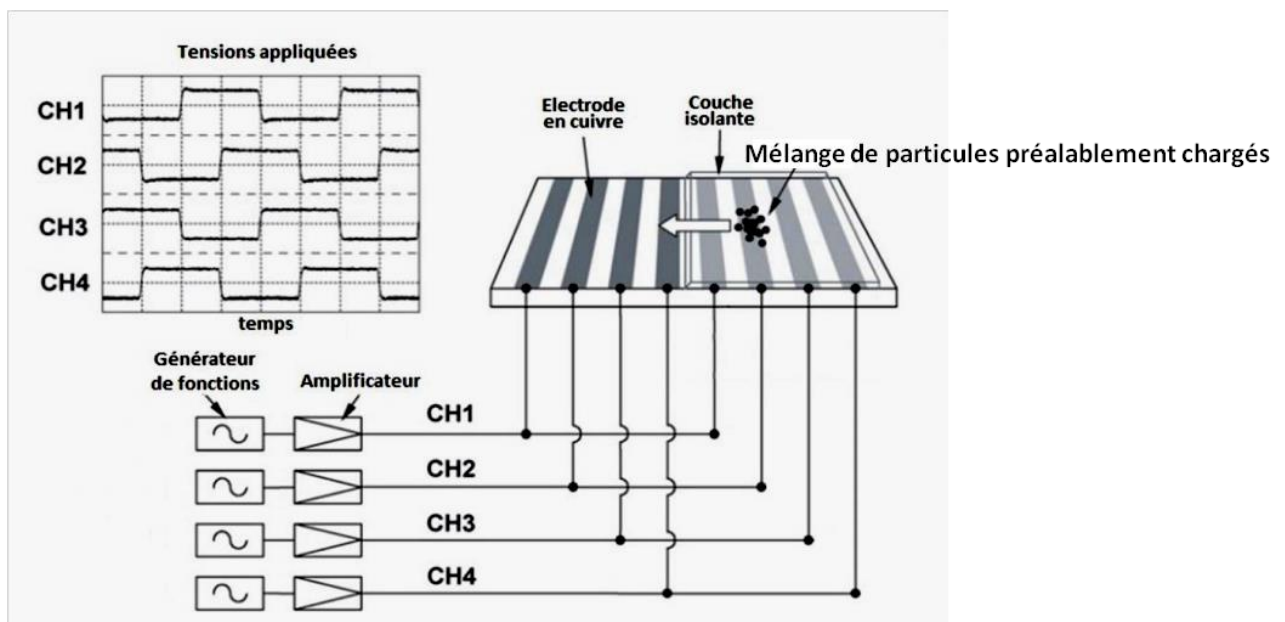


Fig II.1- Convoyeur à ondes mobiles (à 4 phases) [6].

Lorsqu'une particule est placée dans un champ électrique  $E$ , un moment dipolaire est induit dans celle-ci. Dans un champ électrique uniforme, la particule étant soumise à deux forces égales et opposées, la force résultante est par conséquent nulle. Dans un champ électrique non uniforme, la force résultante qui s'exerce sur la particule est non nulle, elle est appelée force diélectrophorétique. Cette force qui ne dépend pas de la polarité de la tension, peut être observée en tension AC ou DC, et représente la force principale dans les convoyeurs dits à « ondes mobiles ». La séparation des particules micronisées par la technique des ondes mobiles a été étudiée pour plusieurs types de particules et dans des milieux différents (liquide, air). Des résultats satisfaisants ont été obtenus pour des applications en électronique, chimie, biochimie, espace, nettoyage des panneaux solaires, etc. L'avantage de cette technologie réside dans le fait que le transport des particules est assuré par les forces du champ électrique au lieu des moyens mécaniques sans produire ni d'effets de bruit acoustique ni de vibrations mécaniques. D'un autre côté, elle sera appliquée dans les précipitateurs électrostatiques pour une tentative de nettoyage des électrodes collectrices, afin d'éliminer la couche de pollution [6].

### II.3 Convoyeurs à ondes mobiles :

Les convoyeurs électrostatiques, connus aussi sous les noms : rideaux électriques (electric curtain), écran électrodynamique (electrodynamic screen) ou bouclier anti-poussière électrodynamique (electrodynamic dust shield) pour certaines applications, se présentent comme un moyen avantageux pour manipuler des particules sur des surfaces. L'intérêt de la communauté électrostatique pour ces dispositifs ne cesse de s'agrandir. Les convoyeurs électrostatiques sont composés d'une série d'électrodes parallèles (Figure II.2) disposées sur un support diélectrique, noyées dans un film mince et alimentées par un système de tension électrique polyphasée. Si le champ électrique est suffisamment élevé lors de l'application de la tension, la force de Coulomb peut vaincre les forces d'attraction entraînant le mouvement des particules [8].

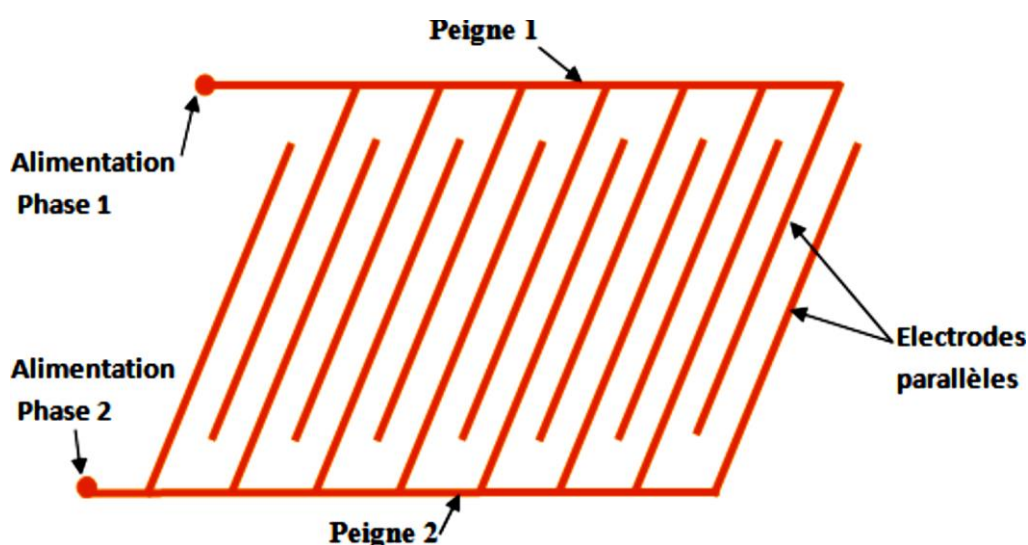


Fig II.2- Représentation schématique d'un convoyeur biphasé sous forme de deux peignes [8].

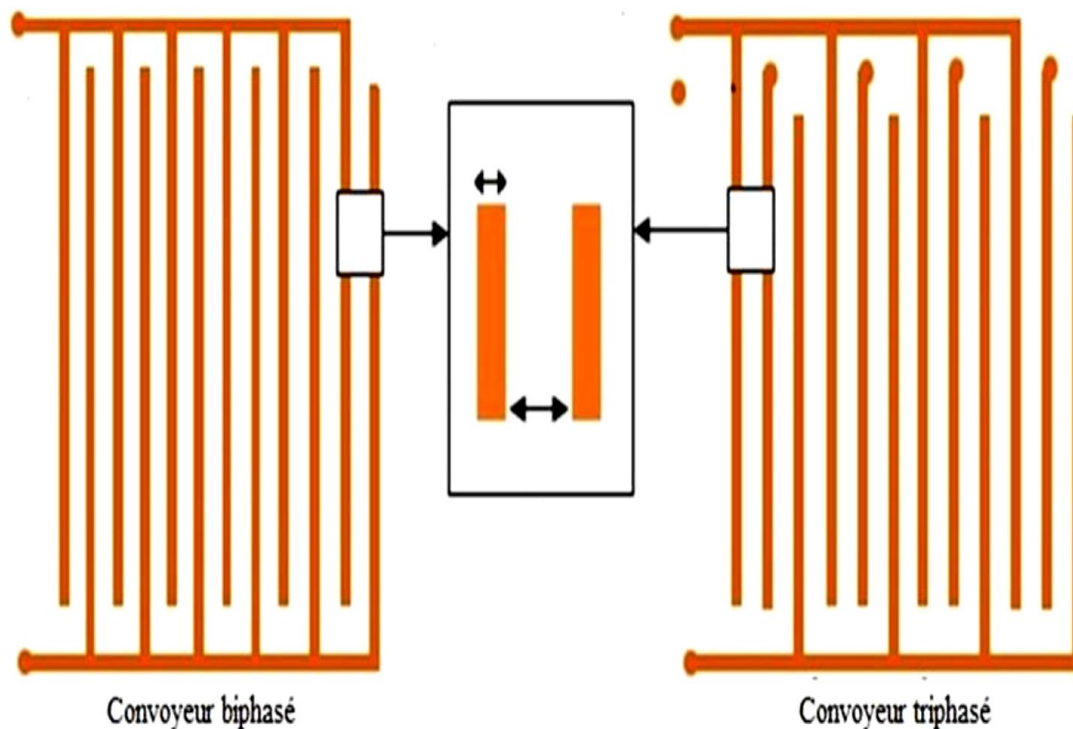
## II.4 Types des convoyeurs à ondes mobiles :

Nous pouvons classer les convoyeurs selon deux critères :

### II.4.1 Le nombre de phases (ou nombre de peignes) :

On distingue plusieurs configurations des séries des électrodes des convoyeurs à ondes mobiles (Figure II.3) :

- Les convoyeurs biphasés ayant 2 peignes intercalés, alimentés par des tensions périodiques ayant un déphasage de  $\pi$  (Figure II.4).
- Les convoyeurs triphasés ayant 3 séries d'électrodes intercalés, chacune reliée à une source de tension périodique ayant un déphasage de  $2\pi/3$  entre elles (Figure II.5).
- Les convoyeurs à 4 phases constitués d'un réseau d'électrodes ayant 4 séries (peignes) intercalés alimenté par des sources tension ayant un déphasage de  $\pi/2$  (Figure II.6).



*Fig II.3 Schéma descriptif de différents types de convoyeurs (biphasé et triphasé) [9].*



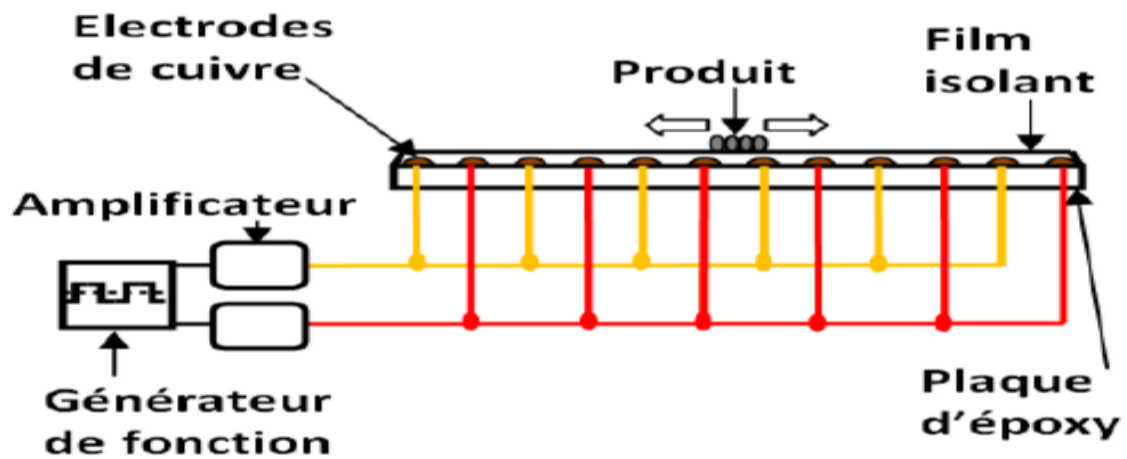


Fig II.4 Schéma descriptif du convoyeur biphasé [9].

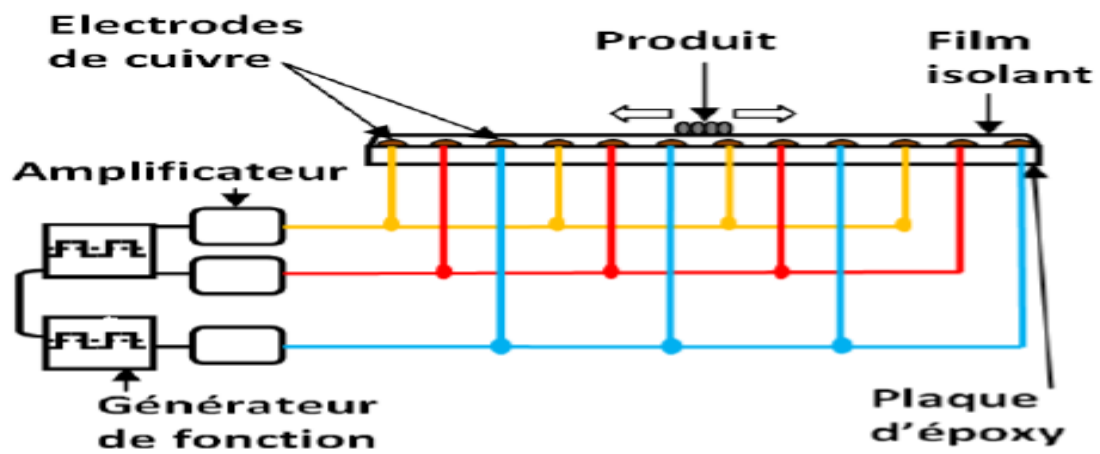


Fig II.5 Schéma descriptif du convoyeur triphasé [9].

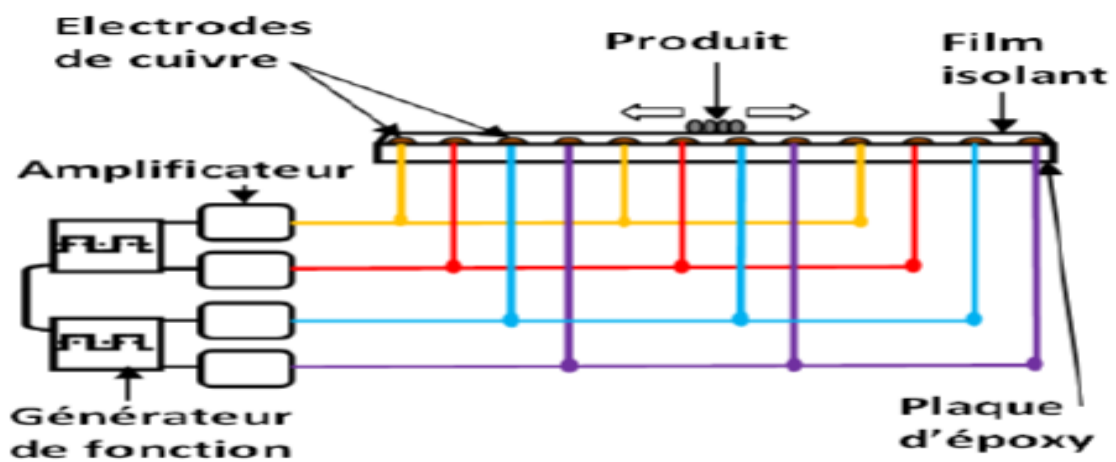
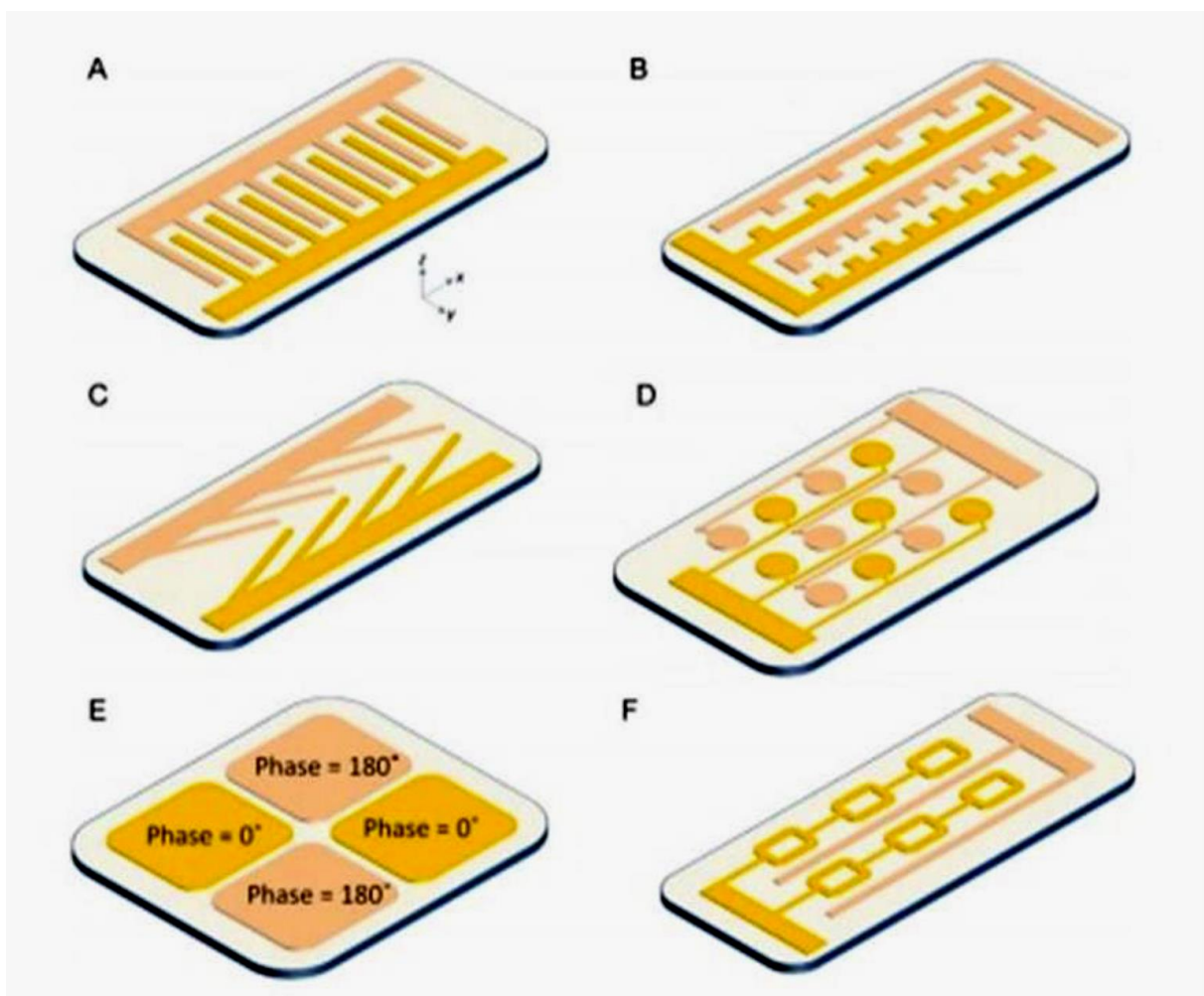


Fig II.6 Schéma descriptif du convoyeur à quatre phases [9].

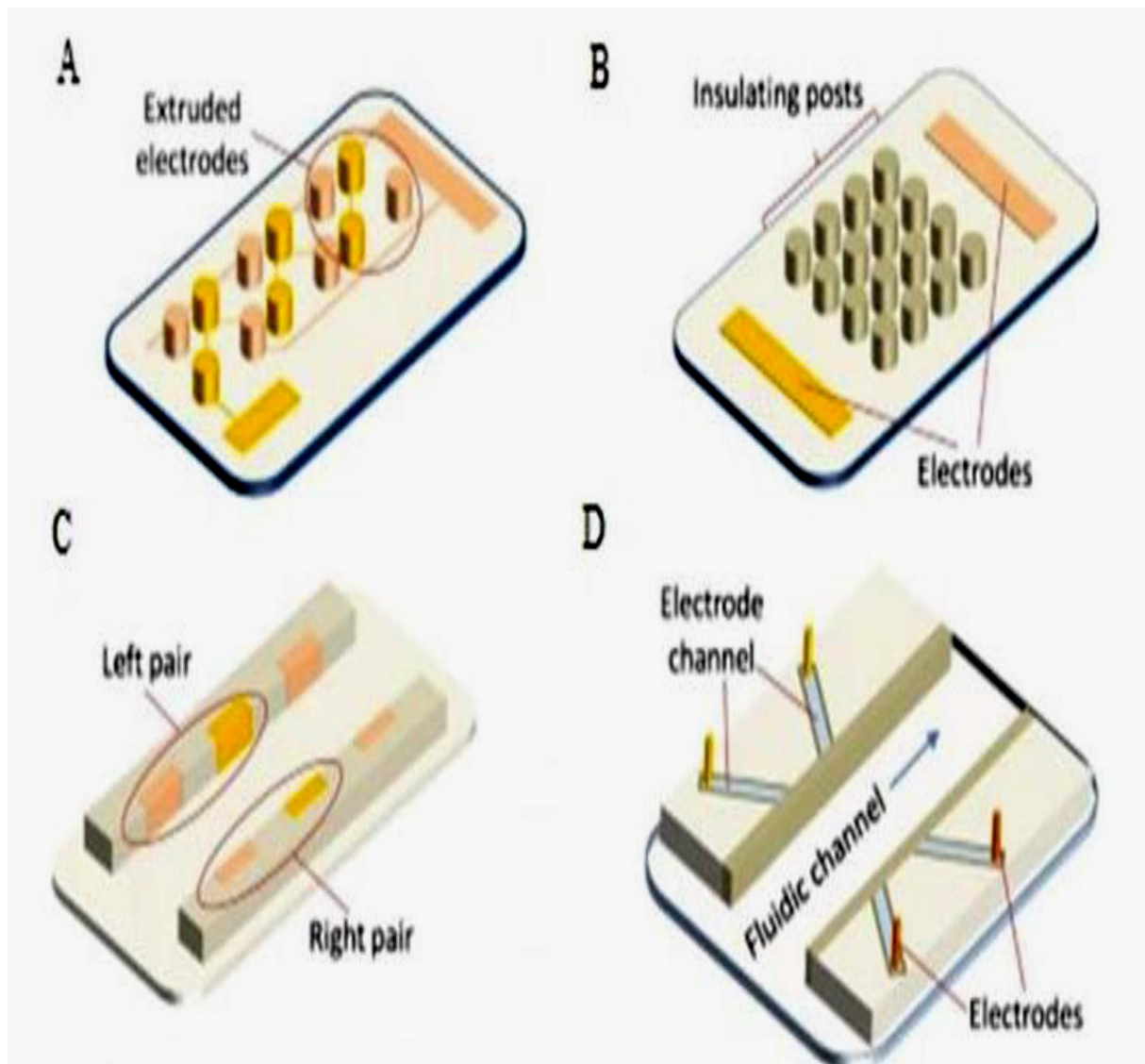
### II.4.2 La géométrie des électrodes :

Les convoyeurs peuvent avoir des configurations 2D ou 3D d'électrodes. Les électrodes 2D sont planaires et fabriquées en utilisant des procédés de photolithographie et métallisation conventionnels. Le champ créé affecte principalement les particules proches de la surface. En revanche, les électrodes 3D sont fabriquées par des procédés plus complexes permettant de créer un champ dans le volume du fluide. La force est donc appliquée plus intensément à un plus grand nombre des particules. Les géométries d'électrodes 2D les plus utilisées sont parallèles ou inter digitées, crénelées, obliques, incurvées et matricielles (Figure II.7). Les électrodes 3D utilisent les géométries suivantes : extrudées, déposées en vis-à-vis, et sans contact direct avec le fluide (Figure II.8). Chaque configuration d'électrodes permet de créer des zones localisées de forts gradients de champ électrique afin d'interagir avec les particules en suspension [6].



*Fig II.7 Quelques exemples de convoyeurs à configuration 2D*

*A) parallèles ou interdigitées, B) crénelées, C) obliques, D) matricielles, E) quadripôle, F) micro puits. [6].*



*Fig II.8 Quelques exemples de convoyeurs à configuration 3D  
A) extrudées, B) basées sur des obstacles isolants, C) déposées sur les flancs du canal, D) sans contact direct avec le fluide [6].*

## II.5 Applications industrielles de la technique des ondes mobile:

Actuellement de nombreuses sociétés fabriquent des installations de séparation électrostatique dans le monde. Multiples recherches ont été réalisées par des laboratoires au niveau mondiale, Cette technique se révèle efficace dans le tri de matériaux granulaires ou pulvérulents selon leurs caractéristiques physiques.

La majorité des installations traitant les particules pulvérulentes utilisent l'effet tribo-électrique comme mécanisme de charge, Le point commun entre ces dispositifs est la nécessité d'avoir deux parties successives, la première celle de chargement triboélectrique des particules, et l'autre destinée à leur séparation.

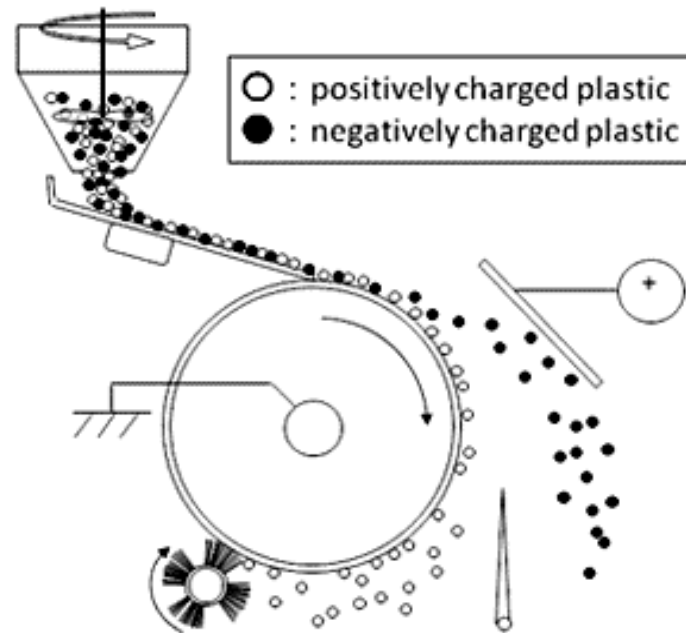


Fig II.9 Séparateur tribo-électrostatique à tambour [10].

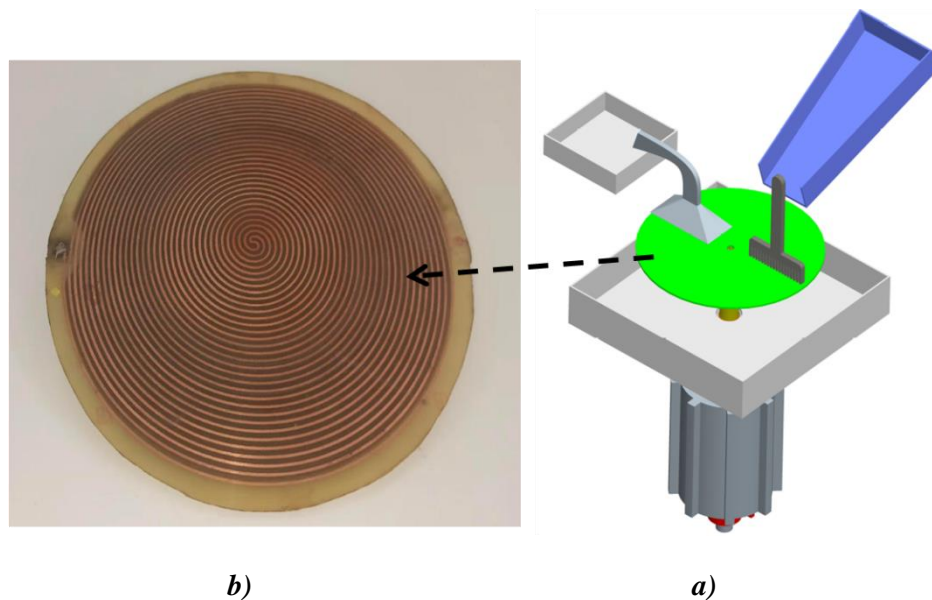
## II.6 Conclusion :

Le convoyeur à ondes mobiles a eu plusieurs appellations différentes, appelé rideau électrique, effet des rideaux électriques. Nous avons présenté dans ce chapitre les notions élémentaires et essentielles des rideaux électriques, en décrivant leurs types ainsi que leurs applications industrielles. Les mécanismes de chargement des particules micronisées qui agissent sur la technologie des ondes mobiles sont complexes, jusqu'à présent les chercheurs ne sont pas d'accord sur le processus. Chaque processus se base sur certains phénomènes électrostatiques.

**CHAPITRE III :**  
***PRESENTATION DU MODELE***  
***ETUDIE***

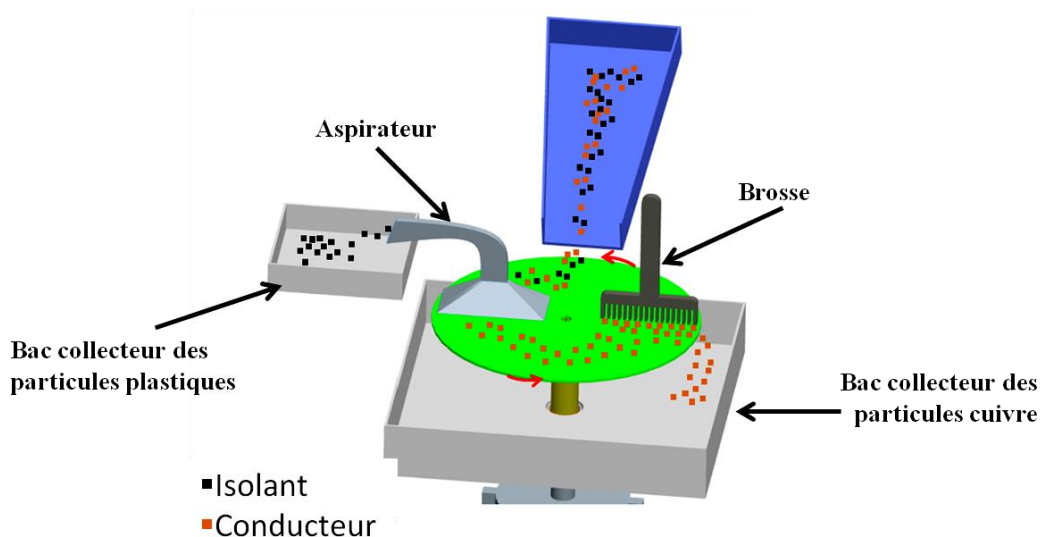
### III.1 Introduction :

Cette partie du projet est destinée à montrer et présenter le model géométrique désiré avec le logiciel de simulation d'éléments finis Flux 2D. Le séparateur électrostatique rotatif pris en considération est présenté ci-dessous dans la Figure III.1. Notre travail s'intéresse particulièrement à la pièce maitresse de ce dispositif représentée par un disque rotatif qui constitue un séparateur de forme spirale relié à un moteur électrique provoquant sa rotation.



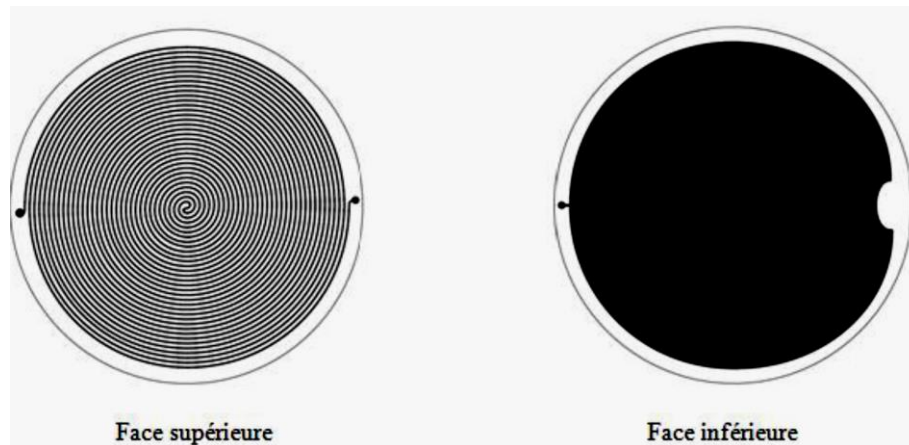
*Fig III.1 Séparateur électrostatique rotatif étudié.*  
 a) Vue d'ensemble b) Photographie du disque rotatif

Le mélange de particules granulaires est étalé progressivement sur le séparateur donc les particules de nature conductrices sont soumises à un champ électrique qui les maintient fixes sur le disque rotatif et les particules de type isolant sont aspirées vers l'extérieur à l'aide d'un aspirateur (figure III.2).



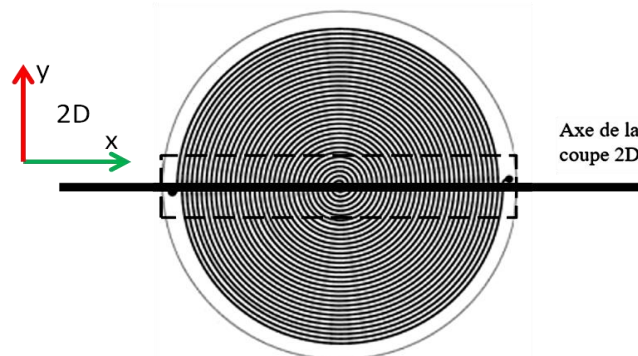
*Fig III.2 Description schématique du procédé de séparation électrostatique.*

Le convoyeur rotatif se présente sous la forme d'un disque réalisé avec un support circulaire en FR4 d'une épaisseur de 2mm. Il est constitué d'une électrode en cuivre de forme circulaire placée sur la face inférieure du disque et reliée à la masse. Sur sa face supérieure, est déposée une électrode de forme spirale reliée à la haute tension (figure III.3). Cette dernière électrode a une largeur de 1mm et une hauteur de 35 $\mu$ m. La distance entre deux cercles successifs de l'électrode spirale est de 2 mm. Les électrodes supérieures sont protégées par un film isolant d'une épaisseur de 100 $\mu$ m. La face arrière de ce disque contient une électrode circulaire en cuivre de 35 $\mu$ m d'épaisseur. Les deux électrodes supérieure et inférieure constituent ainsi un convoyeur à onde mobile biphasé qui sera utilisé dans ce séparateur électrostatique.



**Fig III.3** Forme géométrique de l'électrode supérieure et inférieure [11].

Notre étude se base essentiellement sur le calcul du champ électrique à la surface du disque rotatif. Le but étant de vérifier que l'isolant qui recouvre les électrodes peut supporter le champ électrique à la surface du disque. En effet, le rôle de cet isolant est de prévenir le claquage entre les électrodes et il est utile de connaître la valeur du champ électrique qui sera appliqué à cet isolant. Ainsi, des simulations par éléments finis ont été réalisées pour calculer le champ électrique dans cet isolant afin d'évaluer le risque de son claquage. Ceci nous a poussé à réaliser une coupe 2D (Figure III.4) constitué de 20 électrodes en cuivre disposées sous forme de peignes. Par contre les figure III.5.a et b présente la forme ainsi que la dimension des éléments du model 2D.



**Fig III.4** Présentation de l'axe de la coupe 2D.

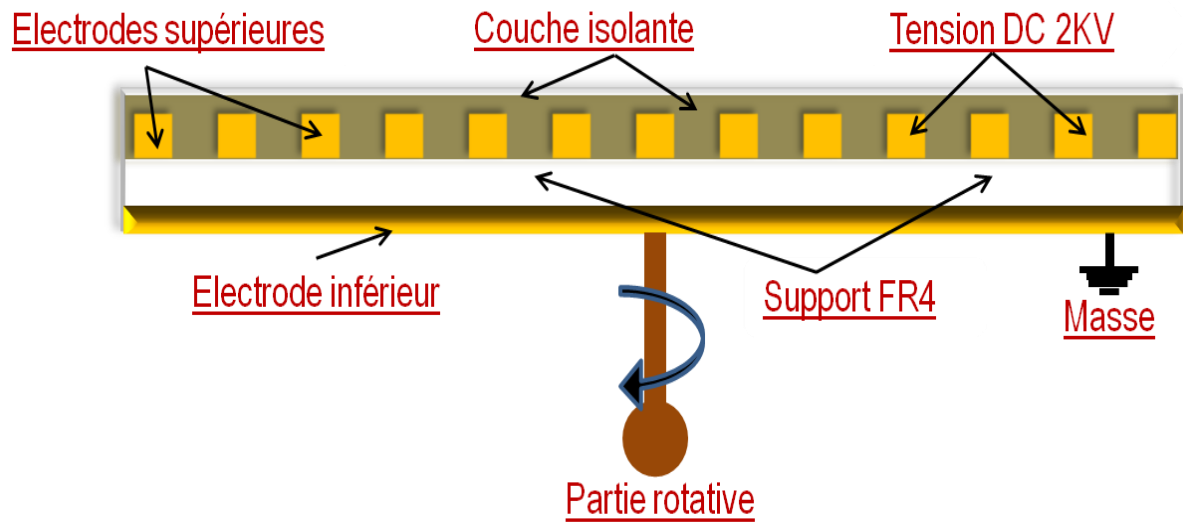


Fig III.5.a Présentation de la coupe 2D du convoyeur rotatif à ondes mobiles.

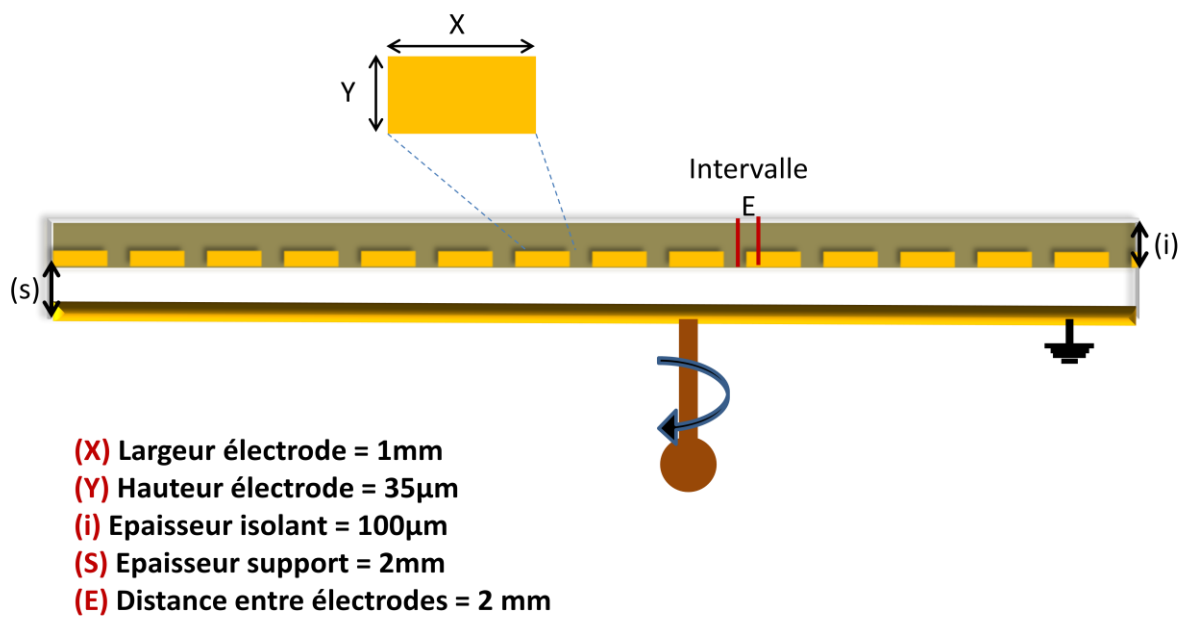


Fig III.5.b Dimensions dans une vue en coupe du convoyeur.



## III.2 Présentation du logiciel Flux2D :

Flux2D est un logiciel de simulation numérique utilisé en conception assistée par ordinateur (Figure III.6). Il utilise la méthode des éléments finis et permet de calculer des états magnétiques, électriques ou thermiques en régimes permanents, transitoires et harmoniques avec des fonctionnalités d'analyse multi-paramétrique étendues. Ceci nécessite la résolution d'équations diverses: équations de Maxwell, de la chaleur, loi de comportement des matériaux. Il en résulte la difficulté de la résolution simultanée de ces équations, le code est découpé en un ensemble de modules chargés de résoudre chacun des types de problèmes donnés (autrement dit les équations à utiliser et les hypothèses associées).



Fig III.6 Interface de logiciel flux 2D [12].

Flux est développé (en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du Laboratoire d'Electrostatique et Matériaux Diélectriques et du Laboratoire de Magnétisme du Navire) et distribué en France par la société CEDRAT S.A. Plusieurs applications peuvent être simulées et optimisées grâce à cet outil (Figure III.7) :

- Les machines tournantes.
- Les actionneurs linéaires.
- La compatibilité électromagnétique.
- Les transformateurs et inductance.
- Les dispositifs de chauffage par induction et procédés de traitement thermique.
- Les capteurs Les dispositifs hauts tension.

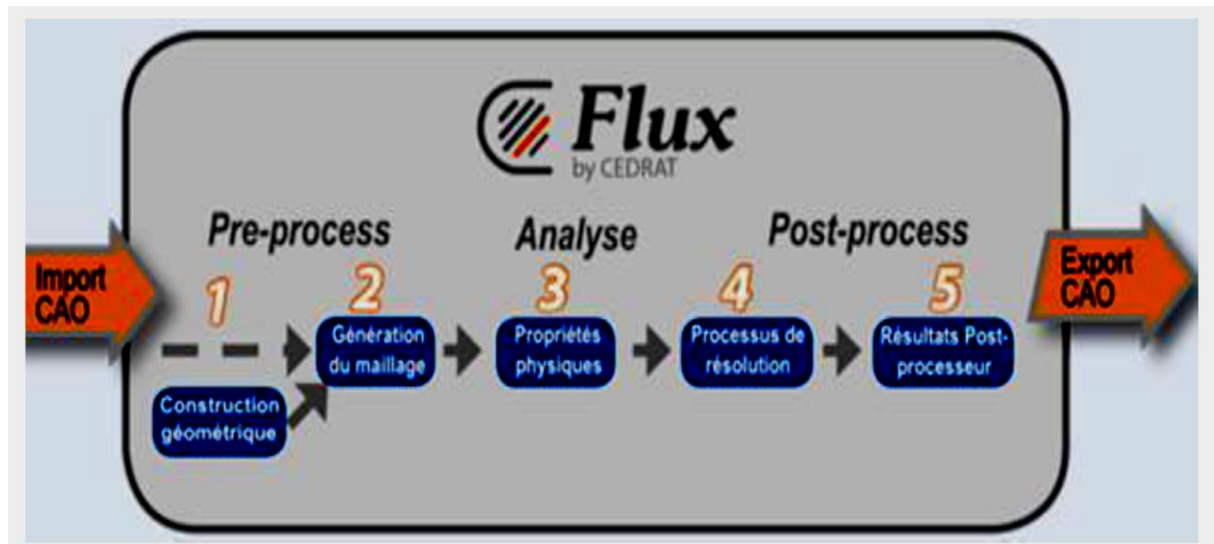


Fig III.7 Les étapes processus de Flux 2D [12].

### III.3 Géométrie du modèle :

La géométrie du modèle réalisé par logiciel Flux 2D est constituée de plusieurs points repérés dans le logiciel par des coordonnées suivant les axes X et Y. Chaque deux points reliés nous donne une ligne. Et plusieurs lignes nous donnent finalement des faces. Cette géométrie implique 20 électrodes en cuivre protégées par un film isolant (Figure III.8). L'ensemble est placé dans un environnement d'air désigné par la suite avec le terme « Chambre ».

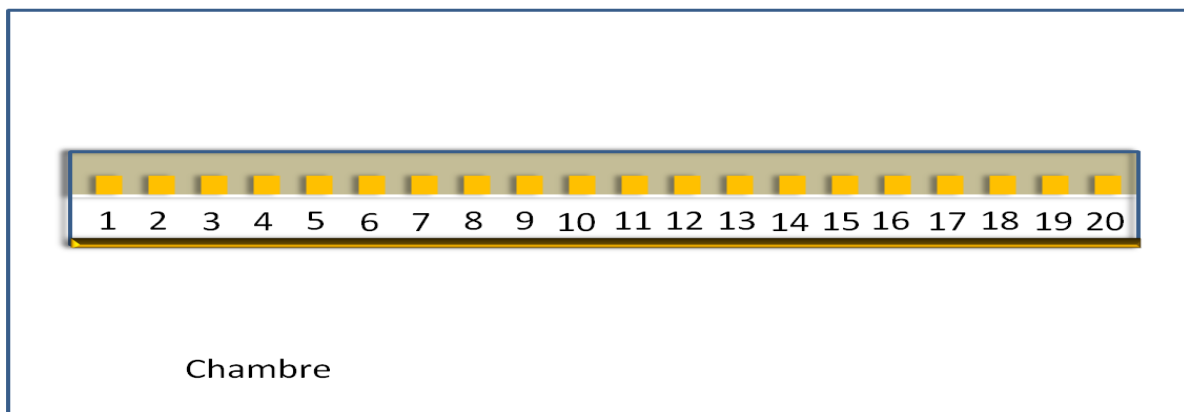
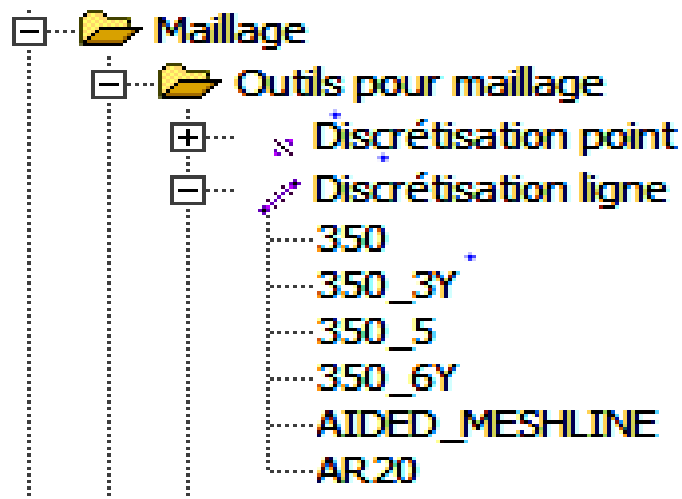


Fig III.8 Géométrie finale du modèle en 2D.

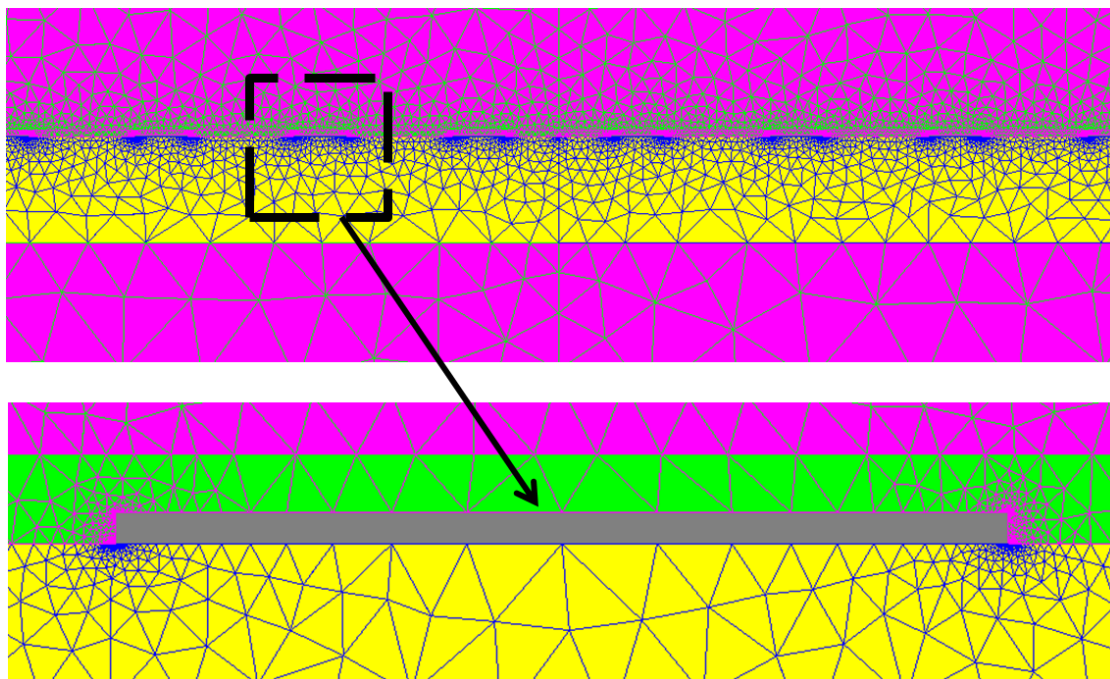
### III.4 Maillage :

Le maillage est une étape très importante dans la simulation qui nous permet de définir exactement les régions de champs électrique intense. Les étapes suivies pour réaliser un maillage : on a appliqué les instructions du dossier maillage sur logiciel les plus importantes donc sont : outils pour maillage, discrétisation ligne. La Figure III.9 décrit la définition.



*Fig III.9* Vue sur le menu des paramètres de maillage dans Flux 2D.

La zone la plus intéressante dans notre modèle géométrique sont les coins des électrodes où le champ électrique est très intense à cause de l'effet de pointe. C'est dans ces angles que le champ électrique est le plus élevé. On a donc appliqué un maillage plus fin et plus « serré » afin d'avoir de bons résultats dans cette zone. La figure ci-dessous (Figure III.10) montre clairement le maillage sur la coupe du modèle.



*Fig III.10* Vue sur le maillage global de la géométrie ainsi qu'un zoom sur le maillage d'une seule électrode.

A l'aide de discrétisations adaptées dans le menu maillage, on obtient un maillage satisfaisant pour avoir des calculs précis du champ électrique. La figure suivante (Figure III.11) montre bien les nœuds condensés autour de la pointe de l'électrode.

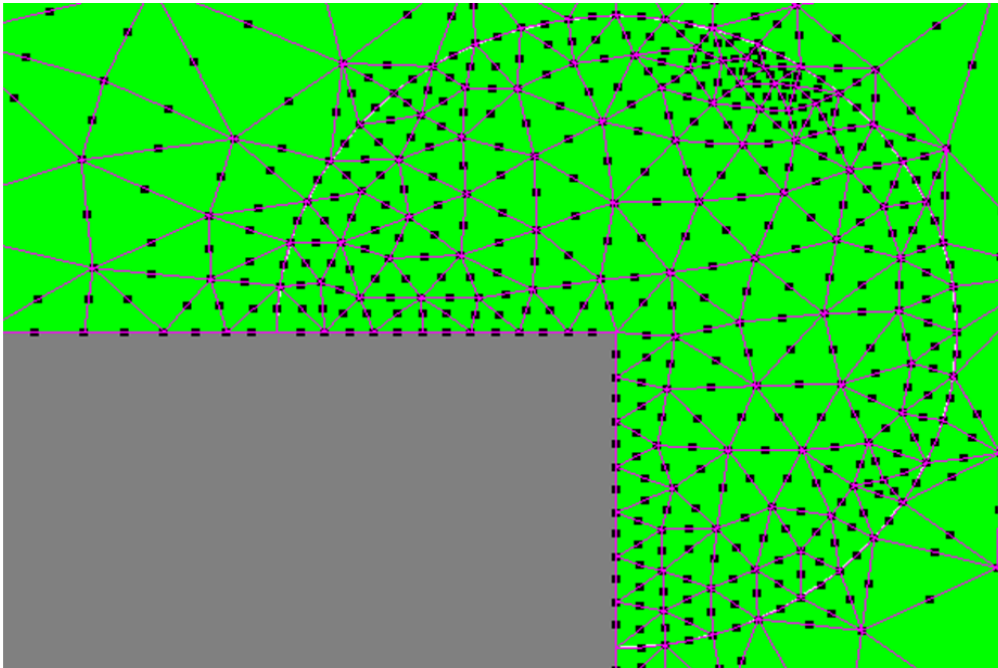


Fig III.11 Vue agrandie du coin d'une électrode avec un maillage fin.

### III.5 Paramètres physiques :

La dernière étape avant la résolution du model consiste à affecter et à appliquer soigneusement les propriétés physiques de la simulation voir (Figure III.12) ci dessous.

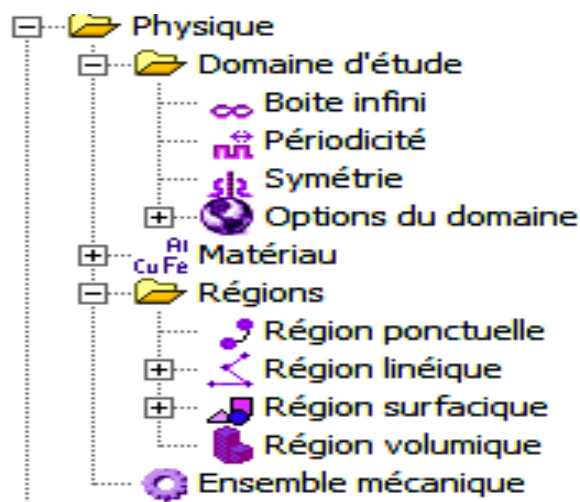


Fig III.12 Menu des propriétés physiques sur Flux 2D.

### III.5.1 Matériau :

Toujours dans les propriétés physiques on a défini trois matériaux isolants rencontrés dans le disque rotatif. A savoir une plaque de FR4 utilisée comme support, ainsi que deux autres matériaux concernant le film isolant qui recouvre les électrodes (film Kapton) ainsi que l'air qui est autour du disque (chambre).

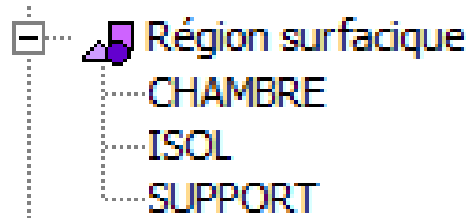


Fig III.13 différents matériaux utilisés dans le model.

Le Tableau III.1 montre les propriétés électriques de ces matériaux qu'on a renseigné dans la partie « Matériaux » du logiciel Flux 2D.

Partie	Matériaux	Permittivité relative
Chambre	Air	1
Support	FR4	4.70
Isolant	film KAPTON	4.35

Tab III.1 Permittivité relative des matériaux utilisés.

#### III.5.1.1 Régions surfaciques :

Les trois faces qui constitue le model sont : la chambre, l'isolant et le support. On accorde à chacune de ses faces les matériaux créés précédemment comme c'est indiqué sur la figure suivante.

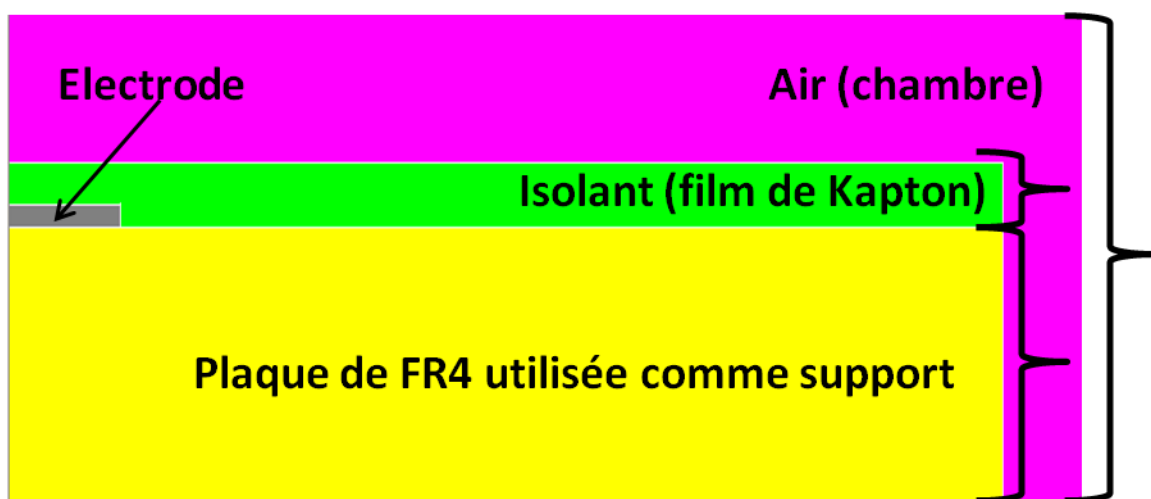


Fig III.14 Matériaux affectés aux faces du model.

### III.5.1.2 Régions linéiques :

Les régions linéiques (figure III.15) consistent à affecter des potentiels électriques aux électrodes de cuivre. Les électrodes supérieures sont reliées à une source de tension continue avec un potentiel électrique de +2kV, L'électrode inférieure est reliée à la masse avec un potentiel 0V. La figure III.14 montre clairement les différents potentiels électrique du model.

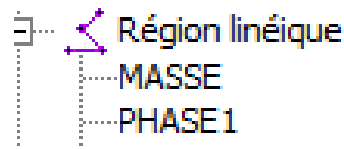


Fig III.15 Menu Flux 2D de la région linéique.

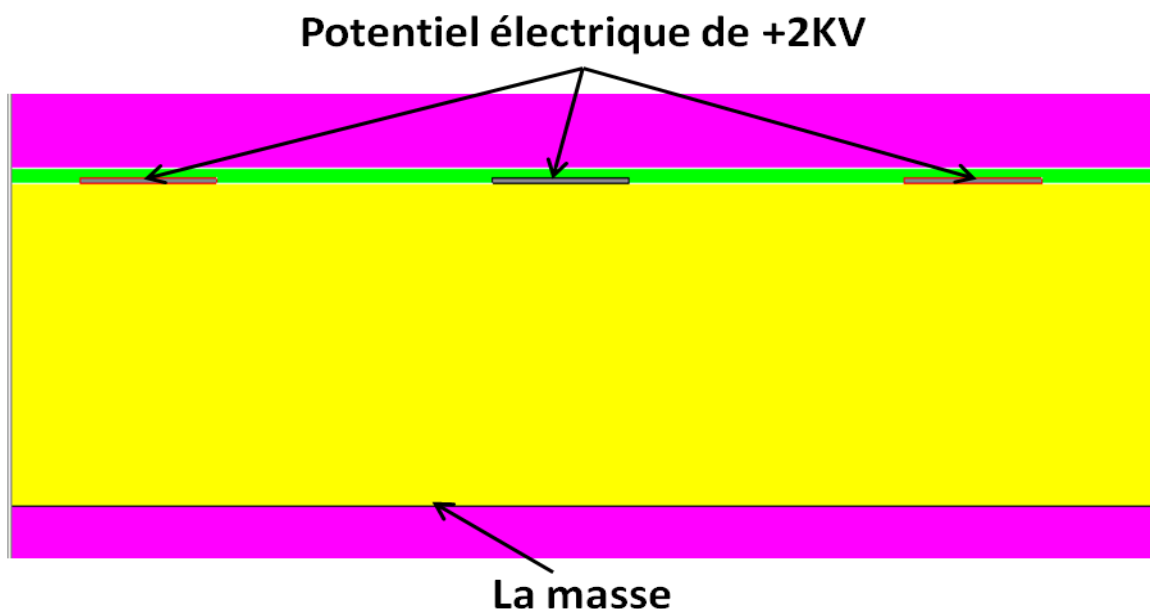


Fig III.16 Tensions appliquées aux électrodes  
(électrodes supérieures 2kV, L'électrode inférieure 0V)

### III.6 Conclusion :

En conclusion dans ce chapitre, nous avons présenté toutes les étapes et les descriptions qu'on a put suivre pour réaliser une simulation réussie avec logiciel Flux 2D. En premier on a commencé par la présentation du model du convoyeur, la description du logiciel de simulation, les différentes étapes du maillage et surtout sur les pointes des électrodes d'où c'est le point le plus important de notre étude. Et en dernier les paramètres physiques du model est l'étape qui nous a permis de définir l'isolant au niveau des différentes faces du model ainsi le potentiel électrique sur les électrodes supérieurs et inférieurs. La forme générale du model obtenue finalement va servir à mieux aborder le chapitre suivant.

**CHAPITRE IV :**  
***ANALYSE DE L'ETUDE DE***  
***SIMULATION***

## IV.1 Introduction :

Comme il a été indiqué sur le chapitre précédent, on continu a dire que cette partie est réservée à l'analyse des résultats de notre simulation du modèle du séparateur électrostatique en forme 2D. Cette simulation a été déjà bien détaillée dans le chapitre III mais notre but c'est le calcul de la valeur du champ électrique qu'a atteindre l'isolant pour mesurer les valeurs maximales afin d'évaluer le risque de claquage entre les électrodes pour définir et choisir la bonne isolation du séparateur ainsi la comparaison des résultats en forme 2D avec des résultats de calculs en forme axisymétrique faite déjà auparavant.

## IV.2 Distribution des lignes équipotentielles :

### IV.2.1 Effet de bord :

Notre étude porte sur un séparateur à 20 électrodes indiqué sur la figure IV.1 mais la simulation nous montre que les lignes du champ électrique aux deux extrémités de la géométrie sont soumis à un phénomène appelé effet de bord qui signifie la continuité et la dilatation des lignes du champ électrique dans l'espace.

Cela également peut perturber les calculs ce qui nous mène à des résultats erronés. Pour cela, on s'est éloigné suffisamment des extrémités et on s'est contenté uniquement de dix électrodes centrales pour garantir des résultats plus où moins précis. la figure IV.2 complète la description des effets de bords.

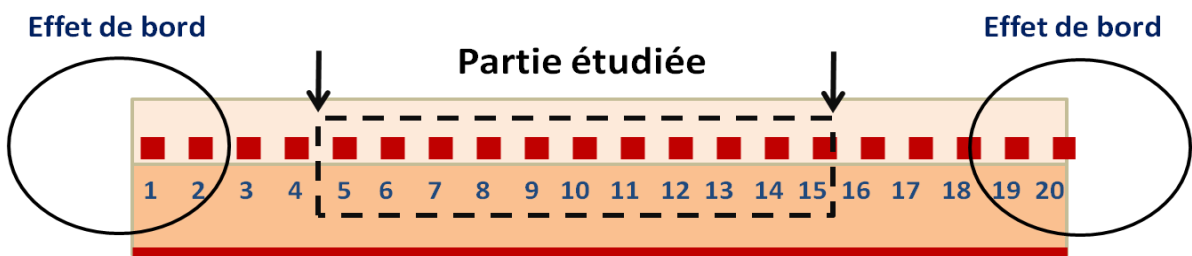


Fig IV.1 Mise en évidence de la zone étudiée du séparateur électrostatique.

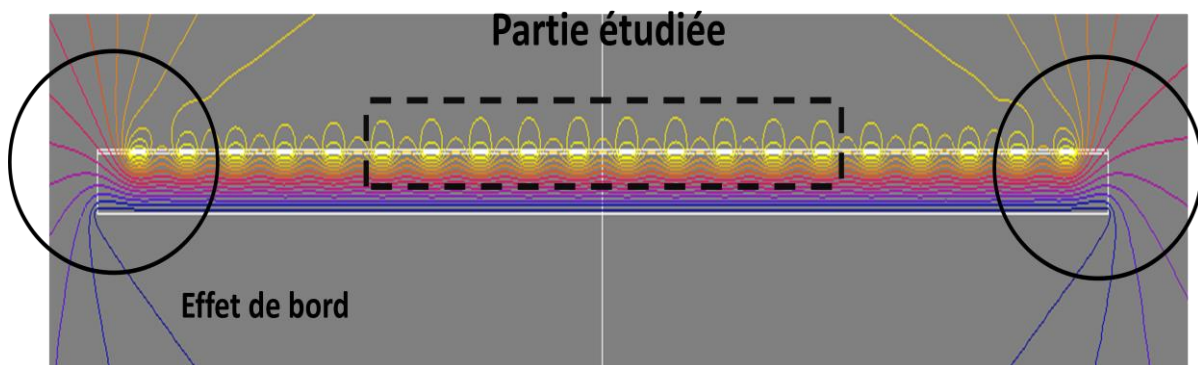
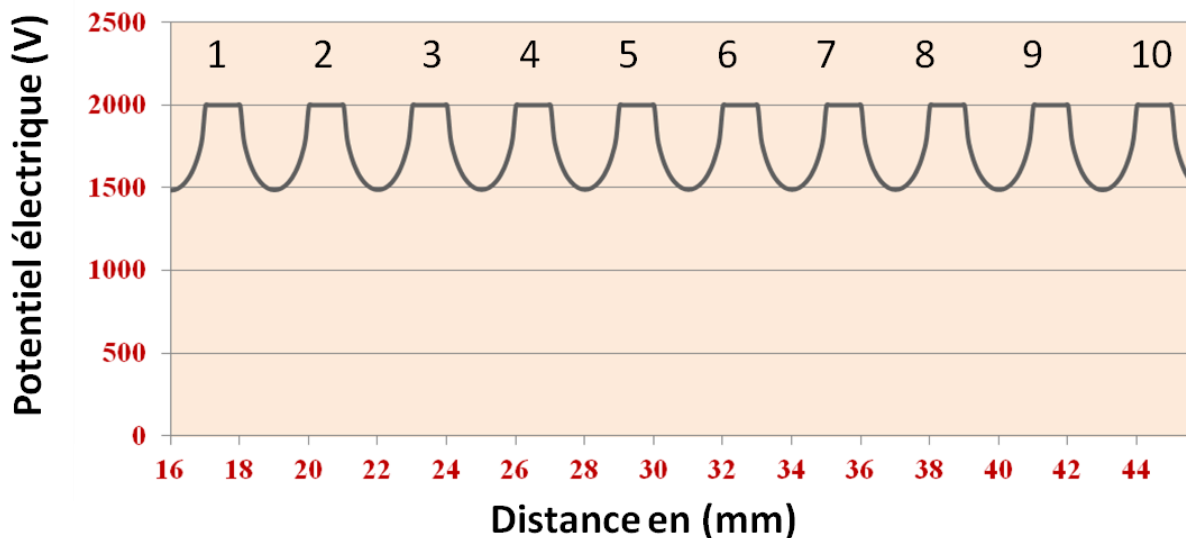


Fig IV.2 Effet de bord aux deux extrémités de la géométrie.



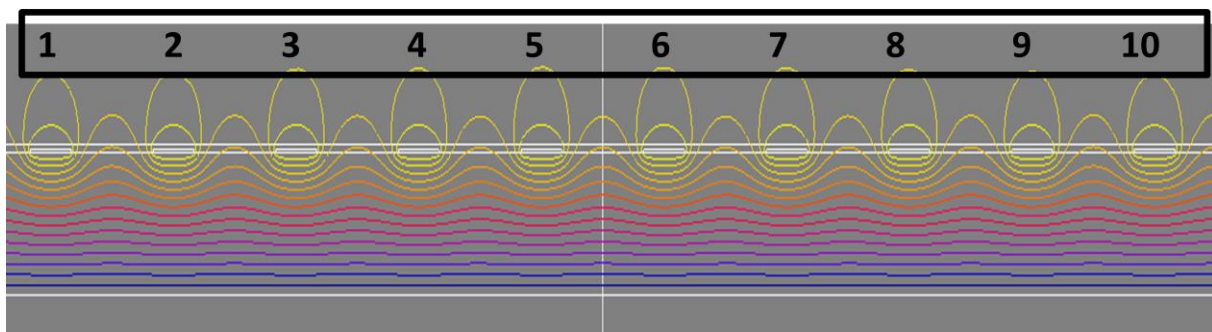
### IV.2.2 Variation du potentiel électrique:

On a affecté des tensions de 2kV aux niveaux des électrodes supérieures du convoyeur donc la courbe présentée dans la figure IV.3 montre bien la variation du potentiel électriques des dix électrodes centrale le long du chemin tracé en haut des électrodes supérieurs. Ce ci est nettement visible sur la courbe donc la tension électrique prend des valeurs stables et fixes mais la distance inter-électrodes on remarque que le potentiel électrique décroît.



*Fig IV.3 La variation du potentiel électrique des dix électrodes centrale.*

Pour un potentiel électrique, il y a création d'un champ électrique en tout point de l'espace qui l'entoure. La simulation sur flux 2D montre comment les lignes équipotentielles sont réparties autour des électrodes (figure IV.4), cela nous donne une vision sur la valeur de champ électrique. On note que les lignes équipotentielles se resserrent autour des coins des électrodes comme le montre la figure IV.5. Ça se traduit par un champ électrique élevé dans cette zone à cause de l'effet de pointe.



*Fig IV.4 Répartition des lignes équipotentielles sur les 10 électrodes centrales.*

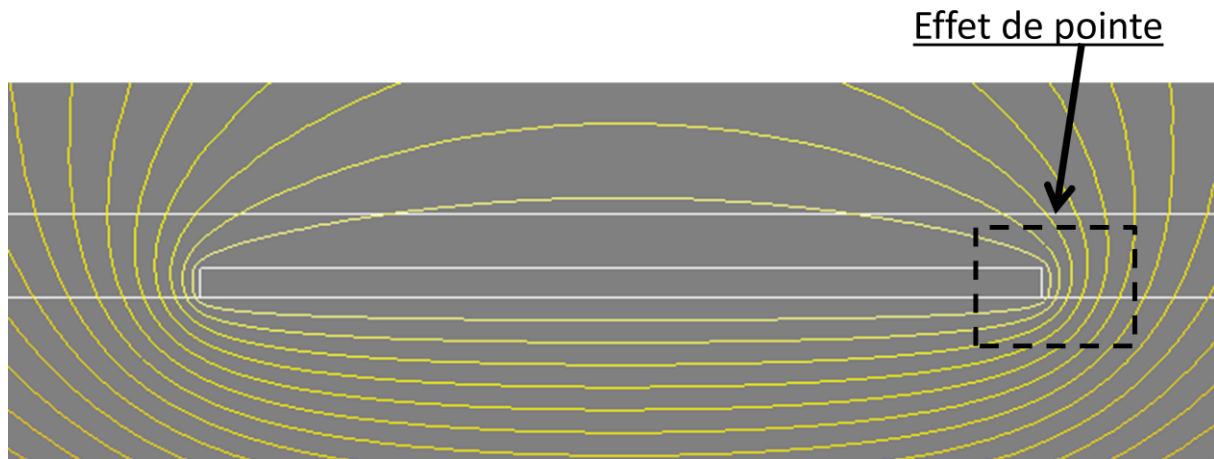


Fig IV.5 Les lignes équipotentielles se resserrent autour des coins des électrodes.

### IV.3 Calcul du champ électrique:

#### IV.3.1 Création des chemins :

Avant de créer les courbes de variation du champ électrique. On commence par le traçage des lignes appelées chemins ce ci sur logiciel de simulation. L'important c'est le calcul du champ électrique dans l'isolant comme nous l'avons déjà décrit que le champ électrique est intense dans la partie supérieure des électrodes. Pour cette raison on a tracés un chemin sur la partie haute des électrodes (figure IV.6). Ce chemin nous facilite de mieux montrer la courbe de variation du champ électrique dans ce domaine et mieux décrire les résultats de variation du champ électrique on à tracer donc un deuxième chemin (figure IV.7) sur la partie inférieure des électrodes afin de montrer l'influence du champ électrique sur le support. Un autre chemin N° 3 sous forme de tronçons (figure IV.8) qui nous aide à déduire la courbe de variation du champ électrique précisément dans la partie inter-électrodes.

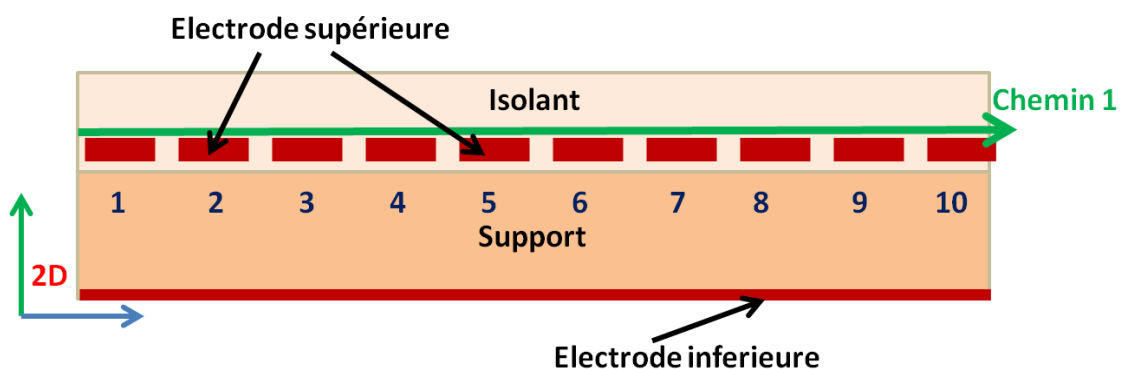


Fig IV.6 Chemin 1 utilisés pour tracer la variation du champ électrique en haut des électrodes.

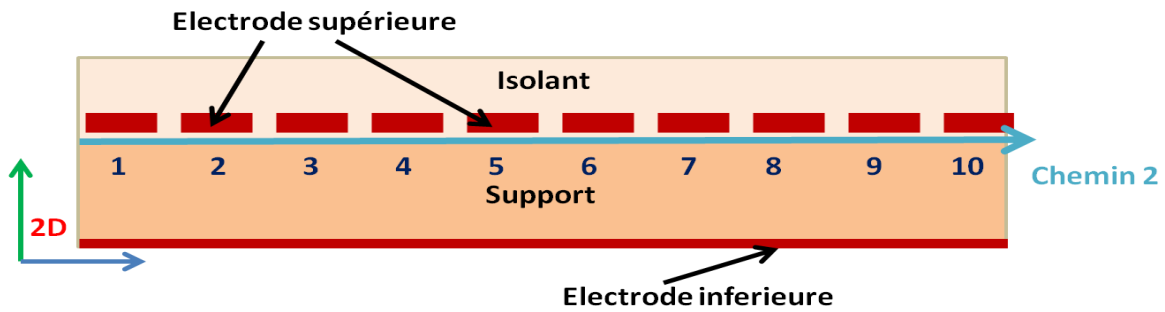


Fig IV.7 Chemin 2 utilisés pour tracer Variation du champ électrique à la surface du support.

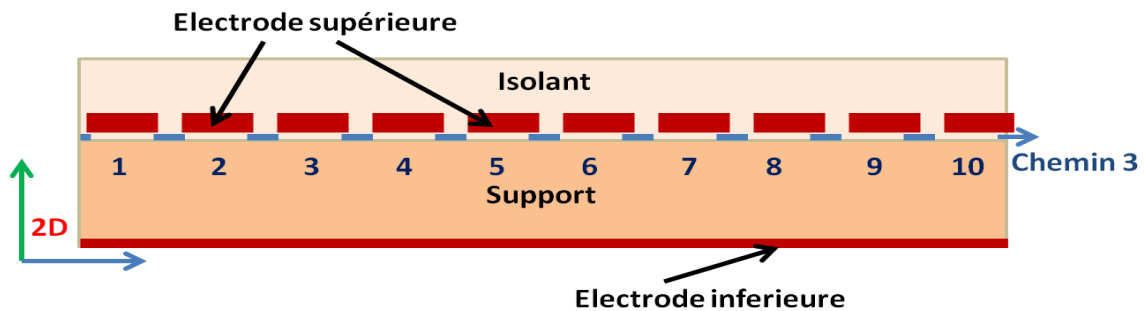


Fig IV.8 Chemin 3 utilisés pour tracer la variation du champ électrique en bas des électrodes.

### IV.3.2 Champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes :

En utilisant le chemin 1, on trace la variation du champ électrique dans l'isolant suivant ce chemin qui passe par le haut des électrodes. On remarque donc que le champ électrique a atteint son maximum au niveau des électrodes 1 et 7. La valeur du champ électrique au niveau de l'électrode N°1 est de 29,35 kV/mm et au niveau de l'électrode N°7 une valeur de 28,60kV/mm.

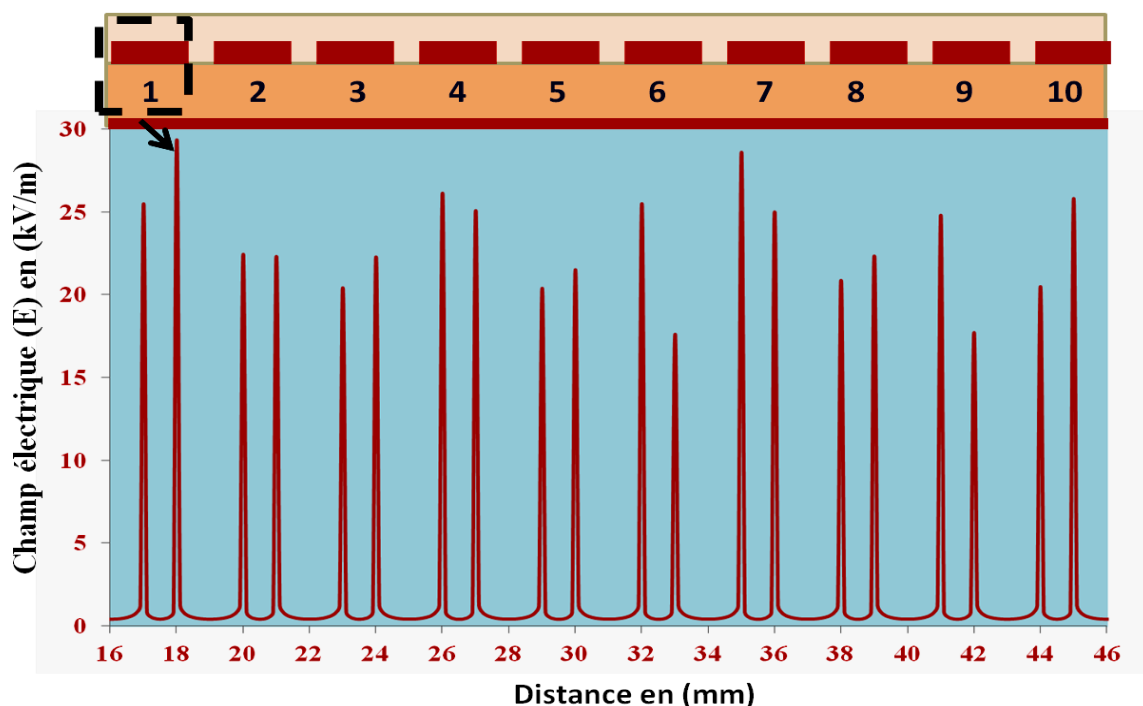


Fig IV.9 Courbe de variation champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes.

### IV.3.3 Champ électrique dans l'isolant en bas des électrodes :

A l'aide du troisième chemin (chemin 3), la courbe ci-dessous montre bien la variation du champ électrique en bas des électrodes. On remarque que le champ électrique nous donne une valeur maximale de 30.83 kV/mm sur l'électrode N°1.

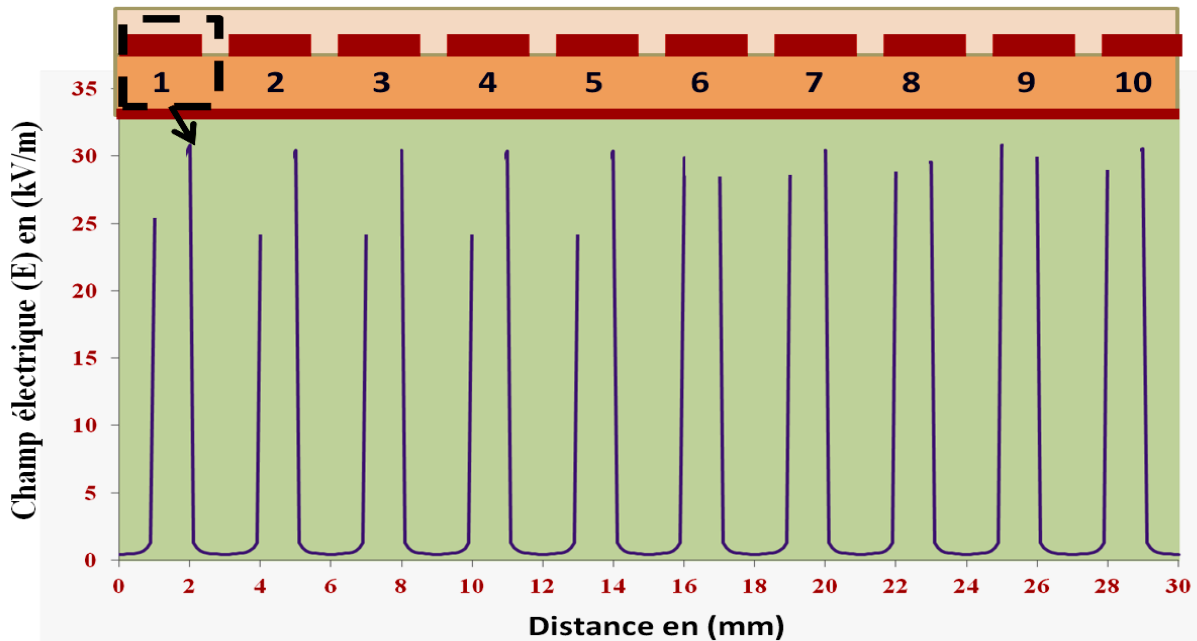


Fig IV.10 Courbe de variation champ électrique dans l'isolant en bas des électrodes.

### IV.3.4 Variation du champ électrique à la surface du support:

Comme il a été indiqué dans le chapitre précédent dans la partie Paramètres Physiques (région surfacique), on a associé dans la face isolant, un matériau de film Kapton et pour la face support, un matériau FR4. En traçant la variation du champ électrique dans le support (FR4) le long du deuxième chemin (chemin 2), on obtient la courbe ci-dessous qui montre que le champ électrique a atteint une valeur maximale de 40,80 kV/mm au niveau du coin bas (coté droit) de l'électrode N°1.

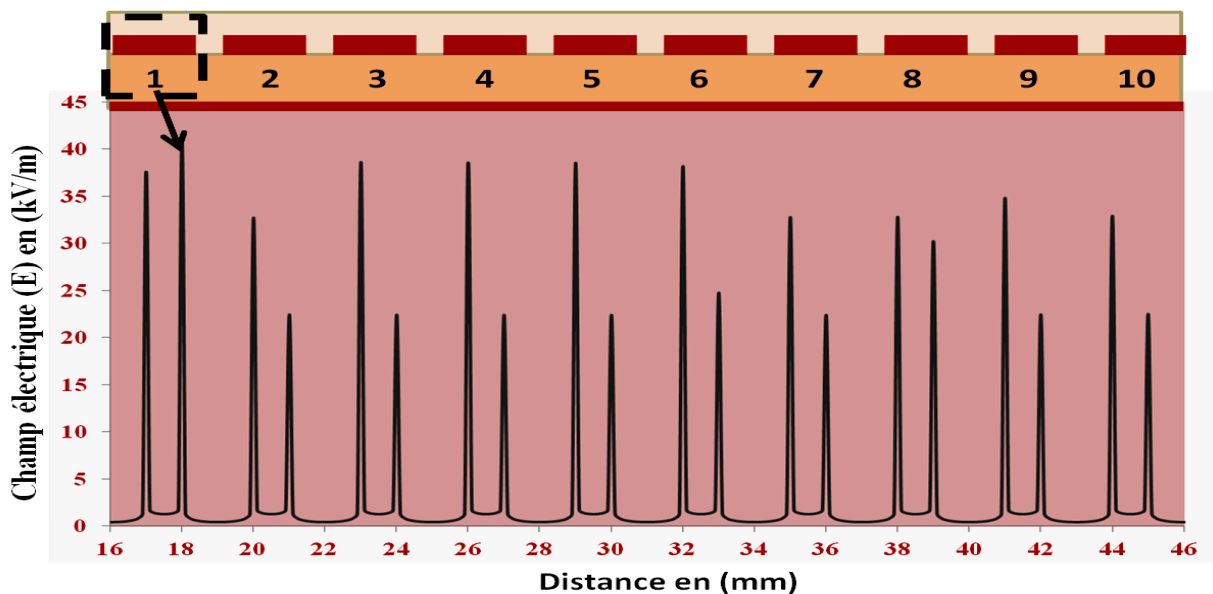
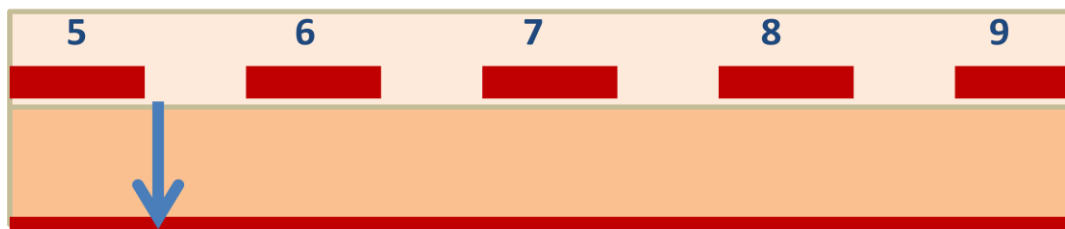


Fig IV.11 Variation du champ électrique à la surface du support.

### IV.3.5 Le champ et le potentiel électrique à l'intérieur du support:

Le support est désigné par un matériau choisi comme une plaque de FR4, son rôle est de diminuer les fuites de champ électrique créée autour des électrodes. Sa nécessité également réside dans le sens de séparer nettement les électrodes supérieures de l'électrode inférieure qui porte toutes les deux un potentiel différent. Donc ce support doit être un fort isolant contre les courts circuits et les fuites des lignes de champ électrique afin d'éviter la défaillance du séparateur électrostatique.



chemin à l'intérieur du support

Fig IV.12 Chemin tracé à l'intérieur du support.

Les figures IV-13 et IV-14 présentent respectivement les variations du champ et du potentiel électrique à l'intérieur du support. Elles ont été tracées en utilisant le chemin indiqué dans la figure IV-12. Ce chemin traverse l'épaisseur du support FR4 en partant de bas de l'électrode supérieure N°5 (portée à 2kV) et arrivant sur l'électrode inférieure portée à la masse (0V). D'ailleurs, on voit clairement dans la fig IV.13 la décroissance progressive du potentiel entre l'électrode supérieure et l'électrode inférieure tout le long de l'épaisseur du support (2mm).

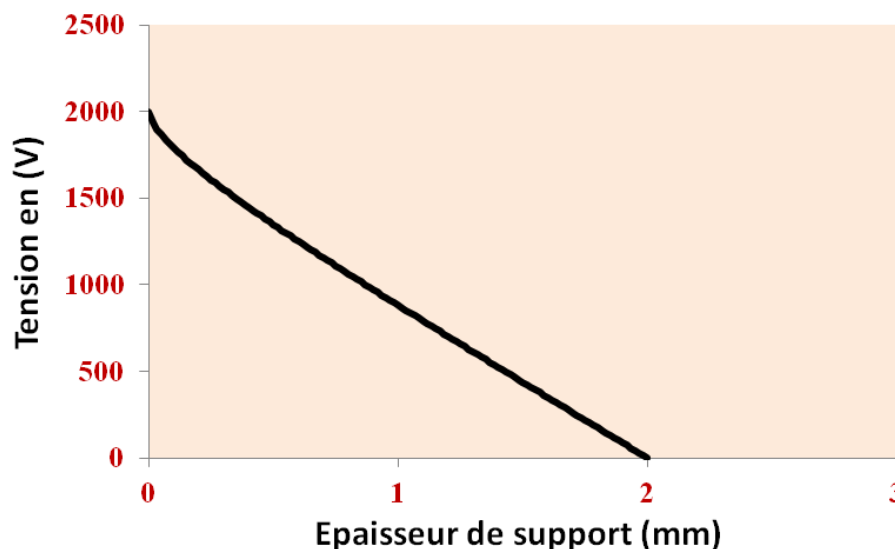


Fig IV.13 Courbe de variation du potentiel électrique à l'intérieur du support.

le champ électrique est très élevé au niveau du coin bas de l'électrode N°5 et décroît très rapidement au fur et à mesure qu'on avance dans l'épaisseur du support jusqu'au niveau presque nul quand on arrive à l'électrode inférieure.

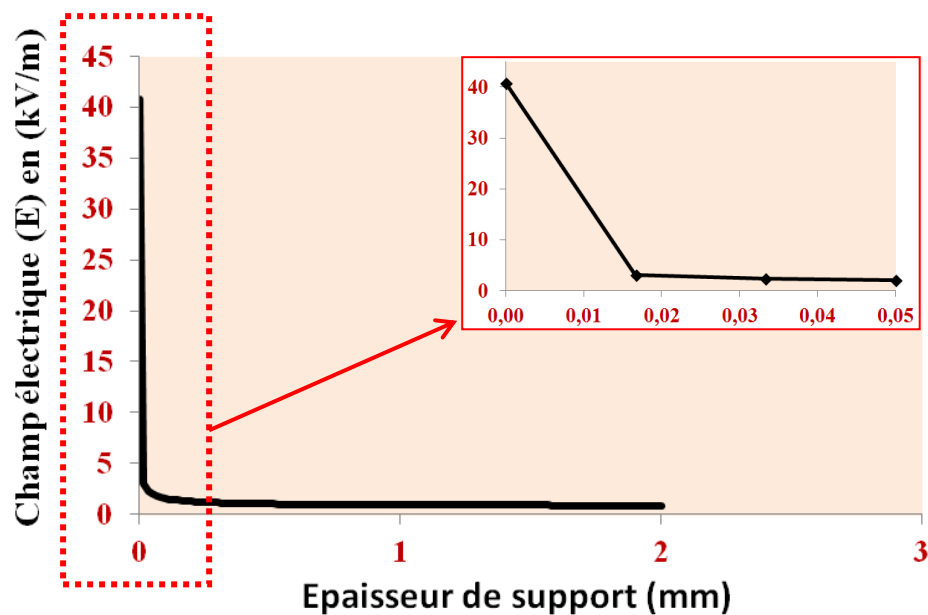


Fig IV.14 Courbe de variation du champ électrique à l'intérieur du support.

#### IV.4 Comparaison des résultats avec un modèle axisymétrique:

Dans cette partie, on fait une comparaison entre nos résultats avec ceux obtenus dans le cadre d'un travail antérieur [11]. Comme expliqué précédemment dans le chapitre 3 (Figure III-4), nos résultats ont été obtenus en réalisant une simulation avec un modèle géométrique issu d'une coupe en 2D, alors que les résultats antérieurs à notre travail ont été eux obtenus avec un modèle géométrique réalisé en axisymétrique selon la configuration présentée dans la figure IV-15.

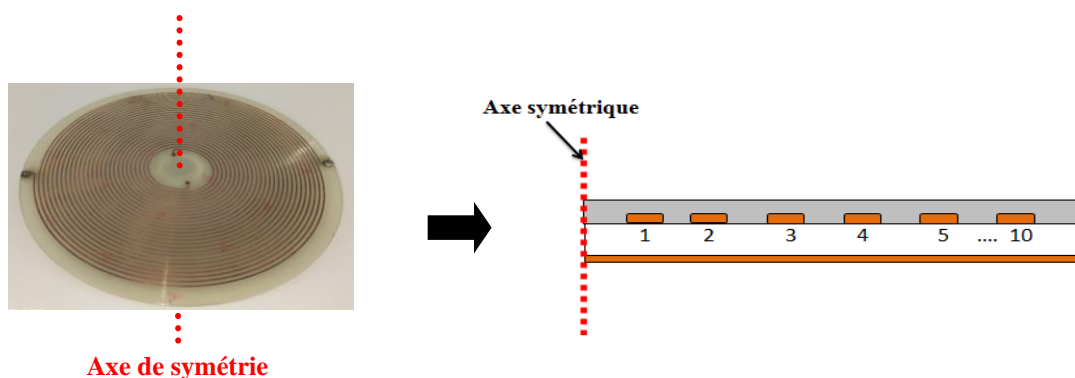


Fig IV.15 : Modèle axisymétrique avec une coupe selon l'axe de symétrie du convoyeur [11].

Le tableau comparatif suivant rassemble les valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant et dans le support obtenues dans notre étude réalisée en 2D avec les valeurs obtenues dans le travail précédent réalisé en axisymétrique. On remarque finalement que les deux résultats sont du même ordre de grandeur et relativement comparables mis à part la valeur du champ électrique dans le support qui est légèrement plus élevée quand la simulation est réalisée en axisymétrique avec une valeur qui atteint 45,78 kV/mm contre 40,80kV/mm obtenu avec une simulation en 2D.

<b>Champ électrique max en kV/mm</b>	<b>En haut des électrodes</b>	<b>Isolant en bas des électrodes</b>	<b>A la surface du support</b>
Vue en 2D	29.35	30.83	40.80
Vue en Axisymétrique [11]	30,69	40,56	45,78

*Tab IV.1 Comparaison entre les valeurs maximales du champ électrique en vue 2D et en vue axisymétrique.*

#### **IV.5 Conclusion :**

Les résultats de simulation de notre modèle géométrique en forme 2D, nous a montré comment les lignes équipotentiels sont réparties autour de la géométrie dont on a trouvé un effet de bord dans les deux extrémités du séparateur ce qui nous a obligé de se pencher uniquement sur les 10 électrodes centrales. La simulation nous a montré que le champ électrique est intense sur les pointes des électrodes d'où l'importance de bien choisir l'isolant qui sera placé sur ces dernières afin de renforcer l'isolation entre les électrodes et de prévenir un claquage entre elles. L'étude de comparaison réalisée entre le modèle 2D et le modèle axisymétrique a montré également qu'on obtient des valeurs proches et du même ordre de grandeur ce qui confirme que l'étude de simulation est suffisamment fiable.

***CONCLUSION***  
***GENERALE***



## Conclusion générale

L'étude de notre mémoire a été consacré d'une manière générale à la simulation d'un model spécifique d'un séparateur électrostatique rotatif dans le but de calculer la valeur du champ électrique dans l'isolant et particulièrement autour des électrodes. Pour cela, on est passé par l'étude bibliographique concernant les notions fondamentales sur l'électrostatique. Commenant par la description de la charge électrique et les différents interactions d'électrifications. Egalement on a parlé du phénomène de l'effet de pointe et les mécanismes physiques de chargement des matériaux pulvérulents.

Dans le deuxième chapitre on a réservé une grande partie pour décrire les convoyeurs à ondes mobiles, leurs types, la géométrie des électrodes et leurs applications industrielles.

Dans le chapitre trois on a accordé plus d'importance à l'étude de la simulation dont nous avons présenté le model géométrique du convoyeur avec une coupe 2D sur le logiciel de simulation d'éléments finies Flux 2D. Notre model est constitué donc de 20 électrodes de largeur 1mm et espacées de 2mm entre chacune d'elles. On a décrit aussi dans ce chapitre les différentes instructions de simulation à savoir, la géométrie constituée par un ensemble de points sur les axes x/y, le maillage qui permet de définir les régions du champ électrique intense, les paramètres physiques définissant l'isolant au niveau des différentes faces du model ainsi que le potentiel électrique affecté aux électrodes.

Dans le chapitre quatre la simulation nous a montré qu'un effet de bord existe aux deux extrémités du séparateur. Par conséquent, le calcul s'est porté uniquement sur les dix électrodes centrales qui ne sont pas affectées par cet effet de bord. Le champ électrique à l'intérieur d'isolant est intense au niveau des coins des électrodes et a atteint une valeur maximale de 30,69 kV/mm ce qui nous rappelle l'importance du bon choix de l'isolant et ceci pour éviter le claquage dans la partie inter-électrodes. On a montré aussi que le support en FR4 est soumis lui aussi à des pics de champ électrique très élevés mais qui reste généralement supportable par les plaques FR4 disponible sur le marché.

Enfin, la comparaison entre la simulation en 2D et celle en axisymétrique donne des résultats proches et du même ordre de grandeur.

Ce modeste travail enrichi la recherche dans le domaine des séparateurs électrostatique et donne des outils pour une meilleure optimisation du convoyeur à ondes mobiles.

***REFERENCES***  
***BIBLIOGRAPHIQUES***

## Références bibliographiques

- [1] **Ahmed Fizazi**, «Electricité et Magnétisme», office des publications universitaires, Université de Béchar 2014.
- [2] **Dr Remaoun. S.M**, « Polycopié d'Électromagnétisme », Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Faculté de Génie Électrique, Département d'Électrotechnique, P15, 2015.
- [3] **Sara Messal**, «Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents », Thèse de Doctorat, université de Poitiers, 2016.
- [4] **Benadla Khouloud Naila, Benamara Nora**, « approche floue sur un séparateur électrostatique a cylindre tournant », Projet de fin d'études de Master, Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, Département de Génie Electrique, P6 et7, 2015.
- [5] **MESSAFEUR Radjaa**, « Etude d'un procédé de séparation d'un mélange de particules isolantes issues de plusieurs matériaux », Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-abbes. chapitre I (état de l'art), P08, 2018.
- [6] **M. N. Horenstein, M. Mazumder and all**, « Modeling of Trajectories in an Electrodynamic Screen for Obtaining Maximum Particle Removal Efficiency ». IEEE Transactions on industry applications, VOL. 49, NO. 2, 2013.
- [7] **H. Pang, P. Atten et JL. Reboud**, « Dépoussiérage électrostatique pour les particules submicroniques en atmosphère usuelle (Terre) et raréfiée (Planète Mars) », Université Joseph Fourier - Grenoble 1, décembre 2006.
- [8] **Ali bida Ahmed**, « Utilisation de la technique des ondes mobiles pour le déplacement des matériaux pulvérulents. Application pour la séparation électrostatique des particules », Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, Faculté de Génie Electrique, chapitre I, P1et2, 2020.
- [9] **Belgacem Abdelkader**, « Etude du déplacement et de la séparation des particules micronisées avec la technique des ondes mobiles », Thèse de Doctorat, Université Djillali liabes de SIDI-BEL-ABBES, Département d'Électrotechnique, 2020.
- [10] **Benaouda Imen**, « contribution à la séparation électrostatique des particules en plastique humide », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, P31, 2020.
- [11] **Boukourdane Abdelmalek, Chementel Kouider**, « Calcul du champ électrique dans un séparateur électrostatique rotatif », Projet de Fin d'Etude de Master, Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent Département de Génie Electrique, P18, 2021.
- [12] **CEDRAT**, « User guide Flux® 11.2 », 15 Chemin de Malacher – Inovallée 38246 MEYLAN Cedex France, 9 Décembre 2013.

## Résumé:

Le séparateur électrostatique ou convoyeur à ondes mobiles a eu plusieurs appellations différentes, appelé rideau électrique, effet des rideaux électriques, dont il existe une multitude d'installations de séparateurs électrostatiques qui traitent différents types de mélange de matériaux de taille plus fine. Nous avons présenté toutes les étapes et les descriptions qu'on a pu suivre pour réaliser une simulation réussie avec logiciel Flux 2D. Les résultats de simulations de notre modèle géométrique en forme 2D, nous a montré comment les lignes équipotentielles sont réparties autour de la géométrie dont on a trouvé un effet de bord dans les deux extrémités du séparateur. On a remarqué aussi que le potentiel électrique reste constant en haut d'électrodes supérieures et prend une valeur de 2kV. La simulation nous a prouvé aussi que le champ électrique est intense sur les pointes des électrodes. Les résultats en forme 2D sont largement différents, plus précis, plus exactes que celle de la forme axisymétrique.

**Mots clés :** Le séparateur électrostatique, convoyeur à ondes mobiles, logiciel Flux 2D, le potentiel électrique, le champ électrique, forme 2D, forme axisymétrique.

## Abstract:

The electrostatic separator or moving wave conveyor has had several different names, called electric curtain, electric curtain effect, of which there are a multitude of electrostatic separator installations that handle different types of finer size material mixture. We have presented all the steps and descriptions that we could follow to carry out a successful simulation with Flux 2D software. The results of simulations of our geometric model in 2D form, showed us how the equipotential lines are distributed around the geometry of which we found an edge effect in the two ends of the separator. It was also noticed that the electric potential remains constant at the top of the upper electrodes and takes a value of 2kV. The simulation also proved to us that the electric field is intense on the tips of the electrodes. The results in 2D form are largely different, more precise, more exact than that of the axisymmetric form.

**Keywords:** The electrostatic separator, moving wave conveyor, Flux 2D software, electric potential, electric field, 2D shape, axisymmetric shape.

## ملخص:

يحتوي الفاصل الكهروستاتيكي أو ناقل الموجة المتحركة على عدة أسماء مختلفة ، تسمى الستارة الكهربائية ، وتأثير الستارة الكهربائية ، والتي يوجد منها العديد من تركيبات الفاصل الكهروستاتيكي التي تتعامل مع أنواع مختلفة من خليط المواد ذات الأحجام الدقيقة. لقد قدمنا جميع الخطوات والأوصاف التي يمكننا اتباعها لإجراء محاكاة ناجحة باستخدام برنامج Flux 2D. أظهرت لنا نتائج محاكاة نموذجنا الهندسي في شكل ثنائي الأبعاد كيف يتم توزيع خطوط متساوية الجهد حول الشكل الهندسي الذي وجدنا فيه تأثير الحافة في طرفي الفاصل. كما أننا استنتجنا أن الجهد الكهربائي يظل ثابتاً في الجزء العلوي من الأقطاب الكهربائية العلوية ويأخذ قيمة 2 كلو فولط. أثبتت لنا المحاكاة أيضاً أن المجال الكهربائي على أطراف الأقطاب الكهربائية يكون بشدة. النتائج في الشكل ثنائي الأبعاد مختلفة إلى حد كبير ، وأكثر دقة ، و موضوعية من تلك الخاصة بالشكل المحوري المتماثل.

الكلمات المفتاحية: الفاصل الكهروستاتيكي ، ناقل الموجة المتحركة ، برنامج Flux 2D ، الجهد الكهربائي ، المجال الكهربائي ، الشكل ثنائي الأبعاد ، شكل المحور المتماثل.