

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République populaire et démocratique  
algérienne  
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 : Electrotechnique.

Spécialité : Électromécanique.

Thème

**Tri des déchets électriques à l'aide d'un séparateur  
électrostatiques**

**Présenté Par :**

- 1) MEGUENI ABDERRAHMANE ILIES.
- 2) BENASKAR FATIMA.
- 3) HADDOU AMINA NASSERINE.

**Devant le jury composé de :**

<b>Aissou Massinissa</b>	<b>MCA</b>	<b>UAT.B. B</b>	<b>Président</b>
<b>TOUHAMI Aicha</b>	<b>MAA</b>	<b>UAT.B. B</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>ZELMAT Samir</b>	<b>Pr</b>	<b>UAT.B. B</b>	<b>Encadrant</b>

## **REMERCIEMENT**

*Une grande gratitude à mon encadreur **Mr Zelmat Samir**, qui m'a soutenu pendant toutes les étapes de mémoire en manifestant un grand intérêt pour mon travail.*

*Mes remerciements iront également aux **membres du jury** pour avoir accepté d'évaluer mon modeste travail.*

*A tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin, par un geste, une parole ou un conseil, je leur dis merci.*

*Sans oublier tous **nos enseignants** qui nous ont assurés des études de haut niveau et qui nous permis d'acquérir des connaissances.*

# *Sommaire*

**Remerciements**

**Sommaire**

**Liste des figures**

**Liste des Tableaux**

**Introduction ..... 1**

## **Chapitre I: Généralités sur l'électrostatique**

I.1 Introduction..... 3

I.2 Définition ..... 3

I.3 Le champ électrostatique ..... 3

I.3.1 Le champ électrique ..... 3

I.3.2 La loi de coulomb ..... 4

I.3.3 Le champ électrique uniforme ..... 4

I.3.4 Lignes de champ, tubes de champ ..... 4

I.3.5 Moment dipolaire..... 5

I.3.6 La polarisation ..... 6

I.3.7 Phénomène de charge électrostatique ..... 7

I.4 Mécanisme de la charge électrique ..... 7

I.4.1 Effet couronne..... 7

I.4.2 L'électrisation ..... 8

I.4.2.1 Electrification par frottement..... 8

I.4.2.2 Electrification par contact..... 8

I.4.2.3 électrisation par influence ..... 9

I.5 Séparation électrostatique ..... 10

I.5.1 Principe de fonctionnement ..... 10

I.5.2	Application.....	10
I.5.3	Avantages du séparateur électrostatique .....	10
I.6	Conclusion .....	11

## **CHAPITRE II : Généralités sur le convoyeur à onde mobile**

II.1/	Introduction .....	13
II.2/	Historique .....	13
II.3/	Définition de la technique des ondes mobiles .....	14
II.4/	Types des convoyeurs à ondes mobiles.....	14
II.4.1	/ Selon le nombre de phases.....	15
II.4.2	/ Selon la géométrie des électrodes.....	16
II.5/	Quelques applications de la technique des ondes mobiles .....	17
II.6/	Séparation avec la technique des ondes mobiles .....	17
II.	7/ Conclusion.....	19

## **Chapitre III: Présentation du modèle étudié**

III.1	Introduction .....	21
III.2	Présentation du prototype expérimental .....	21
III.3.	Modélisation du prototype expérimental.....	22
III.4	Logiciel FLUX 2D .....	26
III.5	Géométrie du modèle .....	27
III.5.1.	Cas 1 : Modèle sans particule.....	27
III.5.2.	Cas 2 : Particule cuivre parallèle aux électrodes .....	28
III.5.3.	Cas 3 : Particule en plastique (PVC) parallèle aux électrodes .....	29
III.5.4.	Cas 4 : Particule cuivre perpendiculaire aux électrodes.....	31
III.5.5.	Cas 5 : Particule en plastique (PVC) perpendiculaire aux électrodes .....	32
III.	6/ Paramètres physiques .....	34
III.6.1	Matériaux et régions surfaciques.....	34
III.6.2	Régions linéiques .....	35
III.	7/ Conclusion.....	36

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

IV.	1/ Introduction.....	38
IV.2	Distribution des lignes équipotentiels .....	38
IV.2.1	Effet de bord.....	38

IV.2.2 Variation du potentiel électrique.....	39
IV.3 Calcul du champ électrique.....	43
IV.3.1 Convoyeur sans particule (cas N°1).....	44
IV.3.2 Convoyeur avec particule cuivre en parallèle (cas N°2).....	45
IV.3.3 Convoyeur avec particule PVC en parallèle (cas N°3).....	46
IV.3.4 Convoyeur avec particule cuivre perpendiculaire (cas N°4) .....	48
IV.3.5 Convoyeur avec particule PVC perpendiculaire (Cas N°5).....	49
IV.4 Conclusion .....	50
Conclusion générale .....	53
Bibliographie.....	56
Résumé.....	59

# Liste des figures

## **Chapitre I: Généralités sur l'électrostatique**

<u>Figure I.1 : La loi de coulomb</u> .....	4
<u>Figure I.2 : Exemple d'un champ uniforme</u> .....	4
<u>Figure I.3 : Les lignes de champ électrostatique</u> .....	5
<u>Figure I.4 : Les lignes de champ électrostatique d'une charge (+) et (-)</u> .....	5
<u>Figure I.5 : Moment dipolaire entre deux charges opposées</u> .....	6
<u>Figure I.6 : Effet de couronne</u> .....	7
<u>Figure I.7 : Electrification par frottement</u> .....	8
<u>Figure I.8 : Electrification par contact</u> .....	9
<u>Figure I.9 : Electrification par influence</u> .....	9
<u>Figure I.10 : Séparateur électrostatique haute tension</u> .....	10

## **CHAPITRE II : Généralités sur le convoyeur à onde mobile**

<u>Figure II.1 : Représentation schématique d'un convoyeur biphasé sous forme de deux peignes</u> .....	14
<u>Fig II.2 : Convoyeur à ondes mobiles (à 4 phases)</u> .....	14
<u>Fig II.3 : Schéma descriptif du convoyeur biphasé</u> .....	15
<u>Fig II.4 : Schéma descriptif du convoyeur triphasé</u> .....	15
<u>Fig II.5 : Schéma descriptif du convoyeur à quatre phases</u> .....	16
<u>Figure II.6: Quelques exemples de convoyeurs à configuration 2D</u> .....	17
<u>Figure II.7 : Quelques exemples de convoyeurs à configuration 3D</u> .....	17

## **Chapitre III: Présentation du modèle étudié**

<u>Figure III.1 : Séparateur électrostatique rotatif</u> .....	21
<u>Figure III.2 : Description schématique du procédé de séparation électrostatique</u> .....	22
<u>Figure III.3 : Forme géométrique de l'électrode supérieure et inférieure</u> .....	22
<u>Figure III.4 : présentation de l'axe de la coupe 2D</u> .....	23
<u>Figure III.5 : Vue de coupe en 2D du convoyeur</u> .....	24
<u>Figure III.6 : Vue de coupe de la géométrie étudiée en 2D</u> .....	24
<u>Figure III.7: Position parallèle et perpendiculaire des particules par rapport aux électrodes du convoyeur</u> .....	25
<u>Figure III.8 : Logo du logiciel Flux</u> .....	26

<u>Figure III.9 : Menu « Géométrie » du logiciel Flux 2D.</u> .....	27
<u>Figure III.10 : Géométrie 2D du modèle sans particule.</u> .....	27
<u>Figure III.11 : Vue globale sur le maillage du modèle sans particule avec un vue agrandie sur le maillage du coin d'une électrode</u> .....	28
<u>Figure III.12: Géométrie 2D du modèle avec particule cuivre en parallèle avec les deux électrodes</u> .....	28
<u>Figure III.13 : Vue agrandie sur le maillage de la particule cuivre</u> .....	29
<u>en parallèle avec les deux électrodes</u> .....	29
<u>Figure III.14: Maillage fin sur le coin supérieur droit de la particule cuivre.</u> .....	29
<u>Figure III.15 : Géométrie 2D du modèle avec particule plastique (PVC) en parallèle avec les deux électrodes</u> .....	30
<u>Figure III.16 : Vue agrandie sur le maillage de la particule plastique (PVC) en parallèle avec les deux électrodes</u> .....	30
<u>Figure III.17 : Maillage fin sur le coin supérieur droit de la particule plastique</u> .....	31
<u>Figure III.18 : Géométrie 2D du modèle avec particule cuivre perpendiculaire avec les deux électrodes</u> .....	31
<u>Figure III.19 : Vue agrandie sur le maillage de la particule cuivre perpendiculaire avec les deux électrodes</u> .....	32
<u>Figure III.20: Maillage fin sur le coin supérieur droit de la particule cuivre</u> .....	32
<u>Figure III.21 : Géométrie 2D du modèle avec particule plastique (PVC).</u> .....	33
<u>Figure III.22 : Vue agrandie sur le maillage de la particule plastique (PVC) perpendiculaire avec les deux électrodes</u> .....	33
<u>Figure III.23: Maillage fin sur le coin supérieur droit de la particule plastique</u> .....	34
<u>Figure III.24: Paramètres créés dans le menu « Physique » du logiciel Flux 2D</u> .....	34
<u>Figure III.25 : Menu Flux 2D de la région linéique</u> .....	35
<u>Figure III.26: Potentiel électrique affecté aux électrodes</u> .....	35

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

<u>Figure IV.1 : Mise en évidence de la zone étudiée du séparateur électrostatique</u> .....	38
<u>Figure IV.2 : Effets de bord aux deux extrémités de la géométrie.</u> .....	39
<u>La figure IV.3 : Potentiel électrique des six électrodes de la partie centrale du convoyeur (cas N°1 : sans particule)</u> .....	40
<u>La figure IV.4 : Potentiel électrique des six électrodes de la partie centrale du convoyeur.</u> 40	
<u>Figure IV.5 : Vue agrandie de la variation du potentiel électrique entre l'électrode N°3 et N°4.</u> .....	41

<u>Figure IV.6 : Distribution des lignes équipotentiels dans la zone centrale du convoyeur pour les cinq cas étudiés</u> .....	42
<u>Figure IV.7 : Vues agrandies de la distribution du potentiel autour de la position de la particule</u> .....	43
<u>Figure IV.8 : Chemin tracé dans l'isolant passant par le haut des électrodes</u> .....	44
<u>Figure IV.9 : Position des points repères pour le calcul du champ électrique au niveau des pointes de la particule.</u> .....	44
<u>Figure IV.10 : Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas 1).</u> .....	45
<u>Figure IV.11 : Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas N°2).</u> .....	46
<u>Figure IV.12: Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas N°3)</u> .....	47
<u>Figure IV.13: Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas N°4)</u> .....	48
<u>Figure IV.14: Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas N°5)</u> .....	49
<u>Figure IV.15 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant au niveau des électrodes du convoyeur pour les cinq cas étudiés.</u> .....	51
<u>Figure IV.16 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'air au niveau des quatre coins de la particule (A, B, C et D) pour les cinq cas.</u> .....	52
<u>Figure IV.17 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant Kapton au niveau des deux coins de la particule (C et D) pour les cinq cas.</u> .....	52

## **Liste des Tableaux**

### **Chapitre III :**

<u>Tableau III.1 : les cas étudiés.</u> .....	26
<u>Tableau III.2: Permittivité relative des matériaux utilisés.</u> .....	35

### **Chapitre IV :**

<u>Tableau IV.1 : Valeurs du champ électrique au niveau des point repères (cas N°1).</u> .....	45
<u>Tableau IV.2 : Valeurs du champ électrique aux coins de la particule cuivre (cas N°2)</u> .....	46
<u>Tableau IV.3 : Valeurs du champ électrique aux coins de la particule PVC (cas N°3)</u> .....	48
<u>Tableau IV.4 : Valeurs du champ électrique aux coins de la particule cuivre (cas N°4)</u> .....	49
<u>Tableau IV.5: Valeurs du champ électrique aux coins de la particule PVC (cas N°5)</u> .....	49
<u>Tableau IV.6 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant au niveau du coin de l'électrode N°6.</u> .....	50
<u>Tableau IV.7 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant au niveau du coin de l'électrode N°4.</u> .....	50

# Introduction générale

## Introduction générale

---

La nécessité de séparer les déchets humains pour les appareils électriques et électroniques a incité à créer de nouvelles technologies pour répondre à ce besoin et rentabiliser la production de ces appareils. Le recyclage du plastique des appareils à la fin de leur cycle de vie est un domaine prioritaire pour la recherche mondiale. Dans ce contexte, il existe une technologie basée sur un convoyeur à ondes mobiles qui peut être intéressante pour séparer les mélanges de matériaux conducteurs et isolants.

Notre travail traite un problème qui survient parfois dans le fonctionnement des convoyeurs à ondes mobile, à savoir le claquage électrique entre ses électrodes portées à des potentiels différents.

L'objectif de notre étude est de faire une simulation avec logiciel « Flux 2D » pour déterminer la valeur du champ électrique dans le convoyeur à ondes mobiles afin de pouvoir optimiser sa conception et prévenir tout risque de claquage électrique à sa surface ou dans son volume. Dans ce mémoire on a calculé le champ électrique dans des zones différentes du convoyeur.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres, Dans le premier chapitre, on a introduit l'électrostatique d'une façon générale.

Dans le deuxième chapitre on a parlé des convoyeurs à ondes mobiles et leurs différents types.

On a présenté dans le troisième chapitre notre modèle d'étude avec la simulation à l'aide du logiciel FLUX 2D. On a expliqué la manière et les étapes de construction de notre modèle, sa géométrie, son maillage, l'affectation des lignes et les paramètres physiques utilisés et finalement la résolution du projet.

Enfin, le dernier chapitre présente l'analyse des résultats de calculs réalisés par le logiciel « Flux 2D »

# **Chapitre I**

## **Généralités sur**

### **L'électrostatique**

## I.1 Introduction :

Bien qu'il s'agisse d'une science physique avec une longue histoire, il est difficile d'imaginer le large éventail de domaines d'étude que l'électrostatique couvre aujourd'hui. Ces recherches sur la piézoélectricité et l'électricité, ainsi que sur la technologie des systèmes d'action à microprocesseur.

Les technologies électromécaniques, telles que la décharge aérodynamique, la précipitation électrostatique, la séparation des particules, l'injection de charge, le dopage, le traitement de surface et la recherche en biophysique des protéines, ont finalement démontré qu'il s'agit à la fois d'une science ancienne et d'une science nouvelle.

## I.2 Définition :

L'électrostatique est la branche de la physique qui étudie les charges électriques immobiles. Le concept de charge électrique a été introduit pour la première fois par Benjamin Franklin en 1750. Il a découvert que les charges électriques pouvaient être positives ou négatives et que des charges opposées s'attiraient tandis que des charges identiques se repoussaient.

## I.3 Le champ électrostatique :

### I.3.1 Le champ électrique :

Le champ électrique est un concept clé de l'électrostatique. Il représente la force électrique exercée sur une charge de test placée à un point donné de l'espace. Le champ électrique est créé par des charges électriques et peut être calculé à partir de la loi de coulomb. est utilisé pour décrire le comportement des charges électriques dans un champ électrique externe. Il est également utilisé dans des applications telles que la conception de condensateurs et la mesure de la tension électrique.

L'intensité du champ électrique dépend de la charge de l'objet qui le produit et de la distance par rapport à l'objet chargé selon l'équation suivante [1].

$$E=k.q/r^2$$

Avec :

E : l'intensité de champ électrique

K : la constante de coulomb

## Chapitre I: Généralités sur l'électrostatique

$Q$  : la charge de particule (C)

$r$  = la distance par rapport à la particule chargée (m)

### I.3.2 La loi de coulomb :

La loi de coulomb permet de calculer la force électrique entre deux charges et de prédire leur comportement en présence d'autres charges. Elle est utilisée dans de nombreuses applications telles que la conception de circuits électrique et la mesure de la charge électrique.

La loi de coulomb permet de calculer la force électrique qui s'exerce entre deux objets immobiles et chargés.

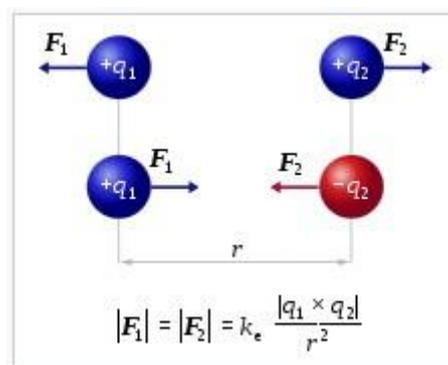


Figure I.1 : La loi de coulomb [2].

### I.3.3 Le champ électrique uniforme :

Un champ électrique est dit uniforme dans une zone de l'espace où il est constant en direction en sens, et en valeur. Les lignes de champs sont alors toutes parallèles.

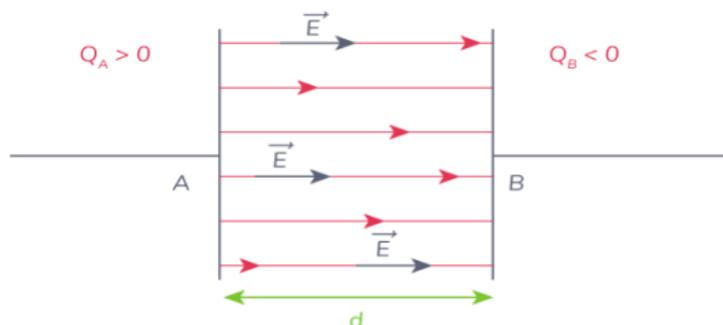


Figure I.2 : Exemple d'un champ uniforme.

### I.3.4 Lignes de champ, tubes de champ :

Une ligne de champ est une courbe telle qu'en chacun de ses points, le champ électrostatique  $\vec{E}$  soit porté par la tangente à la courbe.

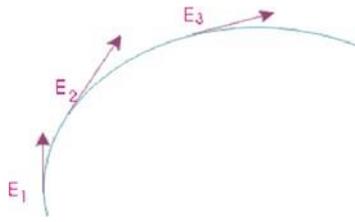


Figure I.3 : Les lignes de champ électrostatique

Dans l'espace il existe une infinité de lignes de champ et il passe une seule ligne de champ par chaque point de l'espace. On oriente chaque ligne de champ dans le sens du vecteur  $\vec{E}$ . Les lignes de champ s'éloignent des sources chargées positivement et se dirigent vers les sources chargées négativement.

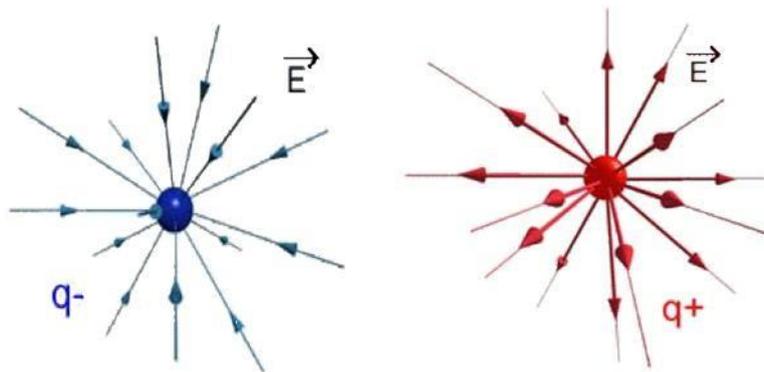


Figure I.4 : Les lignes de champ électrostatique d'une charge (+) et (-)

Un tube de champ est la surface imaginaire formée par l'ensemble des lignes de champ qui s'appuient sur une courbe fermée (par exemple un cylindre dans le cas de lignes de champ parallèles s'appuyant sur un cercle).

Grâce à l'effet de polarisation diélectrique, on peut matérialiser les lignes de champ avec des grains de semoule ou des semences de gazon qui s'orientent dans le sens du champ [3].

### I.3.5 Moment dipolaire :

Le moment dipolaire est une grandeur vectorielle qui caractérise l'intensité et l'orientation d'un dipôle. Ce lien renvoie vers une page d'homonymie. Il peut s'agir :

- D'un dipôle électrostatique : le module du moment dipolaire s'exprime alors en coulombs mètres (Cm).

## Chapitre I: Généralités sur l'électrostatique

---

- D'un dipôle magnétique : le module du moment dipolaire s'exprime alors en ampères mètres carrés (A m<sup>2</sup>).

Pour une molécule électriquement neutre, le module du moment dipolaire électrique s'exprime selon la relation :

$$\mu = q \cdot d$$

Avec :

$d$  : est une distance.

$q$  : la charge caractéristique du dipôle.

Cette formulation revient à associer la molécule à un dipôle constitué de deux charges ponctuelles ( $q^+$ ) et ( $q^-$ ) séparées par la distance  $d$  [4].

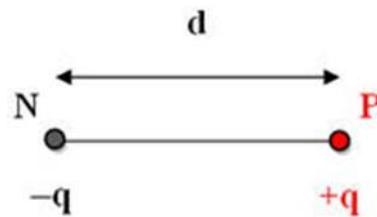


Figure I.5 : Moment dipolaire entre deux charges opposées.

### I.3.6 La polarisation :

La polarisation (ou plus précisément le vecteur polarisation) est une grandeur physique macroscopique vectorielle utilisée dans l'étude des propriétés des matériaux diélectriques. Elle désigne la densité volumique de moment dipolaire électrostatique<sup>1</sup>. Son unité dans le Système international est le C/m<sup>2</sup>. Ce concept a été introduit par Faraday alors qu'il étudiait le comportement des isolants électriques dans des champs électrostatiques.

Dans un diélectrique parfait, il n'existe pas de charges électriques libres. En particulier, un champ électrique appliqué ne provoque pas de courant électrique. Mais les charges électriques liées sont susceptibles de se déplacer sur de petites distances ou de vibrer sous l'influence d'un champ électrique : il y a alors apparition d'une polarisation.

### I.3.7 Phénomène de charge électrostatique :

Tout phénomène électrostatique est dû à la présence de charges électriques qui n'existent pas indépendamment d'un support matériel ; même la charge élémentaire portée par un électron l'est par une particule matérielle. Ces charges électriques sont, soit des électrons, soit des ions positifs, soit des ions négatifs [5].

### I.4 Mécanisme de la charge électrique :

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 Générées par un ou plusieurs des trois mécanismes physiques différents. Il s'agit de l'effet couronne, de l'induction électrostatique et de l'effet tribo-électrique [6].

#### I.4.1 Effet couronne :

L'effet corona, aussi appelé « effet couronne » ou « effet de couronne », est un phénomène de décharge électrique partielle entraînée par l'ionisation du milieu entourant un conducteur. Il apparaît quand le champ électrique dépasse une « valeur critique » (mais dont les conditions ne permettent pas la formation d'un arc). Il se manifeste par l'apparition de points lumineux bleuâtres (sur certaines aspérités métalliques<sup>1</sup>) ou lignes lumineuses ou parfois d'une longue « gaine lumineuse » qui se forme autour des câbles (conducteurs aériens le plus souvent) transportant du courant sous haute tension [7].

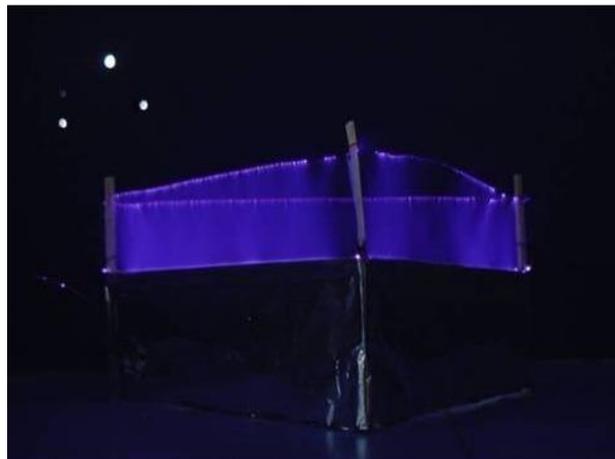


Figure I.6 : Effet de couronne [8].

### I.4.2 L'électrisation :

#### I.4.2.1 Electrification par frottement :

Si l'on frotte une baguette (verre, ébonite, matière plastique...) contre un chiffon quelconque (tissu de laine, drap, peau de chat) on observe que la baguette est capable d'attirer de menus objets (cheveux, duvet, confettis).

C'est le frottement qui a provoqué l'électrisation.

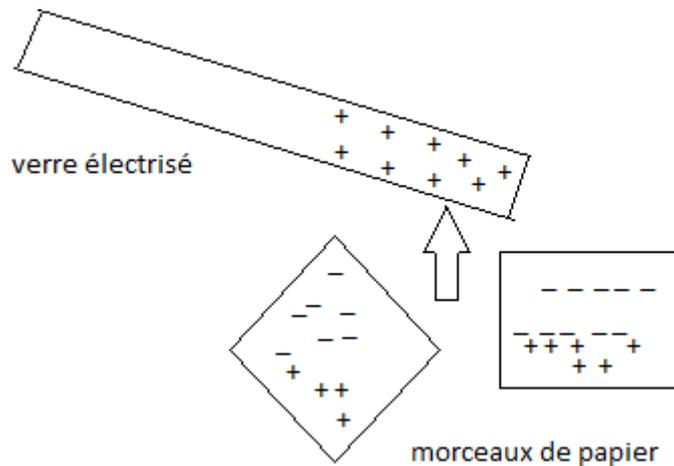


Figure I.7 : Electrification par frottement

#### I.4.2.2 Electrification par contact :

Un pendule électrostatique est constitué d'une boule légère (moelle de sureau, polystyrène expansé...) recouverte d'une couche conductrice (feuille d'aluminium, graphite) suspendue à une potence par un fil.

Lorsqu'on approche une baguette électrisée du pendule, la boule est attirée par la baguette. Après contact avec la baguette, la boule est repoussée.

La boule est repoussée parce qu'elle s'est électrisée par contact avec la baguette.

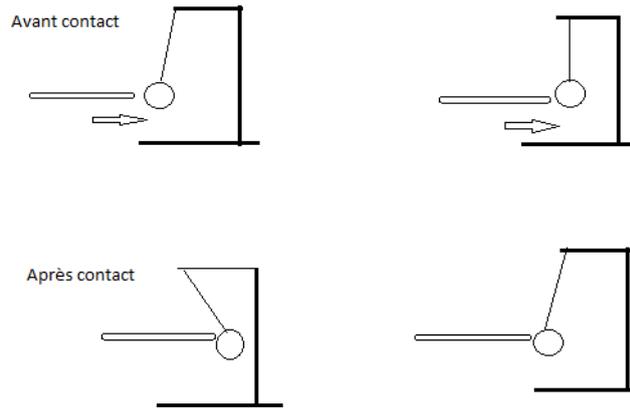


Figure I.8 : Electrification par contact

### I.4.2.3 électrisation par influence :

Un électroscope à feuilles est constitué d'une tige métallique supportant deux feuilles étroites et très fines d'or ou d'aluminium. L'ensemble est placé dans une enceinte transparente et isolante (verre).

Lorsqu'on approche une baguette électrisée de l'électroscope (sans le toucher), les feuilles de l'électroscope s'écartent. Si on éloigne la baguette, les feuilles retombent [9].

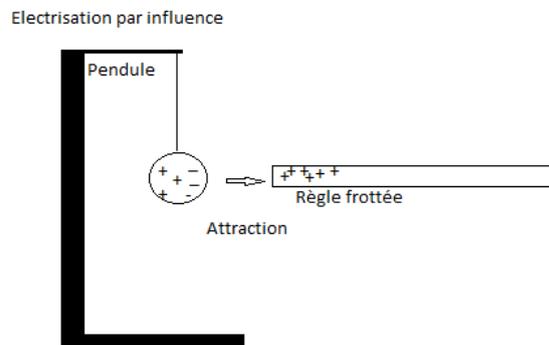


Figure I.9 : Electrification par influence

### I.5 Séparation électrostatique :

#### I.5.1 Principe de fonctionnement :

Les métaux et les non-ferreux sont chargés électrostatiquement par une électrode haute tension. Le métal perd sa charge sur un tambour de séparation avant d'être éjecté. Les non-ferreux adhèrent au tambour et sont enlevés par une brosse.

#### I.5.2 Application :

Élimination des métaux résiduels des flocons de plastique, élimination du bois et du caoutchouc des flocons de plastique, etc.

#### I.5.3 Avantages du séparateur électrostatique :

1. Fonctionne parfaitement sur les matériaux de 0 à 10 mm.
2. Élimine tous les métaux (également l'acier inoxydable).
3. Facilité de fonctionnement.
4. Presque aucun entretien.
5. Faible main-d'œuvre.



Figure I.10 : Séparateur électrostatique haute tension [10].

### **I.6 Conclusion :**

La séparation électrostatique est utilisée depuis très longtemps pour séparer des matériaux. Pour enlever, d'un côté, les métaux d'une fraction plastique et d'un autre côté, séparer les différentes sortes de plastiques. Dans le chapitre suivant, on présentera un autre exemple d'application de la séparation électrostatique à travers les convoyeurs à ondes mobiles.

**Chapitre II:  
Généralités sur le  
convoyeur à onde  
mobile**

### II.1/ Introduction :

Les convoyeurs à ondes mobiles sont des systèmes de transport automatisés utilisant des ondes électromagnétiques pour transporter des objets. Ils ont été développés dans les années 1970 et ont depuis été utilisés dans diverses industries, notamment l'automobile, la logistique et l'aérospatiale.

Le principe de fonctionnement des convoyeurs à ondes mobiles est basé sur l'utilisation d'un champ magnétique alternatif généré par des bobines situées le long du trajet du convoyeur. Ce champ magnétique crée une force qui pousse ou tire les objets transportés.

### II.2/ Historique :

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 [11]. Elle intègre deux parties distinctes, la première partie est le convoyeur lui-même et la deuxième réside dans la haute tension électrique.

Le convoyeur à ondes mobiles a eu plusieurs appellations différentes, appelé rideau électrique (electrical curtain) par Masuda ; lors de ses premières expériences, il a utilisé des électrodes spirales dans un tube pour créer une onde mobile qui a donné le nom de « effet des rideaux électriques » au phénomène des ondes mobiles [2-3]. Par ailleurs, Mazumder a appelé ce phénomène « Electrodynamique screens » EDS, d'autres ont défini le convoyeur comme un ensemble de trois peignes pour un convoyeur triphasé (deux peignes pour le Biphase) [12].

La conception diffère selon les particules à étudier, mais en général la forme ressemble à des rails de chemin de fer, c.à.d. une série d'électrodes parallèles rectilignes avec un espacement régulier intégré dans une couche diélectrique plane et couvert par un mince revêtement isolant (**Figure II.1**). La conception d'un convoyeur est l'étape la plus importante dans cette technique car le choix de la taille des électrodes, la longueur de l'espace inter électrodes ainsi que l'absence des résidus qui favorise la formation d'arc électrique entre les électrodes est primordiale.

La partie haute tension électrique comporte l'amplitude et la fréquence de la tension électrique utilisée ainsi que le déphasage entre les électrodes voisines afin de créer une onde mobile. Il

## CHAPITRE II : Généralités sur le convoyeur à onde mobile

existe trois types de convoyeur : le biphasé, triphasé et à quatre phases; chaque type a son propre signal électrique.

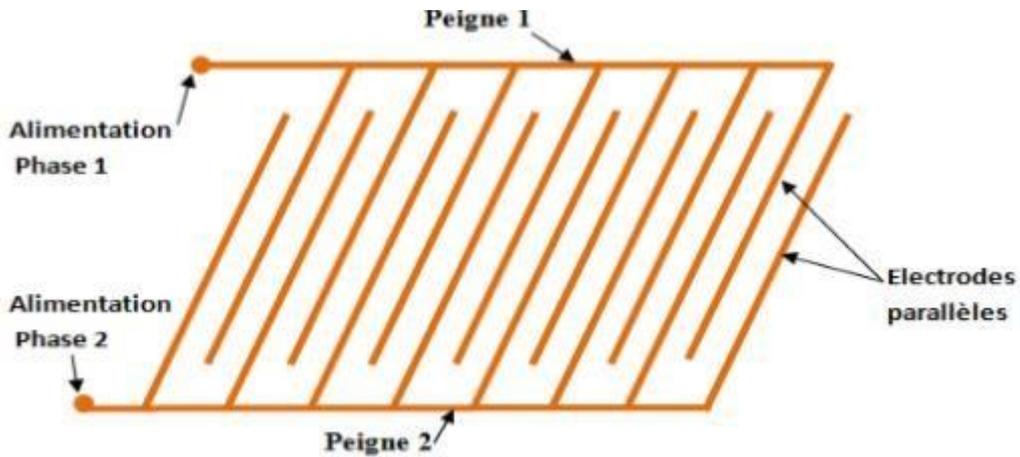


Figure II.1 : Représentation schématique d'un convoyeur biphasé sous forme de deux peignes.

### II.3/ Définition de la technique des ondes mobiles :

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-2) [04].

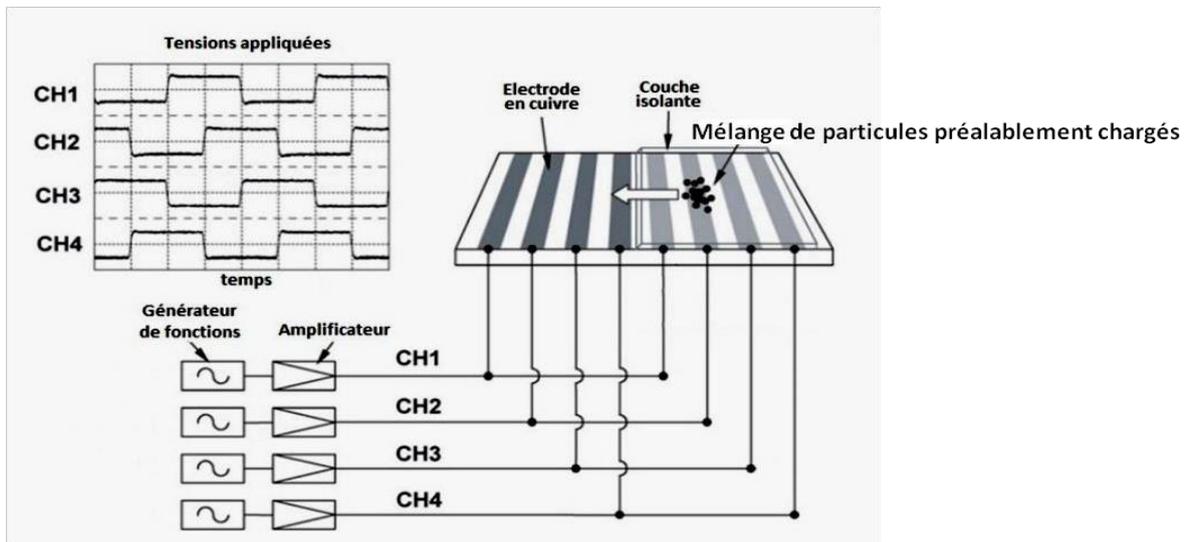


Fig II.2 : Convoyeur à ondes mobiles (à 4 phases) [14].

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

Nous pouvons classer les convoyeurs selon deux critères : le nombre de phases (ou nombre de peignes), et la géométrie des électrodes :

### II.4.1 / Selon le nombre de phases :

On distingue plusieurs configurations des séries des électrodes des convoyeurs à ondes mobiles :

- Les convoyeurs biphasés ayant 2 peignes intercalés, alimentés par des tensions périodiques à 2 phases ayant un déphasage de  $180^\circ$  (Figure II.3).
- Les convoyeurs triphasés ayant 3 séries d'électrodes intercalés, chacune reliée à une source de tension périodique ayant un déphasage de  $120^\circ$  entre elles. (Figure II.4).
- 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  $90^\circ$  (Figure II.5) [14].

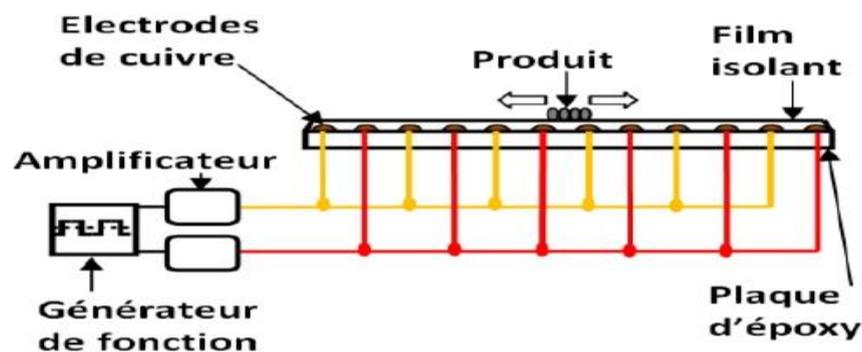


Fig II.3 : Schéma descriptif du convoyeur biphasé [15].

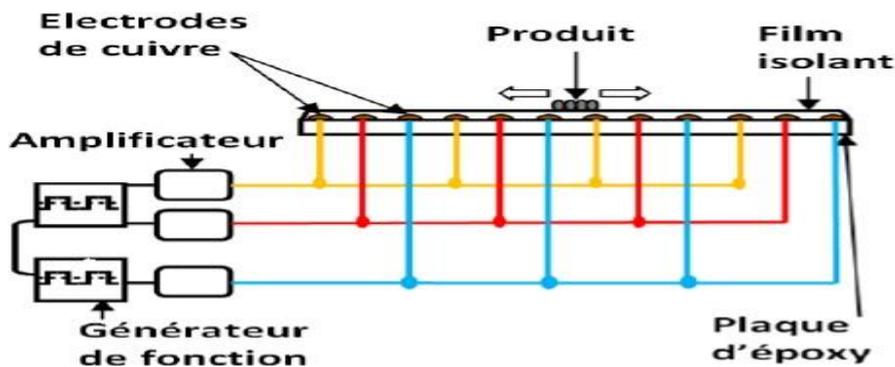


Fig II.4 : Schéma descriptif du convoyeur triphasé [15].

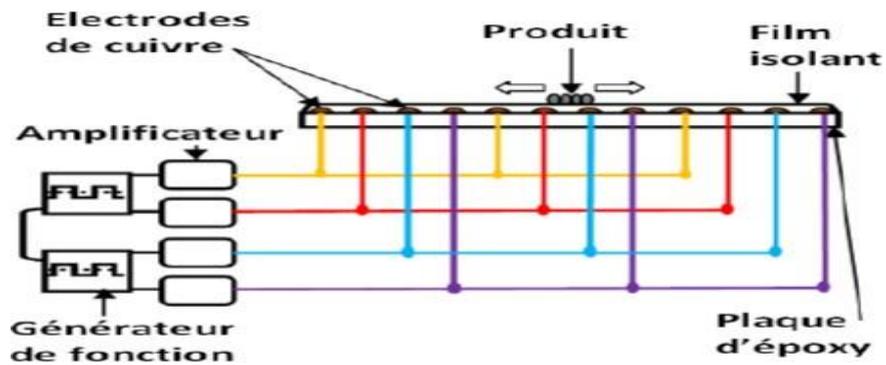
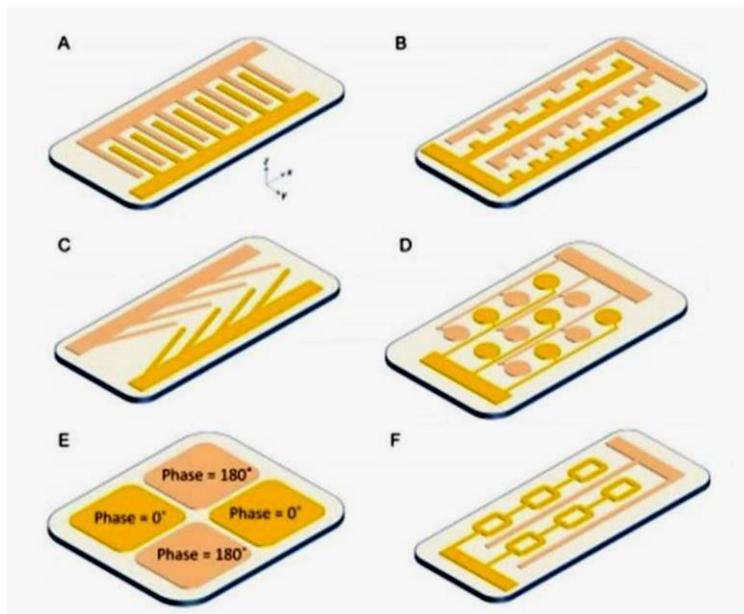


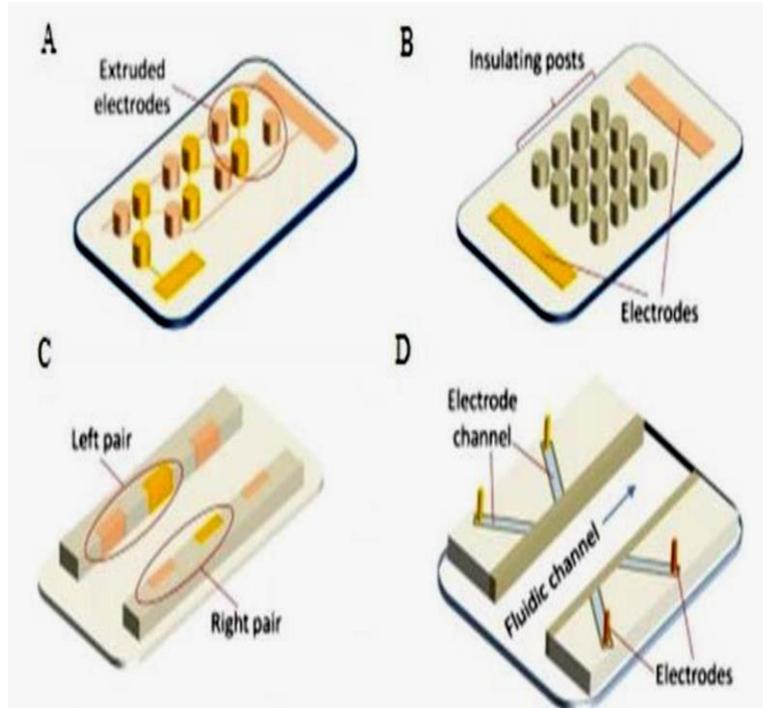
Fig II.5 : Schéma descriptif du convoyeur à quatre phases [15].

### II.4.2 / Selon 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.



**Figure II.6:** Quelques exemples de convoyeurs à configuration 2D [16].



**Figure II.7 :** Quelques exemples de convoyeurs à configuration 3D [16].

### II.5/ Quelques applications de la technique des ondes mobiles :

La séparation électrostatique est un procédé qui permet de séparer des matériaux granulaires différents. C'est une étape du processus de recyclage des matériaux usagés, elle vient après l'étape de broyage qui fournit un matériau granulaire sous forme de particules. Une fois que les particules introduites dans le séparateur électrostatique, elles acquièrent une charge électrique et se comportent différemment selon leurs caractéristiques conductrices ou isolantes.

Pour les mélanges des particules granulaires de taille millimétrique, il y'a trois type de séparation. Le premier appelé séparateur à décharge couronne permet la séparation des mélanges granulaires « isolant-conducteur » (exemple PVC/cuivre). Le deuxième appelé séparateur électrostatique type plaque est utilisé pour le tri des particules, le troisième type appelé séparateur tribo-électrostatique est employé pour la séparation des particules « isolant - isolant ».

### II.6/ Séparation avec la technique des ondes mobiles :

Concernant la séparation avec la technique des ondes mobiles, elle est utilisée pour le tri des particules micronisées dans un milieu liquide ou dans l'air, cette méthode a fait ces preuves avec des résultats satisfaisants dans plusieurs domaines d'application (biochimie, agriculture,

## **CHAPITRE II : Généralités sur le convoyeur à onde mobile**

---

dépoussiérage des panneaux solaires...), elle se base sur l'impact qu'apporte la force d'électrophorétique.

La force d'électrophorétique permet de manipuler des objets possédant des propriétés diélectriques, ce qui est le cas des cellules biologiques, des composants micro fabriqués inorganiques et .... La génération de la force d'électrophorétique nécessite des électrodes et une source de tension alternative. La manipulation des microparticules par la force d'électrophorétique nécessite des électrodes micrométriques réalisables avec des moyens de micro-fabrications classiques et donc fortement intégrable en configuration micro fluïdique.

De plus, grâce au Facteur de Clausius-Mossotti, cette force devient duale, à la fois attractive ou répulsive, ce qui la rend particulièrement intéressante pour la manipulation d'objets micrométriques [17].

### **II.7/ Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a présenté la définition des ondes mobiles et les convoyeurs à ondes mobiles, et leurs différents types (biphasé, triphasé, à quatre phases). Le déplacement des particules micronisées avec la technique des ondes mobiles nécessite un certain réglage pour obtenir des résultats optimaux. Dans le chapitre suivant, on présentera un modèle d'un convoyeur rotatif qui sera modélisé par éléments finis avec le logiciel Flux 2D.



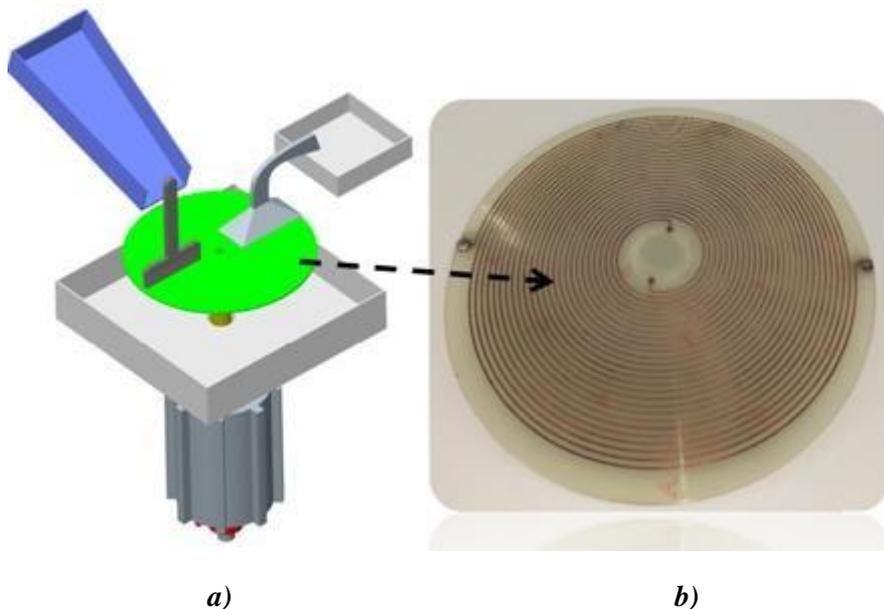
**Chapitre III :  
Présentation du  
modèle étudié**

### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter notre étude qui a pour objectif d'optimiser les différents paramètres de conception du convoyeur. Le but final étant d'obtenir le minimum de risque de claquage électrique entre les électrodes. Ainsi, on a étudié les différents paramètres influents sur la géométrie du convoyeur en utilisant un logiciel de simulation « Flux2D » afin de calculer le champ électrique le plus élevé au niveau des électrodes.

### III.2 Présentation du prototype expérimental :

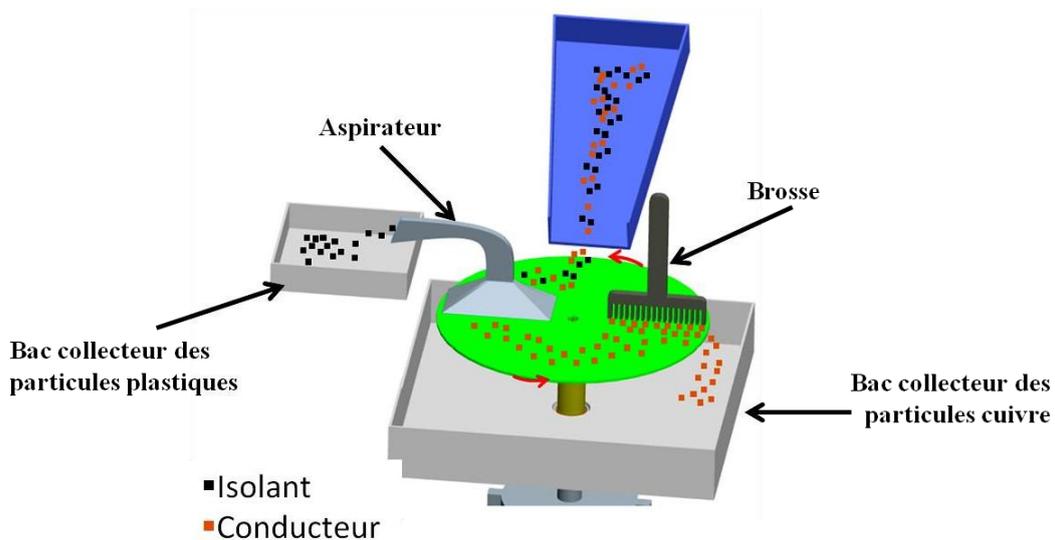
Le séparateur électrostatique rotatif étudié est présenté dans la Figure III.1. Il se présente sous la forme d'un dispositif rotatif relié à un moteur électrique qui lui donne la rotation nécessaire. Le séparateur (ou convoyeur) est composé d'un disque avec des électrodes de forme spirale.



**Figure III.1 :** Séparateur électrostatique rotatif.

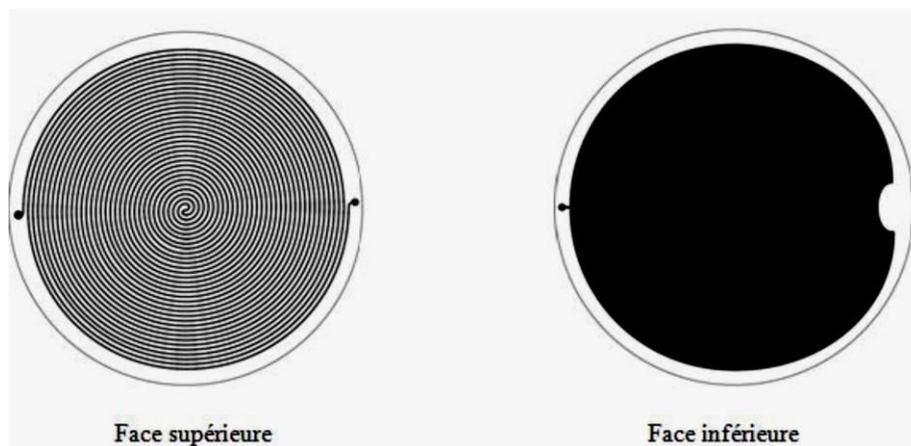
*a) Vue d'ensemble    b) Photographie du disque rotatif*

Les particules granuleuses mixtes dispersées sur le séparateur rotatif. Les particules conductrices restent liées à la surface du disque par l'action du champ électrique, tandis que les particules isolantes sont éjectées par l'aspirateur (figure III.2).



**Figure 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. Une électrode en cuivre de forme spirale est déposée sur sa face supérieure. Ces électrodes ont une largeur de 1mm et une hauteur de  $35\mu\text{m}$ . La distance entre deux électrodes (cercles) successives est de 2mm. L'ensemble de ces électrodes est protégé par un film isolant d'une épaisseur de  $100\mu\text{m}$ . La face arrière du disque contient une électrode circulaire en cuivre de  $35\mu\text{m}$  d'épaisseur. La Figure III.3 présente la forme des électrodes du convoyeur.



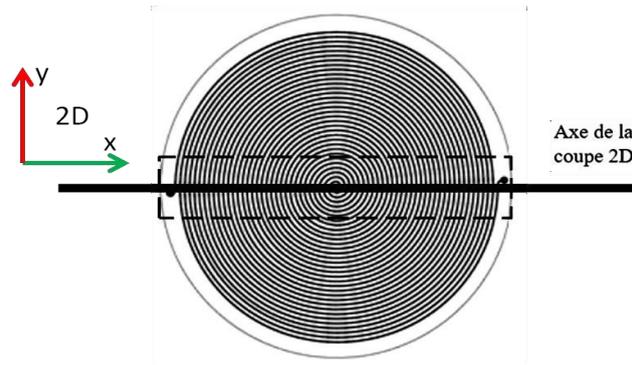
**Figure III.3 :** Forme géométrique de l'électrode supérieure et inférieure [18].

### III.3. Modélisation du prototype expérimental :

Notre travail est basé essentiellement sur le calcul du champ électrique à la surface d'un disque en rotation. L'objectif est de s'assurer que l'isolant recouvrant les électrodes peut supporter le

### Chapitre III: Présentation du modèle étudié

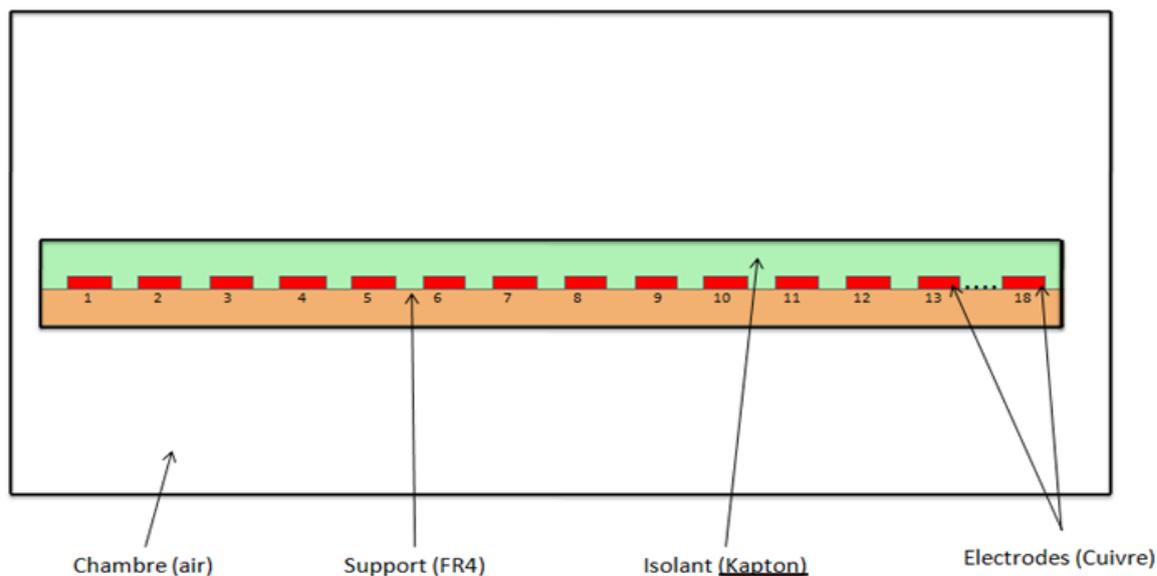
champ électrique à la surface du disque. En effet, le rôle de cet isolant est de prévenir le claquage entre les électrodes et il est utile de connaître la valeur du champ électrique appliqué à l'isolant. Des simulations par éléments finis ont donc été réalisées pour calculer le champ électrique dans cet isolant et estimer son risque de défaillance, ce qui nous a amené à réaliser une coupe 2D du disque rotatif comme indiqué dans la Figure III.4.



**Figure III.4** : présentation de l'axe de la coupe 2D [19].

On a réalisé une coupe 2D d'un convoyeur constitué de 18 électrodes de cuivre déposées sur un support en FR4 de 1 mm de largeur et de 35  $\mu\text{m}$  de hauteur. L'espace inter électrodes est de 2 mm. La Figure III.5 présente cette vue de coupe qui sera utilisée comme modèle géométrique pour notre travail de simulation avec le logiciel Flux 2D.

Ces électrodes se présentent sous forme de deux peignes intercalés (9 électrodes pour chaque peigne). Chaque groupe d'électrodes est relié à une source de tension alternative de forme rectangulaire avec des amplitudes de +2kV (Phase 1) et -2kV (Phase 2). Un déphasage de  $180^\circ$  existe entre ces deux tensions d'alimentation. L'ensemble de ces électrodes est protégé par un film isolant (KAPTON) d'une épaisseur de 100 $\mu\text{m}$ . Le rôle de cet isolant est d'éviter le claquage entre électrodes successives souvent portées à des potentiels différents.



**Figure III.5 :** Vue de coupe en 2D du convoyeur

Les paramètres géométriques présentés ci-dessous sont les valeurs de référence de notre modèle. On étudiera l'influence de certains de ces paramètres sur l'efficacité du convoyeur la Figure III.6 :

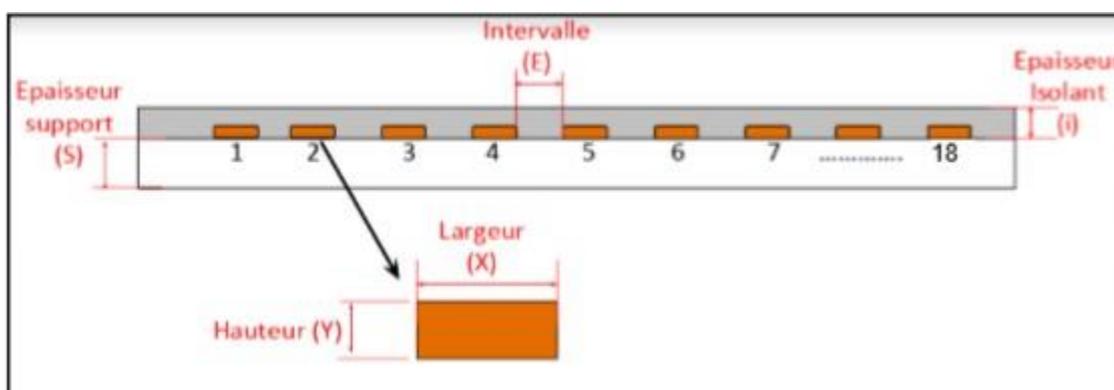
(X) c'est la largeur d'électrode = 1 mm

(Y) c'est la hauteur d'électrode = 35  $\mu\text{m}$

(E) c'est la distance entre les électrodes = 2 mm

(i) c'est l'épaisseur d'isolant = 100  $\mu\text{m}$

(S) c'est l'épaisseur du support = 2 mm



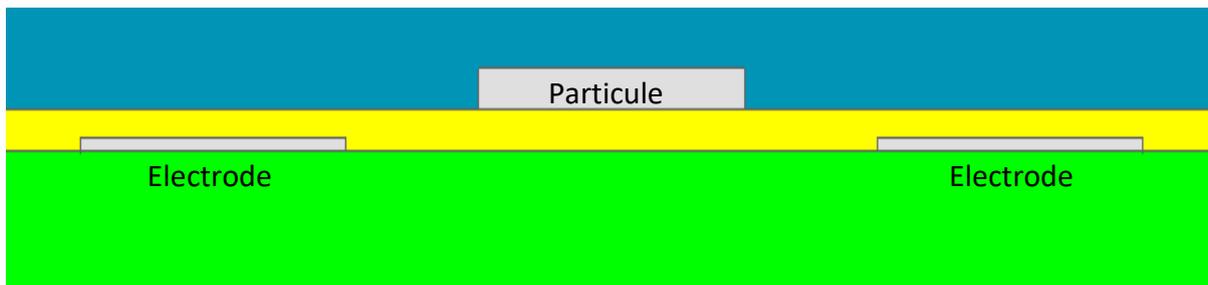
**Figure III.6 :** Vue de coupe de la géométrie étudiée en 2D [20].

Le séparateur sera alimenté par un mélange de particules granulaires plastiques (PVC) et métalliques (cuivre) afin de les séparer. En se déposant sur la surface du convoyeur, ces

### Chapitre III: Présentation du modèle étudié

---

particules vont se positionner par rapport à ses électrodes de façon aléatoire. Certaines particules vont se placer parallèlement aux électrodes, et d'autres perpendiculairement comme indiqué sur la figure III.7. Les autres particules se placeront dans une position intermédiaire entre les deux précédentes situations (parallèle et perpendiculaire).



Particule parallèle aux électrodes



Particule perpendiculaire aux électrodes

**Figure III .7:** Position parallèle et perpendiculaire des particules par rapport aux électrodes du convoyeur

De point de vue « champ électrique », les deux positions ( $//$  et  $\perp$ ) seront considérées comme les cas extrêmes. Ainsi, cinq cas ont été étudiés dans notre projet selon la position et la nature de la particule comme le montre le tableau III.1.

**Tableau III.1** : les cas étudiés.

Les cas étudiés	Les particules et leurs emplacements
CAS N°1	Sans particule.
CAS N°2	Particule cuivre en parallèle avec les deux électrodes.
CAS N° 3	Particule PVC en parallèle avec les deux électrodes.
CAS N°4	Particule cuivre perpendiculaire avec les deux électrodes.
CAS N° 5	Particule PVC perpendiculaire avec les deux électrodes.

### III.4 Logiciel FLUX 2D :

Flux est un logiciel basé sur la méthode des éléments finis, spécialisé dans la simulation des dispositifs électromagnétiques. Il est le fruit de 35 années de collaboration entre l'équipe MAGE du G2ELab et la PME Grenobloise CEDRAT et est une référence mondiale dans son domaine.



**Figure III.8** : Logo du logiciel Flux

En 2016, la société ALTAIR Engineering, un des leaders mondiaux des outils de simulation pour l'ingénierie, a fait l'acquisition de la société CEDRAT et de la suite logiciel Flux. Aujourd'hui, l'équipe MAGE continue à travailler activement au développement de nouvelles méthodes de modélisation électromagnétique avec ALTAIR. L'équipe bénéficie d'un rayonnement accru par la diffusion de ses recherches vers un nombre d'utilisateurs potentiels encore plus important [21].

### III.5 Géométrie du modèle :

La géométrie du model réalisé par logiciel Flux 2D est constitué de plusieurs points repérés dans le logiciel par des coordonnées suivant les axes X et Y. Chaque deux point relié nous donne une ligne. Et plusieurs lignes nous donnent finalement des faces.

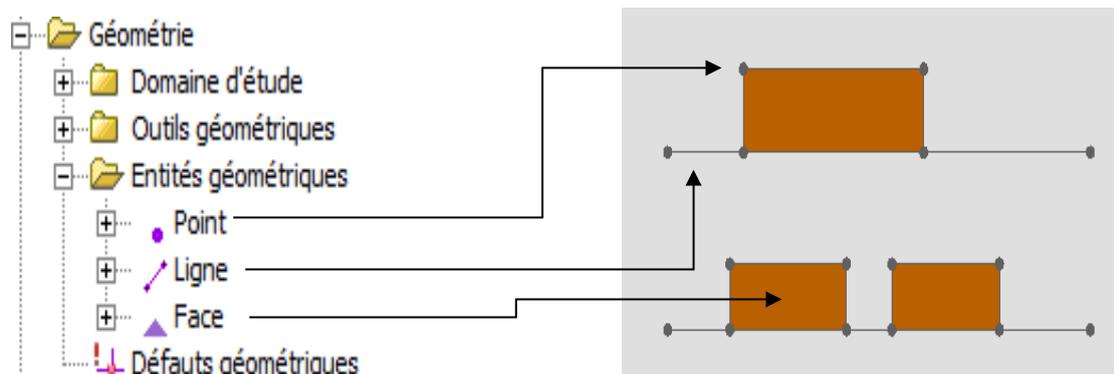


Figure III.9 : Menu « Géométrie » du logiciel Flux 2D.

#### III.5.1. Cas 1 : Modèle sans particule :

Dans cette partie, on considère le cas de « référence » dans lequel le convoyeur est vide avec aucune particule à sa surface. La géométrie utilisée dans ce cas est illustrée dans la figure suivante.

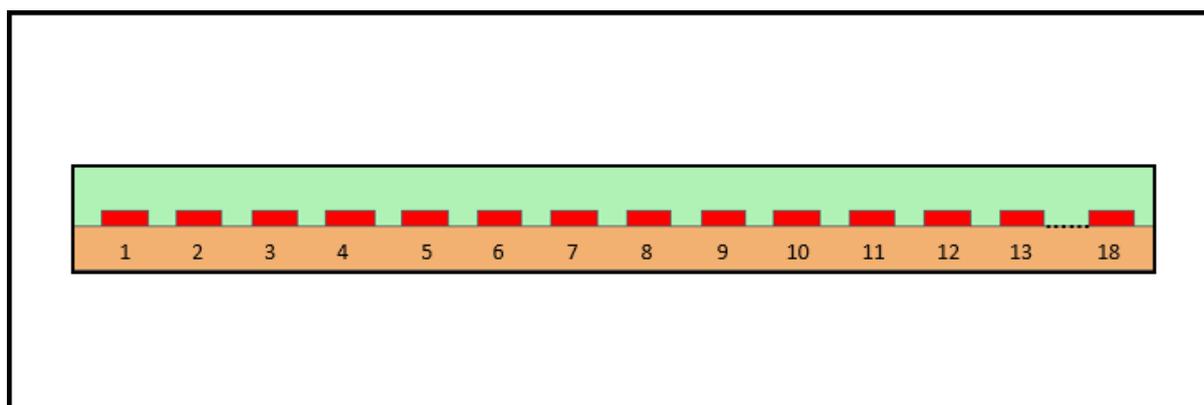
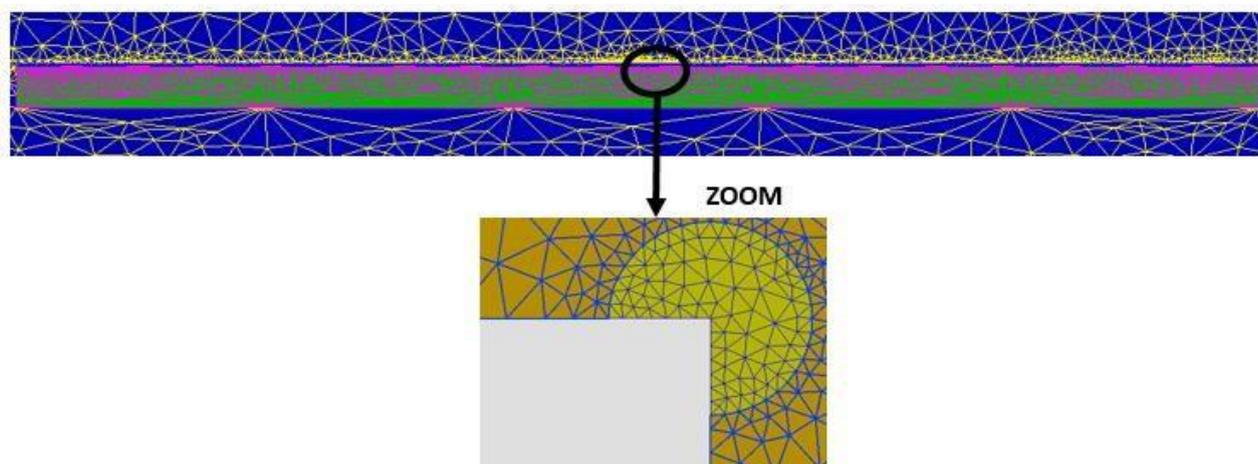


Figure III.10 : Géométrie 2D du modèle sans particule.

La Figure III.11 présente le maillage de la géométrie dans sa globalité. On a donné une attention particulière aux zones les plus importantes en leur affectant un maillage plus dense et plus serré afin que les calculs du champ électrique dans ces zones soient les plus précis possible. Ces

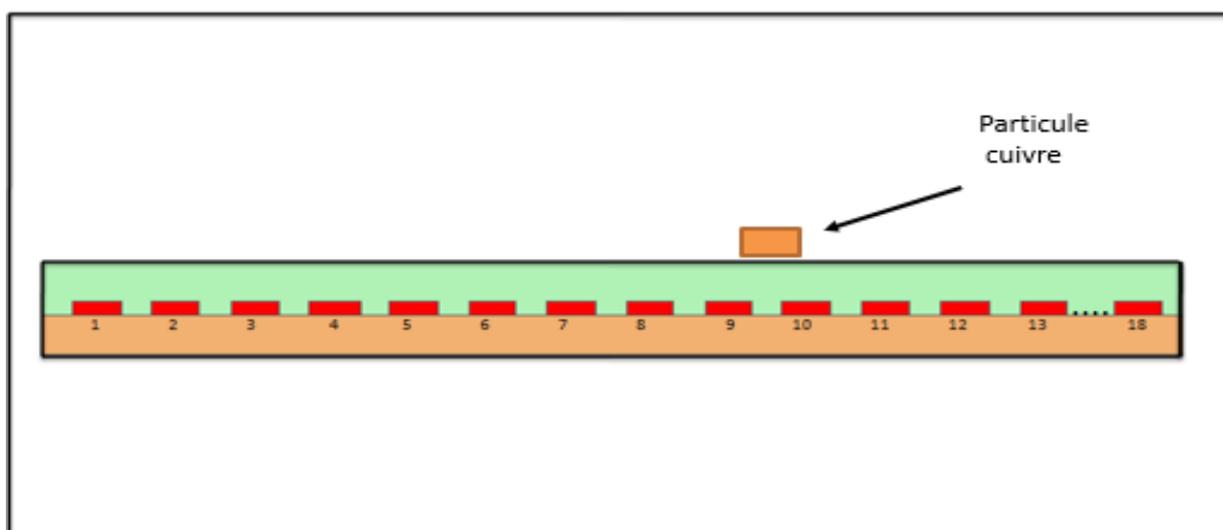
zones sont les coins des électrodes supérieures autour desquels le champ électrique est théoriquement le plus élevé à cause de l'effet de pointe engendré par leur forme géométrique (angles de  $90^\circ$  aux niveaux des 4 coins de l'électrode de forme rectangulaire).



**Figure III.11 :** Vue globale sur le maillage du modèle sans particule avec un vue agrandie sur le maillage du coin d'une électrode

### III.5.2. Cas 2 : Particule cuivre parallèle aux électrodes

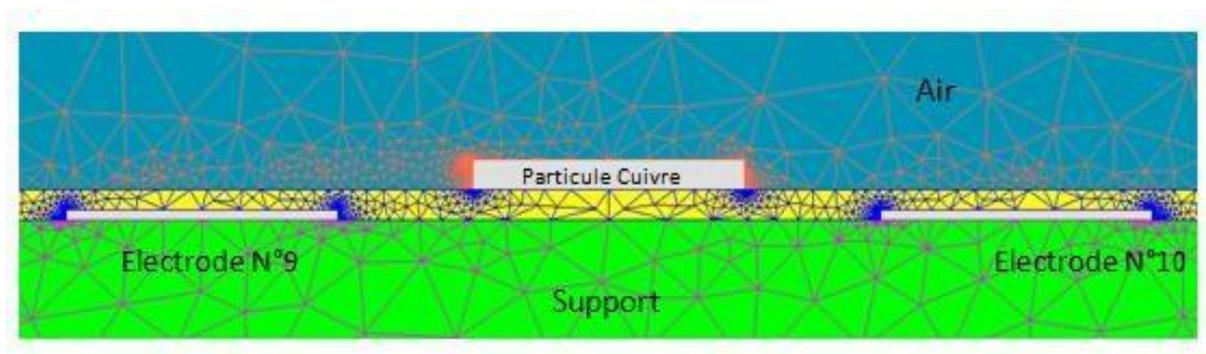
Ce cas présente une particule en cuivre qui se trouve en surface du convoyeur entre deux électrodes et parallèlement à celles-ci. On a fait l'hypothèse que la particule possède une forme rectangulaire avec une hauteur de  $100\mu\text{m}$  et une largeur de  $1\text{mm}$ . On a également supposé que sa position est approximativement au milieu de la surface du convoyeur, entre l'électrode N°9 et l'électrode N°10 comme illustré sur la Figure III.12.



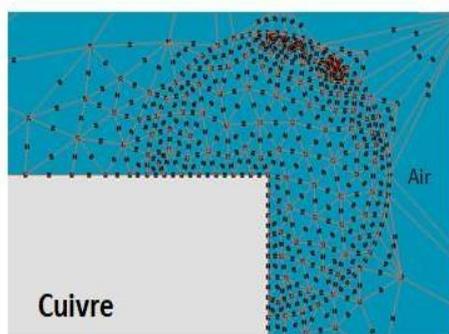
**Figure III.12:** Géométrie 2D du modèle avec particule cuivre en parallèle avec les deux électrodes

## Chapitre III: Présentation du modèle étudié

Dans cette étape, on réalise un maillage de la particule cuivre placée sur l'isolant en parallèle avec l'électrode N°9 et l'électrode N°10 (Figure III.13). Comme le champ électrique est nul à l'intérieur d'un matériau conducteur, la surface intérieure de la particule n'a pas été maillée comme d'ailleurs pour les 18 électrodes du convoyeur. Les coins des électrodes ainsi que les quatre coins de la particule représentent les zones où le champ électrique est théoriquement le plus élevé et ont été donc maillés encore finement comme illustré sur la Figure III.14 qui montre le maillage au niveau du coin supérieur de la particule.



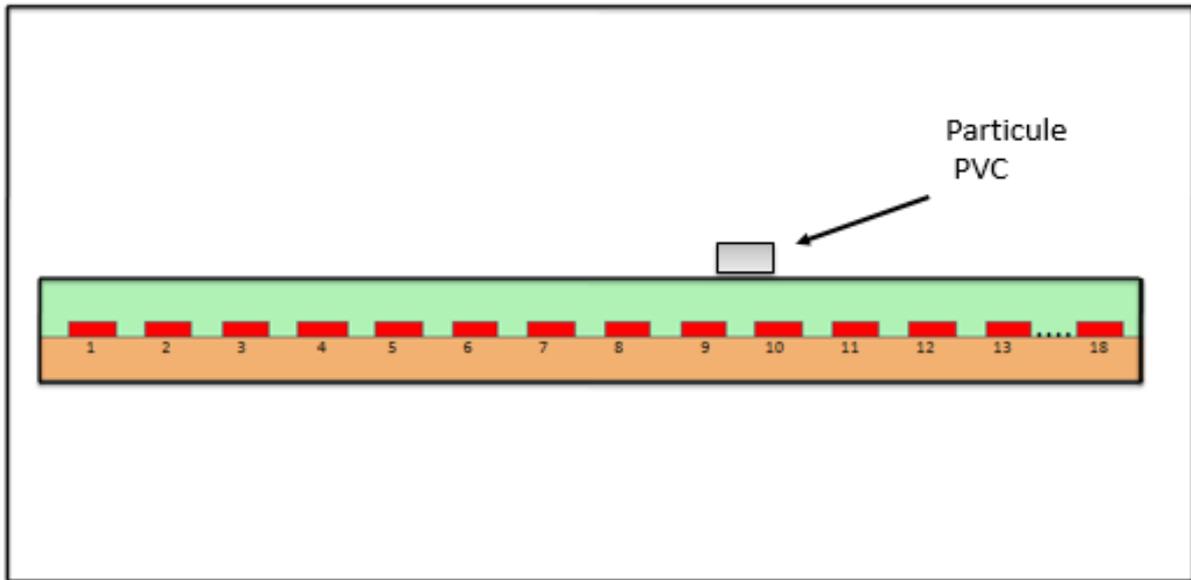
**Figure III.13 :** Vue agrandie sur le maillage de la particule cuivre en parallèle avec les deux électrodes



**Figure III.14:** Maillage fin sur le coin supérieur droit de la particule cuivre

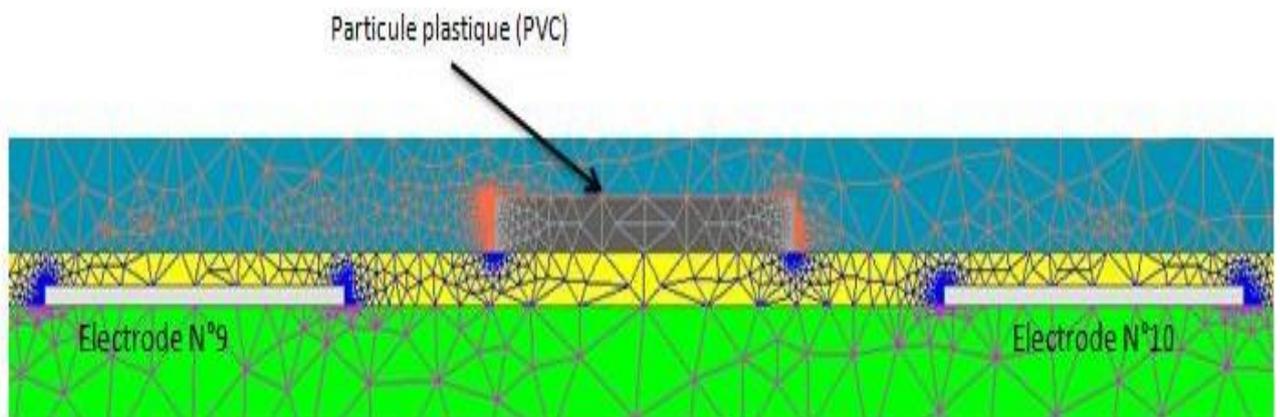
### III.5.3. Cas 3 : Particule en plastique (PVC) parallèle aux électrodes :

Ce cas est similaire au cas précédent à la différence que la particule qui se trouve en surface du convoyeur est ici en plastique (en matériau PVC). On suppose que la forme, les dimensions ainsi que la position de la particule sur le convoyeur sont les mêmes que ceux utilisés précédemment pour la particule cuivre comme indiqué sur la Figure III.15.

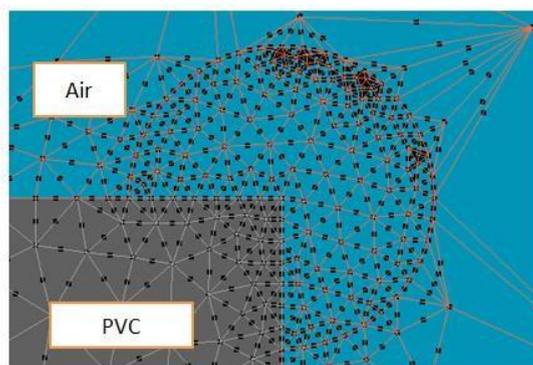


**Figure III.15** : Géométrie 2D du modèle avec particule plastique (PVC) en parallèle avec les deux électrodes

Comme le cas de particule cuivre on fait le maillage de la particule plastique mais cette fois-ci en maillant également l'intérieur de sa surface (Figure III.16). La particule plastique (PVC) est placée sur l'isolant en parallèle avec l'électrode N°9 et l'électrode N°10. Les coins des électrodes ainsi que les quatre coins de la particule PVC sont maillés finement comme illustré sur la Figure III.17 qui montre le maillage au niveau du coin supérieur de la particule.



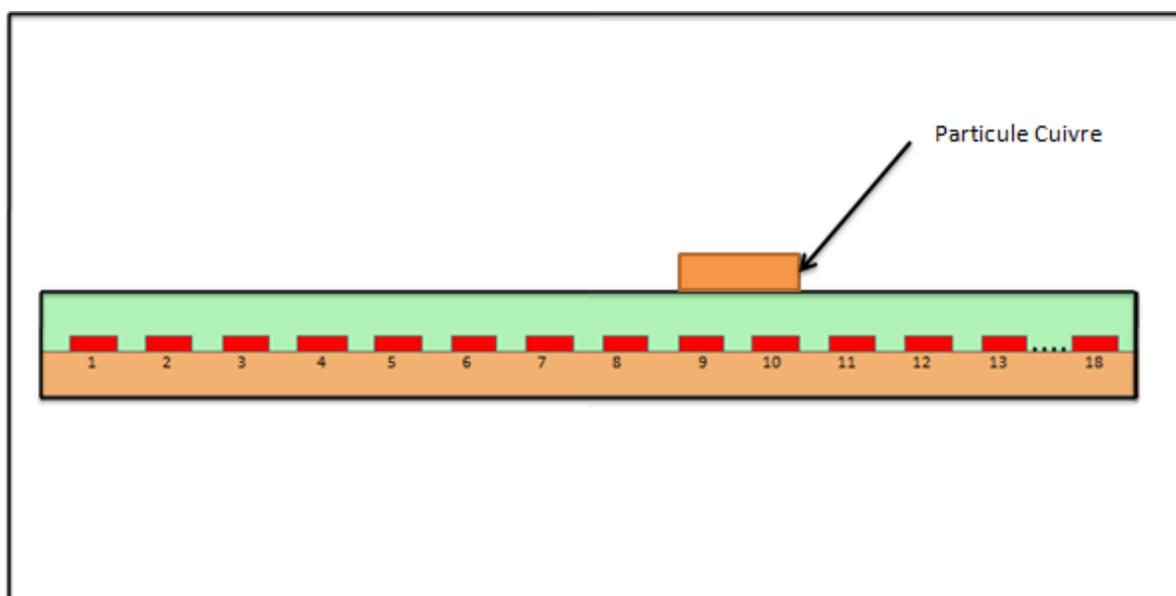
**Figure III.16** : Vue agrandie sur le maillage de la particule plastique (PVC) en parallèle avec les deux électrodes



**Figure III.17** : Maillage fin sur le coin supérieur droit de la particule plastique

### III.5.4. Cas 4 : Particule cuivre perpendiculaire aux électrodes

Le quatrième cas présente une particule en cuivre qui se trouve en surface du convoyeur et qui se positionne au-dessus de deux électrodes et perpendiculairement à celles-ci. On a fait l'hypothèse que la particule possède une forme rectangulaire avec une hauteur de  $100\mu\text{m}$  et une largeur de  $1\text{mm}$ . On a également supposé que sa position est approximativement au milieu de la surface du convoyeur, perpendiculaire avec l'électrode N°9 et l'électrode N°10 comme illustré sur la Figure III.18

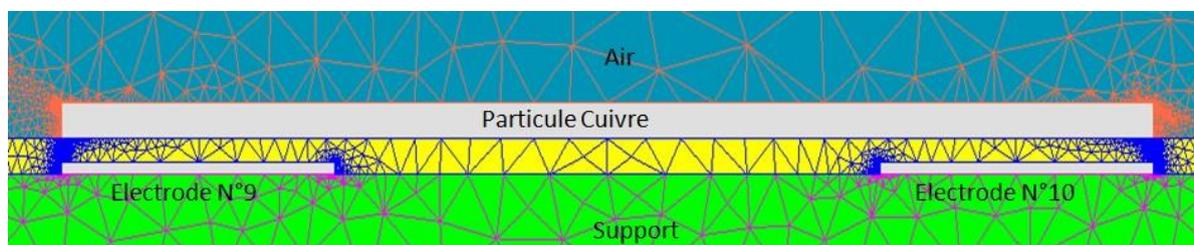


**Figure III.18** : Géométrie 2D du modèle avec particule cuivre perpendiculaire avec les deux électrodes

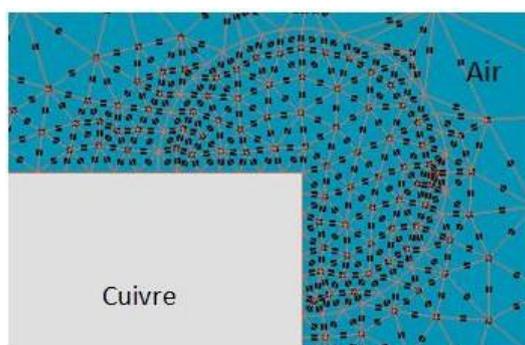
On réalise un maillage de la particule cuivre placée sur l'isolant perpendiculairement avec l'électrode N°9 et l'électrode N°10 comme le montre la Figure III.19. Comme le champ électrique est nul à l'intérieur d'un matériau conducteur, la surface intérieure de la particule n'a pas été maillée comme d'ailleurs pour les 18 électrodes du convoyeur. Les coins des électrodes

## Chapitre III: Présentation du modèle étudié

ainsi que les quatre coins de la particule représentent les zones où le champ électrique est théoriquement le plus élevé et ont été donc maillées encore finement comme illustré sur la Figure III.20 qui montre le maillage au niveau du coin supérieur de la particule.



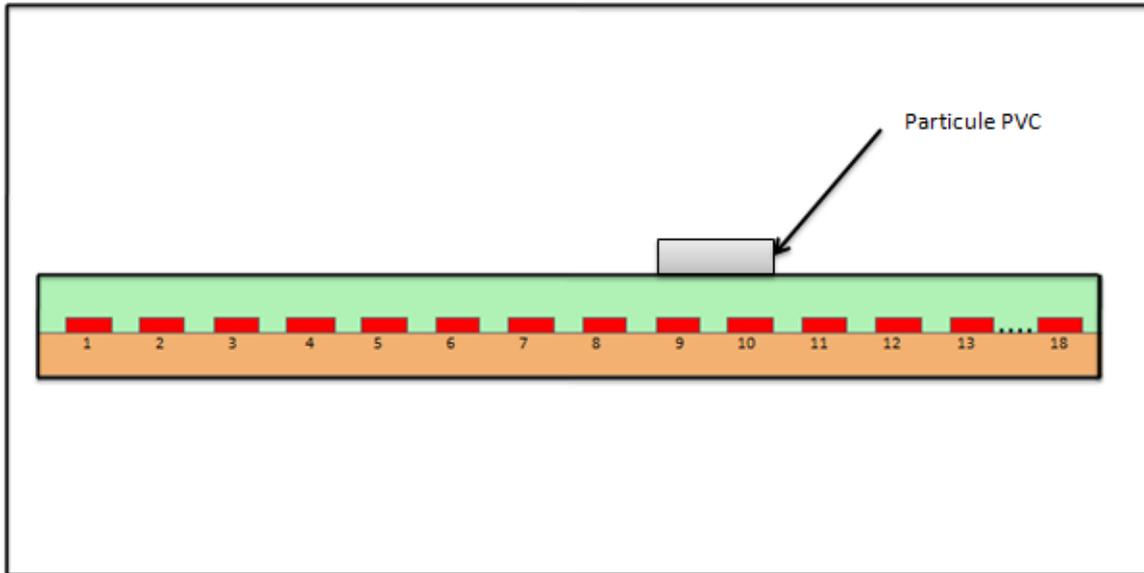
**Figure III.19 :** Vue agrandie sur le maillage de la particule cuivre perpendiculaire avec les deux électrodes



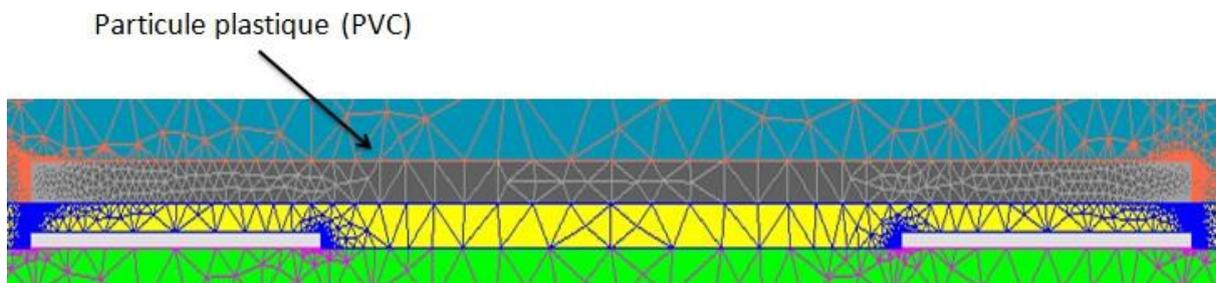
**Figure III.20:** Maillage fin sur le coin supérieur droit de la particule cuivre

### III.5.5. Cas 5 : Particule en plastique (PVC) perpendiculaire aux électrodes :

Ce cas est similaire au cas précédent sauf que la particule qui se trouve en surface du convoyeur est ici en plastique (en matériau PVC). On suppose que la forme, les dimensions ainsi que la position de la particule sur le convoyeur sont les mêmes que celles utilisées précédemment pour la particule cuivre (4 cas).



**Figure III.21** : Géométrie 2D du modèle avec particule plastique (PVC).  
Comme dans le cas de la particule cuivre, on fait le maillage de la particule plastique mais cette fois-ci en maillant également l'intérieur de sa surface. La Figure III.22 montre une vue agrandie sur le maillage de la particule plastique (PVC) perpendiculaire avec les deux électrodes placées sur l'isolant au-dessus l'électrode N°9 et l'électrode N°10. Les coins des électrodes ainsi que les quatre coins de la particule PVC sont maillés finement comme illustré sur la Figure III.23 qui montre le maillage au niveau du coin supérieur de la particule.



**Figure III.22** : Vue agrandie sur le maillage de la particule plastique (PVC) perpendiculaire avec les deux électrodes.

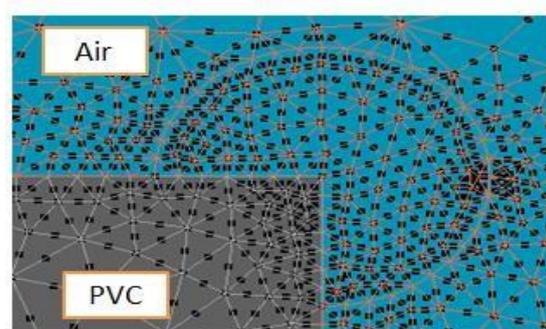


Figure III.23: Maillage fin sur le coin supérieur droit de la particule plastique

### III.6/ Paramètres physiques :

Cette partie est la dernière étape avant la résolution du modèle. Elle consiste à affecter les propriétés physiques de notre simulation (Figure III.24).

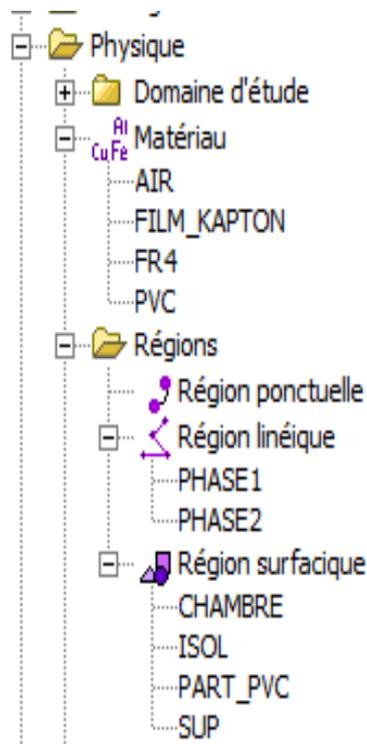


Figure III.24: Paramètres créés dans le menu « Physique » du logiciel Flux 2D

#### III.6.1 Matériaux et régions surfaciques :

Le Tableau III.2 montre les propriétés électriques de ces matériaux qu'on a renseigné dans la partie « Matériaux » du logiciel Flux 2D. Chacun de ces matériaux sera affecté aux différentes faces de la géométrie appelées « régions surfaciques ». Les quatre faces qui constituent le modèle sont : la chambre, l'isolant et le support, Matière de la particule plastique (PVC).

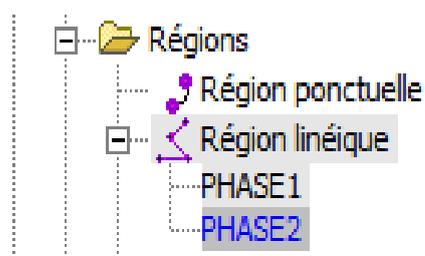
## Chapitre III: Présentation du modèle étudié

Partie	Matériaux	Permittivité relative
Chambre (espace autour du convoyeur)	Air	1
Support du convoyeur	FR4	4.70
Isolant qui recouvre les électrodes	film KAPTON	3.35
Matière de la particule plastique	PVC	3.39

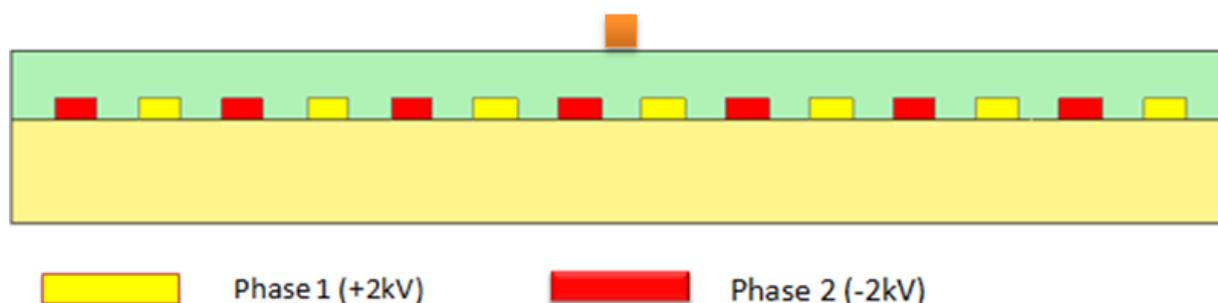
**Tableau III.2:** Permittivité relative des matériaux utilisés.

### III.6.2 Régions linéiques :

Les régions linéiques (figure III.25) consistent à affecter des potentiels électriques aux électrodes de cuivre. Les deux groupes d'électrodes sont portés à une tension de +2kV et de -2kV respectivement pour la phase 1 et la phase 2 du convoyeur. La figure III.26 montre les différents potentiels électrique du model.



**Figure III.25 :** Menu Flux 2D de la région linéique.

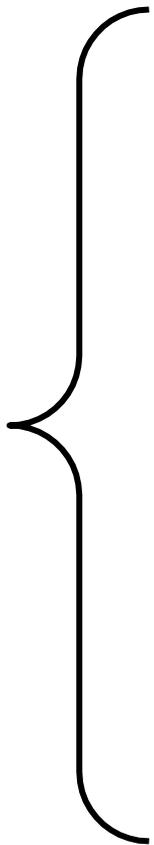


**Figure III.26:** Potentiel électrique affecté aux électrodes

### **III.7/ Conclusion :**

Dans ce chapitre ; nous avons présenté et montré les étapes suivies dans notre simulation d'un convoyeur à ondes mobiles biphasé dans le logiciel Flux 2D afin de calculer le champ électrique. Les résultats et les calculs obtenus avec ce modèle sont présentés dans le chapitre suivant.

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



### IV.1/ Introduction :

L'objectif de cette dernière partie de notre mémoire est d'analyser les résultats de simulation de notre modèle du convoyeur à ondes mobile détaillé dans le chapitre précédent en considérant cinq cas différents. Le but étant de calculer la valeur du champ électrique atteint dans l'isolant afin d'évaluer le risque de claquage entre les électrodes en surface du convoyeur rotatif.

### IV.2 Distribution des lignes équipotentielles :

#### IV.2.1 Effet de bord :

Notre étude porte sur un séparateur à 18 électrodes comme indiqué dans la figure IV.1. La simulation montre que les lignes du champ électrique aux deux extrémités de la géométrie sont soumises à un phénomène appelé « effet de bord » qui les déforme dans l'espace. Ceci peut perturber les calculs dans cette zone d'extrémité et conduit à des résultats erronés. Pour cela, on s'est éloigné suffisamment des extrémités et on s'est contenté d'analyser uniquement ce qui se passe au niveau des six électrodes centrales pour garantir des résultats plus précis. La figure IV.2 présente les effets de bords obtenus par les résultats de simulation aux extrémités de la géométrie.

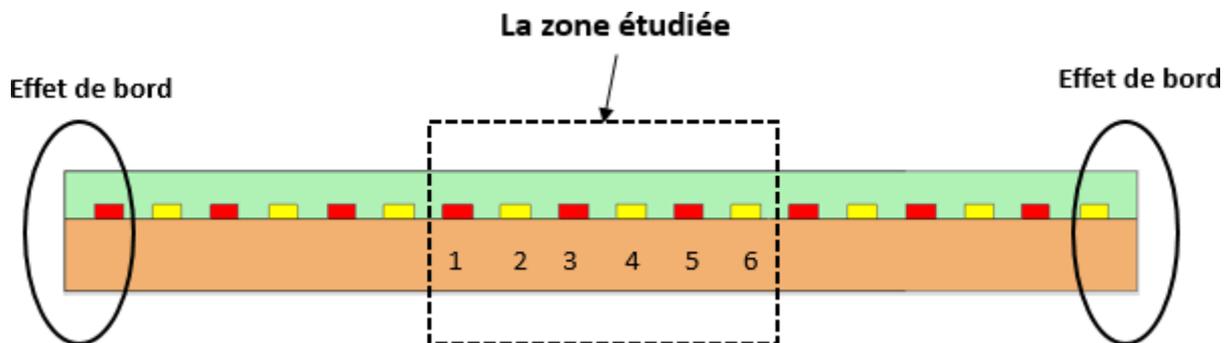


Figure IV.1 : Mise en évidence de la zone étudiée du séparateur électrostatique

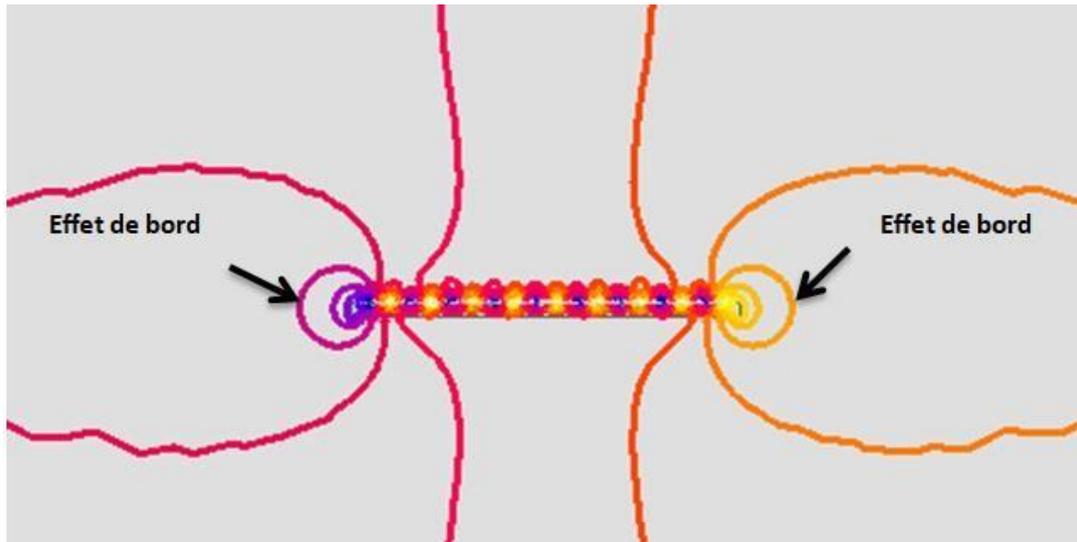


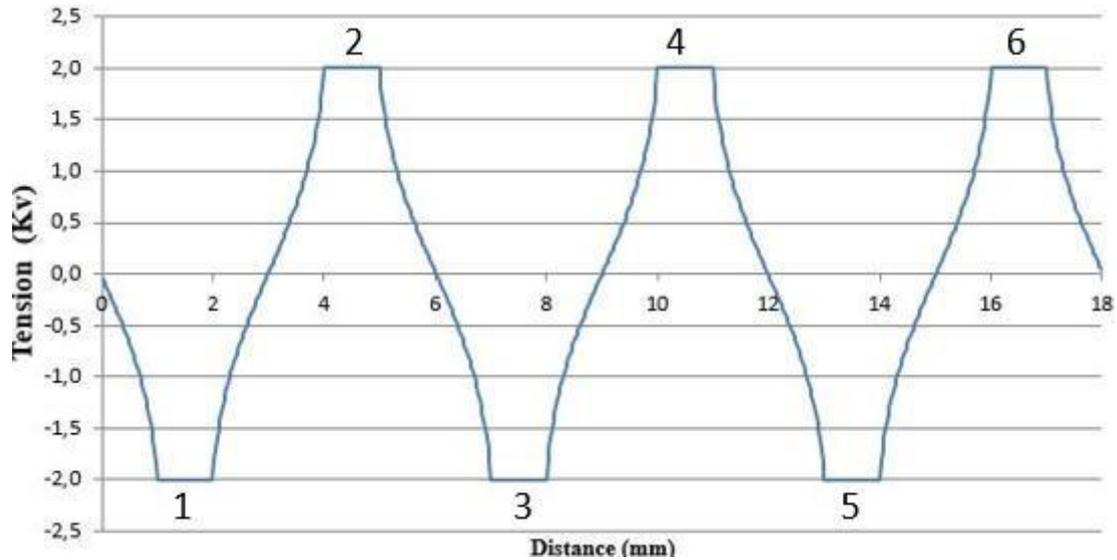
Figure IV.2 : Effets de bord aux deux extrémités de la géométrie.

### IV.2.2 Variation du potentiel électrique :

Les 18 électrodes du convoyeur se présentent sous forme de deux « peignes » intercalés (9 électrodes pour chaque « peigne »). Chaque groupe d'électrodes est relié à une source de tension alternative de forme rectangulaire. Un déphasage de  $180^\circ$  existe entre ces deux tensions d'alimentation. Ainsi, chaque « peigne » sera porté à une tension de +2kV ou de -2kV en fonction de temps.

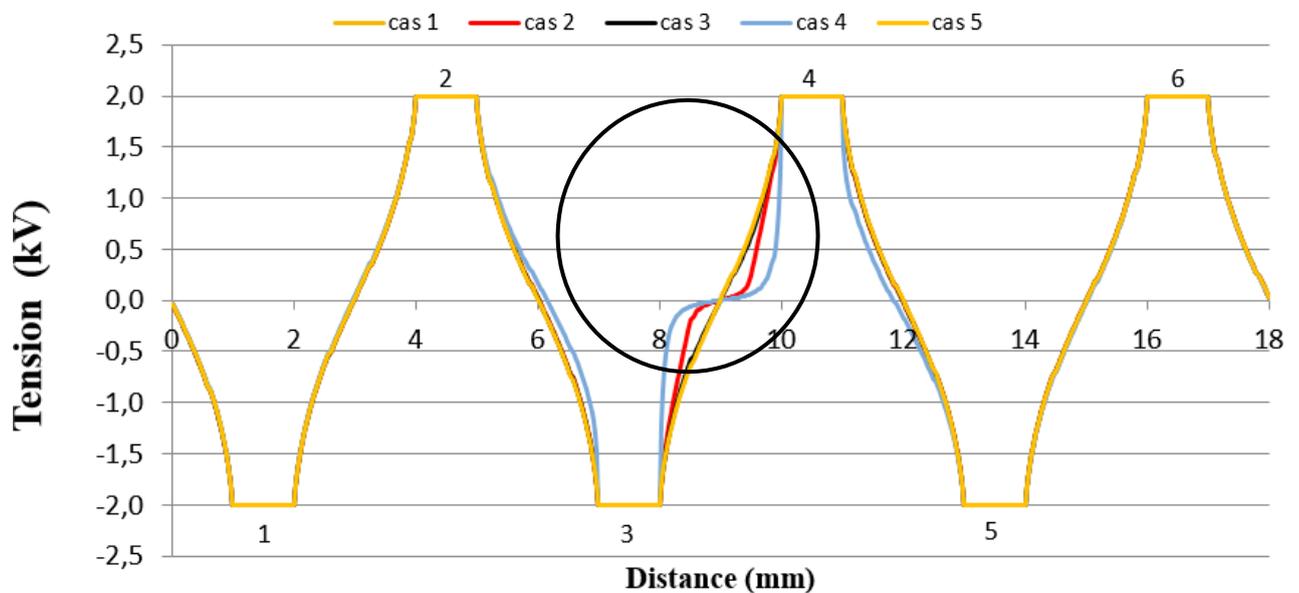
La tension au niveau des électrodes prend successivement une valeur de +2kV ou de -2kV. Quand le potentiel de la première électrode est égal a +2kV, la deuxième aura un potentiel égal a -2kV, la troisième aura un potentiel égal a +2kV et ainsi de suite. La variation du potentiel électrique le long des six électrodes centrales est présentée dans la figure IV.3 qui illustre bien l'alternance dans le potentiel des électrodes et montre sa variation le long des six électrodes de la zone centrale considérée dans notre étude.

## Chapitre IV : analyse de l'étude de simulation



La figure IV.3 : Potentiel électrique des six électrodes de la partie centrale du convoyeur (cas N°1 : sans particule)

La figure IV- 4 présente la variation du potentiel électrique le long d'une ligne qui passe par les six électrodes centrales, et ce pour les cinq cas considérés dans notre étude (cf. tableau III.1). On observe que le potentiel au niveau des électrodes est bien fixé à +2kV ou -2kV et varie progressivement entre ces deux valeurs en passant d'une électrode à celle d'à côté. On note aussi une variation du potentiel similaire à tous les cinq cas étudiés, bien qu'une légère différence est observée au niveau des électrodes directement en dessous des particules comme le montre la figure IV.5.



La figure IV.4 : Potentiel électrique des six électrodes de la partie centrale du convoyeur

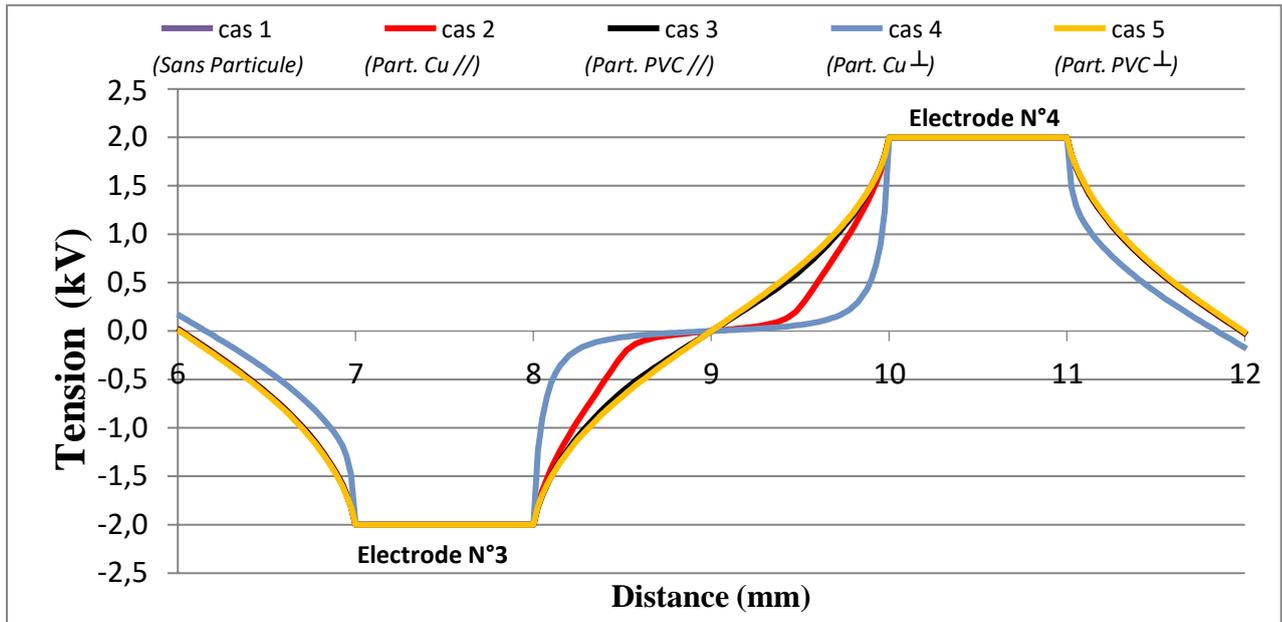


Figure IV.5 : Vue agrandie de la variation du potentiel électrique entre l'électrode N°3 et N°4.

La figure IV.6 montre la répartition des lignes équipotentielles dans la zone des six électrodes pour les cinq cas étudiés (sans particule, avec particule cuivre en parallèle, avec particule PVC en parallèle, avec particule cuivre perpendiculaire, avec particule PVC perpendiculaire). On voit que la distribution du potentiel dans le convoyeur varie en fonction de la présence (ou non) de la particule ainsi que de sa nature (conductrice ou isolante).

Cette différence entre les cinq cas est illustrée dans la Figure IV.7 qui montre une vue agrandie de la distribution du potentiel autour de la position de la particule. Elle montre également que les lignes équipotentielles se resserrent autour des angles (coins) des électrodes ainsi que ceux de la particule, ce qui se traduit généralement par un champ électrique élevé dans ces coins à cause de l'effet de pointe.

C'est donc dans ces zones qu'on va calculer les valeurs maximales du champ électrique afin de les comparer pour les cinq cas.

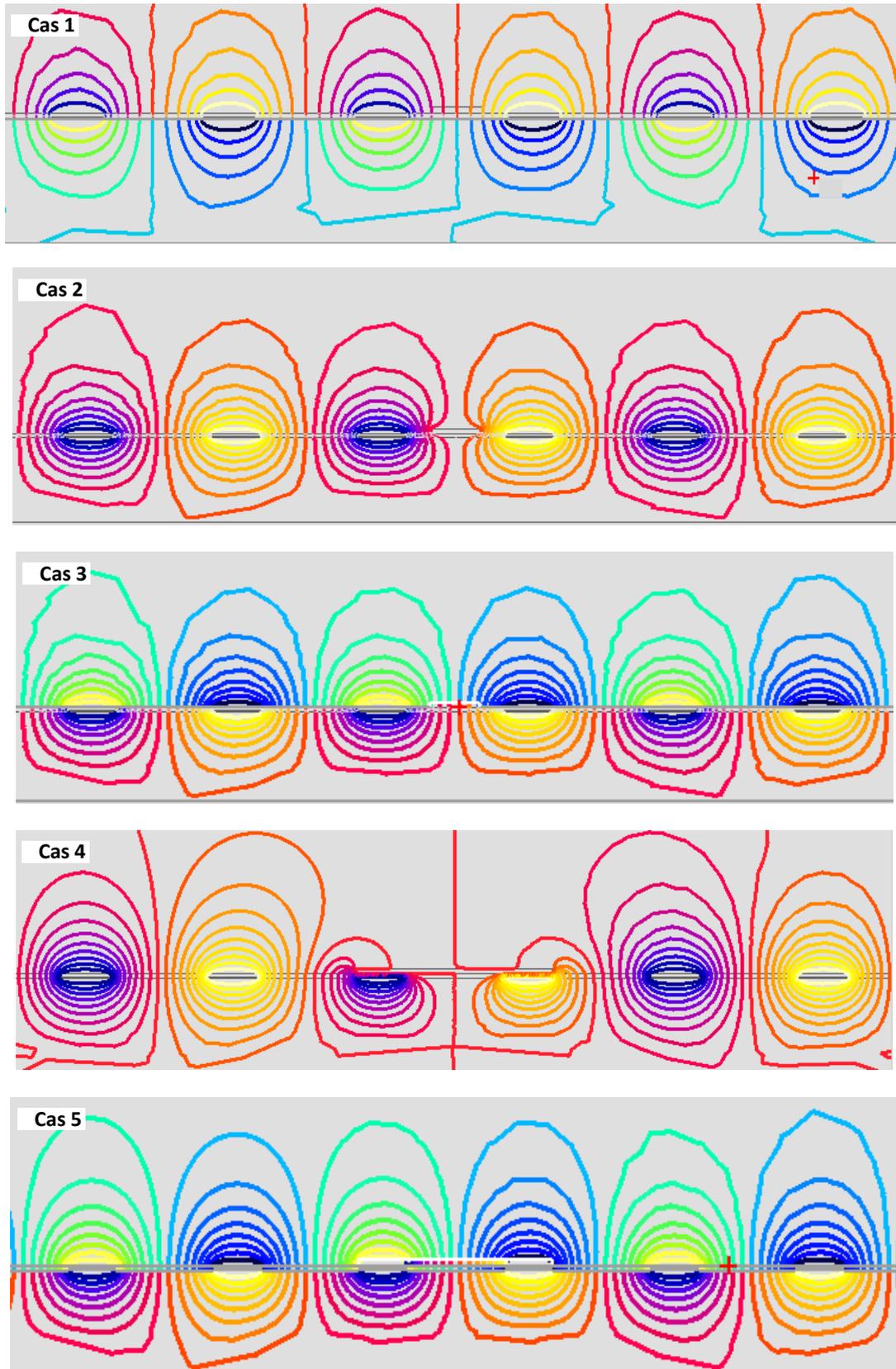
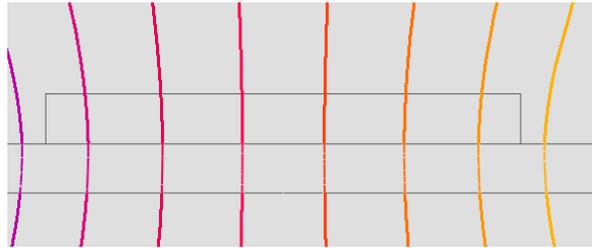
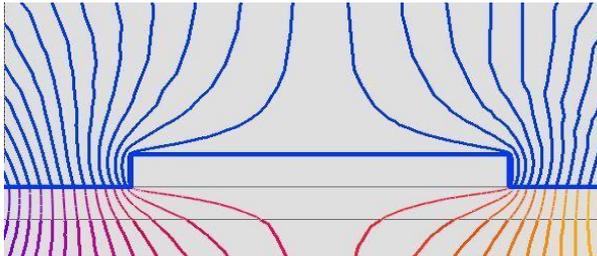


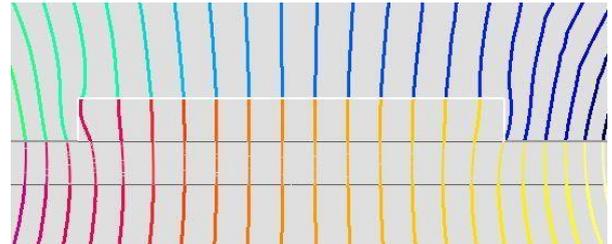
Figure IV.6 : Distribution des lignes équipotentiels dans la zone centrale du convoyeur pour les cinq cas étudiés



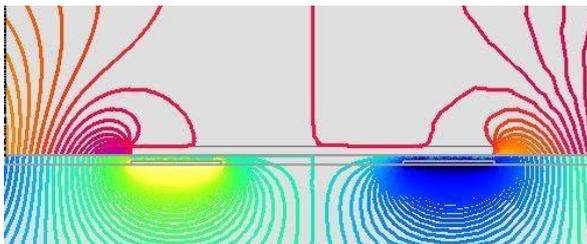
Cas 1 : Sans particule



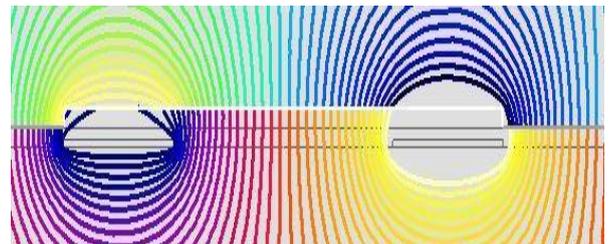
Cas 2 : Particule Cu //



Cas 3 : Particule PVC //



Cas 4 : Particule Cu  $\perp$



Cas 5 : Particule PVC  $\perp$

Figure IV.7 : Vues agrandies de la distribution du potentiel autour de la position de la particule

### IV.3 Calcul du champ électrique:

Avant de créer les courbes de variation du champ électrique, on commence par le traçage des lignes appelées chemins sur le logiciel de simulation Flux2D. On s'intéresse essentiellement au calcul du champ électrique dans l'isolant comme nous l'avons déjà décrit car il peut être intense dans la partie supérieure des électrodes. Pour cette raison on a tracé un chemin qui passe par la partie haute des électrodes comme indiqué sur la Figure IV.8. Ainsi, parmi les valeurs obtenues du champ électrique dans l'isolant, on obtient les valeurs maximales atteintes exactement au niveau des coins supérieurs des électrodes.

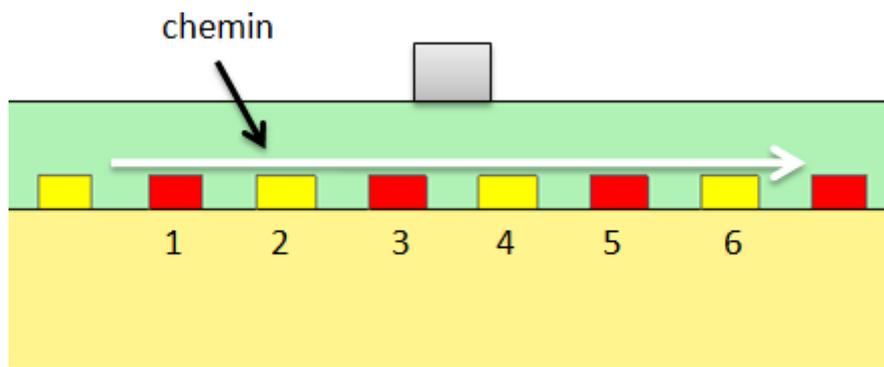


Figure IV.8 : Chemin tracé dans l'isolant passant par le haut des électrodes  
Par ailleurs, le champ électrique atteint une valeur maximale au niveau des quatre coins de la particule. Nous avons donc placé des points repères sur chacun de ses coins. Le champ électrique est ensuite mesuré sur ces repères afin d'évaluer l'accroissement du champ électrique dû à l'effet de pointe au niveau de ces coins. A noter que les points A et B donnent des valeurs du champ électrique uniquement dans l'air, alors que les points C et D permettent de donner des valeurs dans l'air et dans l'isolant car ces deux points se trouvent à l'interface de ces deux matériaux.

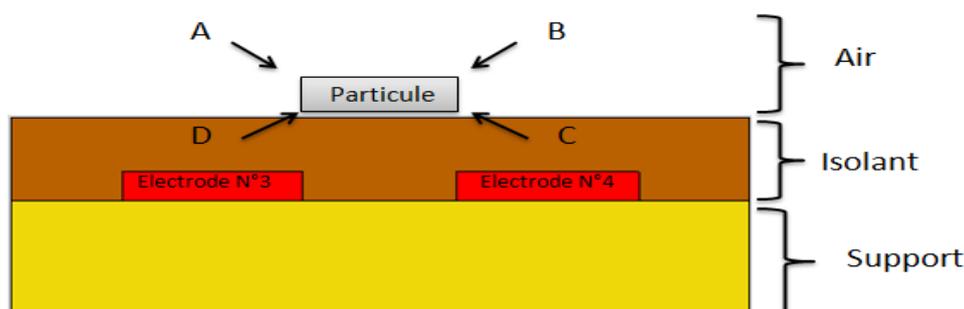


Figure IV.9 : Position des points repères pour le calcul du champ électrique au niveau des pointes de la particule.

### IV.3.1 Convoyeur sans particule (cas N°1)

Le champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes est calculé selon le chemin décrit précédemment dans la Figure IV.8. La variation du champ électrique dans l'isolant le long des six électrodes centrales montre qu'il atteint une valeur maximale de 63,83 kV/mm au niveau de la pointe supérieure droit de l'électrode numéro 6 comme indiqué sur la Figure IV.10.

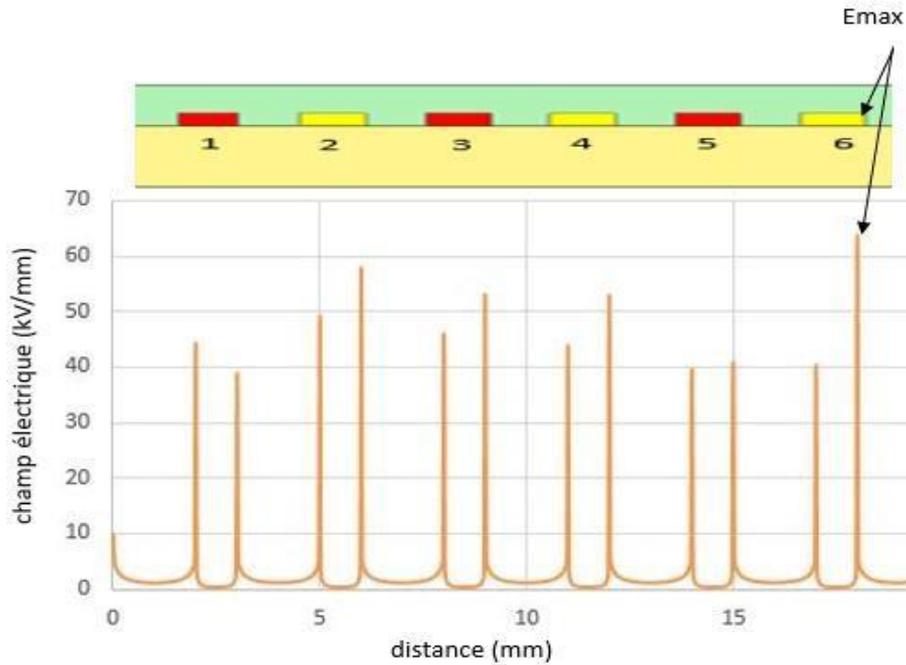


Figure IV.10 : Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas 1).

Les valeurs du champ électrique au niveau des points repères décrits dans la Figure IV.9 sont données au Tableau IV.1. A noter que pour les points A et B, il n'y a pas de valeur dans l'isolant car ces deux points se trouvent uniquement dans l'air.

Champ E (kV/mm)	A	B	C	D
Air	1,481	1,482	1,536	1,536
Isolant (Kapton)			1,534	1,533

Tableau IV.1 : Valeurs du champ électrique au niveau des point repères (cas N°1).

### IV.3.2 Convoyeur avec particule cuivre en parallèle (cas N°2)

En rajoutant une particule cuivre sur le convoyeur, la variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes est calculé selon le chemin décrit précédemment dans la Figure IV.8. La variation du champ électrique dans l'isolant le long des six électrodes centrales montre

## Chapitre IV : analyse de l'étude de simulation

qu'il atteigne une valeur maximale de 63,86 kV/mm au niveau de la pointe supérieure droite de l'électrode numéro 6 comme indiqué sur la Figure IV.11.

Les valeurs du champ électrique au niveau des coins de la particule cuivre sont présentées dans le tableau IV.2.

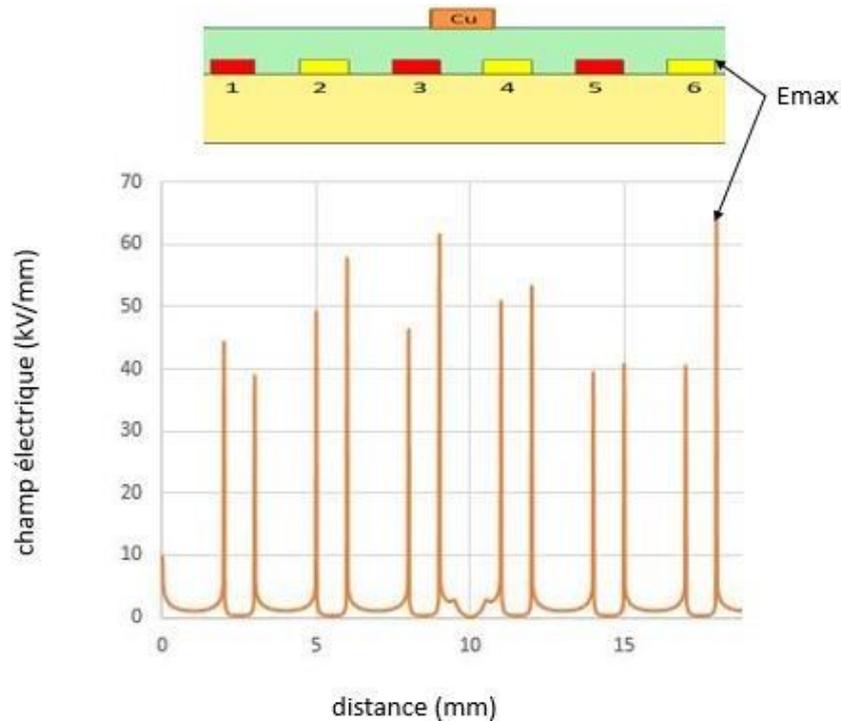


Figure IV.11 : Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas N°2).

Champ E (kV/mm)	A	B	C	D
Air	70,18	42,19	140,64	135,15
Isolant (Kapton)			70,83	130,57

Tableau IV.2 : Valeurs du champ électrique aux coins de la particule cuivre (cas N°2).

### IV.3.3 Convoyeur avec particule PVC en parallèle (cas N°3)

Lorsqu'on remplace la particule de cuivre avec une particule plastique en PVC, la variation du champ électrique dans l'isolant reste sensiblement là même à hauteur des électrodes avec une valeur maximale toujours au niveau de l'électrode N°6 avec une valeur de 63,83 kV/mm.

## Chapitre IV : analyse de l'étude de simulation

Cependant, on note une différence au niveau de l'électrode N°3 et l'électrode N°4 avec une légère diminution comme le montre la Figure IV.12. Ceci est dû au fait que l'électrode N°3 et l'électrode N°4 se trouvent de part et d'autres la particule ce qui a par conséquent de modifier la répartition des lignes équipotentielles dans cette zone.

On note aussi que les valeurs de champ électrique au niveau des coins de la particule sont du même ordre de grandeur que dans le cas N°1 sans particule mais beaucoup plus faibles que celles trouvées aux coins de la particule cuivre comme le montre le Tableau IV.3.

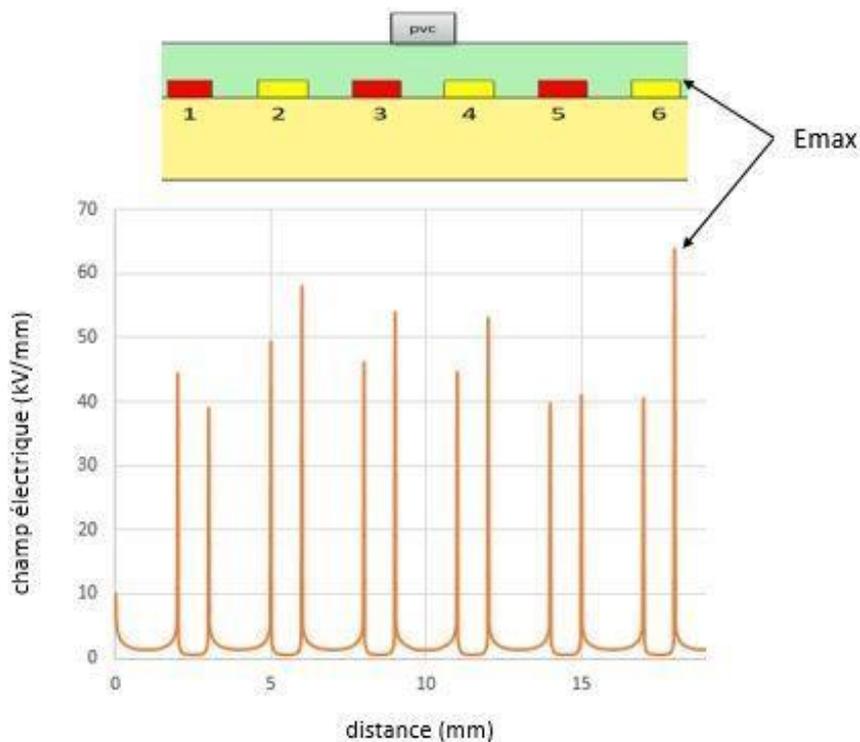


Figure IV.12: Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas N°3)

Champ E (kV/mm)	A	B	C	D
Air	5,91	4,08	6,42	6,47
Isolant (Kapton)			3,83	4,30

Tableau IV.3 : Valeurs du champ électrique aux coins de la particule PVC (cas N°3)

### IV.3.4 Convoyeur avec particule cuivre perpendiculaire (cas N°4)

Dans ce cas, nous avons changé le placement de la particule de cuivre. Elle sera disposée perpendiculairement aux électrodes du convoyeur et placée directement au-dessus des électrodes N°3 et N°4. La variation du champ électrique dans l'isolant le long des six électrodes centrales montre qu'il augmente au niveau des électrodes N°3 et N°4 et atteint une valeur maximale de 361,49 kV/mm au niveau de la pointe supérieure gauche de l'électrode numéro 4 comme indiqué sur la Figure IV.13.

Par ailleurs, les valeurs du champ électrique au niveau des coins de la particule cuivre atteignent des valeurs très élevées notamment au niveau des coins inférieurs (points C et D), et ceci que ça soit dans l'air ou dans l'isolant Kapton comme le montre le Tableau IV.4.

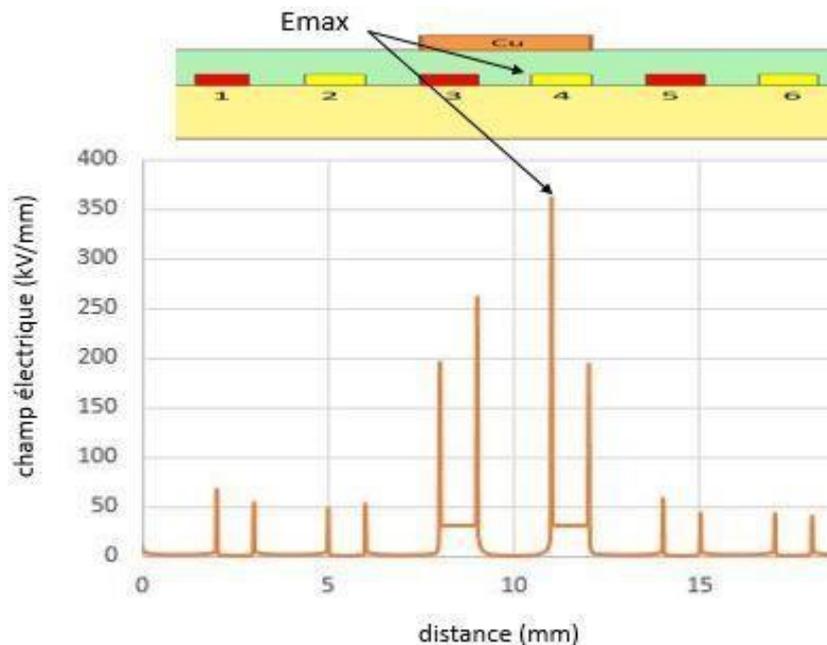


Figure IV.13: Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas N°4)

Champ E (kV/mm)	A	B	C	D
Air	44,61	45,98	646,71	573,78

## Chapitre IV : analyse de l'étude de simulation

Isolant (Kapton)			326,40	600,92
------------------	--	--	--------	--------

Tableau IV.4 : Valeurs du champ électrique aux coins de la particule cuivre (cas N°4).

### IV.3.5 Convoyeur avec particule PVC perpendiculaire (Cas N°5)

Il s'agit du même cas vu précédemment (cas N°4) mais en remplaçant la particule de cuivre par une particule plastique en PVC.

Comme montré dans la Figure IV.14 et le Tableau IV.5, on constate que la particule PVC n'engendre pas l'élévation importante observée avec la particule cuivre (Cas N°4).

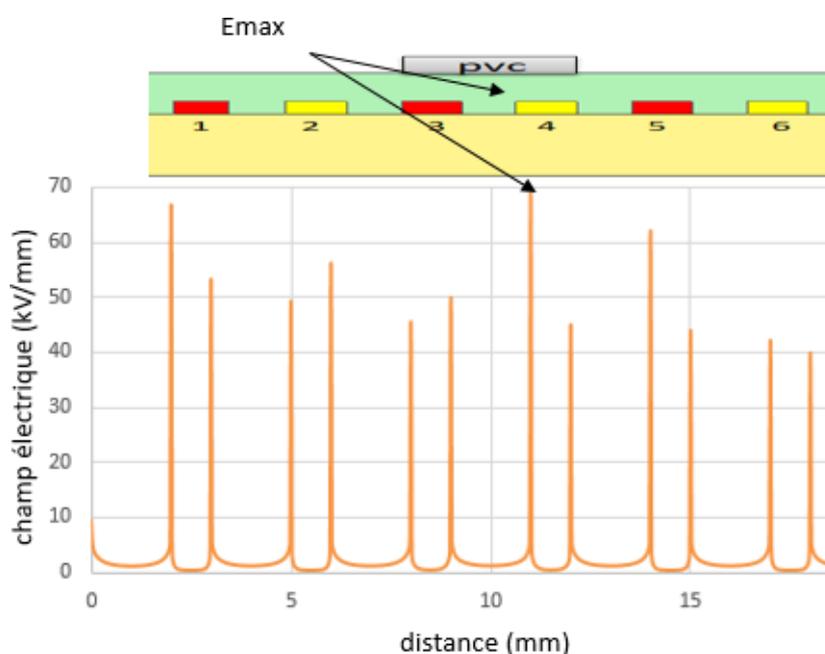


Figure IV.14: Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (casN°5)

Champ E (kV/mm)	A	B	C	D
Air	12,01	12,24	3,30	3,44
Isolant (Kapton)			2,32	2,79

Tableau IV.5: Valeurs du champ électrique aux coins de la particule PVC (cas N°5).

### IV.4 Conclusion

Les résultats obtenus des différents calculs de champ électrique des cinq configurations nous amènent à faire les conclusions suivantes:

- L'effet de la particule n'affecte que localement la distribution des équipotentiels dans le convoyeur. En effet, pour les cinq cas, la variation du champ électrique dans l'isolant dans la partie centrale du convoyeur est restée quasi-similaire avec une valeur maximale dans les trois premiers cas (1,2,3) au niveau du coin de l'électrode N°6 et avec une valeur maximale au niveau du coin de l'électrode N°4 dans les derniers cas (4,5) comme le montre le tableau IV.6 et IV.7

	Détails	E max (kV/mm)
Cas N°1	Sans particule	63,83
Cas N°2	Particule cuivre en parallèle	63,86
Cas N°3	Particule PVC en parallèle	63,83

Tableau IV.6 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant au niveau du coin de l'électrode N°6.

	Détails	E max (kV/mm)
Cas N°4	Particule cuivre perpendiculaire	361,49
Cas N°5	Particule PVC perpendiculaire	68,95

Tableau IV.7 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant au niveau du coin de l'électrode N°4.

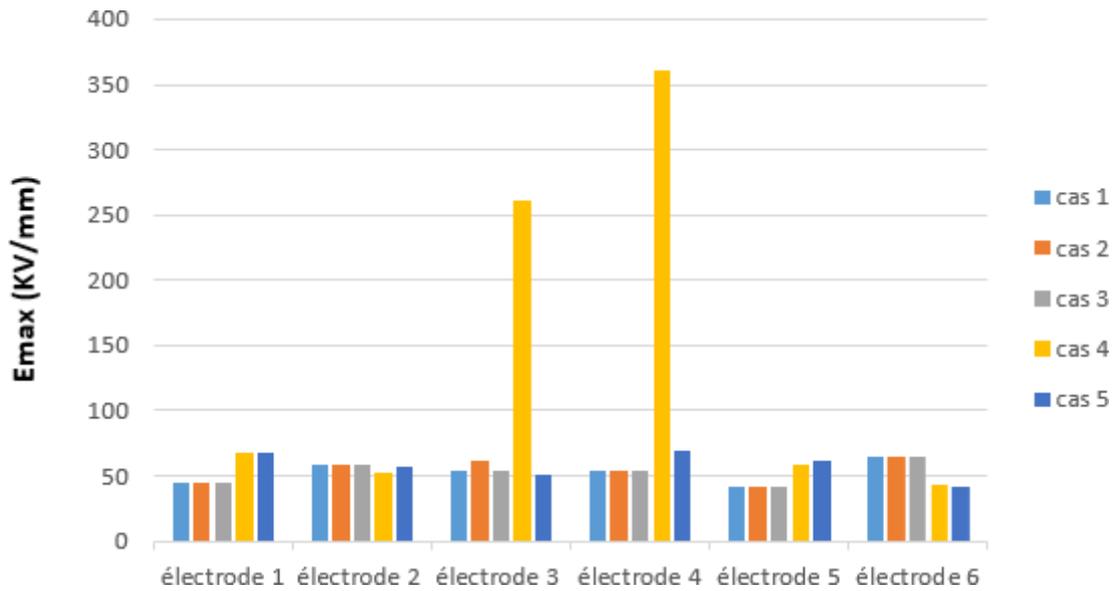
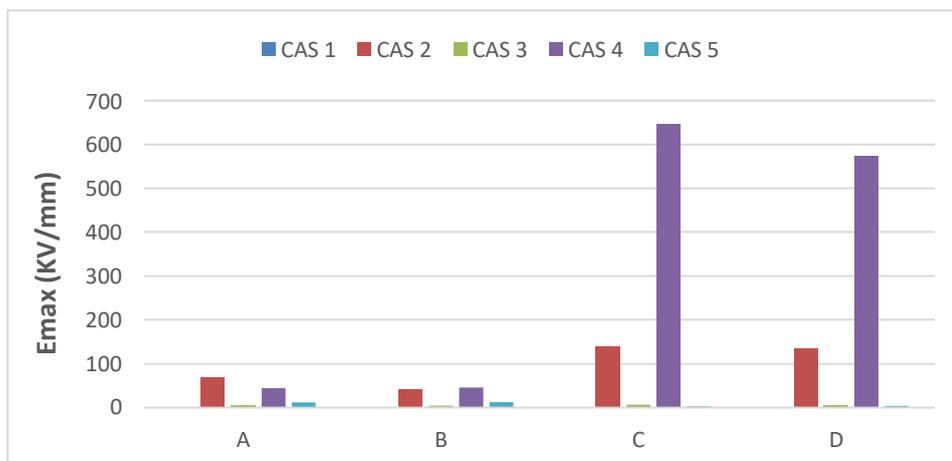


Figure IV.15 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant au niveau des électrodes du convoyeur pour les cinq cas étudiés.

- La configuration avec une particule en cuivre (Cas N°2) et (Cas N°4) est celle qui présentent les valeurs maximales du champ électrique au niveau de ses coins (dans l'isolant Kapton et dans l'air). Ceci est dû à la forte distorsion des lignes équipotentielle engendrée par sa présence sur le convoyeur comparativement avec les trois autres cas comme le montre les figures suivantes.



## Chapitre IV : analyse de l'étude de simulation

Figure IV.16 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'air au niveau des quatre coins de la particule (A, B, C et D) pour les cinq cas.

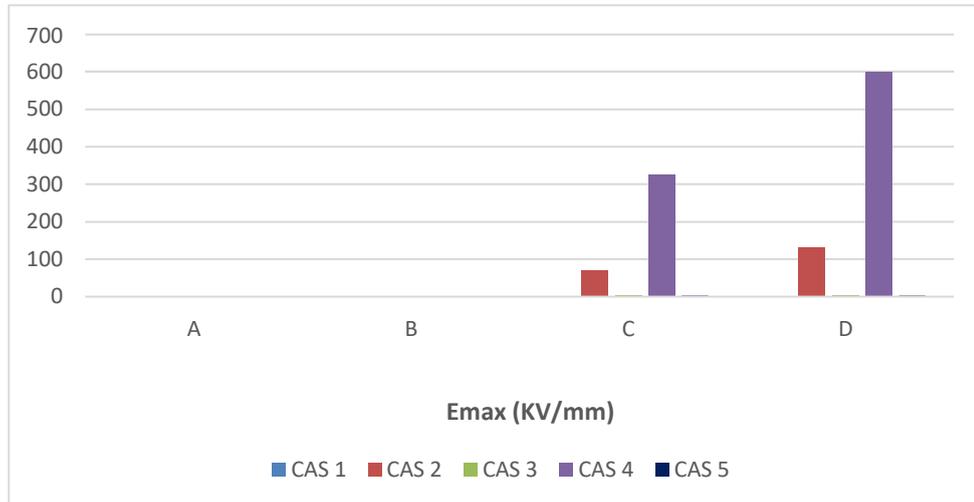
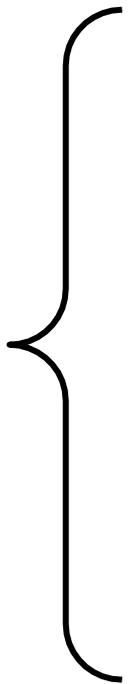


Figure IV.17 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant Kapton au niveau des deux coins de la particule (C et D) pour les cinq cas.



**Conclusion  
générale**

Dans ce mémoire nous avons réalisé une étude de simulation de l'effet des particules sur le champ électrique d'un convoyeur à ondes mobiles biphasé. Nous avons fait un petit rappel sur le champ électrique et les convoyeurs, ainsi que les techniques de séparation électrostatique.

Ensuite, on a présenté le modèle étudié par FLUX 2D qui est un logiciel de simulation par éléments finis et nous avons présenté les résultats obtenus de notre simulation avec l'analyse des différentes configurations étudiées.

Tout d'abord nous avons fait la configuration sans particule et obtenu les valeurs de champ électrique au niveau des électrodes, puis nous avons ajouté une particule cuivre disposée en parallèle aux électrodes du convoyeur, puis on l'a remplacé par une particule PVC placée de la même manière par rapports aux électrodes.

La valeur maximale de champ électrique dans ces trois cas était toujours au niveau de la pointe droite de l'électrode numéro 6.

Après avoir fini avec les résultats précédents, nous avons changé le placement de la particule. Elle est placée perpendiculairement aux électrodes du convoyeur. Nous avons étudié ainsi le cas où la particule est en cuivre ainsi que le cas d'une particule en PVC (Cas N 4 et Cas N°5).

La valeur maximale de champ électrique dans ces deux cas était au niveau de la pointe supérieure gauche de l'électrode numéro 4.

Par ailleurs, les résultats de simulation ont également montré l'effet très localisé de la présence de la particule et de sa nature sur la répartition des équipotentielle. En d'autres termes, le fait de rajouter une particule (isolante ou conductrice) n'affecte que la zone proche ou elle est posée.

L'effet de pointe a également été mis en évidence dans nos résultats à travers les pics de champ électrique très localisés au niveau des angles des particules. Les valeurs maximales ont été atteintes notamment quand la particule était en cuivre.

Lorsque nous avons comparé les résultats obtenus dans notre étude avec ceux d'un travail précédent [22]. (Sachant que nous avons conservé des dimensions géométriques similaires du convoyeur), nous avons constaté que la valeur du champ électrique est toujours élevée dans les particules de cuivre. On a également constaté que les électrodes qui présentent les valeurs les plus élevée au niveau de ces coins, sont celles qui sont les plus proches de la particule.

# ***Bibliographie***

## Bibliographie

- [1] kaddouri walid - driss chaimaa <<Effet des particules sur le champ électrique d'un convoyeur à ondes mobiles>> (page2-3). Université Belhadj Bouchaib.Ain Temouchent 2021-2022.
- [2] site internet <https://fr.wikipedia.org/> consulté 06/2023.
- [3] site internet <https://uel.unisciel.fr/> consulté 06/2023.
- [4] Zennani Imane, Merdoud Mourad « Optimisation d'une nouvelle technique de séparation électrostatique à ondes mobiles métal / plastique ». Mémoire Master 2, Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2019.
- [5] smili karima << Etude Des Proprietes Dielectriques Des Materiaux Isolants Soumis A Des Champs Très Intenses >> Universite Badji Mokhtar – Annaba 2018.
- [6] Gontran Richard « Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires » thèse de doctorat, Université Poitiers 2018.
- [7] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, and V. Neamtu. "Electrostatique séparation of insulating and conductive particles from granular mixes."Part. Sci. &Technol., Vol. 16, pp. 25-42, 1998.
- [8] site internet : <https://forums.futura-sciences.com/> .consulté 06/2023.
- [9] site internet : <https://webetab.ac-bordeaux.fr/> .consulté 06/2023.
- [10] site internet : <https://fr.made-in-china.com/> .consulté 06/2023.
- [11] M. N. Horenstein, M. Mazumder and all, "Modeling of Trajectories in an Electro-dynamic Screen for Obtaining Maximum Particle Removal Efficiency". IEEE Transactions on industry applications, VOL. 49, NO. 2, 2013.
- [12] 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.

[13] Yahiaoui Ilies, Khechab Mohamed Lakhdar "*Simulation du champ électrostatique dans un convoyeur à ondes mobiles*" (page 15), PFE M2, Universitaire Ain Temouchent 2020.

[14] 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.

[15] Loucif Fatima Zohra, Maachou Mokhtaria Dounia "*Optimisation des paramètres géométriques d'un convoyeur à onde mobile biphasé*" (page 16), PFE M2, Université Ain Temouchent 2020.

[16] Belgacem Abdelkader « *Etude du déplacement et de la séparation des particules micronisées avec la technique des ondes mobiles*" (page 15). Thèse Doctorat 3eme cycle en Electrotechnique, Université Djilali Liabes. Sidi Bel Abbes .2020.

[17] 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.

[18] chaibi mouaadh, benahmed daho abderrahmane, « *Etude de simulation d'un séparateur électrostatique rotatif* », Projet de Fin d'Etude de Master, Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent Département de Génie Electrique, P23, 2021.

[19] site internet : [made-in-china.com connecting buyers with Chinese suppliers](http://made-in-china.com/connecting-buyers-with-chinese-suppliers). Consulté 06/2023.

[20] Site Internet : <http://www.cao.fr/rubrique-toutes/actu/5322/Cedrat-annonce-la-version11-2-de-son-logicielFlux.html>

[21] kaddouri walid - driss chaimaa <<*Effet des particules sur le champ électrique d'un convoyeur à ondes mobiles*>> (Université Belhadj Bouchaib.Ain Temouchent 2021-2022.

# Résumé

### Résumé :

L'objectif de cette étude est de présenter la simulation de l'effet des particules isolantes ou conductrices sur le champ électrique dans un convoyeur à ondes mobiles.

Les résultats de simulation ont montré l'effet très localisé de la présence de la particule et de sa nature sur la répartition des équipotentielle. En d'autres termes, le fait de rajouter une particule (isolante ou conductrice) n'affecte que la zone proche où elle est posée. En tout cas ceci est valable pour les dimensions de particules qui ont été considérées dans ce travail.

**Mots clé :** simulation, champ électrique, ondes mobiles, isolant, conducteur, équipotentielle. Flux 2D.

### Abstract:

The objective of this study is to present the simulation of insulating or conducting particle effect on the electric field in a travelling wave conveyor. The modeling results showed the very localized effect of the presence of the particle and its type on the distribution of the equipotential lines. In other words, adding a particle (insulating or conducting one) affects only the area near where it is placed. Anyway, this is valid for the particle sizes that have been considered in this work.

**Key words :** Modeling, electric field, Travelling waves, insulator, conducting, Flux2D.

### ملخص :

الهدف من هذه الدراسة هو تقديم محاكاة لتأثير الجسيمات على المجال الكهربائي في ناقل موجة متحركة.

أظهرت نتائج المحاكاة التأثير الموضعي للغاية لوجود الجسيم وطبيعته على توزيع القوى الكامنة. بمعنى آخر، فإن إضافة جسيم (عازل أو ناقل) يؤثر فقط على المنطقة القريبة من مكان وضعه. على أي حال، هذا صالح لأحجام الجسيمات التي تم النظر فيها.

**الكلمات المفتاحية:** محاكاة - الجسيمات - المجال الكهربائي - موجة متحركة - عازل - ناقل - القوى الكامنة. Flux2D