

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
**Domaine** : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
**Filière** : Electrotechnique  
**Spécialité** : Commande Electrique  
**Thème** :

Simulation du champ électrostatique dans un convoyeur à ondes mobiles

**Présenté Par :**

Yahiaoui Ilies

Khechab Mohamed Lakhdar

**Devant les jurys composés de :**

B. Benazza

M. Flitti

S. Zelmat

MAA

PR

MCA

C.U.B.B (Ain Temouchent)

C.U.B.B (Ain Temouchent)

C.U.B.B (Ain Temouchent)

Président

Examinateur

Encadrant

*Année universitaire 2019/2020*

# Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

A mes chers parents Qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'études pour que je puisse atteindre mes objectifs  
Que ce travail soit, pour eux un faible témoignage.

A mon cher frère Baha Eddine.

A mes deux grandes familles Yahiaoui, Kessair.

A mon binôme Khechab Mohamed lakhdar

A mon Equipe :

Sidahmed.B, Walid, Sidahmed.D, Madjid, Mansour, Oussama,  
Chawki

A mes amies et mes copains et copines de classe

A tous ceux qui m'ont encouragé de près ou de loin.

*Yahiaoui Ilies*

# Dédicaces

Je dédie ce mémoire  
A mes parents pour leur patience, leur soutien et encouragements

Ma tante Michia

A mon frère Ibrahim

A mon binôme Yahiaoui ilies

A mes cousins et cousines Riad, Ibrahim, Adel, Abdelkader ikhlas

A mes amis Kadour, Ahmad, Hamza, Chawki....

A tous mes amis et mes copains et copines de classe

A toute personnes qui nous aidés du pré ou du loin à terminer ce  
travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués et le fuit  
de votre soutien infallible

Merci d'être la toujours pour moi.

Khechab Mohamed Lakhdar

# Remerciements

Louange à Allah le Tout Puissant Qui m'a accordé la foi, le courage et la patience pour mener ce travail.

On voudrait dans un premier temps remercier, notre encadreur Monsieur **Zelmat Samir** pour sa patience, son orientation, sa disponibilité et surtout de nous avoir encadré.

Nous tenons également à remercier tout particulièrement Monsieur **Benazza** pour avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Nos vifs remerciements aussi à notre examinateurs Monsieur **Flitti**

Et finalement mes remerciements sont destinés aussi à toute ma famille, et tous mes amis pour leur aide et leur soutien.

# *Sommaire*

Introduction général

01

*Chapitre I : Généralités sur l'électrostatique*

I.1 Introduction	02
I.2 Champ électrostatique	02
I.2.1 Champ électrique	02
I.2.2 Champ électrique uniforme	02
I.2.3 Lignes de champ électrostatique	03
I.3 Moment dipolaire	04
I.4 Polarisation électrostatique	04
I.5 Forces électrostatiques	05
I.5.1 Force de Coulomb (principe de superposition)	05
I.5.2 Force d'image	06
I.5.3 Force diélectrophorétique	06
I.6 Phénomènes de Charge	07
I.7 Mécanismes de charge des particules	08
I.8 Séparation électrostatique	08
I.9 Techniques de séparation électrostatique des particules en utilisant les COM	09
I.10 Conclusion	09

## ***Chapitre II : Généralités sur les Convoyeurs à ondes mobiles***

II.1 Introduction	10
II.2 Les ondes mobiles	10
II.3 Les Convoyeurs à ondes mobiles	11
II.4 Principe des convoyeurs à ondes mobile	11
II.5 Types de convoyeurs	12
II.5.1 Convoyeurs multi-phases	12
II.5.2 Convoyeurs à onde stationnaire	13
II.6 Classification des convoyeurs à ondes mobiles	14
II.6.1 Le nombre de phases (ou nombre de peignes)	15
II.6.2 La géométrie des électrodes	16
II.7 Conclusion	18

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

III.1 Introduction	19
III.2 Présentation du logiciel Flux2D	20
III.3 Géométrie du modèle	21
III.4 Maillage	22
III.5 Paramètres physiques	23
III.5.1 Matériau	24
III.5.1.1 Isolation des électrodes par l'air	24
III.5.1.2 Isolation des électrodes avec un Film Kapton	25
III.5.2 Régions linéiques :	25
III.5.2.1 Convoyeur biphasé	25
III.5.2.1 Convoyeur triphasé	27
III.6 Conclusion	29

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

IV.1 Introduction	30
IV.2 Convoyeur biphasé	30
IV.2.1 Distribution des lignes équipotentielles	30
IV.2.2 Calcul du champ électrique	32
IV. 3 Convoyeur triphasé	33
IV.3.1 Distribution des lignes équipotentielles	34
IV.3.2 Calcul du champ électrique	37
IV.4 Conclusion	40
Conclusion générale	42

# *Liste Des Figures*

Figure I.2: lignes champ électrostatique charge (+) et (-).	03
Figure I.3 : Le moment dipolaire entre deux charges opposées.	04
Figure I.4 : Polarisation d'une particule sous un champ électrique.	05
Figure I.5 : Force de coulomb entre deux particules sphériques chargées.	05
Figure I.6: Force diélectrophorétique.	07
Figure I.7: Influence entre deux corps.	08
Figure II.1 : Convoyeur à ondes mobiles (à 4 phases) relié à une source de tension.	10
Figure II.2 : Représentation schématique d'un convoyeur biphasé sous forme de deux peignes.	12
Figure II.3: Section transversale d'un rideau électrique triphasé.	13
Figure II.4 : Rideau électrique à onde stationnaire avec double réseau.	14
Figure II.5 : Schéma descriptif de différents types de convoyeurs (biphasé et triphasé).	15
Figure II.6 : Schéma descriptif du convoyeur biphasé.	15
Figure II.7 : Schéma descriptif du convoyeur triphasé.	16
Figure II.8 : Schéma descriptif du convoyeur à quatre phases.	16
Figure II.9 : Quelques exemples de convoyeurs à configuration 2D.	17
Figure II.10 : Quelques exemples de convoyeurs à configuration 3D.	17
Figure III.1: Présentation de l'exemple étudié.	19
Figure III.2: Présentation de l'axe de la coupe 2D.	19
Figure III.3 : Vue de coupe du modèle étudié.	20
Figure III.4: Les étapes processus prototypage simple.	21
Figure III.5: Géométrie du modèle.	21
Figure III.6: Vue sur le menu des paramètres de maillage dans Flux 2D.	22
Figure III.7: Vue sur le maillage global de la géométrie ainsi qu'un zoom sur le maillage d'une seule électrode.	22
Figure III.8: Maillage fin sur le bord supérieur d'une électrode.	23
Figure III.9: Menu des propriétés physiques dans Flux 2D.	23
Figure III.10: Menu Flux 2D des matériaux utilisés dans le modèle.	24
Figure III.11: Matériaux affectés aux régions surfaciques avec film isolant AIR.	24
Figure III.12: Matériaux affectés aux régions surfaciques (Film isolant = KAPTON).	25
Figure III.13: Menu Flux 2D des régions linéiques du convoyeur biphasé.	26

Figure III.14: Convoyeur biphasé avec deux groupes d'électrodes (phase 1 et phase 2)	26
Figure III.15: Valeurs de la tension des phases 1 et 2 en fonction du temps.	27
Figure III.16: Flux 2D des régions linéiques du convoyeur triphasé.	27
Figure III.17: Convoyeur triphasé avec les trois groupes d'électrodes (Ph1, Ph2 et Ph3).	28
Figure III.18: Valeurs de la tension des phases 1 et 2 et 3 en fonction du temps	28
Figure IV.1 : Mise en évidence de la zone étudiée dans le convoyeur biphasé.	31
Figure IV.2 : Vue d'ensemble sur la répartition des lignes équipotentiellles (isolant Kapton).	31
Figure IV.3 : Potentiel électrique des électrodes de la partie centrale du convoyeur.	32
Figure IV.4 : Lignes équipotentiellles dans la partie centrale du convoyeur isolant.	32
Figure IV.5 : Zoom sur le resserrement des lignes équipotentiellles aux coins d'une électrode	32
Figure IV.6: Dégradé de champ électrique pour Air et film kapton.	33
Figure IV.7 : Variation de champ électrique en fonction du type d'isolant (Air ou Kapton).	33
Figure IV.8 : Mise en évidence de la partie étudiée dans le convoyeur triphasé.	34
Figure IV.9 : Potentiel électrique des électrodes de la partie centrale du convoyeur(T1).	35
Figure IV.10: Lignes équipotentiellles dans la partie centrale du convoyeur isolant(T1).	35
Figure IV.11 : Potentiel électrique des électrodes de la partie centrale du convoyeur(T2).	36
Figure IV.12: Lignes équipotentiellles dans la partie centrale du convoyeur isolant(T2).	36
Figure IV.13: Potentiel électrique des électrodes de la partie centrale du convoyeur(T3).	36
Figure IV.14 : Lignes équipotentiellles dans la partie centrale du convoyeur isolant(T3).	37
Figure IV.15: Dégradé de champ électrique pour Air et Film kapton(T1).	37
Figure IV.16: Dégradé de champ électrique pour Air et Isolant(T2).	37
Figure IV.17: Dégradé de champ électrique pour Air et Isolant(T3).	38
Figure IV.18 : Variation de champ électrique en fonction du type d'isolant pendant T1.	38
Figure IV.19 : Variation de champ électrique en fonction du type d'isolant pendant T2.	39
Figure IV.20 : Variation de champ électrique en fonction du type d'isolant pendant T3	39
Figure IV.21 : Valeurs maximales du champ électrique en fonction du type d'isolant.	40
Figure IV.22 : Comparaison entre les valeurs maximales du champ électrique.	41

# *Listes Des Tableaux*

Tableau III.2 : Matériaux affectés aux surfaces du model (régions surfaciques)	25
Tableau IV.1 : Valeurs maximales du champ électrique en fonction du type d'isolant	33
Tableau IV.2 : Valeur de déphasage en T1 T2 T3	35
Tableau IV.3 : Valeurs maximales du champ électrique en fonction du temps	40

*Introduction  
Générale*

# Introduction générale :

---

Le besoin de l'homme de séparer les déchets d'équipements électriques et électroniques l'a poussé à créer de nouvelles techniques afin de satisfaire ce besoin et rentabiliser la production de ces équipements.

Le recyclage des matériaux plastiques provenant de ces équipements en fin de cycle de vie constitue un domaine prioritaire de recherche sur le plan mondial. Pour réaliser cette opération, il existe une technique basée sur les convoyeurs à ondes mobiles.

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 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.

Dans ce mémoire on a étudié la simulation du champ électrostatique dans deux types de convoyeur à ondes mobile ; biphasé et triphasé. On a organisé ce manuscrit en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre on a donné des rappels de champ électrostatique d'une manière général en mentionnant les différentes forces rencontrées dans le fonctionnement des convoyeurs à ondes mobiles.

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 réalisé avec le logiciel «Flux2D» et on a expliqué les étapes qui ont servi à la création de notre modèle. Plus particulièrement les étapes de la création de la géométrie de notre modèle, son maillage ainsi que les paramètres physiques utilisés.

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

*Chapitre I*  
*Généralités*  
*Sur*  
*L'électrostatique*

# I.1 Introduction :

---

Malgré que l'électrostatique représente une ancienne discipline de la physique, il est difficile d'imaginer aujourd'hui la variété des domaines d'études couverts par cette discipline de pointe. La recherche sur la piézoélectricité et les électrets, la technologie des microsystèmes électromécaniques (MEMS), les actionneurs aérodynamiques à décharge, filtrage et précipitation électrostatique, séparation électrostatique de granules, injection des charges et dopage, revêtement et traitement de surface, l'étude des protéines en biophysique, montrent enfin de compte que cette science ancienne et aussi une science d'avenir.

## I.2 Champ électrostatique :

### I.2.1 Champ électrique :

Un champ électrique est une région de l'espace où une charge électrique est soumise à une force électrique [1].

Pour définir le champ électrique en un point de l'espace, on y place une petite charge d'essai positive  $q$  et on regarde la force de Coulomb  $F$  qui s'exerce sur elle, due à la présence des charges électriques environnantes qui créent le champ électrique. Le champ électrique en ce point est défini comme la force par unité de charge :

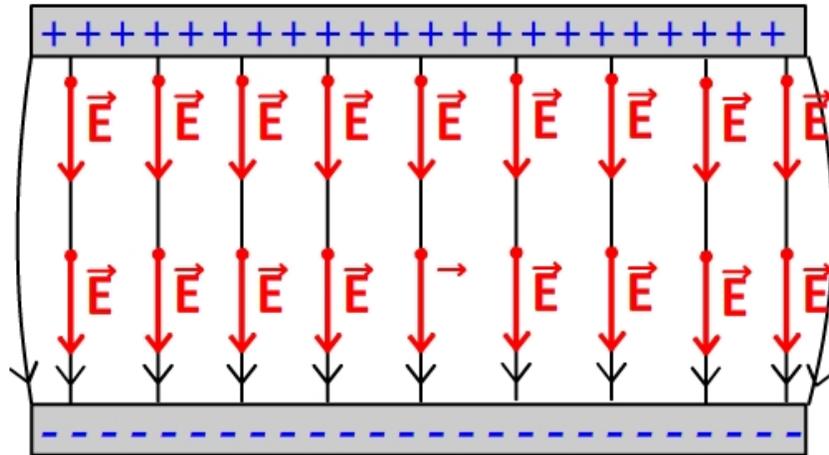
$$\vec{E} \equiv \frac{F}{q}, \quad q > 0 \quad (1)$$

Le champ électrique est donc une grandeur vectorielle. L'unité SI de champ électrique est le Newton par Coulomb (N/C) [2].

### I.2.2 Champ électrique uniforme :

Un champ électrique est uniforme dans un domaine (Figure I.1) si en tout point du domaine le vecteur conserve même sens, même direction et même valeur [3].

Il est possible de produire un champ électrique uniforme grâce un condensateur plan. Il s'agit d'un composant électrique constitué de deux plaques métalliques parallèles, appelées armatures, séparées par un isolant (air, vide, matière plastique...). L'une des armatures du condensateur porte une charge positive  $+q$  tandis que l'autre porte une charge négative  $-q$ .



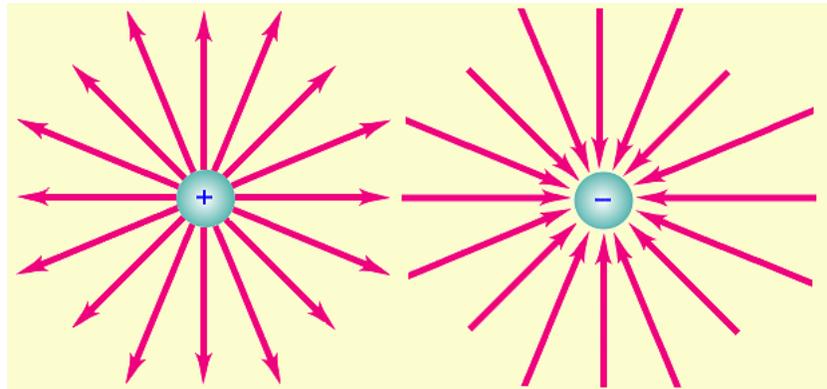
**Figure I.1 :** Lignes de champ créées par deux électrodes parallèles.

Le champ électrique est alors quasiment uniforme entre ces deux armatures, il leur est perpendiculaire et orientée de celle qui est chargée positivement vers celle qui est négative.

### I.2.3 Lignes de champ électrostatique :

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

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. Les lignes de champ s'éloignent des sources chargées positivement (Figure I-2) et se dirigent vers les sources chargées négativement (Figure I.2) [3].



**Figure I.2 :** lignes champ électrostatique 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 du champ avec des grains de semoule ou des semences de gazon qui s'orientent dans le sens du champ.

### I.3 Moment dipolaire :

Le moment dipolaire est la grandeur reflétant la polarité d'une molécule.

Une molécule présente un moment dipolaire lorsqu'il existe un barycentre des charges positives (point P) distinct du barycentre des charges négatives (point N). Ces barycentres P et N existent lorsque l'on a une différence d'électronégativité marquée entre les deux atomes de chaque liaison, et que la symétrie de la molécule fait que les moments dipolaires s'annulent (Figure I.3) [4].

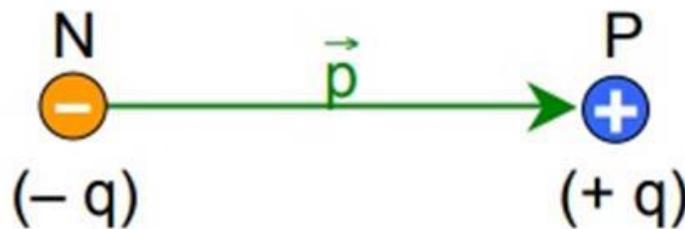


Figure I.3 : Le moment dipolaire entre deux charges opposées.

### I.4 Polarisation électrostatique :

N'importe quelle particule comporte des charges électriques négatives et positives. Lorsqu'elle est exposée à un champ électrique, elle aura un comportement selon sa nature. La particule conductrice va se polariser, c.à.d. les charges positives seront regroupées à l'opposé des charges négatives ; il y aura un léger déplacement du nuage d'électrons par rapport au noyau, ce qui va créer un moment dipolaire, c'est la polarisation (Figure I.4) [5].



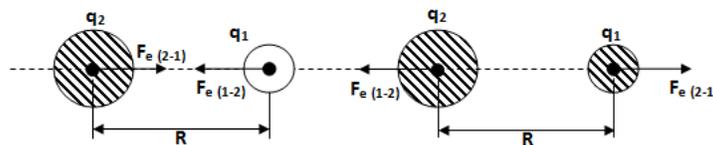
**Figure I.4 :** Polarisation d'une particule sous un champ électrique.

## I.5 Forces électrostatiques :

La plupart des particules isolantes portent des charges électriques qui peuvent s'accumuler accidentellement ou délibérément. Pour de plus grosses particules, les chargements électrostatiques se produisent fréquemment durant le transport ou la manipulation (Séville, 1997).

### I.5.1 Force de Coulomb (principe de superposition) :

C'est en 1785, le physicien français Charles-Augustin de Coulomb découvre expérimentalement l'expression décrivant le module de la force électrique que s'exerce entre deux charges électriques immobiles disposées sur des sphères (Figure I.5). La loi de Coulomb est une méthode de définition et de mesure des charges ponctuelles par la mesure de la force de répulsion et de leur distance qui nous permet de mesurer leur charge commune.



**Figure I.5 :** Force de Coulomb entre deux particules sphériques chargées.

(a) : attraction, charges signes contraires ( $q_1 q_2 < 0$ )

(b) : répulsion, charges signes semblables ( $q_1 q_2 > 0$ )

La force agissant entre deux particules chargées s'écrit [6] :

$$F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{R^2} \quad (2)$$

Où :

$F_e$  : Force électrique en newton (N).

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

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

**R** : distance entre les deux charges ponctuelles en mètre (m).

**K** : Constante de la loi de Coulomb,  $k = 9.109 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ .

Une particule chargée est soumise à une force électrostatique dès qu'elle est proche de surfaces chargées ou d'autres particules chargées. En présence d'un champ électrique  $E$ , les particules ayant acquis une charge électrique  $q$  subissent la force de Coulomb  $F_c$  proportionnelle à la charge :  $F = q E$ .

### I.5.2 Force d'image :

Lorsqu'une particule chargée approche d'une surface, elle induit une charge d'image sur la surface. La force d'image électrostatique  $F_i$  dépend de la taille des particules et de la nature du matériau du film isolant des électrodes. Cependant, le paramètre majeur est la charge de la particule qui diminue généralement avec le temps, de sorte que la force d'image peut être négligée dans la pratique. Cette force est donnée par [6] :

$$F_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{n=1}^N \left( \frac{q_i q_n}{2d} \right)^2 \frac{d}{|d|} \quad (3)$$

**qi** : la charge de la particule.

**qn** : la charge du film isolant qui est négligeable.

**d** : distance entre la particule et l'électrode.

### I.5.3 Force diélectrophorétique :

La diélectrophorèse est un phénomène physique, qui peut être considéré comme une composante de deuxième ordre de l'électrophorèse. L'électrophorèse est la force créée sur une particule chargée par un champ électrique. Dans le cas de la diélectrophorèse, la particule est neutre (globalement non chargée), mais polarisable : un moment dipolaire y apparaît lorsqu'elle est soumise à un champ. Si un champ constant ne crée aucune résultante (seulement un moment) sur une particule globalement neutre mais polarisée, le gradient d'un champ spatialement variable crée lui une résultante : la force diélectrophorétique [7].

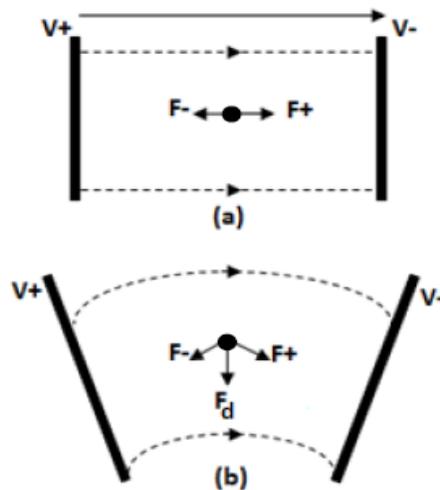
### Principe :

Lorsqu'on expose une particule à un champ électrique  $E$ , un moment dipolaire électrique  $p$  est induit dans celle-ci.

Si le champ électrique est uniforme, la particule est soumise à deux forces égales et opposées, la force résultante est conséquemment nulle (Figure I.6) (a).

Dans un champ électrique non uniforme, la force résultante qui s'exerce sur la particule est non nulle, elle est appelée force diélectrophorétique (Figure I.6) (b).

Cette force qui ne dépend pas de la polarité de la tension peut être observée en tension continue ou alternative.



**Figure I.6:** Force diélectrophorétique.

Cette force qui ne dépend pas de la polarité de la tension peut être observée en tension continue ou alternative.

## I.6 Phénomènes de Charge :

Les phénomènes les plus répandus étant l'effet triboélectrique et l'influence. L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux mais sa définition s'étend souvent aux transferts de charges par contact, le frottement étant l'équivalent de contacts suivi de séparations, mais s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse. Le phénomène d'influence correspond à l'apparition de charges électrostatiques sur un corps d'un matériau dû à la proximité d'un corps déjà chargé, sans qu'il y ait contact entre les deux. En effet la présence du corps chargé induit un champ électrique à l'intérieur du corps influencé produisant ainsi des forces qui vont s'exercer sur les

porteurs de charges libres ayant pour conséquence une redistribution de ceux-ci. La charge ainsi induite sera de signe opposé à la charge du corps influençant. (Figure I.7) [08].



**Figure I.7:** Influence entre deux corps.

### **I.7 Mécanismes de charge des particules :**

Avant d'aborder les théories du principe de fonctionnement des ondes mobiles, il faut faire un rappel des mécanismes permettant aux particules fines de recueillir des charges électriques, qui sont [09] :

- Chargement « naturel » par attachement des ions existant dans l'atmosphère.
- Chargement triboélectrique : regroupant la charge par contact et la charge par frottement.
- Acquisition de charge par champ et par diffusion : les ions gazeux sont produits dans ce cas principalement à l'aide d'une source radioactive ou d'une décharge électrique. La densité d'ions peut être unipolaire (positive ou négative utilisée pour la charge des particules) ou bipolaire.

### **I.8 Séparation électrostatique :**

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.

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, dépoussiérage des panneaux solaires.), elle se base sur l'impact qu'apporte la force diélectrophorétique [10].

## **I.9 Techniques de séparation électrostatique des particules en utilisant les COM :**

Cinq techniques de séparation électrostatique des particules ont été développées en utilisant l'équilibre de la force électrostatique et gravitationnelle.

- La première est un système de convoyeur à plaques inclinés. Un convoyeur à plaques est constitué d'électrodes parallèles et une onde électrostatique à quatre phases a été appliquée aux électrodes pour transporter des particules sur le convoyeur. Les particules ont été séparées par taille sous l'application de la tension avec une fréquence appropriée en fonction de leurs caractéristiques ; où les petites particules ont été transportées vers le haut contre la gravité, mais de grandes particules étaient susceptibles de tomber ;
- La deuxième technique est un système de tube incliné. Le principe est commun avec celui du système de plaque inclinée.
- La troisième technique utilise un convoyeur électrostatique circulaire similaire à la spectroscopie de masse, mais utilise la caractéristique que les petites particules volent à haute altitude par rapport à celles grosses.
- La quatrième technique, un système de vortex, aussi utilise la différence entre les petites et grandes particules volantes.
- La dernière technique est la combinaison entre un convoyeur linéaire et un rouleau de séparation électrostatique situé à la fin du convoyeur [11].

## **I.10 Conclusion :**

Le but de ce chapitre est de donner une idée générale sur le champ électrostatique (champ électrique, potentiel, charge, polarisation ...) et aussi le chargement des particules dans les COM. A la fin on a parlé de la séparation électrostatique et leurs domaines dans l'étude les convoyeurs à ondes mobiles.

*Chapitre II*  
*Généralités*  
*Sur*  
*Les convoyeurs à ondes*  
*mobiles*

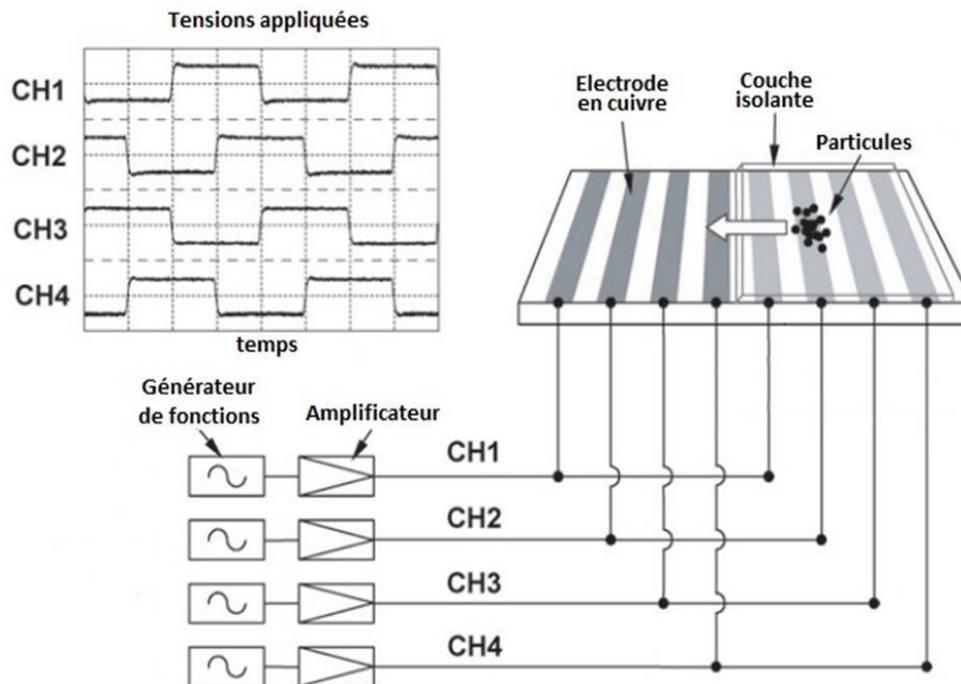
## II.1 Introduction :

L'évolution de l'industrie a poussé les constructeurs à s'engager dans la recherche technologique pour alléger et rentabiliser l'activité. Parmi ces aboutissements, il y a eu la création du premier convoyeur qui a donné par la suite la naissance à plusieurs convoyeurs selon le besoin.

Parmi ces convoyeurs, les convoyeurs à ondes mobiles (COM) sont généralement utilisés pour produire les mouvements des matériaux isolants micronisés. Ce COM combine des électrodes parallèles avec 2 ou 3 ou 4 phases alternatives déphasées entre elles.

### II.2 Les 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.1).



**Figure II.1 :** Convoyeur à ondes mobiles (à 4 phases) relié à une source de tension

Lorsqu'une particule est placée dans un champ électrique  $E$ , un moment dipolaire électrique  $p$  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 [12].

### **II.3 Les Convoyeurs à ondes mobiles :**

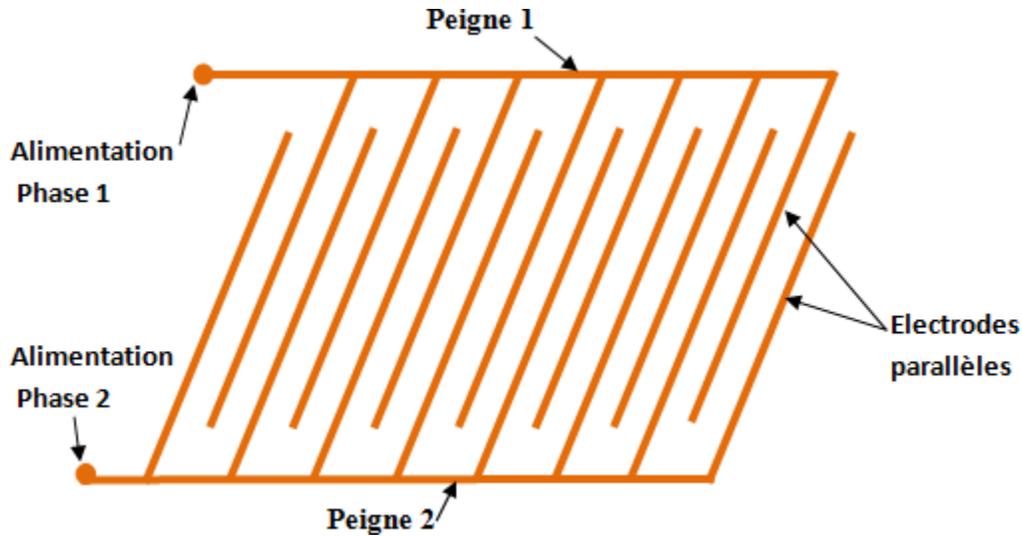
La technique des ondes mobiles est une technologie bien établie qui a été proposée en premier lieu par F.B. Tatom et ses collaborateurs de l'Administration Nationale Aéronautique et Spatiale (NASA) en 1967 et le Professeur Senichi Masuda de l'université de Tokyo (Japon) dans les années 1970 [1].

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 « Electrodynamic screens » EDS [4-8], d'autres ont défini le convoyeur comme un ensemble de trois peignes pour un convoyeur triphasé (deux peignes pour le Biphase) [13].

### **II.4 Principe des convoyeurs à ondes mobile :**

Les rideaux électriques ou convoyeurs sont des réseaux d'électrodes rectilignes, parallèles généralement en cuivre prenant la forme d'un peigne, séparés par un intervalle (distance inter-

électrodes), isolés entre eux par un diélectrique (air, paraffine, ...) pour minimiser le risque de claquage entre électrodes (Figure II.2).

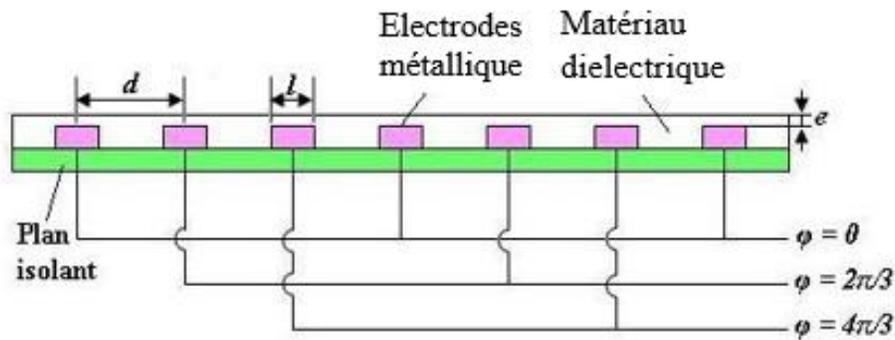


**Figure II.2 :** Représentation schématique d'un convoyeur biphasé sous forme de deux peignes.

## II.5 Types de convoyeurs :

### II.5.1 Convoyeurs multi-phases :

Pendant les années 1970 Masuda et ses collègues ont effectué de nombreuses études sur une technique appelée « rideau électrique » (« electric curtain » en anglais) pour le confinement et le transport d'aérosols chargés. Le dispositif typique du rideau électrique comporte des séries d'électrodes rectilignes, parallèles, toutes placées dans un plan horizontal et noyées dans une couche plane d'isolant. Dans le dispositif triphasé (Figure 2.3), les électrodes sont connectées et réalisent un ensemble de trois « peignes » intercalés alimentés par des tensions périodiques ayant un déphasage de  $2\pi/3$  et qui génèrent un champ progressif (appelé « traveling-wave electric curtain » en anglais) dans la direction perpendiculaire au axes des électrodes [14].



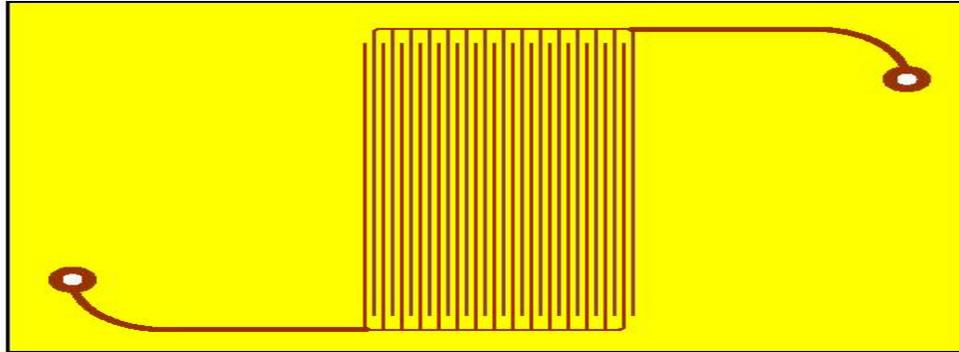
**Figure II.3** : Section transversale d'un rideau électrique triphasé

En un point dans l'air au-dessus de la surface de l'isolant, le rideau électrique multi-phases à un champ électrique tournant. On pourrait s'attendre à un mouvement cyclique des particules chargées. Mais le champ électrique diminue avec la distance au plan des électrodes de façon que le cycle n'est pas fermé ; sur une période du champ alternatif, l'analyse du mouvement d'une particule chargée a établi que la force exercée sur la particule a une composante verticale qui peut compenser la force de gravitation et une composante horizontale dont la direction dépend du signe de la charge. La force résultante est proportionnelle à la charge de la particule et au champ électrique et dépend aussi du gradient de champ. Ceci explique le balayage horizontal des particules chargées qui sortent ainsi de la zone soumise au champ [14].

### II.5.2 Convoyeurs à onde stationnaire :

Masuda a également examiné le cas plus simple où deux « peignes » intercalés sont alimentés par une tension monophasée (Figure 2.4), l'un est connecté à la tension alternative et l'autre est relié à la masse. Dans ce cas, le champ électrique est oscillant (« standing-wave » en anglais) et, en un point, le champ a une direction définie et une amplitude oscillant à la période imposée. Une particule chargée unique a donc un mouvement oscillatoire. Pour le dispositif horizontal, il apparaît une force résultante verticale qui peut repousser la particule chargée ; mais, pour une amplitude suffisamment faible du mouvement des particules, la composante horizontale moyennée spatialement est nulle et une particule unique devrait être piégée dans la région autour de la position initiale, entre les deux électrodes les plus proches. Si l'amplitude du champ est plus élevée, le mouvement peut être beaucoup plus complexe et nous avons observé un déplacement assez aléatoire de particules finissant par quitter la zone soumise au champ.

Z. Dudzicz a suggéré que le processus pourrait être utilisé pour étudier et construire de nouveaux types de précipitateurs et de séparateurs électrostatiques [14].



**Figure II.4** : Rideau électrique à onde stationnaire avec double réseau

Des expériences effectuées avec un dispositif à ondes stationnaires ont montré que les poudres de certains composés comme le poly-chlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE), le nylon et des résines époxy se chargent au contact de la feuille d'isolant (Téflon, PE ou même papier) recouvrant les électrodes ; la poudre déposée présente une agitation intense lorsqu'une tension suffisante est appliquée. Masuda n'a pas discuté le phénomène d'expulsion progressive de la poudre hors de la zone de champ. Il est vraisemblable que les interactions entre les particules chargées contribuent à donner aux particules une vitesse moyenne horizontale non nulle.

Assez récemment, des observations ont été effectuées sur des rideaux électriques à onde stationnaire étudiés dans le but de dépoussiérer les couches de poudre déposée, en particulier, sur les panneaux solaires martiens. Sims et al. ont utilisé des réseaux intercalés d'électrodes du type montré dans la Figure 2.3, ce qui génère une onde stationnaire. Dans l'air à 1 bar, pour des tensions appliquées suffisamment élevées (quelques kilovolts) de fréquence variant de quelques dizaines à quelques centaines de Hertz, il se produit une mise en agitation de la poudre déposée sur la couche isolante qui enduit les deux réseaux d'électrodes et l'on observe une éjection notable bien qu'incomplète des particules hors de la zone soumise au champ [14].

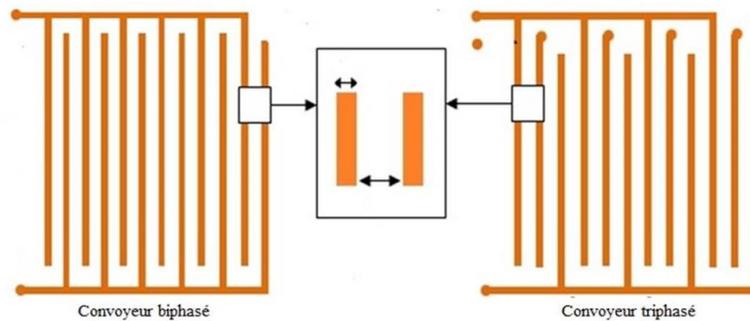
## **II.6 Classification des convoyeurs à ondes mobiles :**

Nous pouvons classer les convoyeurs selon deux critères :

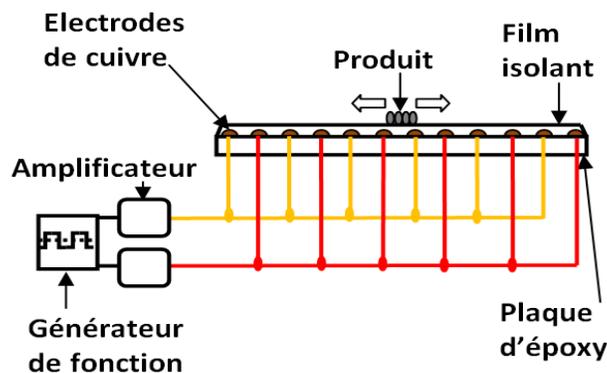
### II.6.1 Le nombre de phases (ou nombre de peignes) :

Les différents types des convoyeurs (Figure II.5)

- Les convoyeurs biphasés ayant 2 peignes intercalés, alimentés par des tensions périodiques à 2 phases ayant un déphasage de  $\pi$  (Figure II.6).
- 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.7).
- 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.8) [15].



**Figure II.5 :** Schéma descriptif de différents types de convoyeurs (biphasé et triphasé)



**Figure II.6 :** Schéma descriptif du convoyeur biphasé

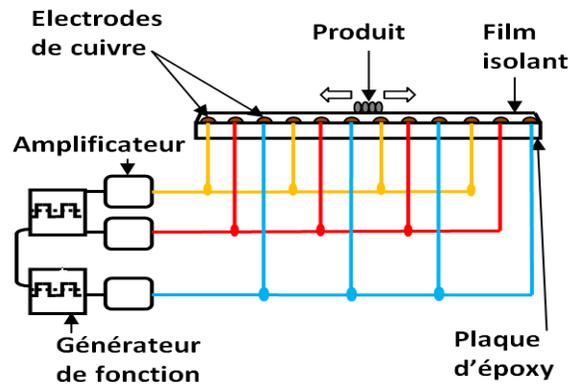


Figure II.7 : Schéma descriptif du convoyeur triphasé

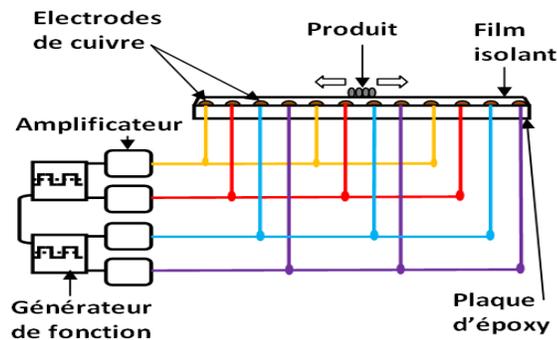


Figure II.8 : Schéma descriptif du convoyeur à quatre phases.

### II.6.2 La géométrie des électrodes :

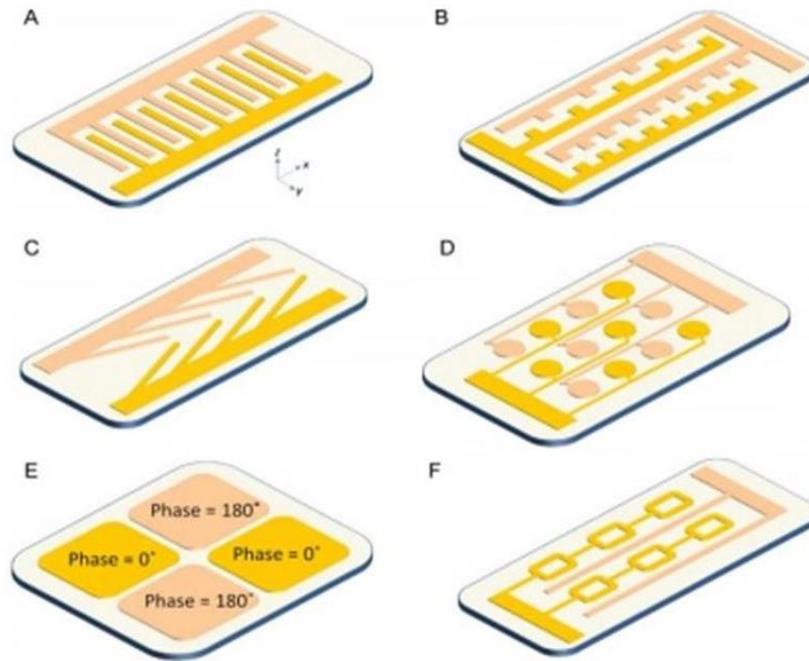
Les convoyeurs peuvent avoir des configurations 2D ou 3D d'électrodes. Les électrodes 2D sont planaires et fabriquées en utilisant des procédés de photolithographie et métallisation conventionnels. Le champ créé affecte principalement les particules proches de la surface.

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.

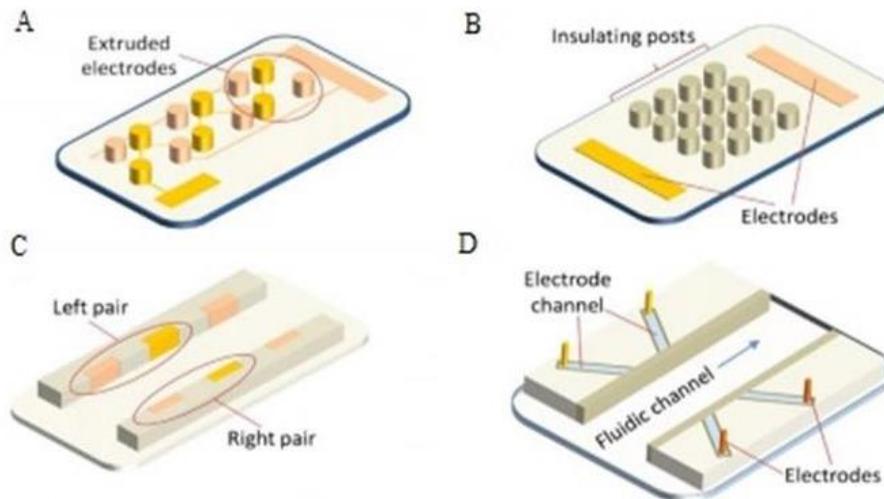
Les géométries d'électrodes 2D les plus utilisées sont parallèles ou inter digitées, crénelées, obliques, incurvées et matricielles (Figure II.9).

Les électrodes 3D utilisent les géométries suivantes : extrudées, déposées en vis-à-vis, et sans contact direct avec le fluide (Figure II.10).

Chaque configuration d'électrodes permet de créer des zones localisées de forts gradients de champ électrique afin d'interagir avec les particules en suspension [16].



**Figure II.9 :** Quelques exemples de convoyeurs à configuration 2D  
 A) parallèles ou interdigitées, B) crénelées, C) obliques, D) matricielles, E) quadripôle, F) micro puits.



**Figure II.10 :** 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 [12].

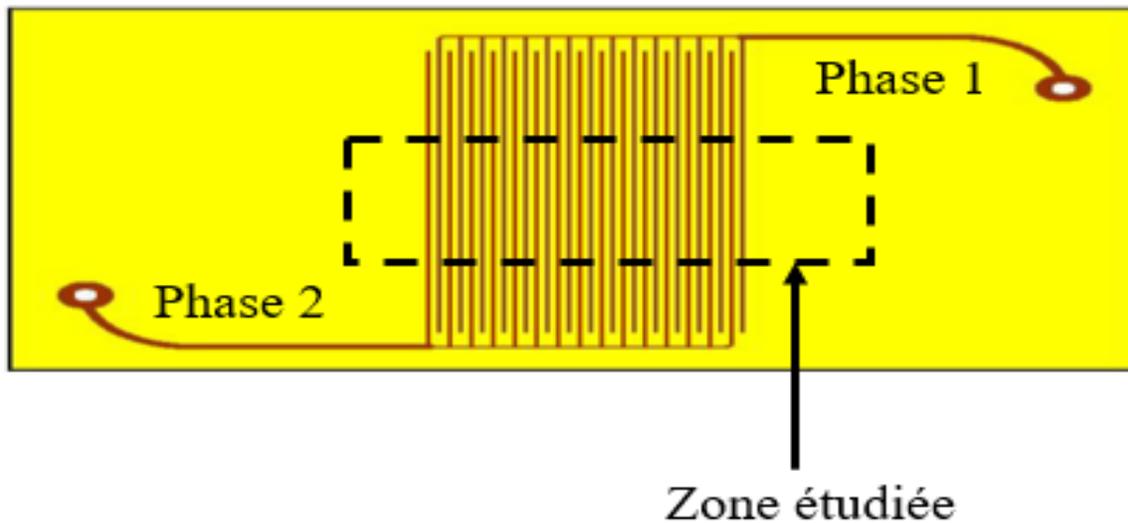
**II.7 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté la définition et les différents types des convoyeurs spécialement les convoyeurs à ondes mobiles (biphasé, triphasé et à quatre phases) et c'est ces convoyeurs qu'on va utiliser dans l'étude de notre modèle dans le chapitre quatre.

*Chapitre III*  
*Présentation du*  
*Modèle étudié*

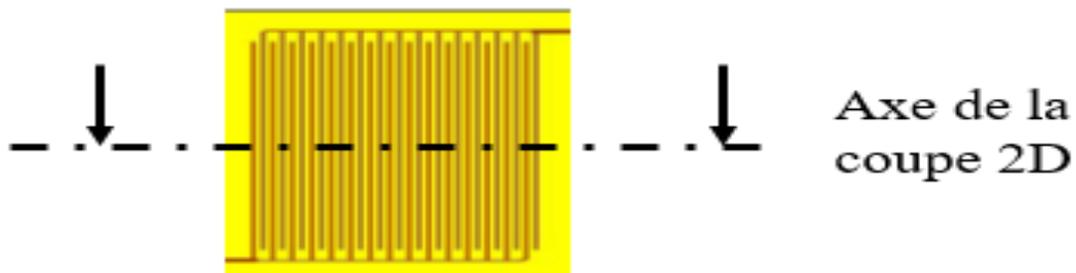
## III.1 Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter la simulation considérée dans notre étude. Pour cela, on a utilisé « Flux 2D », un logiciel de simulation d'élément finis. Le convoyeur à onde mobile étudié est présenté dans la (Figure III.1).



**Figure III.1** Présentation de l'exemple étudié

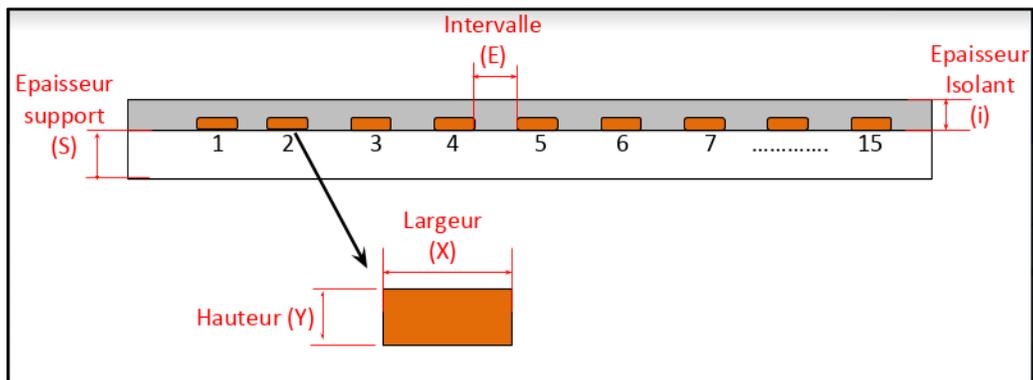
Dans notre étude, on étudiera le champ électrostatique dans deux type des convoyeurs à ondes mobiles ; biphasé et triphasé. Pour cela on a réalisé une coupe 2D d'un convoyeur constitué de 18 électrodes en cuivre disposées sous forme de peignes inter-digités (Figure III.2).



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

Dans la (Figure III.3) on a une vue de coupe d'un convoyeur constitué de 18 électrodes en cuivre déposées sur un support en FR4 d'une épaisseur de 2mm. Les électrodes ont une largeur de 1mm et une hauteur de 35 $\mu$ m. L'ensemble de ces électrodes est protégé par un film isolant d'une épaisseur de 100 $\mu$ m. La distance entre deux électrodes successives est de 2 mm.

Ces électrodes sont reliées à deux sources de tensions déphasées de 180° pour le convoyeur biphasé, et à trois sources de tensions pour le convoyeur triphasé. Ces tensions sont alternatives et de forme rectangulaire avec des amplitudes de 2kV à -2kV (tension crête à crête égale à 4kV).



**Figure III.3** Vue de coupe du modèle étudié.

- (X) Largeur électrode = 1mm
- (Y) Hauteur électrode = 35 $\mu$ m
- (E) Distance entre électrodes = 2 mm
- (S) Epaisseur support = 2mm
- (i) Epaisseur isolant = 100 $\mu$ m

### III.2 Présentation du logiciel Flux2D :

Le logiciel Flux, développé par CEDRAT à Grenoble, en collaboration avec le G2Elab, permet une analyse poussée des dispositifs électriques, magnétiques et thermiques par la méthode des éléments finis. Il offre aux concepteurs la possibilité d'effectuer des expériences, tel un laboratoire virtuel, et de comparer les résultats obtenus dans différentes conditions, lui permettant ainsi de gagner du temps et de réduire ses coûts en se passant de coûteux prototypes.

La (Figure III.4) montre un schéma de principe adopté dans le logiciel Flux 2D et les différentes étapes à suivre pour les études de simulation. [17]

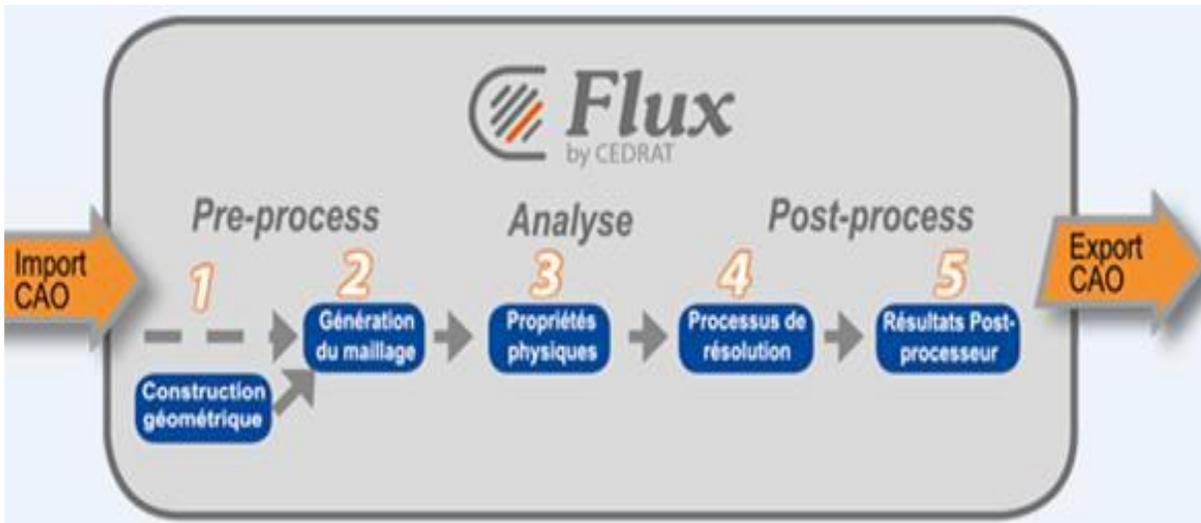


Figure III.4 Les étapes processus prototypage simple.

### III.3 Géométrie du modèle :

La géométrie de notre modèle est celle d'un convoyeur composé d'un support (plaque) sur lequel a été déposées 18 électrodes en cuivre protégées par un film isolant. L'ensemble est placé dans un environnement d'air désigné par « Chambre » dans le reste du document.

Sur Flux 2D, cette géométrie est constituée de plusieurs faces formées par une multitude de lignes qui relient plusieurs points (Figure III.5).

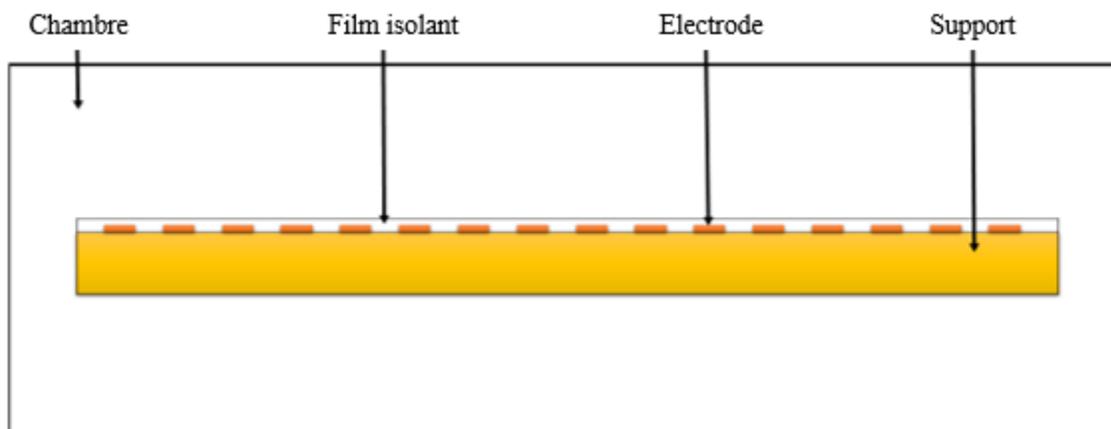
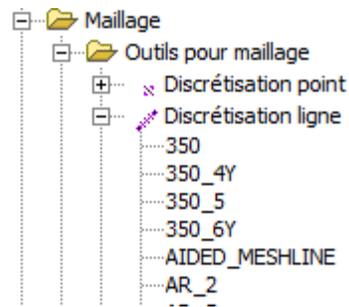


Figure III.5 Géométrie du modèle

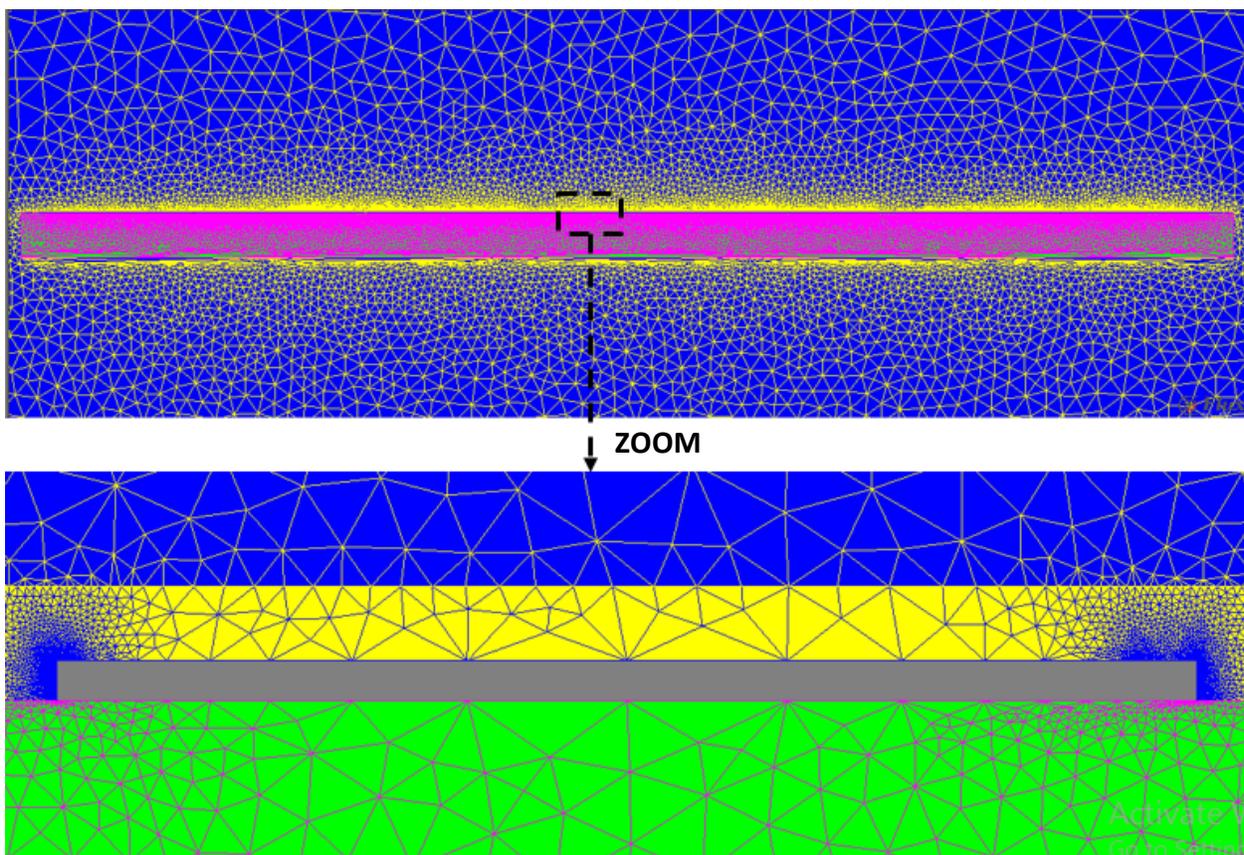
### III.4 Maillage :

Dans cette étape, on a fait le maillage de la géométrie précédente en utilisant différents paramètres de maillage qu'on a créé dans "outils pour maillage" → "discrétisation ligne". (Figure III.6).



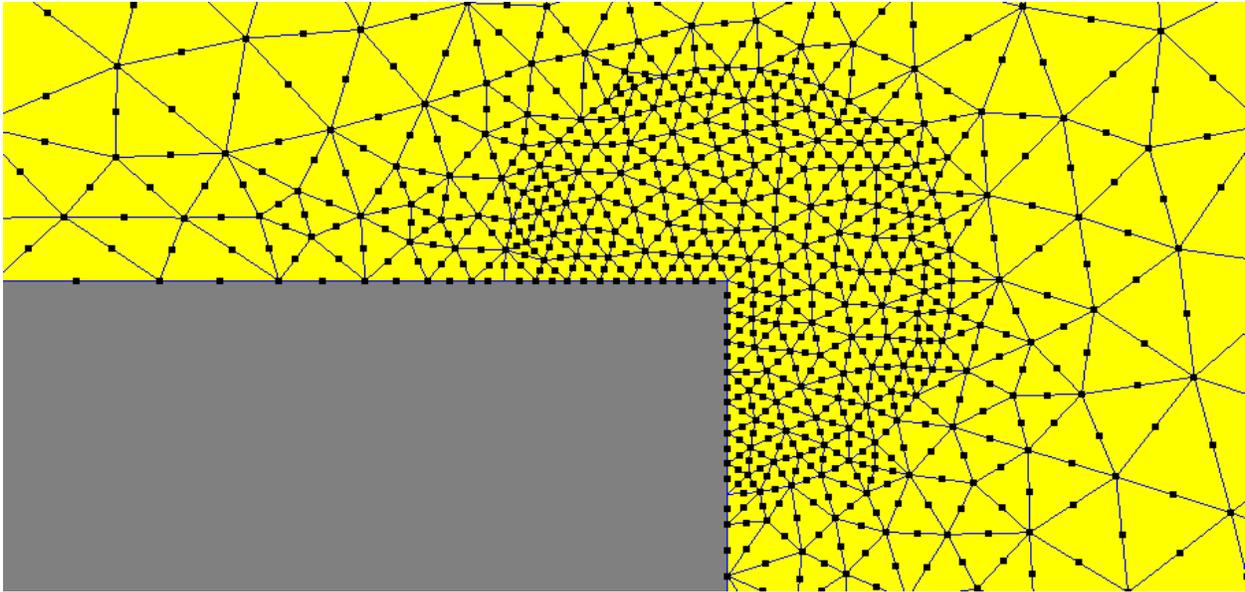
**Figure III.6 :** Vue sur le menu des paramètres de maillage dans Flux 2D

La figure ci-dessous montre le maillage réalisé sur la coupe du modèle. La zone la plus intéressante pour nos calculs a été maillée assez finement afin d'avoir des résultats plus précis.



**Figure III.7** Vue sur le maillage global de la géométrie ainsi qu'un zoom sur le maillage d'une seule électrode

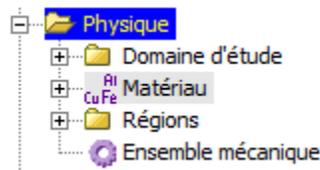
En appliquant dans Flux 2D une discrétisation adaptée (réglage spécifique dans le maillage), on obtient comme résultat le maillage présenté dans la (Figure III.7). Une attention particulière a été donnée au maillage au niveau des angles des électrodes. En effet, c'est dans cette zone que le champ électrique est le plus élevé à cause du phénomène de l'effet de pointe, et donc un maillage encore plus fin et plus serré a été réalisé dans cette zone comme le montre la (Figure III.8).



**Figure III.8** Maillage fin sur le bord supérieur d'une électrode

### III.5 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.9).



**Figure III.9** : Menu des propriétés physiques dans Flux 2D

### III.5.1 Matériau :

Dans notre étude on va utiliser trois matériaux isolants. Une plaque de FR4 utilisée comme support, ainsi que deux autres matériaux pour le film isolant qui recouvre les électrodes (air, film Kapton®). Le rôle de ce film est de prévenir les claquages entre les électrodes (Figure III.10).

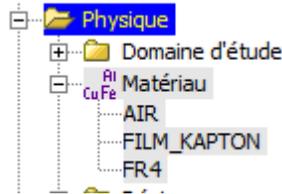


Figure III.10 : Menu Flux 2D des matériaux utilisés dans le modèle

#### III.5.1.1 Isolation des électrodes par l'air :

Dans cette étape on va utiliser l'air pour notre film isolant avec les paramètres suivants [18] [20] (Figure III.11) :

Matériau	Permittivité relative
Air (Film isolant de protection)	1
FR4 (support)	4,70

Tableau III.1 Matériaux affectés aux faces du model (régions surfaciques)

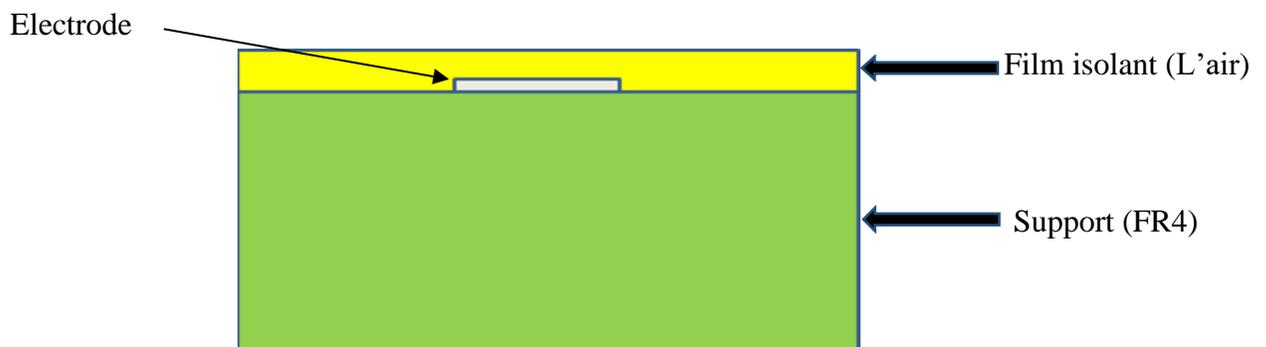


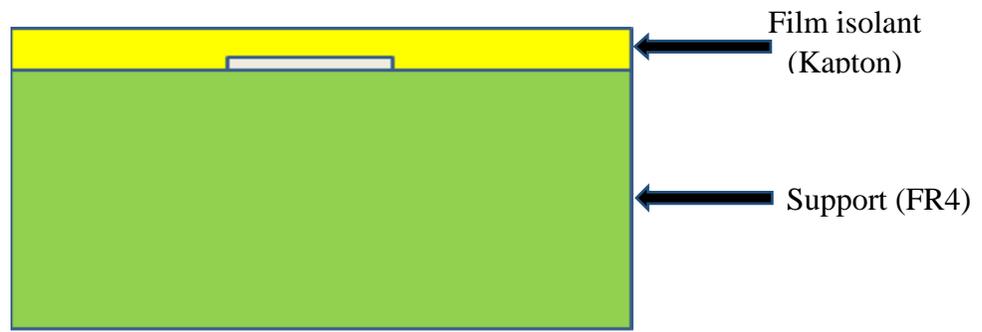
Figure III.11 Matériaux affectés aux régions surfaciques avec film isolant AIR

### III.5.1.2 Isolation des électrodes avec un Film Kapton :

Dans cette étape on va utiliser un Film polymère (Kapton®) pour notre film isolant avec les paramètres suivants [19] [20] (Figure III.12) :

Matériau	Permittivité relative
KAPTON (Film isolant de protection)	3,35
FR4 (support)	4,70

**Tableau III.2** Matériaux affectés aux faces du model (régions surfaciques)



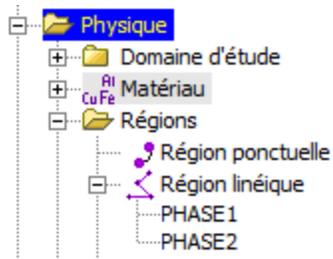
**Figure III.12** Matériaux affectés aux régions surfaciques (Film isolant = KAPTON)

### III.5.2 Régions linéiques :

Cette partie consiste à affecter des potentiels électriques aux lignes qui représentent les électrodes de cuivre. Ces électrodes sont portées à des potentiels spécifiques en fonction du temps et du type de convoyeur.

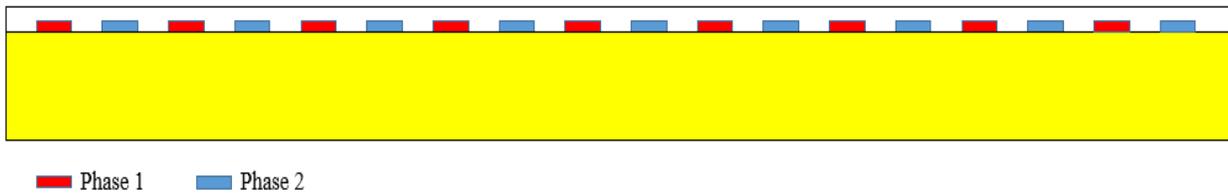
#### III.5.2.1 Convoyeur biphasé :

Pour le convoyeur biphasé, on a créé deux régions linéiques qui représentent les deux groupes d'électrodes (phase 1 et phase2) qui peuvent être portées à une tension de +2kV ou de -2kV en fonction de temps (Figure III.13).



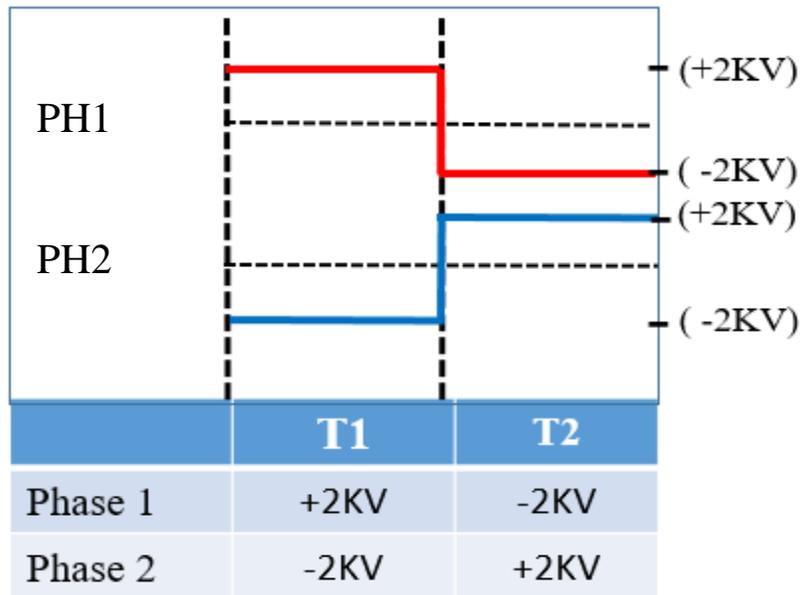
**Figure III.13 :** Menu Flux 2D des régions linéiques du convoyeur biphase

En appliquant cela, on va avoir la configuration présentée dans la (Figure III.14).



**Figure III.14 :** Convoyeur biphase avec deux groupes d'électrodes (phase 1 et phase 2).

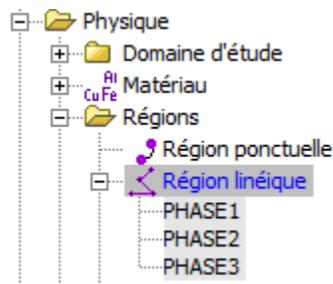
Pour notre convoyeur biphase, on a créé deux simulations selon les périodes ci-dessous (Figure 3.15). Un groupe d'électrodes sera connecté à la phase 1 et l'autre à la phase 2 avec un déphasage de  $180^\circ$  entre les deux. Ainsi, on se retrouve avec deux cas T1 et T2 dans lesquels la phase 1 et 2 seront portées soit à  $+2\text{kV}$  soit à  $-2\text{kV}$  en fonction du temps. Puisque T1 et T2 sont symétriques, on peut ainsi se contenter de modéliser un seul cas. Le second donnera en effet les mêmes résultats mais avec des signes opposés. (Figure III.15)



**Figure III.15 :** Valeurs de la tension des phases 1 et 2 en fonction du temps

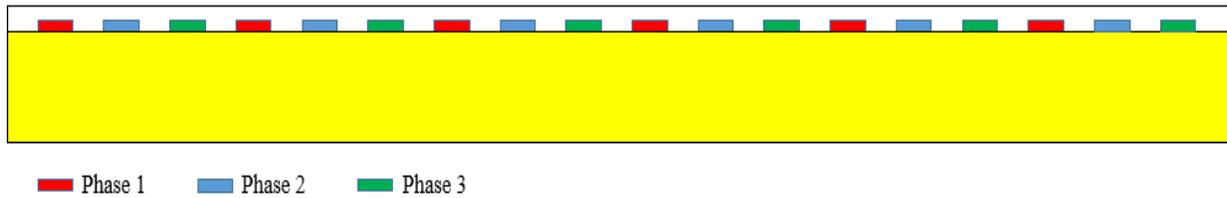
### III.5.2.1 Convoyeur triphasé :

Pour le convoyeur triphasé, on a créé trois régions linéiques qui représentent les trois groupes d'électrodes (phase 1, phase 2 et phase 3) qui peuvent être portées à une tension de +2kV ou de -2kV en fonction de temps (Figure III.16)



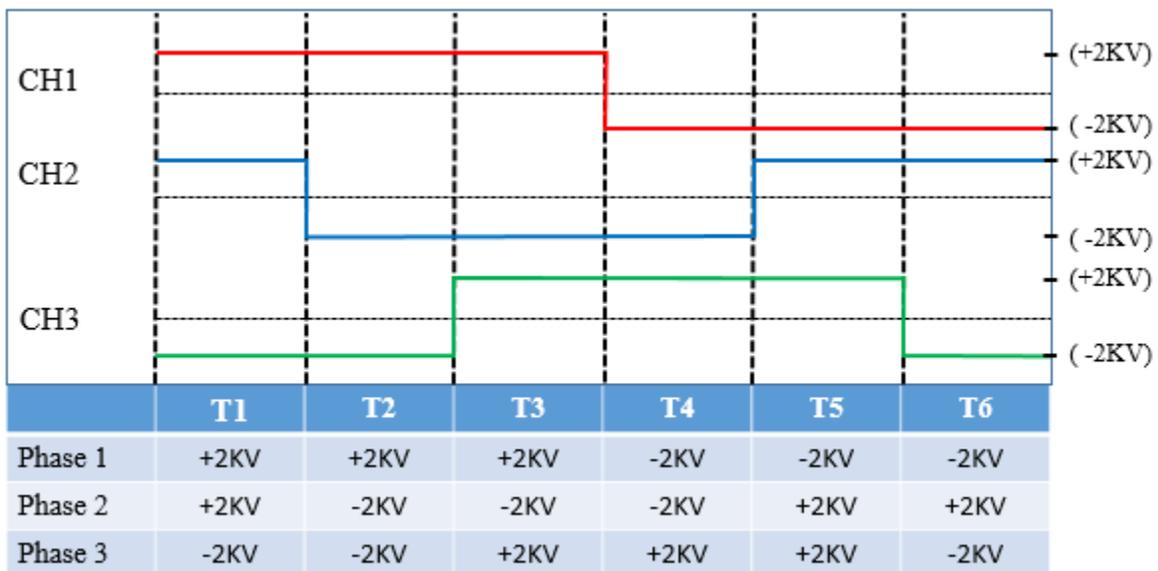
**Figure III.16 :** Flux 2D des régions linéiques du convoyeur triphasé

En appliquant cela, on va avoir la configuration présentée dans la figure suivante (Figure III.17)



**Figure III.17 :** Convoyeur triphasé avec les trois groupes d'électrodes (Ph1, Ph2 et Ph3).

Dans le convoyeur triphasé, les trois groupes d'électrodes sont connectées à trois tensions rectangulaires différentes et déphasées de  $120^\circ$  entre elles. Un groupe d'électrodes sera donc connecté à la phase 1, le second à la phase 2 et le troisième à la phase 3. Ainsi, on se retrouve avec six cas différents (T1 à T6) dans lesquels chaque phase sera portée soit à +2kV soit à -2kV en fonction du temps. Puisque T1, T2 et T3 sont symétriques avec T4, T5 et T6 respectivement, on peut donc se contenter de modéliser que les trois premiers cas T1, T2 et T3. Les trois autres donneront en effet les mêmes résultats mais avec des signes opposés (Figure III.18).



**Figure III.18 :** Valeurs de la tension des phases 1 et 2 et 3 en fonction du temps

**III.6 Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre les détails de notre simulation et toutes les étapes réalisées dans le logiciel Flux 2D. Les résultats et les calculs des cas présentés ici sont présentés dans le chapitre suivant.

# *Chapitre IV*

## *Analyse de l'étude*

### *De simulation*

---

## IV.1 Introduction :

---

Le but de ce chapitre est d'analyser et comparer les résultats de simulation des différents cas que nous avons présentés dans le chapitre 3.

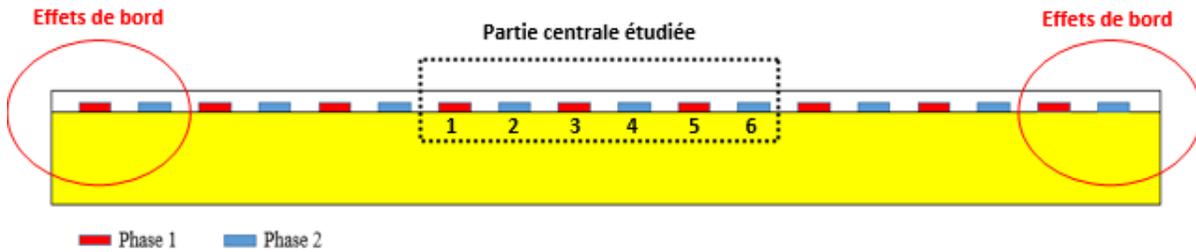
Deux types de convoyeurs ont été étudiés dans notre travail ; biphasé et triphasé. Pour chacun de ces convoyeurs, on va réaliser des simulations en modifiant le type d'isolant qui recouvre les électrodes. On choisira comme isolant soit de l'air, soit un film en Kapton. Le champ électrique sera calculé pour chaque configuration étudiée afin de déterminer la valeur maximale obtenue. Le but final étant d'identifier la configuration qui donne des valeurs faibles de champ électrique afin de minimiser le risque de claquage électrique du convoyeur.

### IV.2 Convoyeur biphasé :

Le convoyeur biphasé comporte une série de 18 électrodes rectilignes, parallèles, toutes placées dans un plan horizontal et noyées dans une couche plane d'isolant (soit de l'air, soit un film en Kapton). Les électrodes sont connectées et réalisent un ensemble de deux « peignes » intercalés. Chaque « peigne » sera porté à une tension de +2kV ou de -2kV en fonction de temps. Nous rappelons que pour le convoyeur biphasé, on utilise deux tensions périodiques rectangulaires décalées de 180°.

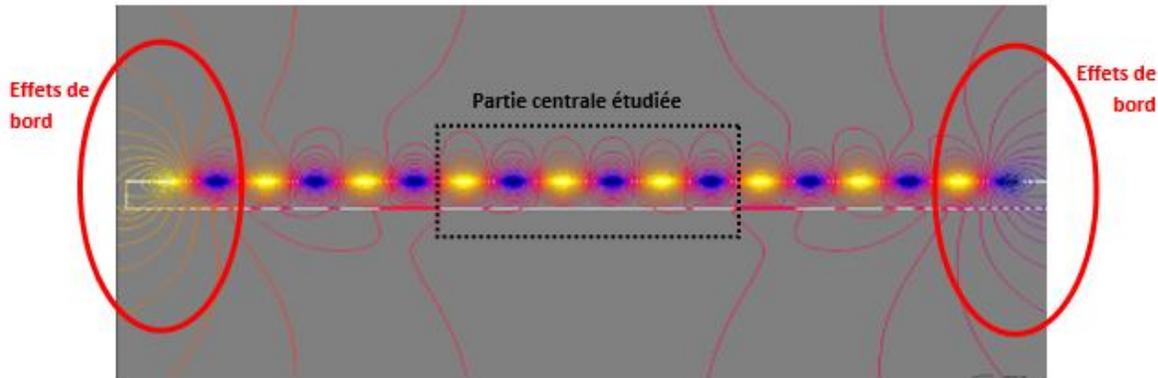
#### IV.2.1 Distribution des lignes équipotentiels :

Le convoyeur est constitué de 18 électrodes au total mais dans notre étude on ne présentera que les résultats de simulation des six électrodes centrales qui se trouvent au milieu du convoyeur. En effet, les électrodes aux deux autres extrémités du convoyeur sont sujet à l'effet de bord qui peut perturber les calculs dans ces deux zones et donner des résultats non représentatifs ou erronés. Ainsi, en choisissant les six électrodes centrales, on se met suffisamment loin de cet effet de bord et on obtient une reproductibilité suffisante dans les résultats de calcul. La figure IV.1 met en évidence la zone centrale considérée dans notre étude.



**Figure IV.1 :** Mise en évidence de la zone étudiée dans le convoyeur biphasé.

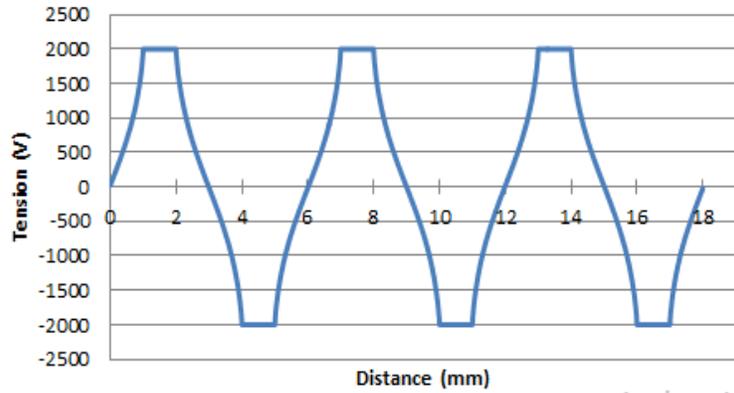
La figure IV.2 montre l'effet de bord sur la répartition des lignes équipotentielles obtenue sur l'ensemble des 18 électrodes du convoyeur. On voit ainsi que les six électrodes centrales sont suffisamment loin de cet effet.



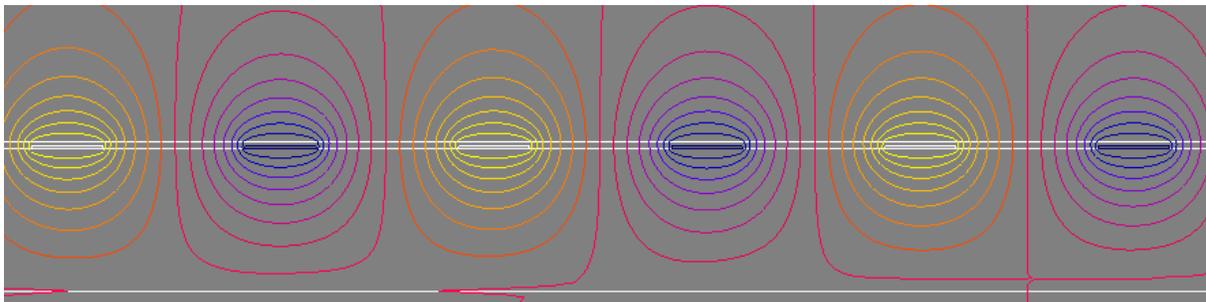
**Figure IV.2 :** Vue d'ensemble sur la répartition des lignes équipotentielles (isolant Kapton)

La Figure IV.3 montre la variation du potentiel électrique le long des six électrodes centrales. On voit que la tension au niveau des électrodes varie entre +2kV et -2kV. Ainsi, la première électrode a un potentiel de +2kV, la deuxième -2kV, la troisième +2kV et ainsi de suite. Cette alternance dans le potentiel des électrodes est clairement visible dans la figure VI.4 qui montre la répartition des lignes équipotentielles dans la zone des six électrodes centrales.

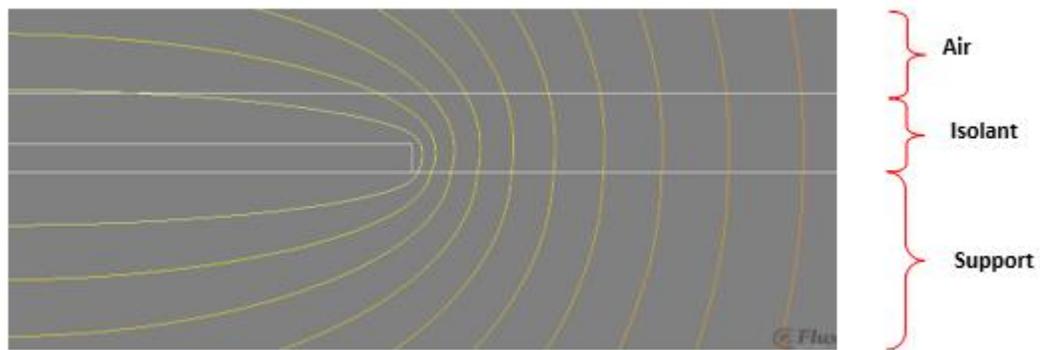
On note en particulier que les lignes équipotentielles se resserrent autour des angles (coins) des électrodes comme le montre la figure IV.5. Ceci va se traduire par un champ électrique élevé dans cette zone à cause de l'effet de pointe.



**Figure IV.3 :** Potentiel électrique des électrodes de la partie centrale du convoyeur.



**Figure IV.4 :** Lignes équipotentielles dans la partie centrale du convoyeur (Kapton).

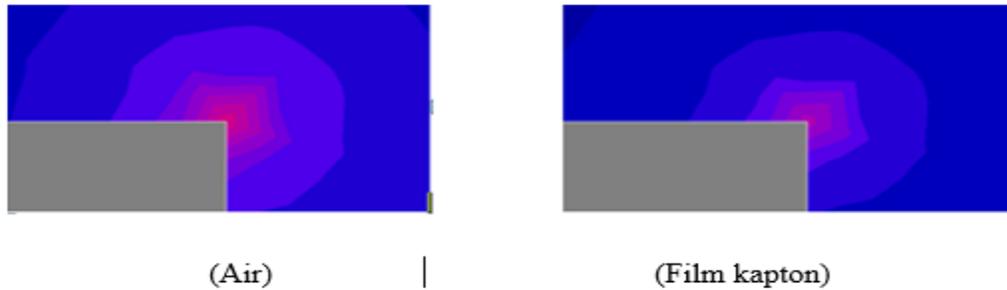


**Figure IV.5 :** Zoom sur le resserrement des lignes équipotentielles aux coins d'une électrode

## IV.2.2 Calcul du champ électrique :

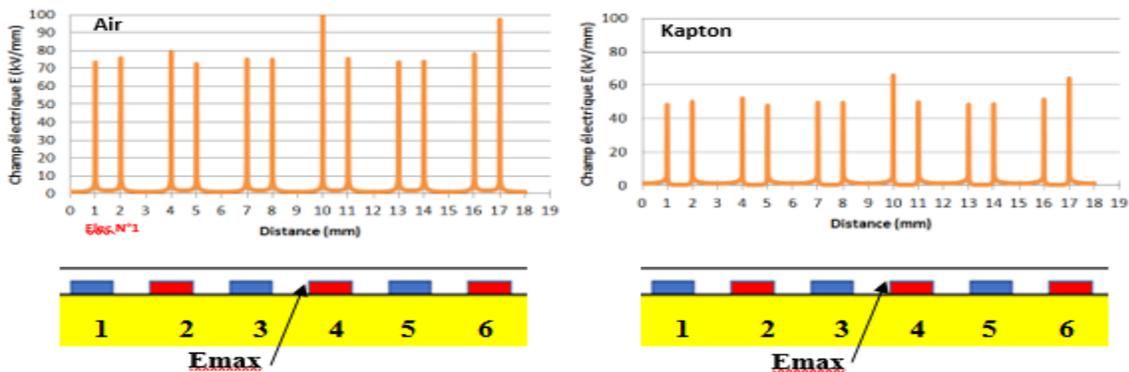
La Figure IV.6 montre la variation du champ électrique à travers un dégradé de couleurs. Plus la couleur est rouge, plus le champ électrique est élevé. Et inversement, plus la couleur est bleu, plus le champ électrique est faible. Ainsi on peut observer facilement à travers les couleurs du dégradé de champ au bord des électrodes que le champ électrique est plus élevé au niveau du

coin supérieur des électrodes. Cette valeur est encore plus élevée quand l'isolant qui recouvre les électrodes est seulement l'air. Cette valeur diminue quand on remplace l'air par un film en Kapton.



**Figure IV.6:** Dégradé de champ électrique pour Air et film kapton.

La Figure IV.7 montre la variation de champ électrique en fonction de la distance (mm) le long des six électrodes centrales. On remarque que le champ électrique atteint une valeur maximale au niveau du coin supérieur gauche de l'électrode numéro 4. Cette valeur atteint une valeur de 65,75kV/mm quand l'isolant est en Kapton. Elle est encore plus élevée quand l'isolant qui recouvre les électrodes est l'air comme le montre le tableau IV.1.



**Figure IV.7 :** Variation du champ électrique en fonction du type d'isolant (Air ou Kapton).

Isolant	E <sub>max</sub> (kV/mm)
Air	99,83
Film Kapton	65,75

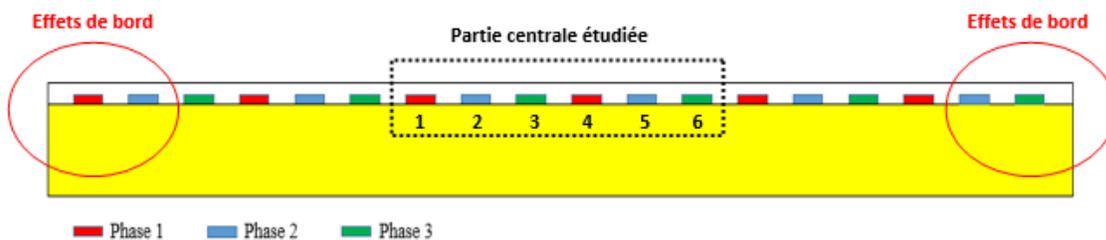
**Tableau IV.1 :** Valeurs maximales du champ électrique en fonction du type d'isolant

### IV. 3 Convoyeur triphasé :

Le convoyeur triphasé comporte une série de 18 électrodes rectilignes, parallèles, toutes placées dans un plan horizontal et noyées dans une couche plane d'isolant (soit air, soit un film en Kapton). Les électrodes sont connectées et réalisent un ensemble de trois « peignes » intercalés. Chaque « peigne » sera porté à une tension de +2kV ou de -2kV en fonction de temps. Nous rappelons que pour le convoyeur triphasé, on utilise trois tensions périodiques rectangulaires décalées de  $120^\circ$ .

#### IV. 3.1 Distribution des lignes équipotentielles :

Comme dans le cas du convoyeur biphasé, on ne présentera ici que les résultats de simulation des six électrodes centrales qui se trouvent au milieu du convoyeur triphasé. En effet, les électrodes aux deux autres extrémités du convoyeur sont sujet à l'effet de bord qui peut perturber les calculs dans ces deux zones et donner des résultats non représentatifs ou erronés. Ainsi, en choisissant les six électrodes centrales, on se met suffisamment loin de cet effet de bord et on obtient reproductibilité suffisante dans les résultats de calcul. La figure IV.8 met en évidence la zone centrale considérée dans notre étude du convoyeur triphasé.



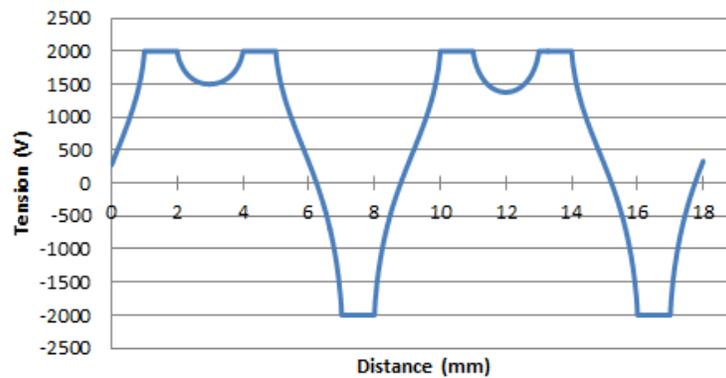
**Figure IV.8 :** Mise en évidence de la partie étudiée dans le convoyeur triphasé

Dans cette partie d'étude qui traite le convoyeur triphasé, on va présenter les résultats de simulation pour les trois périodes de temps T1, T2 et T3 tel que définies dans le chapitre précédent (figure III.18). En effet, les résultats de simulation seront différents en fonction du temps à cause du déphasage de  $120^\circ$  qui existe entre les trois sources de tensions qui alimentent les trois « peignes » du convoyeur (Tableau IV.2).

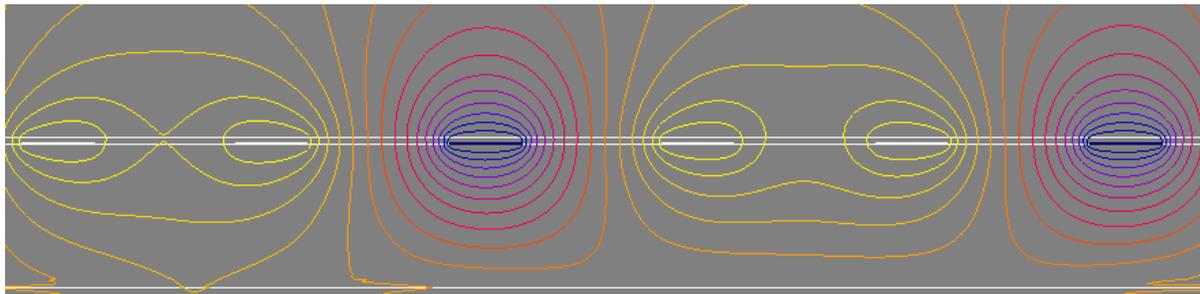
	T1	T2	T3
Phase 1	+2KV	+2KV	+2KV
Phase 2	+2KV	-2KV	-2KV
Phase 3	-2KV	-2KV	+2KV

**Tableau IV.2 :** Valeurs du potentiel pour chaque phase du convoyeur en fonction du temps.

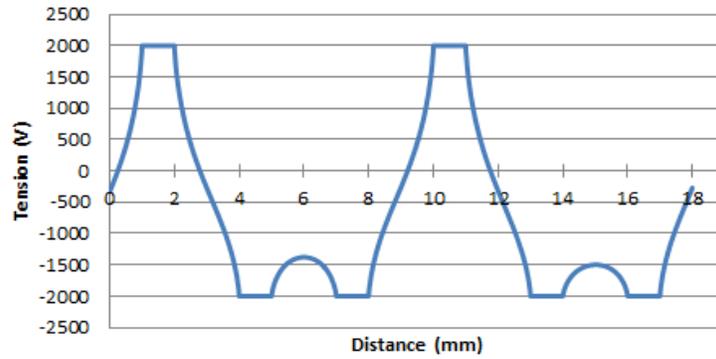
Les figures suivantes montrent la variation du potentiel électrique le long des six électrodes centrales pour chaque période T1, T2 et T3. On voit que la tension au niveau des électrodes varie en fonction du temps entre +2kV et -2kV. Cette variation dans le potentiel des électrodes est clairement visible dans les figures qui montrent la répartition des lignes équipotentielles dans la zone des six électrodes centrales.



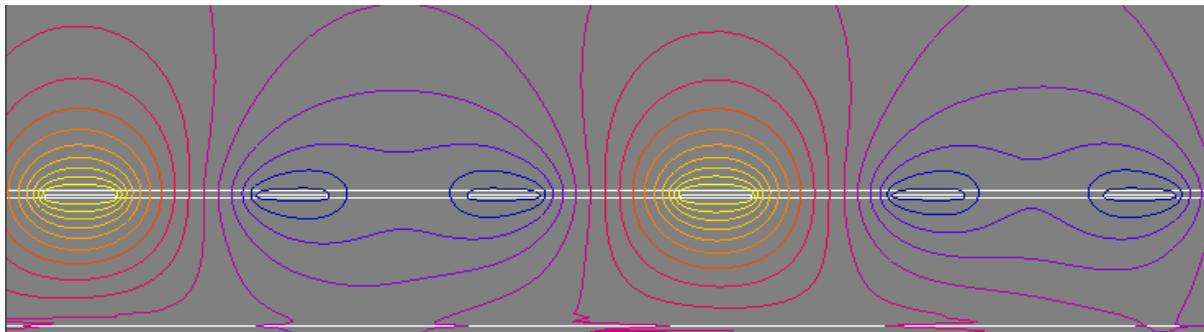
**Figure IV.9 :** Potentiel électrique des électrodes de la partie centrale du convoyeur (T1).



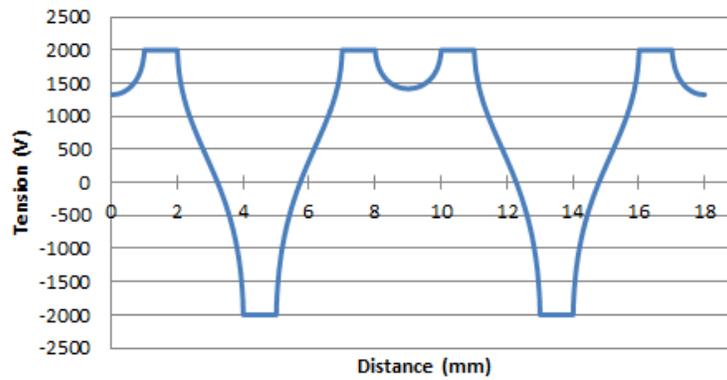
**Figure IV.10:** Lignes équipotentielles dans la partie centrale du convoyeur isolant (T1).



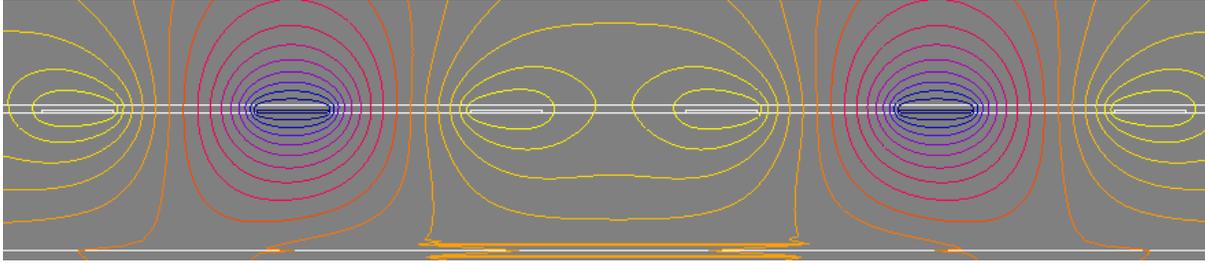
**Figure IV.11 :** Potentiel électrique des électrodes de la partie centrale du convoyeur (T2).



**Figure IV.12:** Lignes équipotentielles dans la partie centrale du convoyeur isolant (T2).



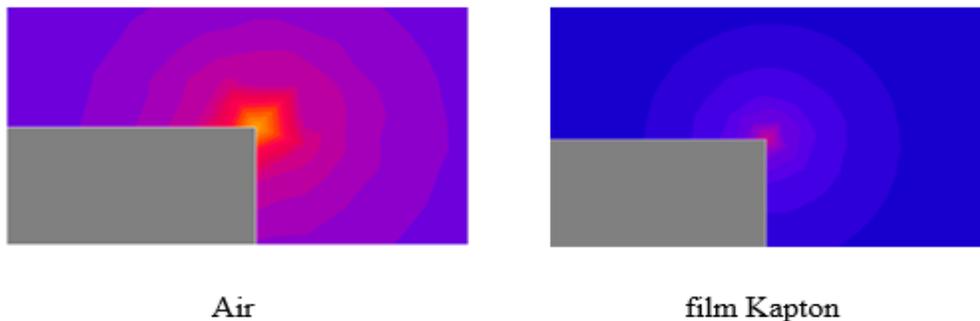
**Figure IV.13:** Potentiel électrique des électrodes de la partie centrale du convoyeur (T3).



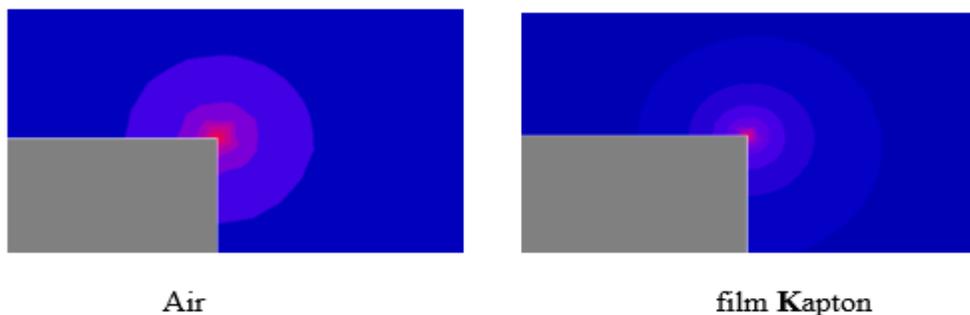
**Figure IV.14** : Lignes équipotentielles dans la partie centrale du convoyeur isolant (T3).

### IV.3.2 Calcul du champ électrique :

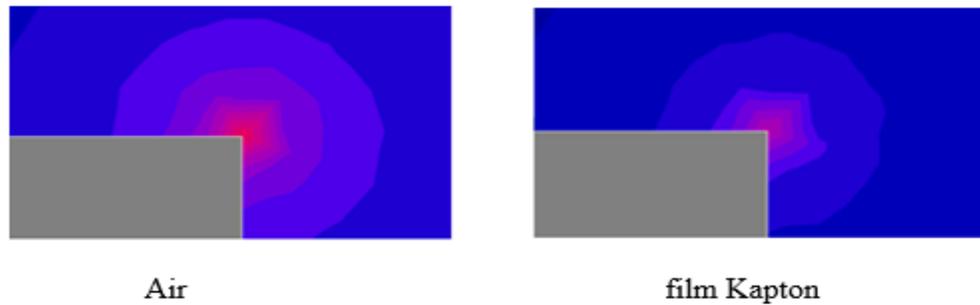
Les Figures IV.15, IV.16 et IV.17 montrent les zones autour des électrodes où règne un champ électrique intense pour les périodes de temps T1, T2 et T3 respectivement. Ainsi on peut observer facilement à travers les couleurs du dégradé de champ au bord des électrodes que le champ électrique est plus élevé au niveau du coin supérieur des électrodes à cause de l'effet de pointe dans cette zone. Cette valeur est encore plus élevée quand l'isolant qui recouvre les électrodes est seulement l'air, et légèrement inférieure quand on remplace l'air par un film en Kapton.



**Figure IV.15** : Dégradé de champ électrique pour Air et film kapton (T1).

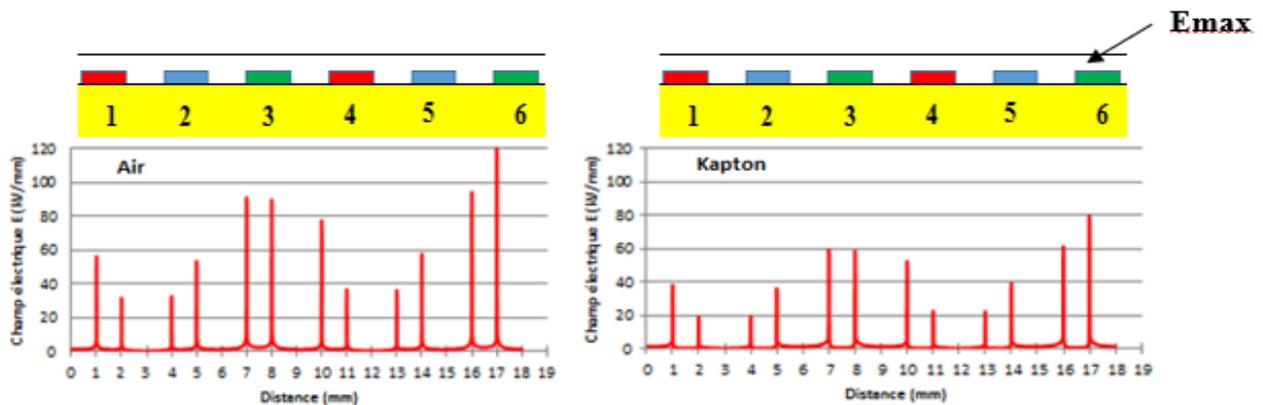


**Figure IV.16** : Dégradé de champ électrique pour Air et film kapton (T2).



**Figure IV.17 :** Dégradé de champ électrique pour Air et film kapton (T3).

La Figure IV.18 montre la variation du champ électrique en fonction de la distance le long des six électrodes centrales. On remarque que la position où le champ électrique est maximal varie selon la période de temps. En effet, elle atteint une valeur maximale dans l'isolant Kapton au niveau du coin supérieur de l'électrode numéro N°6, N°4 et N° 2 avec des valeurs de 79,42kV/mm, 77,62kV/mm et 61,07kV/mm respectivement pour les périodes T1, T2 et T3. Ces valeurs sont encore plus élevées quand l'isolant qui recouvre les électrodes est l'air comme le montre le tableau IV.3.



**Figure IV.18 :** Variation de champ électrique en fonction du type d'isolant pendant T1.

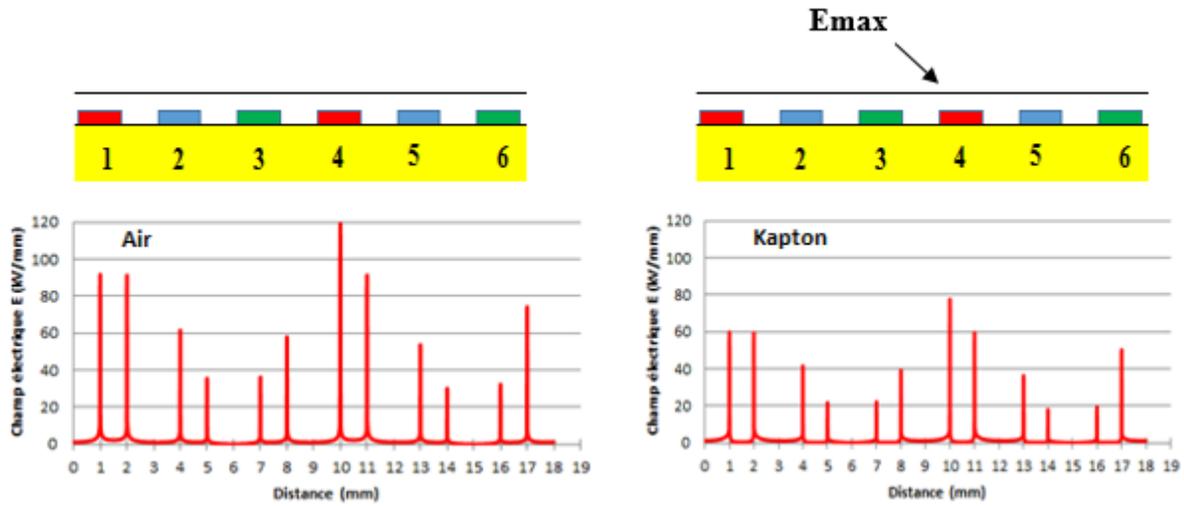


Figure IV.19 : Variation de champ électrique en fonction du type d'isolant pendant T2.

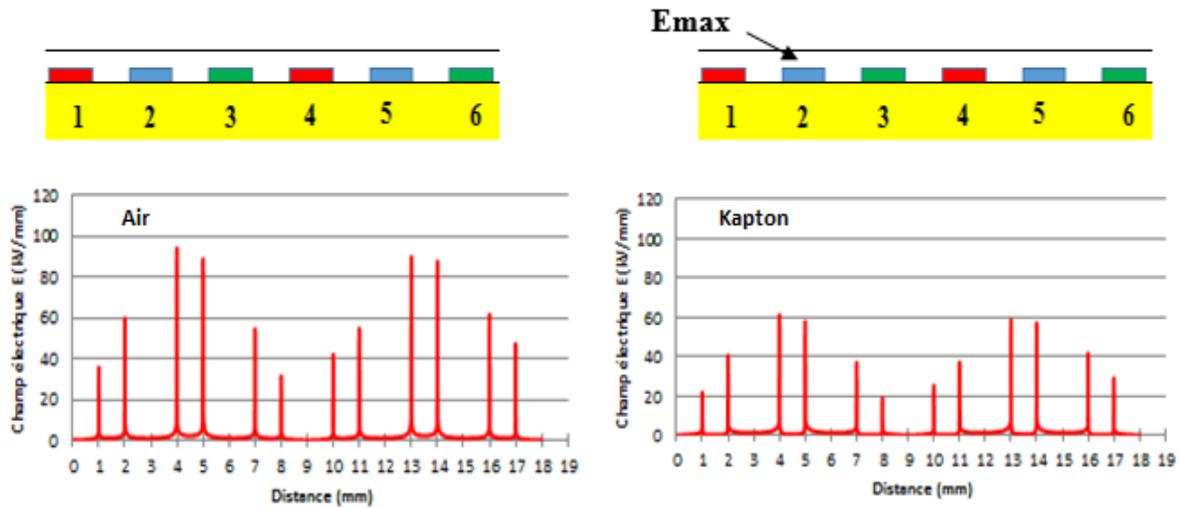


Figure IV.20 : Variation de champ électrique en fonction du type d'isolant pendant T3.

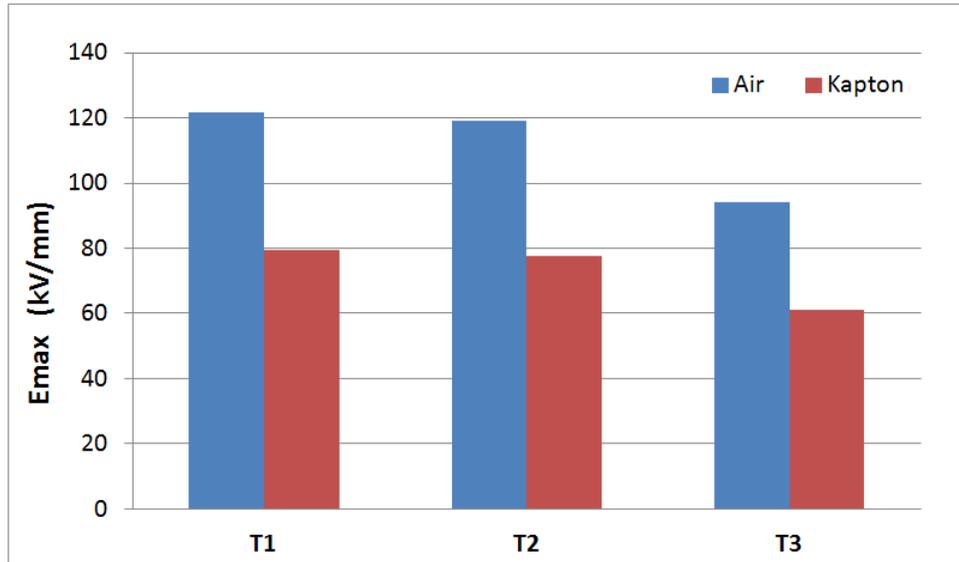


Figure IV.21 : Valeurs maximales du champ électrique en fonction du temps.

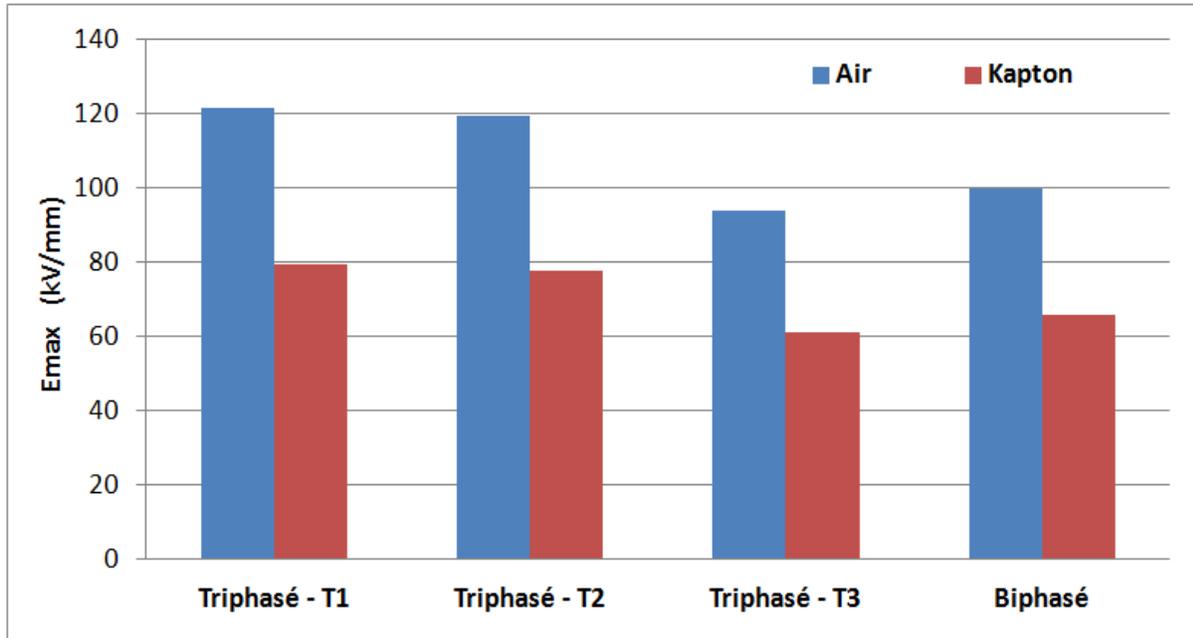
Isolant	T1	T2	T3
Air	121,55	119,24	94,03
Film Kapton	79,42	77,62	61,07

Tableau IV.3 : Valeurs maximales du champ électrique en fonction du temps

#### IV.4 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présentés les résultats obtenus par la simulation de convoyeur biphasé et triphasé avec le logiciel FLUX 2D. Les résultats montrent que le champ électrique est plus élevé dans l'air et il diminue quand on remplace l'air par un film isolant de 100µm en Kapton. Ceci est valable aussi bien pour le convoyeur biphasé que le convoyeur triphasé.

La figure IV.22 montre un récapitulatif des résultats de simulation avec une comparaison entre les différentes configurations étudiées. On observe que la valeur maximale du champ électrique est atteinte pendant la période T1 en triphasé. La valeur minimum quand à elle est obtenue en triphasé pendant la période T3 présentant ainsi la configuration avec le minimum de risque de claquage entre électrodes.



**Figure IV.22 :** Comparaison entre les valeurs maximales du champ électrique.

*Conclusion*

*Générale*

# Conclusion générale :

---

Dans ce mémoire, nous avons réalisé une étude de simulation du champ électrostatique dans un convoyeur à ondes mobiles. Nous avons fait un rappel sur le champ électrostatique ainsi que sur la technique de séparation électrostatique avec ses différents types.

On a présenté ensuite 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.

On a utilisé deux types d'isolement (en Air et en Film Kapton) et ceci dans les deux types de convoyeur à ondes mobiles traités dans ce mémoire (biphasé et triphasé).

Les résultats obtenus ont montré que l'isolation par film air est mieux que l'isolation par film Kapton soit dans le convoyeur biphasé ou triphasé.

Les résultats ont montré que le champ électrique est plus élevé dans l'air et il diminue quand on remplace l'air par un film isolant en Kapton. Ceci est valable aussi bien pour le convoyeur biphasé que le convoyeur triphasé.

La valeur maximale du champ électrique est atteinte pendant la période T1 en triphasé et la valeur minimum quand à elle est obtenue en triphasé pendant la période T3. Cette dernière configuration présente ainsi la configuration avec le minimum de risque de claquage entre électrodes. Ainsi, c'est en se basant sur ces valeurs qu'il faudrait optimiser la conception du convoyeur et le choix du matériau isolant qui le recouvre afin d'éviter le claquage électrique entre électrodes pendant le fonctionnement du convoyeur.

# *Bibliographie*

- [1] chapitre I : « *cours* » champ électrique- page 2  
[http://www.al.lu/physics/deuxieme/mousset/champ\\_electrique.pdf](http://www.al.lu/physics/deuxieme/mousset/champ_electrique.pdf)
- [2] CHAPITRE V : Le champ électrique page V.1  
<http://www.iihe.ac.be/~cvdvelde/Info/Cours/ChapV.pdf>
- [3] Site Internet consulté le : 04/2019,  
[http://uel.unisciel.fr/physique/elecstat/elecstat\\_ch03/co/apprendre\\_ch03\\_03.html](http://uel.unisciel.fr/physique/elecstat/elecstat_ch03/co/apprendre_ch03_03.html)
- [4] Zennani Imane Merdoud Mourad << *Optimisation d'une nouvelle technique de séparation électrostatique à ondes mobiles métal / plastique*>> (page 43). Université Djilali Liabes . Sidi Bel Abbes 2019
- [5] Belgacem Abdelkader << *Etude du déplacement et de la séparation des particules micronisées avec la technique des ondes mobiles* >> (page 28). Université Djilali Liabes . Sidi Bel Abbes 2020
- [6] I. Holme, J.E. McIntyre and Z.J. Shen, “*Electrostatic charging of textiles*”, The Textile Institute, 1, p 28, 1998.
- [7] Ronald Pethig, « *Article de synthèse - La diélectrophorèse : état de la théorie, de la technologie et des applications* », Biomicrofluidics, vol. 4, no 2, 2010.
- [8] SMILI Karima << *ETUDE DES PROPRIETES DIELECTRIQUES DES MATERIAUX ISOLANTS SOUMIS A DES CHAMPS TRES INTENSES* >> UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA 2018.
- [9] P. Atten, H.L. Pang, and J.L. Reboud, “*Study of dust removal by standing wave electric curtain for applications to solar cells on Mars*”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 45, no. 1, pp. 75–86, Jan./Feb. 2009.
- [10] Belgacem Abdelkader <<*Etude du déplacement et de la séparation des particules micronisées avec la technique des ondes mobiles*>> (page 04). Université Djilali Liabes . Sidi Bel Abbes 2019.
- [11] Zennani Imane Merdoud Mourad << *Optimisation d'une nouvelle technique de séparation électrostatique à ondes mobiles métal / plastique*>> (page 55). Université Djilali Liabes . Sidi Bel Abbes 2019.
- [12] 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.
- [13] S. Masuda, M. Washizu and M. Iwaware, “*Separation of Small Particles Suspended in Liquid by Non uniform Traveling Field*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 23, pp. 474-480, 1987.
- [14] S. Masuda and T. Kamimura, “*Approximate methods for calculating a non-uniform*

*travelling field*”, Journal of Electrostatics, 1, pp. 351-370, 1975.

[15] M.N. Horenstein, M. Mazumder and R.C. Sumner Jr, “*Predicting particle trajectories on an electro-dynamic screen theory and experiment*”. Journal of Electrostatics, 71(3), pp. 185–188, 2013.

[16] M. Mazumder, M. Horenstein, J.W. Stark, P. Girouard, R. Sumner, B. Henderson, O. Sadder, I. Hidetaka, A. Biris and R. Sharma, “*Characterization of electro dynamic screen performance for dust removal from solar panels and solar hydrogen generators*”, Industry Applications, IEEE Transactions, 49(4), pp. 1793–1800, July 2013.

[17] Site Internet :

<http://www.cao.fr/rubrique-toutes/actu/5322/Cedrat-annonce-la-version-11-2-de-son-logiciel-Flux.html>

[18] Site Internet :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Permittivit%C3%A9#Permittivit%C3%A9\\_d%E2%80%99un\\_mat%C3%A9riau](https://fr.wikipedia.org/wiki/Permittivit%C3%A9#Permittivit%C3%A9_d%E2%80%99un_mat%C3%A9riau)

[19] Site Internet :

[https://www.researchgate.net/figure/Measured-relative-permittivity-of-a-15-mm-thick-Kapton-HN-film-from-860-to-960-MHz-at\\_fig1\\_220409327](https://www.researchgate.net/figure/Measured-relative-permittivity-of-a-15-mm-thick-Kapton-HN-film-from-860-to-960-MHz-at_fig1_220409327)

[20] Site Internet :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/FR-4>

# *Résumé*

## Résumé :

L'objectif de cette étude est de présenter la simulation de champ électrostatique dans un convoyeur à ondes mobiles.

Deux modèles de simulation ont été établis et calculés à l'aide du logiciel Flux2D, pour les deux types des convoyeurs (biphasé et triphasé) avec un film d'isolement par l'air et en kapton.

Les résultats obtenus de simulation montrent que le champ électrique est plus élevé avec le film d'isolement par l'air et il diminue quand on le remplace par le film Kapton. Ceci est valable aussi bien dans le convoyeur biphasé que dans le convoyeur triphasé.

**Mots clés :** champ électrostatique - Air - Film Kapton – ondes mobiles - Flux2D - simulation.

## Abstract:

The objective of this study is to present the simulation of electrostatic field in a moving wave conveyor.

Two simulation models were established and calculated using Flux2D software, for the two types of conveyors (two and three phases) with an air insulating film and kapton film.

The simulation results show that the electric field is higher with air isolation film and it is diminished when we replace it by the kapton film in the two-phases or three-phases conveyor. Kapton film isolation is better than air isolation.

**Key words:** electrostatic field - Air - Kapton – travelling waves - Flux2D - simulation.

## ملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو عرض محاكاة المجال الكهروستاتيكي في ناقل موجة متحرك .

تم إنشاء نموذجين محاكاة وحسابهما باستخدام برنامج Flux2D لنوعي الناقلات (ثنائي وثلاثي الطور) مع

غلاف بالعزل الهوائي وبغلاف Kapton .

تظهر نتائج المحاكاة أن المجال الكهربائي أعلى بغلاف العزل الهوائي ويتم تخفيضه عندما نستبدله بغلاف kapton إما في ناقل ثنائي الطور أو ثلاثي الطور. غلاف العزل الهوائي أفضل من عزل غلاف kapton .

**الكلمات المفتاحية:** حقل كهروستاتيكي - هواء - غلاف kapton - ناقل - Flux2D - محاكاة