

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
جامعة بلحاج بوشعيب - عين تموشنت-
Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : ELECTROTECNIQUES

Spécialité : Commandes Electriques

Thème :

**CALCUL DU CHAMP ELECTRIQUE DANS UN
SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE ROTATIF**

Présenté par :

BOUKOURDANE Abdelmalek

CHEMENTEL Kouider

Devant le jury composé de :

YOUNES Mohamed Pr UAT.B.B (Ain Temouchent) Président

TOUHAMI Aicha MAA UAT.B.B (Ain Temouchent) Examinatrice

ZELMAT Samir Pr UAT.B.B (Ain Temouchent) Encadrant

Année Universitaire 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

*En tout premier lieu je remercie **Allah** de m'avoir aidé à défier tous les obstacles, afin de compléter ce modeste travail.*

Je tiens à remercier très sincèrement mon encadreur « Pr Zalmet Samir » qui a accepté de m'encadrer, et pour le temps qu'il m'a consacré et ses précieux conseils.

Mes remerciements s'adressent également aux Président et membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail, et pour l'honneur qu'ils me font de bien vouloir le juger.

J'ai pu aller au bout de ma recherche grâce au soutien de ma famille respective.

Je ne peux conclure sans avoir remercié tous ceux qui ont aidé de près ou de loin au succès de ma formation.

Dédicace

♥ À mes chers parents, qui m'entouraient par leurs supplications, et je serais éternellement reconnaissant.

♥ À ma chère épouse et copine de ma vie qui m'a soutenu avec dévouement.

♥ À mes enfants: Zakaria, Imad, Lina, Amir

♥ À mes frères, mes sœurs, et tous mes proches.

♥ À mon cher ami et collègue de la vie professionnelle: Fateh.

♥ À mon binôme CHEMANTEL Kouider.

♥ À tous les enseignants et les étudiants de deuxième année Master CE.

♥ A toutes mes connaissances.

♥ À tous ces gens-là, Je dédie cet humble travail.

Cordialement 

ABDELMACEK

Dédicace

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

A mes deux grandes familles

A mon binôme *BOUKOURDANE ABDELMALEK*

A mes amies et mes copains et copines de classe

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

KOUJDER

Liste des

Figures

Liste des figures:

Figure I.1 : Force d'attraction (interaction coulombienne) entre deux particules chargées de polarités opposées.	1
Figure I.2 : Génération d'une avalanche électronique et de décharge couronne.	3
Figure I.3 : Représentation schématique d'un procédé de séparation électrostatique qui utilise l'effet couronne pour la charge des particules isolantes.	4
Figure I.4 : Représentation schématique de l'effet couronne sur des particules conductrices (a, b, c, d) et isolantes (e, f).	5
Figure I.5 : Représentation schématique du mécanisme induction électrostatique sur des particules conductrices.	7
Figure I.6 : Représentation schématique d'un séparateur TBS.	8
Figure I.7 : Séparateurs électrostatiques de Hamos pour le traitement des minéraux	9
Figure II.1 : Représentation schématique d'un convoyeur biphasé sous forme de deux peignes.	12
Figure II.2 : Convoyeur à ondes mobiles à quatre phases.	13
Figure II.3 : Schéma descriptif de différents types de convoyeurs (biphasé et triphasé)	14
Figure II.4 : Schéma descriptif du convoyeur biphasé.	15
Figure II.5 : Schéma descriptif du convoyeur triphasé.	15
Figure II.6 : Schéma descriptif du convoyeur à quatre phases.	16
Figure II.7 : Quelques exemples de convoyeurs à configuration 2D	16
Figure II.8 : Quelques exemples de convoyeurs à configuration 3D	17
Figure III.1 : Présentation du convoyeur rotatif à ondes mobiles.	18
Figure III.2 : Forme géométrique de l'électrode supérieure et inférieure.	18
Figure III.3 : Vue en coupe du modèle étudié.	19
Figure III.4 : Modèle axisymétrique du convoyeur	19
Figure III.5 : Les étapes processus de Flux 2D.	20
Figure III.6 : Géométrie du modèle Flux2D en axisymétrique.	21
Figure III.7 : Vue sur le menu des paramètres de maillage dans Flux 2D.	21

Figure III.8 : Vue sur le maillage global de la géométrie ainsi qu'un zoom sur le maillage d'une seule électrode.	22
Figure III.9 : Maillage fin sur le bord supérieur d'une électrode.	23
Figure III.10 : Menu des propriétés physiques dans Flux 2D.	23
Figure III.11 : Menu Flux 2D des matériaux utilisés dans le modèle.	24
Figure III.12 : Matériaux affectés aux faces du model.	24
Figure III.13 : Forme des tensions appliquées aux électrodes (en rouge +2kV, en marron 0V).	25
Figure IV.1 : Mise en évidence de la zone étudiée dans le convoyeur.	26
Figure IV.2 : Effet de bord sur la répartition des lignes équipotentiellles.	27
Figure IV.3 : Potentiel électrique des électrodes de la partie centrale du convoyeur.	27
Figure IV.4 : Répartition des lignes équipotentiellles sur les 5 électrodes centrales.	28
Figure IV.5 : Dégradé de champ électrique au niveau des cinq électrodes centrales.	28
Figure IV.6 : Renforcement du champ électrique au niveau du coin supérieur de l'électrode	29
Figure IV.7 : Zoom sur le resserrement des lignes équipotentiellles aux coins d'une électrode.	29
Figure IV.8 : Chemins utilisés pour tracer la variation du champ électrique.	30
Figure IV.9 : Variation du champ électrique en fonction de la distance dans l'isolant le long du chemin N°1.	31
Figure IV.10 : Variation du champ électrique en fonction de la distance dans l'isolant le long du chemin N°2.	32
Figure IV.11 : Variation du champ électrique à la surface du support.	33
Figure IV.12 : Chemin utilisé pour le calcul du champ électrique dans le volume du support FR4 du convoyeur rotatif.	33
Figure IV.13 :Potentiel électrique des électrodes dans le volume du support.	34
Figure IV.14 : Variation du champ électrique dans le volume du support.	35

*Liste des
Tableaux et
Acronymes*

Liste des tableaux:

Tableau III.1: *Permittivité relative des matériaux utilisés.....* 24

Tableau IV.1 : *Valeurs maximales du champ électrique dans les trois parties.....* 35

Liste des acronymes :

- F*** Force électrique en newton (N).
- Q1*** Première Charge.
- Q2*** Deuxième Charge.
- d*** Distance entre les deux charges ponctuelles.
- ϵ_0** La permittivité électrique du vide.

<i>Liste des figures</i>	<i>i</i>
<i>Liste des tableaux et acronymes</i>	<i>iii</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>iv</i>

<i>CHAPITRE I : Généralités sur l'électrostatique rotatif</i>
--

<i>I.1/ Introduction</i>	<i>1</i>
<i>I.2/ Mécanismes de charge électrique</i>	<i>2</i>
<i>I.2.1/ Effet couronne</i>	<i>2</i>
<i>I.2.2/ Induction électrostatique</i>	<i>6</i>
<i>I.3/ Séparation électrostatique des matériaux pulvérulents</i>	<i>7</i>
<i>I.3.1/ Installations de laboratoire</i>	<i>8</i>
<i>I.3.2/ Applications industrielles</i>	<i>9</i>
<i>I.4/ Conclusions</i>	<i>10</i>

<i>CHAPITRE II : Généralités sur le convoyeur à onde mobile</i>
--

<i>II.1/ Historique</i>	<i>11</i>
<i>II.2/ Quelques applications de la technique des ondes mobiles</i>	<i>12</i>
<i>II.3/ Séparation avec la technique des ondes mobiles</i>	<i>12</i>
<i>II.4/ Définition de la technique des ondes mobiles</i>	<i>13</i>
<i>II.5/ Types des convoyeurs à ondes mobiles</i>	<i>14</i>
<i>II.5.1/ Selon le nombre de phases</i>	<i>14</i>
<i>II.5.2/ Selon la géométrie des électrodes</i>	<i>16</i>
<i>II.6/ Conclusion</i>	<i>17</i>

CHAPITRE III : Présentation du module étudié

<i>III.1/ Introduction</i>	<i>18</i>
<i>III.2/ Présentation du logiciel Flux2D.....</i>	<i>20</i>
<i>III.3/ Géométrie du modèle.....</i>	<i>21</i>
<i>III.4/ Maillage</i>	<i>21</i>
<i>III.5/ Paramètres physiques</i>	<i>23</i>
<i>III.5.1/ Matériau.....</i>	<i>23</i>
<i>III.5.1.1/ Régions linéiques.....</i>	<i>24</i>
<i>III.5.1.2/ Régions surfaciques.....</i>	<i>25</i>
<i>III.6/ Conclusion.....</i>	<i>25</i>

CHAPITRE IV : Analyse de l'étude de simulation

<i>IV.1/ Introduction</i>	<i>26</i>
<i>IV.2/ Distribution des lignes équipotentielles</i>	<i>26</i>
<i>IV.3 / Dégradé du champ électrique.....</i>	<i>28</i>
<i>IV.4 / Champ électrique dans l'électrode.....</i>	<i>30</i>
<i>IV.4.1 / Champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes</i>	<i>30</i>
<i>IV.4.2 / Champ électrique dans l'isolant en bas des électrodes</i>	<i>31</i>
<i>IV.4.3 / Champ électrique à la surface du support</i>	<i>32</i>
<i>IV.4.4 / Champ électrique dans le volume du support</i>	<i>33</i>
<i>IV.5 / Conclusion.....</i>	<i>35</i>
 <i>Conclusion générale</i>	 <i>38</i>
<i>Bibliographie.....</i>	<i>39</i>
<i>Résumé.....</i>	<i>41</i>

Introduction Générale

Introduction générale

La séparation électrostatique est une technologie qui s'intègre pleinement à ce nouveau modèle énergétique. Caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien, elle représente une technologie économiquement viable pour le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques ainsi que pour la purification des minerais et des produits agroalimentaires. Son utilisation dans ces industries nécessite le développement de nouveaux, procédés et de nouvelles installations afin d'améliorer les performances, tout en respectant une réglementation de plus en plus sévère respectueuse de l'environnement.

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, commençant par un état de l'art qui donne des rappels de champ électrostatique d'une manière général en mentionnant les différents types de séparateurs électrostatiques.

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 ainsi que son maillage.

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

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

I.1/ Introduction :

La séparation électrostatique des matériaux pulvérulents est produite par les forces électriques agissant sur les particules qui ont des caractéristiques physiques différentes, qui sont chargés ou polarisés, et qui se trouvent dans un champ électrique intense. C'est Charles Coulomb qui a établi l'expression de la force **F** d'attraction ou de répulsion qui se manifeste entre deux corps ayant les charges **Q1** et **Q2**, situés à une distance **d** l'un par rapport à l'autre.

$$F = (Q1Q2) / (4 \epsilon_0 \pi d^2) \tag{I.1}$$

Où :

F : 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);

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

$\epsilon_0 = 1/ (4\pi \cdot 9 \cdot 10^9)$ [F/m] est une constante (la permittivité électrique du vide).

Si les charges sont de la même polarité, la force (positive) est une force de répulsion. Si les charges sont de polarités contraires ($Q1 = qA < 0$ et $Q2 = qB > 0$), la force (négative) est une force d'attraction (**Figure I.1**)

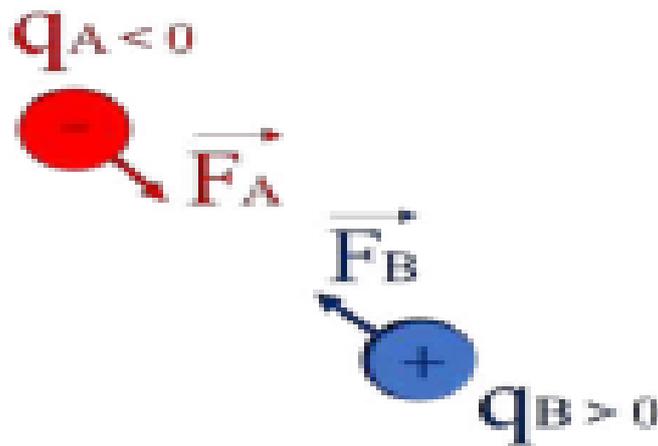


Figure I.1 : Force d'attraction (interaction coulombienne) entre deux particules chargées de polarités opposées [1].

I.2/ Mécanismes de 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 [2].

I.2.1/ Effet couronne :

Longtemps observé lors des phénomènes météorologiques intenses, l'effet couronne a trouvé aujourd'hui des applications diverses dans le domaine de l'électrostatique et a fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques, il est utilisé pour la précipitation de poussières, et la fabrication des films plastiques et textiles, ainsi que dans les processus de l'électrophotographie et la séparation des mélanges granulaires [3].

Description :

L'effet couronne est lié à l'ionisation de l'air dans une zone de champ électrique très intense produite entre deux électrodes métalliques : l'une dite active, se présente généralement sous la forme d'une pointe ou d'un fil de petit diamètre, et est reliée à une source de haute tension de plusieurs kilovolts, et l'autre passive qui n'est autre qu'une plaque ou une grille métallique reliée à la terre.

À proximité de l'électrode active la tension varie fortement sur une courte distance créant ainsi un fort champ électrique, responsable de l'accélération des quelques électrons issus de l'ionisation naturelle de l'air. L'avalanche électronique a lieu à proximité de l'électrode active quelle que soit la polarité qui lui est appliquée (**Figure I.2**).

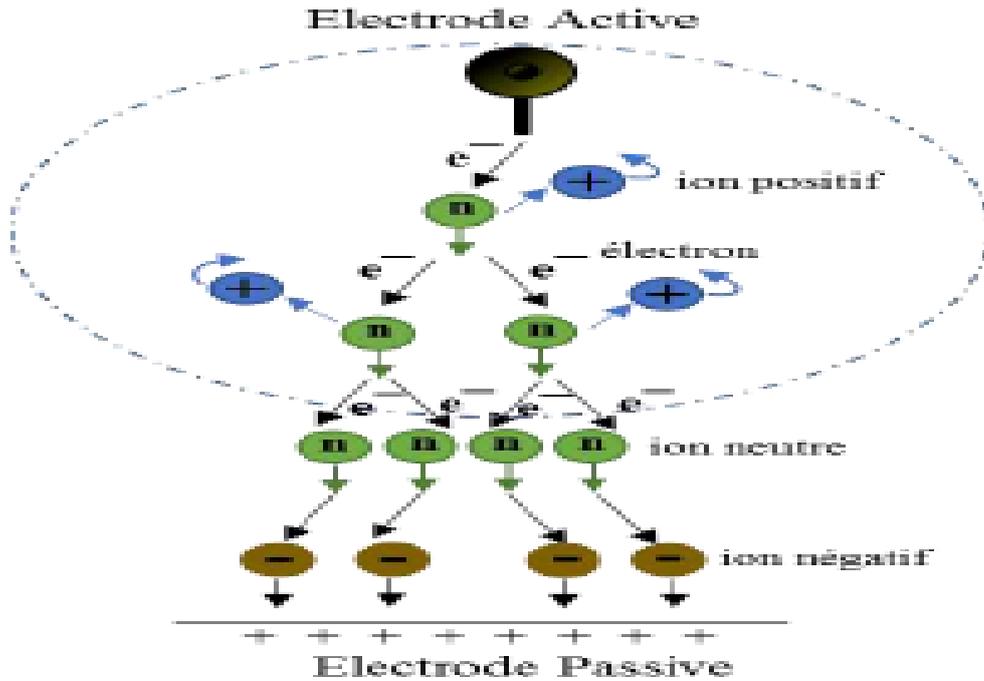


Figure I.2 : Génération d'une avalanche électronique et de décharge couronne.

Les électrons libérés vont se heurter aux molécules d'air présentes dans l'espace. Ces électrons portent un haut niveau d'énergie et de cet impact résulte la libération d'un ou plusieurs électrons par ces molécules. Ces derniers vont continuer leur trajet vers l'électrode passive, de polarité opposée, vers laquelle ils sont attirés, tout en heurtant d'autres molécules de gaz et ainsi, en multiplient leur nombre. Les molécules ayant libéré des électrons sont devenues des ions positifs et sont donc attirés par l'électrode active.

De cette façon, elles regagnent un électron et redeviennent neutres. Ce phénomène est délimité dans l'espace (quelques micromètres de l'électrode) dans une zone caractérisée par une forte intensité du champ électrique : la zone d'ionisation.

Au-delà de cette dernière, le champ électrique n'est plus suffisamment fort pour que les électrons aient assez d'énergie pour heurter les molécules d'air de façon à ce qu'elles cèdent un autre électron. Ils vont alors s'associer aux molécules d'air et former des ions chargés négativement [4]. Ces ions entrent en contact avec les particules et leurs durées de vie sont suffisamment longues pour que la séparation des matériaux ait lieu.

Les particules, soumises au flux ionique, vont se charger négativement. Lors de l'utilisation de l'effet couronne comme mécanisme de charge pour la séparation électrostatique des mélanges isolant/conducteur (**Figure I.3**) [5], les particules sont positionnées sur la surface de l'électrode passive et acquièrent des charges positives ou négatives selon la polarité de l'électrode active qui produit un nuage ionique mono-polaire.

Les particules qui traversent ce nuage acquièrent une charge ionique, cependant les particules conductrices perdent cette charge aussitôt du fait de leur contact avec la terre et redeviennent neutres (**Figure I.4 a, b, c, d**) alors que les particules isolantes la gardent plus longtemps (**Figure I.4 e, f**). Ce phénomène permet donc la séparabilité du mélange isolant/conducteur, confirme l'efficacité de l'effet couronne en tant que mécanisme de charge des particules, et justifie son utilisation dans plusieurs installations électrostatiques [6].

Cependant, les décharges couronne créent également un vent ionique du fait de l'accélération des ions qui, au cours de leur déplacement dans le champ électrique, entrent en collision avec des molécules de gaz, leur transmettant non seulement une énergie sous forme de chaleur mais aussi une énergie cinétique. De cette énergie cinétique découle un flux d'air, à qui on reconnaît certes plusieurs applications, dont notamment le contrôle des écoulements aérodynamiques sur les profils d'aile d'avion, mais qui reste néfaste au processus de séparation électrostatique, puisqu'il peut perturber le parcours des particules les plus fines et être à l'origine d'une dispersion voire d'une perte de matière [7].

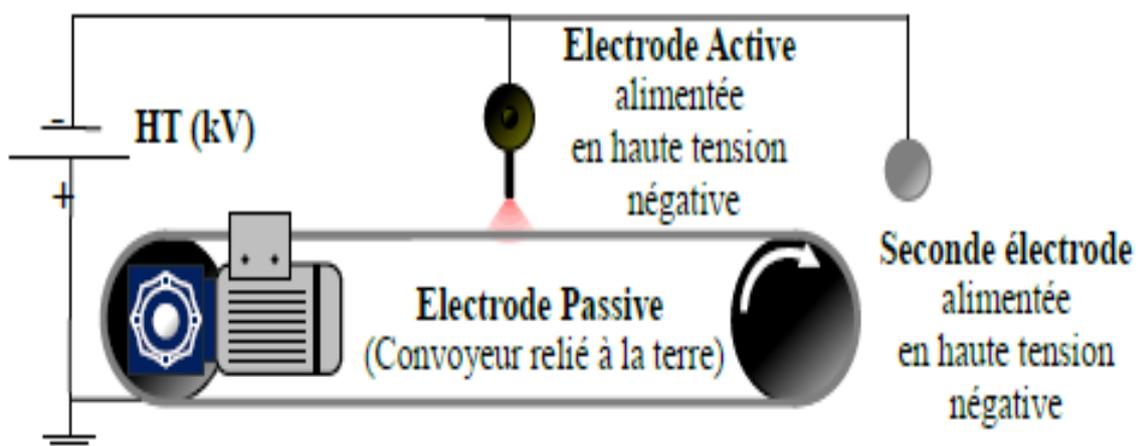


Figure I.3 : Représentation schématique d'un procédé de séparation électrostatique qui utilise l'effet couronne pour la charge des particules isolantes.

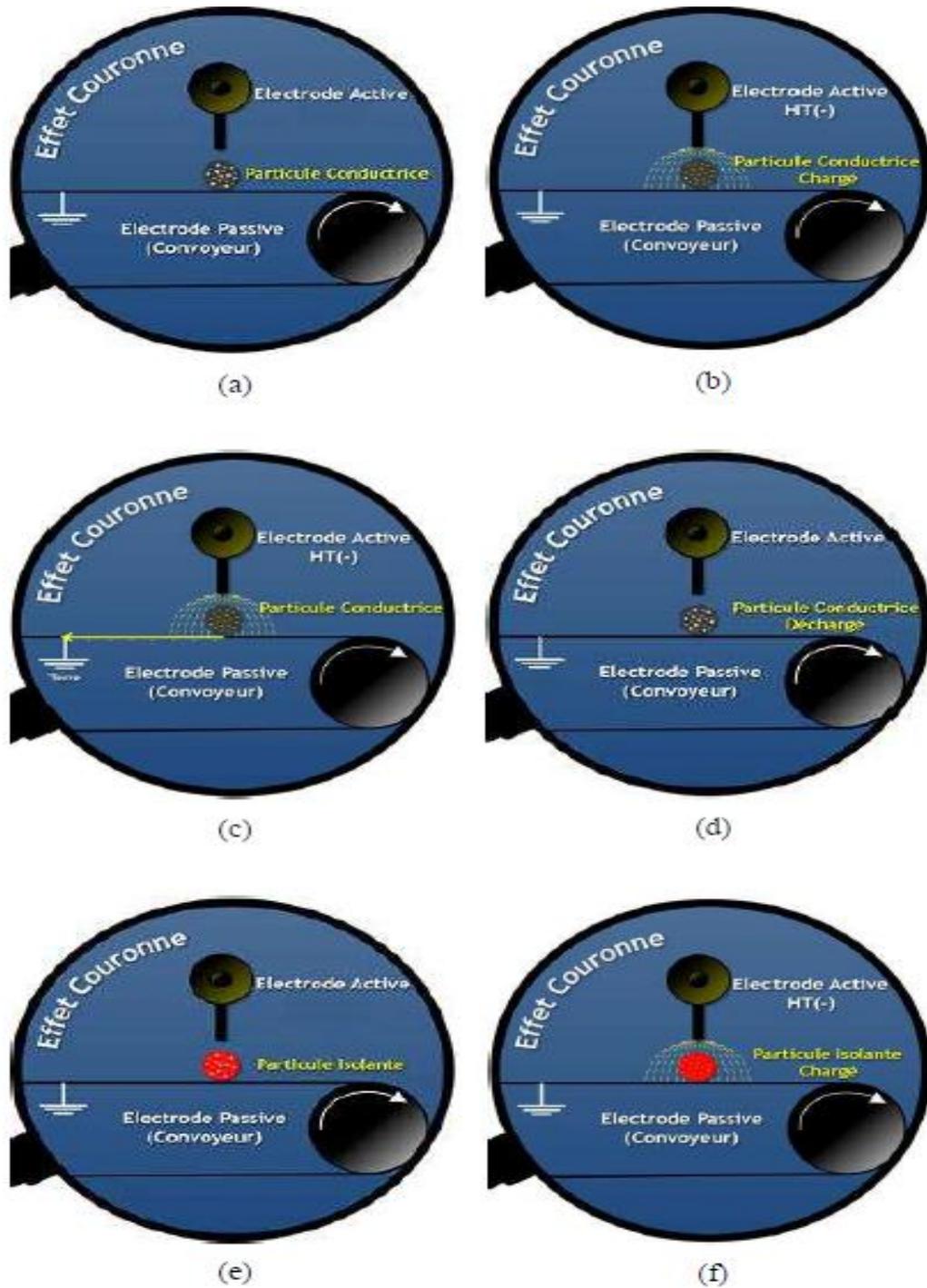


Figure I.4 : Représentation schématique de l'effet couronne sur des particules conductrices (a, b, c, d) et isolantes (e, f).

1.2.2/ Induction électrostatique :

Description :

L'induction électrostatique peut se définir comme une méthode par laquelle un objet électriquement chargé est employé pour créer un déplacement de charges électriques dans un deuxième objet, neutre, sans être en contact avec celui-ci. L'objet chargé, qui génère un champ électrique, provoque la polarisation de l'objet neutre (les centres de gravité des charges positives et négatives présentes dans ce dernier se séparent). Si l'objet neutre est conducteur et temporairement en contact avec une électrode liée à la masse, les charges polaires situées au voisinage du point de contact vont s'écouler vers la terre.

De ce fait, lorsque l'objet est déconnecté de la terre, il emporte une charge nette non nulle. Les charges ne s'écoulant pas dans un corps isolant, celui-ci n'est alors jamais chargé par induction électrostatique [8].

Ce mécanisme explique, par exemple, la charge d'une particule conductrice placée entre deux électrodes de polarités différentes. Dans la situation illustrée sur la **Figure I.5**, une particule conductrice, initialement neutre, déposée sur la surface d'une électrode (convoyeur métallique) liée à la terre, se polarise dans le champ électrique créé par une autre électrode (cylindre métallique) connectée à une haute tension de polarité négative. La particule étant conductrice, elle finit par acquérir une charge positive (de même signe que l'électrode avec laquelle elle est en contact).

Dans la séparation électrostatique des mélanges conducteur/isolant, les performances peuvent être améliorées en associant l'induction électrostatique et l'effet couronne par l'ajout d'une seconde électrode produisant un champ électrique étendu, intense et quasi-uniforme qui augmente la force électrique de décollage des particules conductrices déposées sur une surface métallique reliée à la terre [9] .

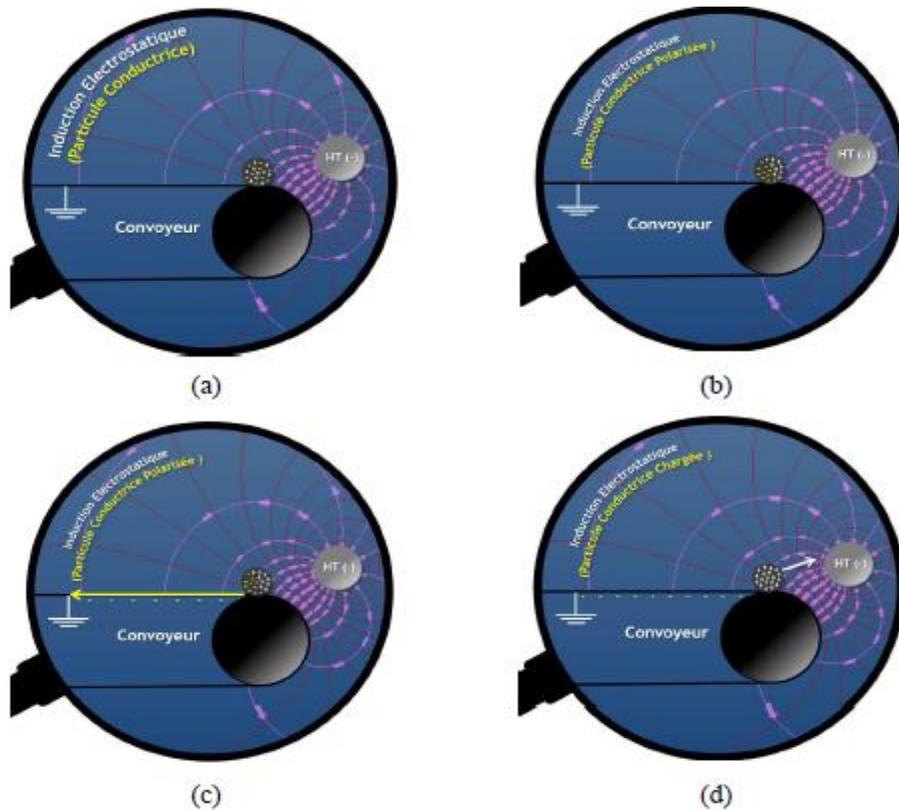


Figure I.5 : Représentation schématique du mécanisme induction électrostatique sur des particules conductrices.

- (a) : Particule conductrice neutre ;
- (b) : Particule conductrice polarisée ;
- (c) : Ecoulement des charges vers la terre ;
- (d) : Attraction de la particule conductrice par la force électrostatique.

1.3/ Séparation électrostatique des matériaux pulvérulents :

Elle représente de nos jours, une technologie économiquement viable pour la concentration des minerais, le recyclage des déchets et la purification des produits agroalimentaires. Son utilisation dans ces industries nécessite le développement de nouvelles technologies afin d'améliorer les résultats, tout en respectant une réglementation de plus en plus sévère pour la protection de l'environnement. Les recherches entreprises dans ce sens ont été très fructueuses lorsqu'il s'agissait de la séparation des particules de tailles millimétriques, dites granulaires.

Cependant, peu de résultats ont été obtenus pour la séparation électrostatique des particules pulvérulentes dont la taille est inférieure à 1 mm, comme celles rencontrées dans l'industrie agro-alimentaire. Les procédés de séparation de ces particules fines se heurtent souvent à la difficulté de contrôler leurs trajectoires, en raison de l'influence des forces aérodynamiques [10].

1.3.1/ Installations de laboratoire :

Afin de répondre aux besoins de l'industrie du recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques, multiples recherches ont été réalisées par des laboratoires américains, japonais, européens, canadiens et algériens sur la séparation électrostatique. Cette technique se révèle efficace dans le tri de matériaux granulaires ou pulvérulents selon leurs caractéristiques physiques, en faisant appel aux forces qui s'exercent sur les particules chargées ou polarisées, en champ électrique intense.

La majorité des installations traitant les particules pulvérulentes utilisent l'effet triboélectrique comme mécanisme de charge, qui empêche l'apparition des agglomérats. Le point commun entre ces dispositifs est la nécessité d'avoir deux parties successives, la première celle de chargement triboélectrique des particules, et l'autre destinée à leur séparation [11].

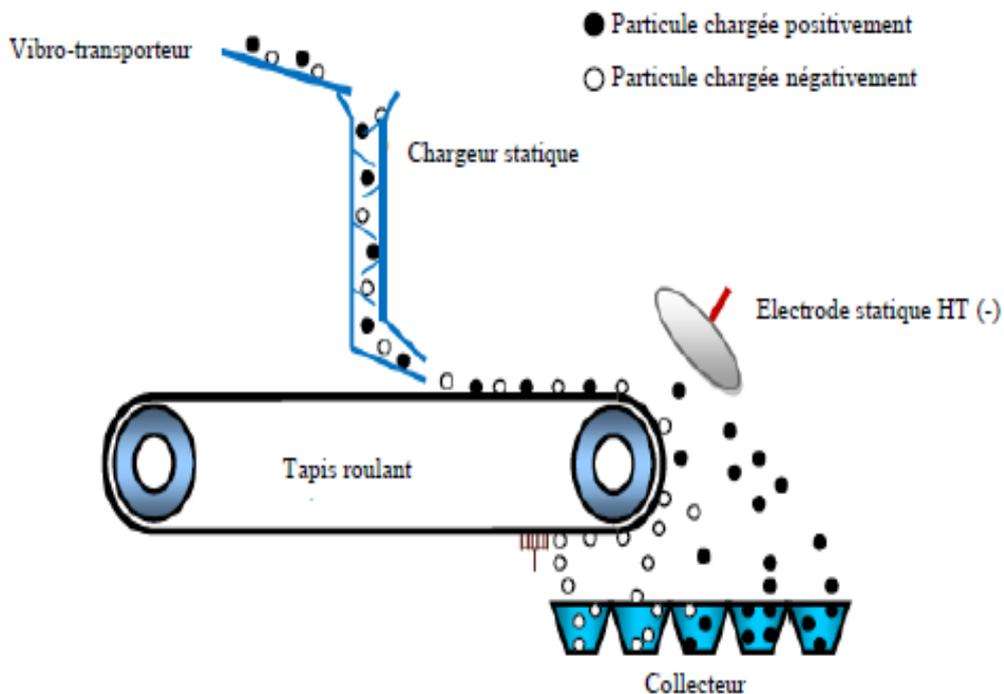


Figure I.6: Représentation schématique d'un séparateur TBS.

I.3.2/ Applications industrielles :

Actuellement de nombreuses sociétés fabriquent, utilisent et commercialisent des installations de séparation électrostatique dans le monde, historiquement, la firme américaine CARPCO Inc. était la première compagnie qui pratiqua avec succès le tri des mélanges PVC Cuivre de taille supérieure à 1 mm, en utilisant la décharge couronne.

Parmi les sociétés qui traitent les matières pulvérulentes, deux d'entre elles se distinguent, la première est allemande **Hamos GmbH** qui représente de nos jours le leader mondial dans l'industrie du traitement des minéraux, avec ses séparateurs **KMS** et **EMS** pour des mélanges de taille comprise entre 100 microns à 1000 microns. La deuxième est américaine **Separation Technologies LLC**, spécialiste dans la séparation électrostatique des cendres issues des centrales électriques et de l'industrie du ciment.

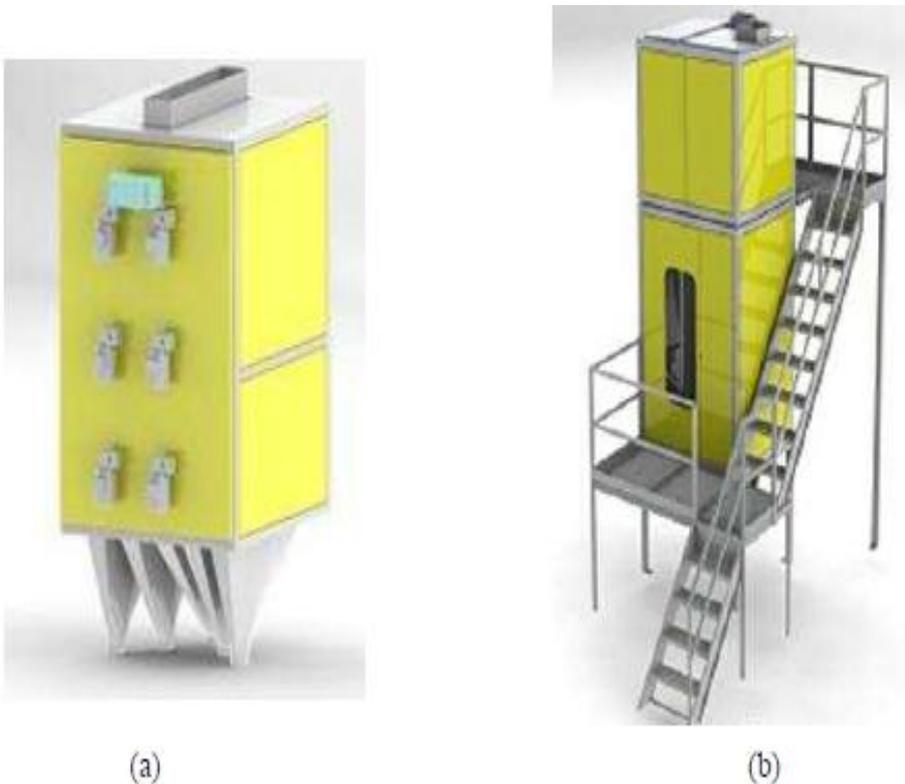


Figure I.7: Séparateurs électrostatiques de Hamos pour le traitement des minéraux [12].

(a) : Séparateur électrostatique KMS,

(b) : Séparateur électrostatique EMS.

I.4/ Conclusions :

Il existe une multitude d'installations électrostatiques qui traitent différents types de mélange de matériaux pulvérulents dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières.

La séparation électrostatique des matériaux pulvérulents peut être effectuée, en associant un ou deux mécanismes de charge différents. L'effet tribo-électrique apporte d'irremplaçables avantages pour la séparation des mélanges de matériaux non-conducteurs.

Pour des mélanges de matériaux conducteur - non-conducteur la séparation électrostatique nécessite l'utilisation de l'induction électrostatique et /ou de la décharge couronne.

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

II.1/ 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 [13]; 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 « Electrodynamic screens » EDS , d'autres ont défini le convoyeur comme un ensemble de trois peignes pour un convoyeur triphasé (deux peignes pour le Biphase) [14].

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

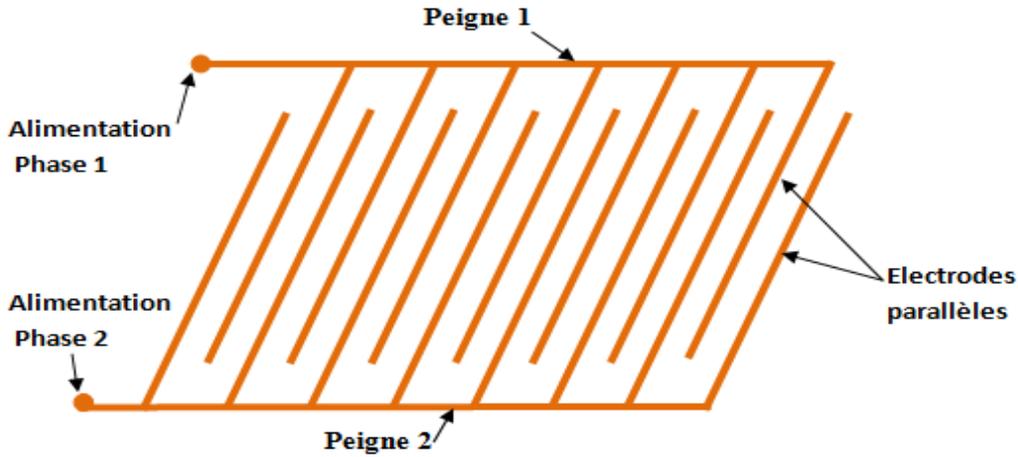


Figure II.1 : Représentation schématique d'un convoyeur biphasé sous forme de deux peignes.

II.2/ 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.3/ 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, dépoussiérage des panneaux solaires.....), elle se base sur l'impact qu'apporte la force diélectrophorétique.

La force diélectrophorétique 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 diélectrophorétique nécessite des électrodes et une source de tension alternative. La manipulation des microparticules par la force diélectrophorétique 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 [15].

II.4/ Définition de la technique des ondes mobiles :

Les ondes mobiles (traveling waves) est un mouvement unidirectionnel provoqué par les interactions entre plusieurs champs électriques qui sont produits par des électrodes. Cette définition est simple car le déphasage entre deux électrodes voisines est nécessaire selon la configuration du convoyeur biphasé, triphasé ou quatre phases (**Figure II.2**). Le déphasage entre deux électrodes voisines peut être égal à 90° , 120° ou 180° selon qu'il s'agit d'un convoyeur à quatre, à trois ou à deux phases, respectivement.

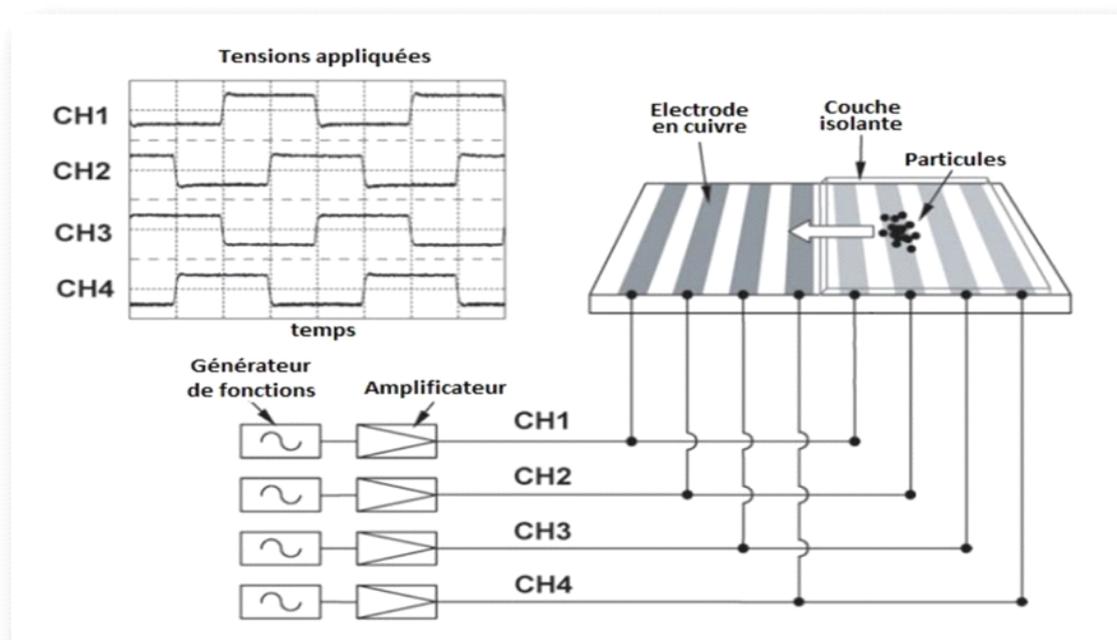


Figure II.2: Convoyeur à ondes mobiles relié à une source de tension [16].

II.5/ 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.5.1/ Selon le nombre de phases :

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

- Les convoyeurs biphasés ayant 2 peignes intercalés, alimentés par des tensions périodiques à 2 phases ayant un déphasage de 180° .
- Les convoyeurs triphasés ayant 3 séries d'électrodes intercalés, chacune reliée à une source de tension périodique ayant un déphasage de 120° entre elles.
- 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° [16].

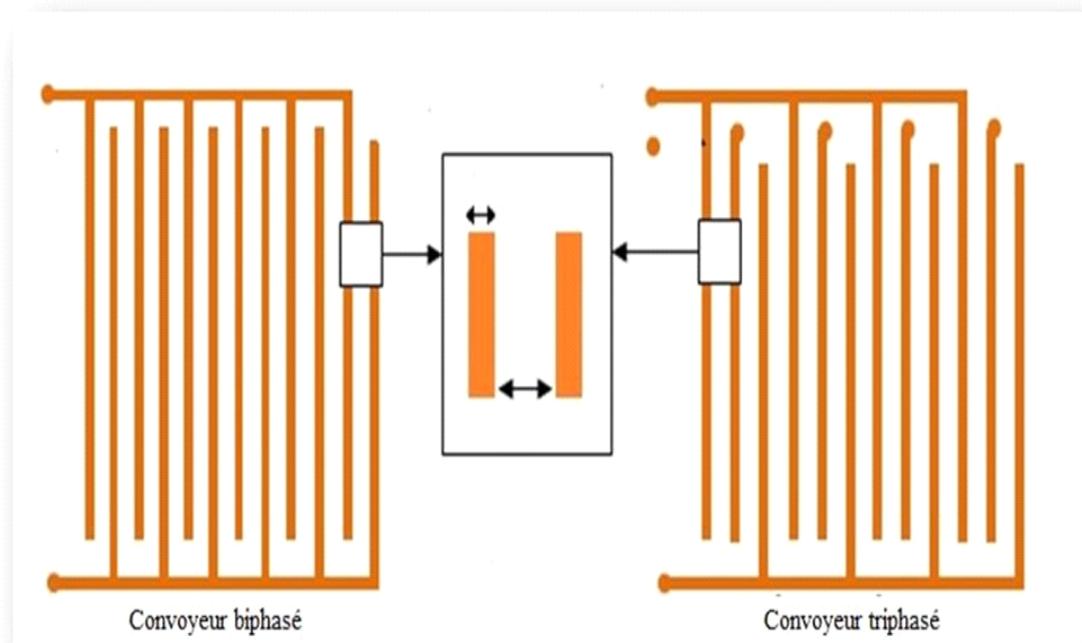


Figure II.3: Schéma descriptif de différents types de convoyeurs (biphasé et triphasé) [16].

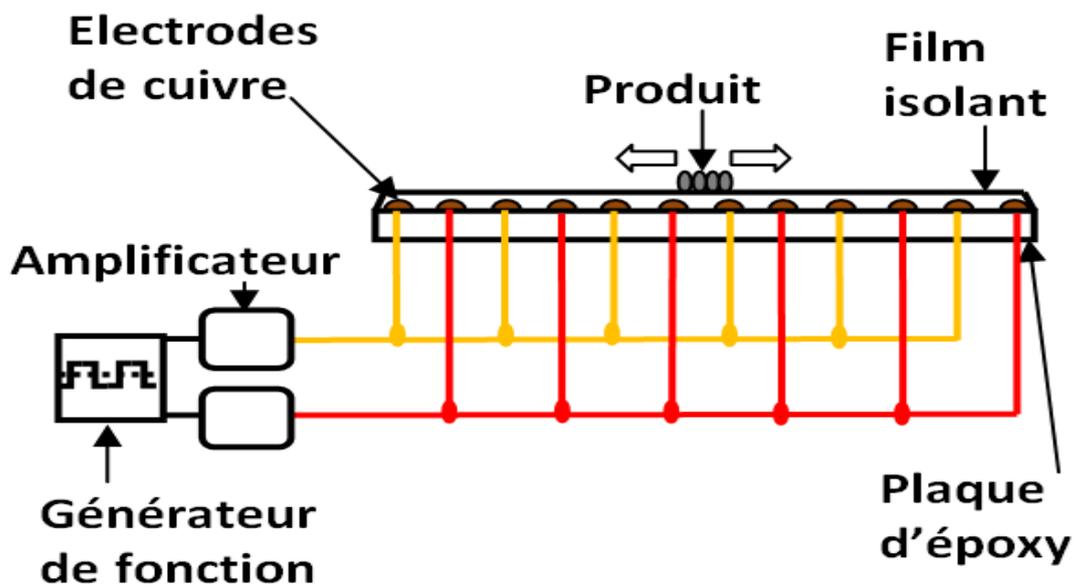


Figure II.4 : Schéma descriptif du convoyeur biphasé.

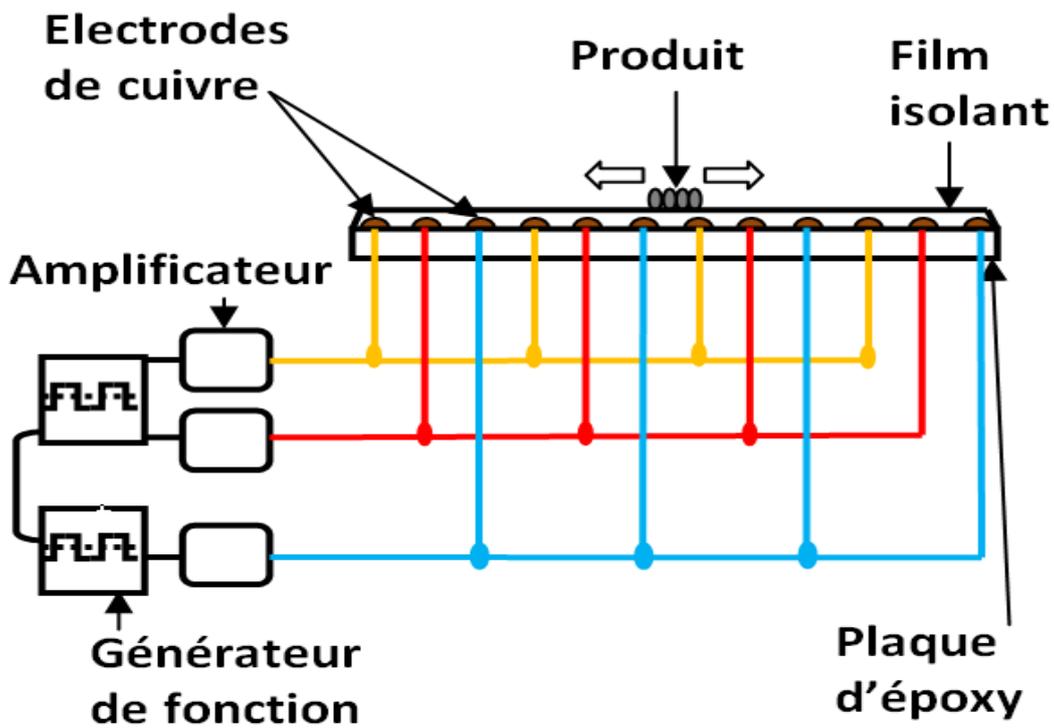


Figure II.5 : Schéma descriptif du convoyeur triphasé.

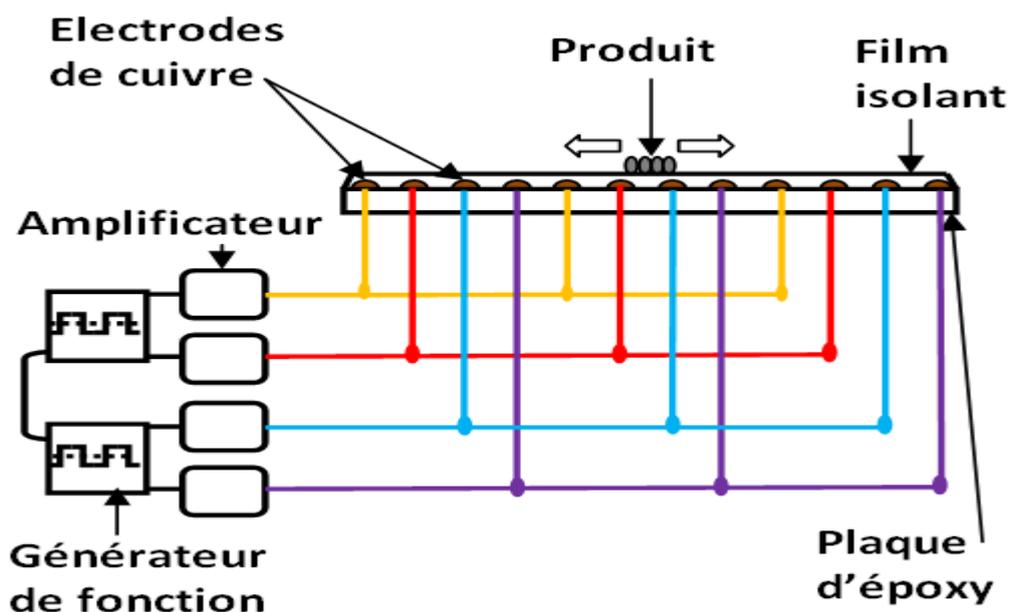


Figure II.6 : Schéma descriptif du convoyeur à quatre phases.

II.5.1/ 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.

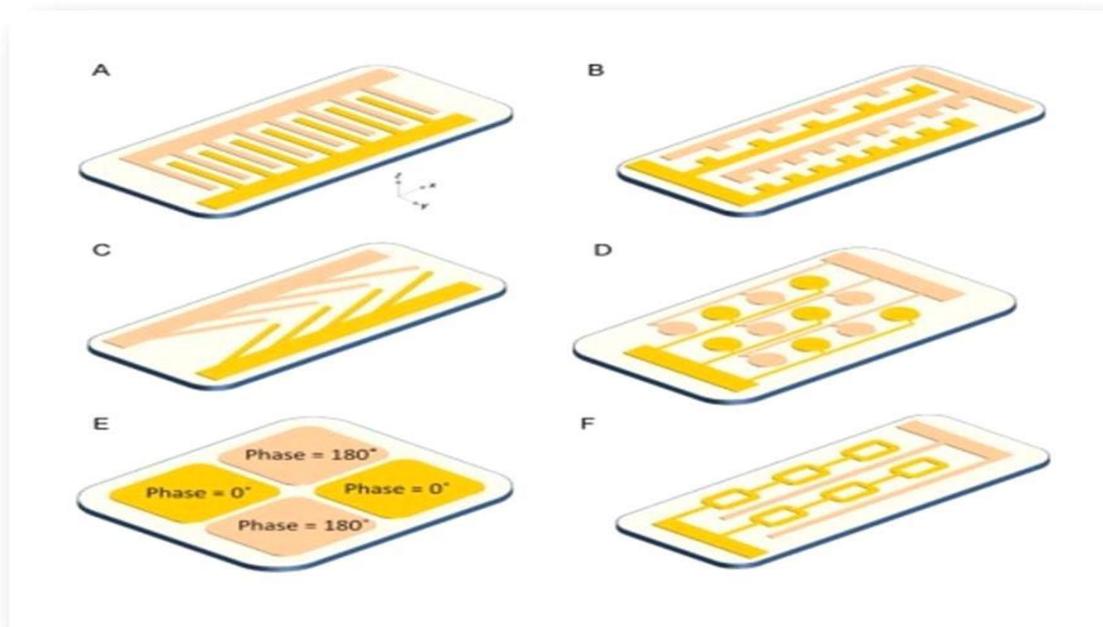


Figure II.7: Quelques exemples de convoyeurs à configuration 2D [17].

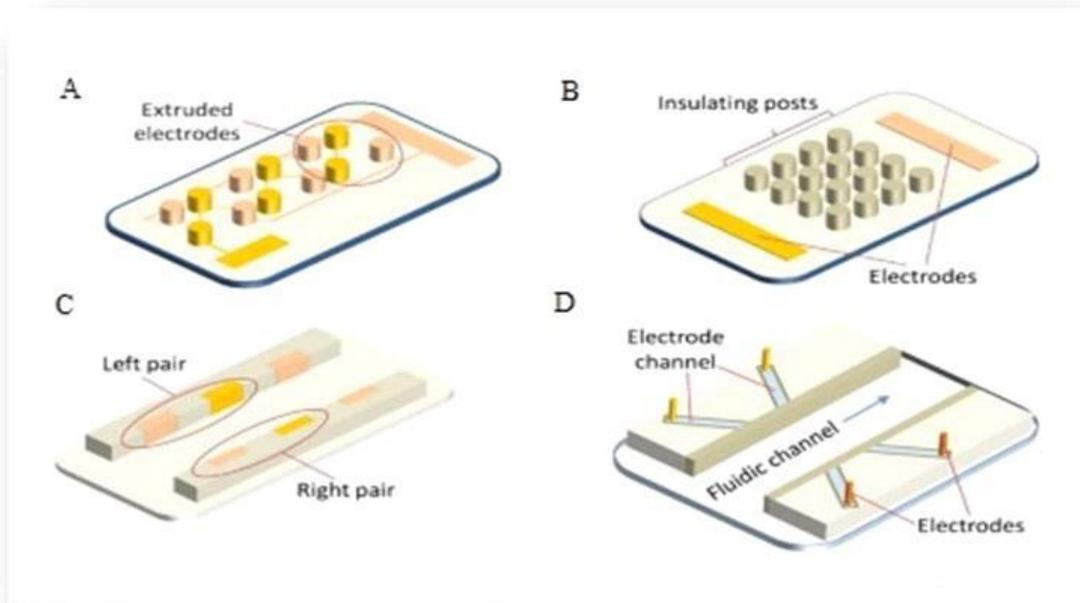


Figure II.8 : Quelques exemples de convoyeurs à configuration 3D [17].

II.6/ Conclusion :

Le déplacement des particules micronisées avec la technique des ondes mobiles nécessite un certain réglage pour obtenir des résultats optimaux. Nous avons montré que les paramètres qui influent sur le déplacement des particules sur les convoyeurs sont : fréquence, tension, humidité ambiante, charge des particules ainsi que leurs tailles moyennes.

***Chapitre III:
Présentation
du module
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'éléments finis. Le convoyeur à onde mobile étudié est présenté dans la **Figure III.1**. L'électrode supérieure de forme spirale est portée à une tension continue de +2kV. L'électrode inférieure de forme circulaire est reliée à la masse. La Figure III.2 présente la forme des électrodes du convoyeur.

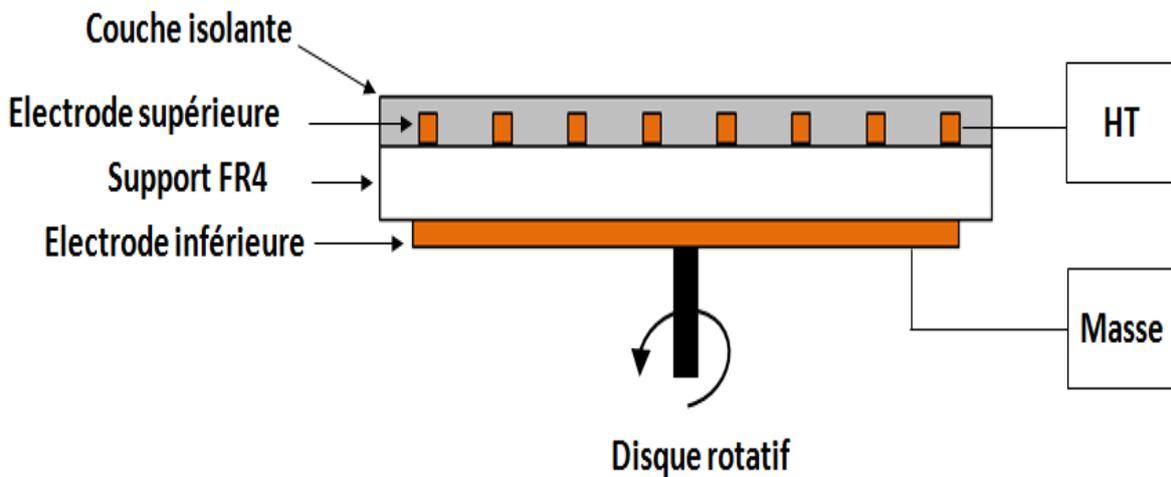


Figure III.1 : Présentation du convoyeur rotatif à ondes mobiles.

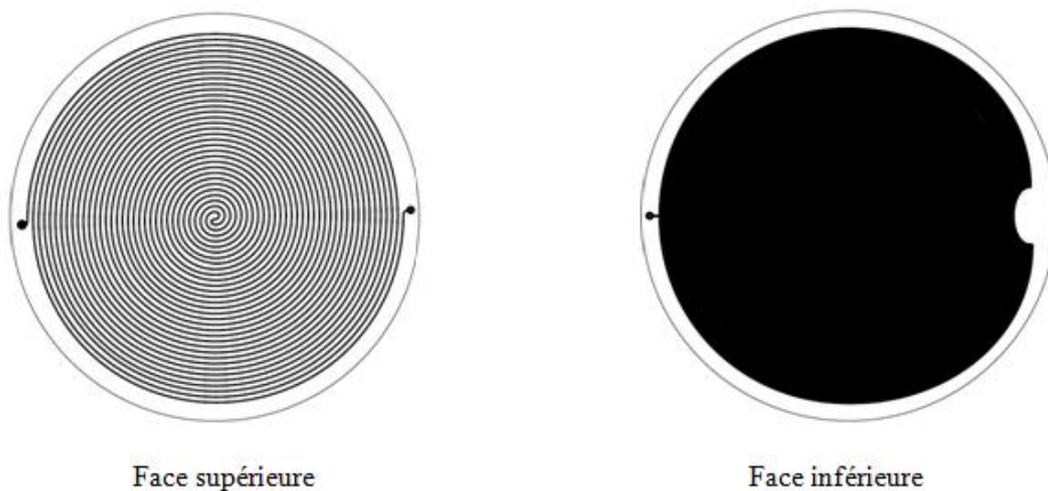


Figure III.2 : Forme géométrique de l'électrode supérieure et inférieure.

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 (avec 10 « cercles » dans la spirale). Ces électrodes ont une largeur de 1mm et une hauteur de 35 μ m. La distance entre deux électrodes (cercles) successives est de 2 mm. L'ensemble de ces électrodes est protégé par un film isolant d'une épaisseur de 100 μ m. La face arrière du disque contient une électrode circulaire en cuivre de 35 μ m d'épaisseur. La **Figure III.3** montre le détail de ces dimensions dans une vue en coupe du convoyeur.

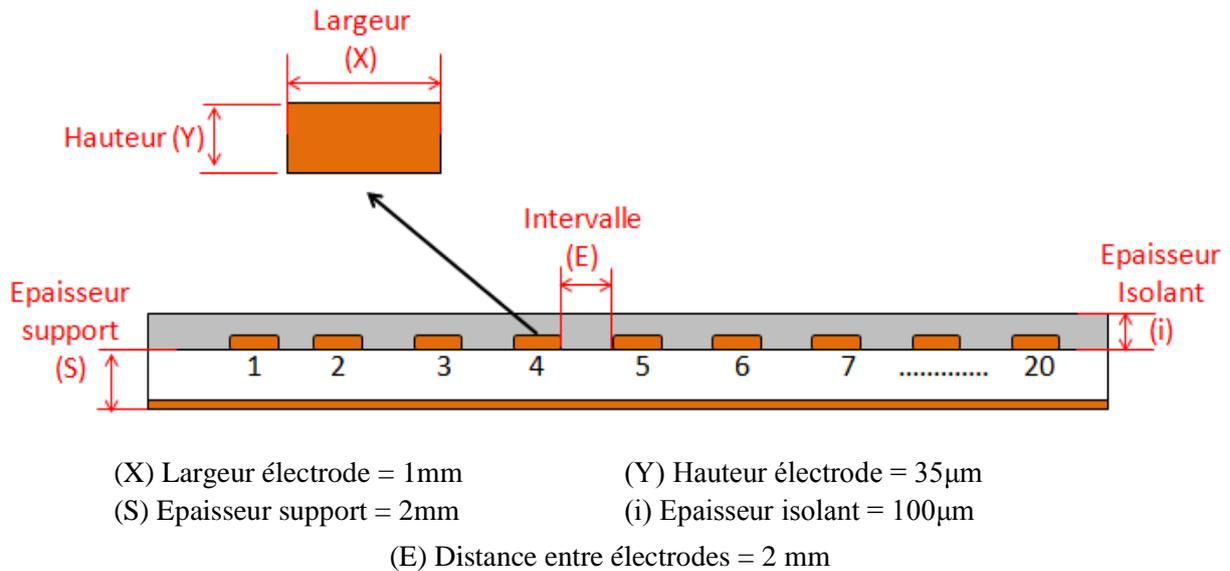


Figure III.3 :Vue en coupe du modèle étudié.

Vu le caractère symétrique du disque par rapport à son axe central, la simulation dans le logiciel Flux 2D sera réalisée uniquement sur la demi-vue du disque en utilisant la fonction « Axisymétrique » du logiciel. La figure III.4 présente la géométrie étudiée dans Flux 2D.

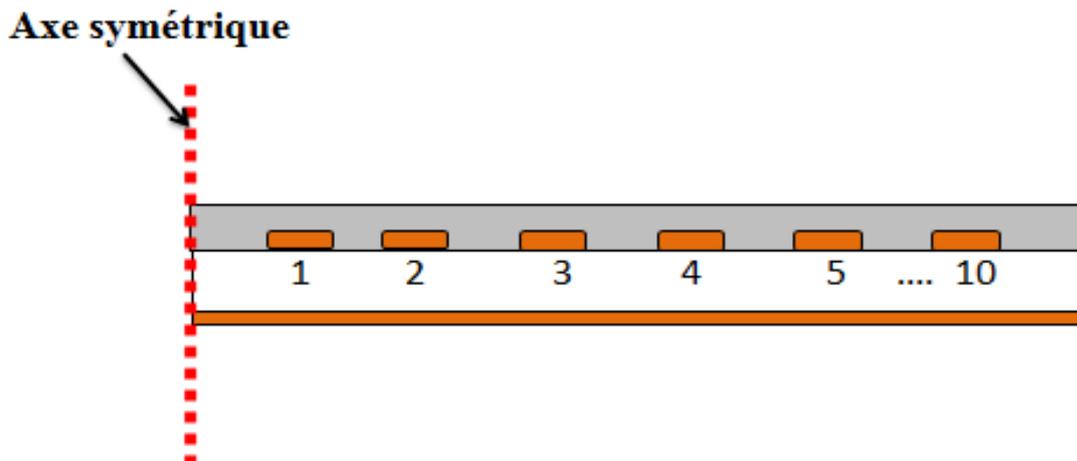


Figure III.4 : Modèle axisymétrique du convoyeur.

III.2/ Présentation du logiciel Flux2D :

Flux2D est un logiciel de simulation numérique utilisé en conception assistée par ordinateur. Il utilise la méthode des éléments finis et permet le calcul des états magnétiques, électriques ou thermiques des dispositifs en régimes permanents, transitoires et harmoniques, avec des fonctionnalités d'analyse multi-paramétrique étendues, les couplages circuit et cinématique. Ceci nécessite la résolution d'équations diverses: équations de Maxwell, de la chaleur, loi de comportement des matériaux. De par la difficulté de la résolution simultanée de ces équations, le code est découpé en un ensemble de modules chargés de résoudre chacun un type de problème donné (c'est-à-dire les équations à utiliser et les hypothèses associées).

Flux est développé (en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du Laboratoire d'Electrostatique et Matériaux Diélectriques et du Laboratoire de Magnétisme du Navire) et distribué en France par la société CEDRAT S.A [18].

Plusieurs d'applications peuvent être simulées et optimisés grâce a cet outil :

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

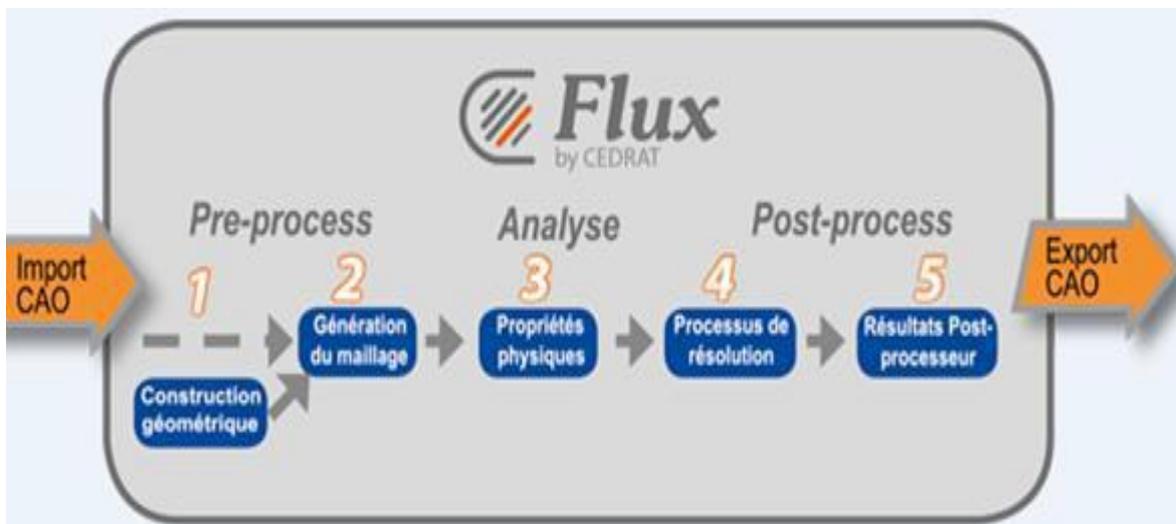


Figure III.5 : Les étapes processus de Flux 2D.

III.3/ Géométrie du modèle :

Dans Flux 2D, une géométrie est constituée de plusieurs faces formées par une multitude de lignes qui relient plusieurs points. La géométrie de notre modèle est celle d'un convoyeur composé d'un support (plaque) sur lequel a été déposées 10 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 (**Figure III.6**).

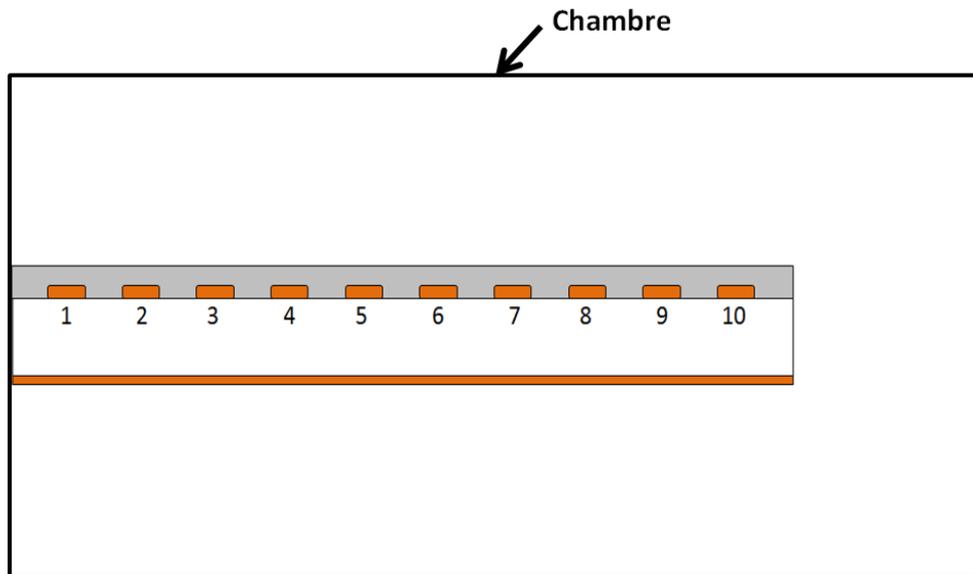


Figure III.6 : Géométrie du modèle Flux2D en axisymétrie.

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.7**).

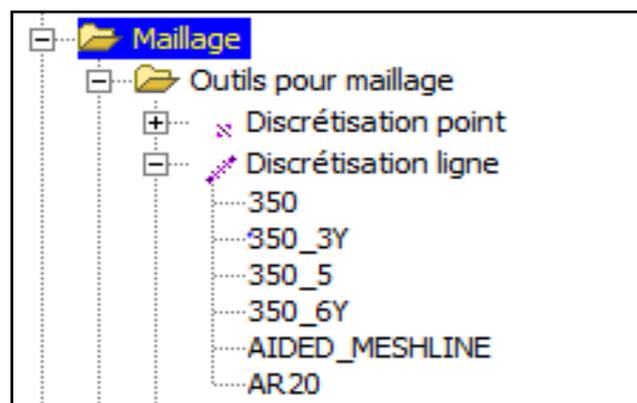


Figure III.7 : Vue sur le menu des paramètres de maillage dans Flux 2D.

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.

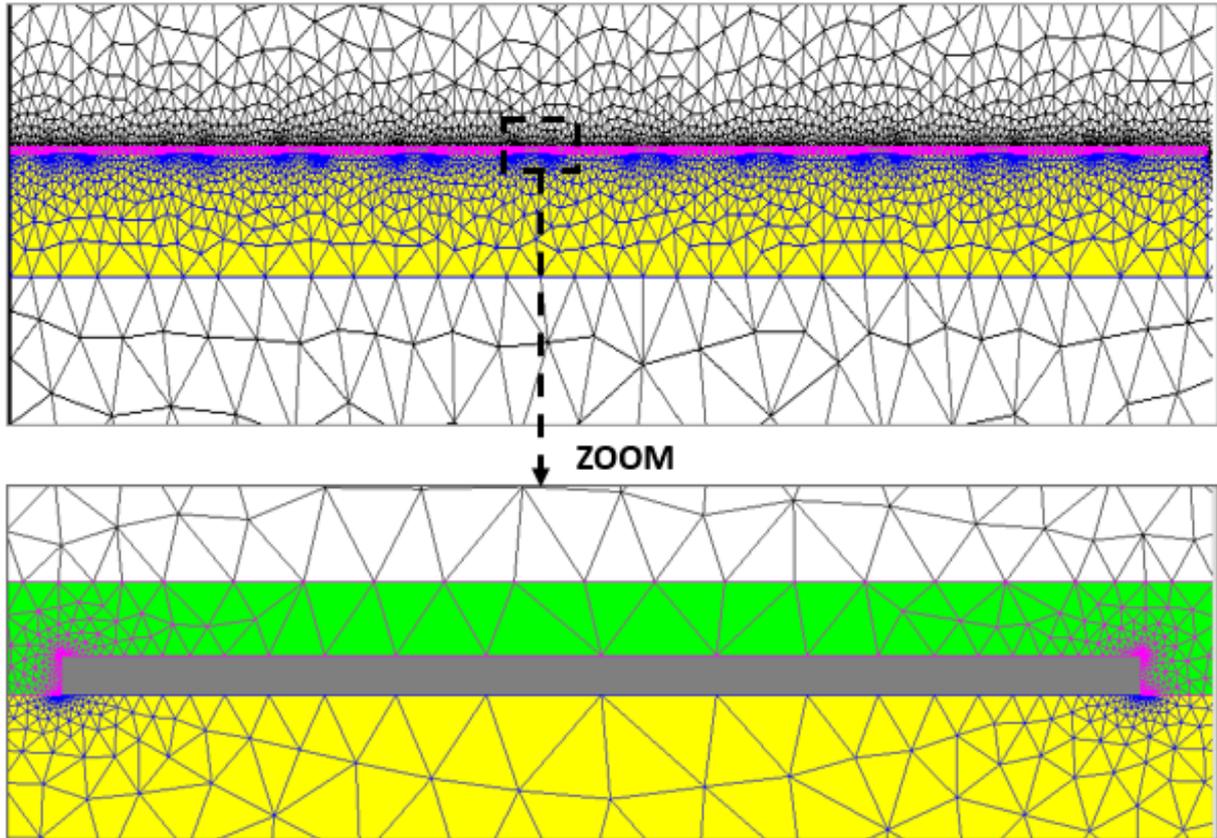


Figure III.8 : Vue sur le maillage global de la géométrie ainsi qu'un zoom sur le maillage d'une seule électrode.

En appliquant dans Flux 2D une discrétisation adaptée (réglage spécifique dans le maillage), on obtient comme résultat le maillage présenté dans la **Figure III.8**.

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.9**.

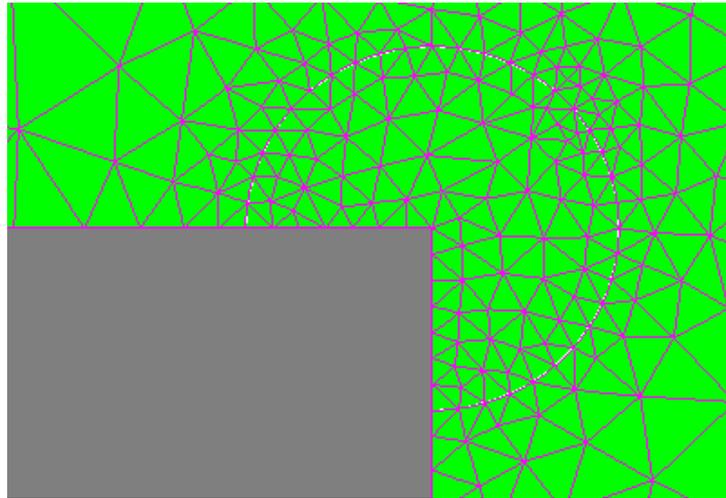


Figure III.9 : Maillage fin sur le bord supérieur d'une électrode.

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.10).

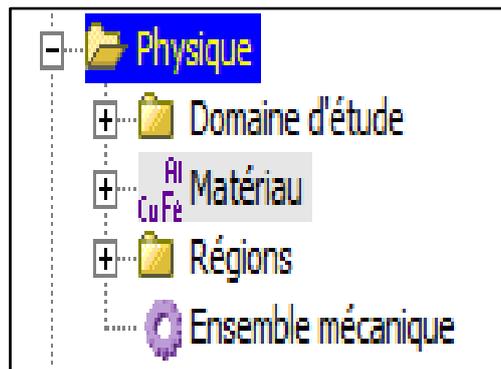


Figure III.10 : Menu des propriétés physiques dans Flux 2D.

III.5.1/ Matériau :

Dans notre étude on a utilisé 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.11).

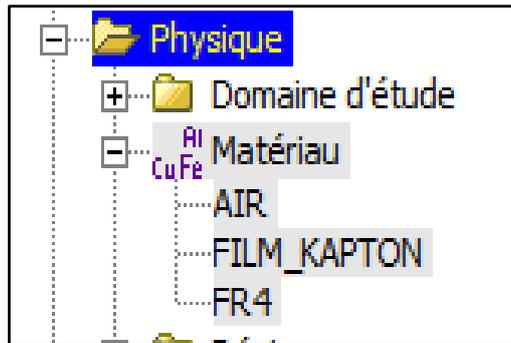


Figure III.11: Menu Flux 2D des matériaux utilisés dans le modèle.

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

Partie	Matériaux	Permittivité relative
Chambre	Air	1
Support	FR4	4,70
Isolant	film KAPTON	4,35

Tableau III.1: Permittivité relative des matériaux utilisés.

III.5.1.1/ Régions surfaciques :

Cette étape consiste à associer les matériaux créés précédemment aux différentes faces du modèle comme le montre la figure suivante.

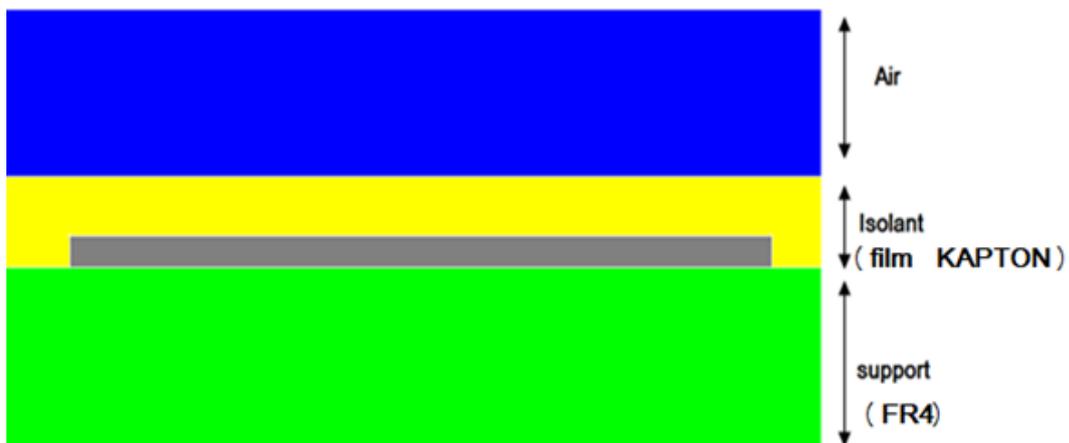


Figure III.12 : Matériaux affectés aux faces du model.

III.5.1.2/ Régions linéiques :

Cette partie consiste à affecter des potentiels électriques aux lignes qui représentent les électrodes de cuivre. Les électrodes supérieures sont reliées à une source de tension continue avec un potentiel électrique de +2000V. L'électrode inférieure est reliée à la masse avec un potentiel 0V comme le montre la **Figure III.13**.

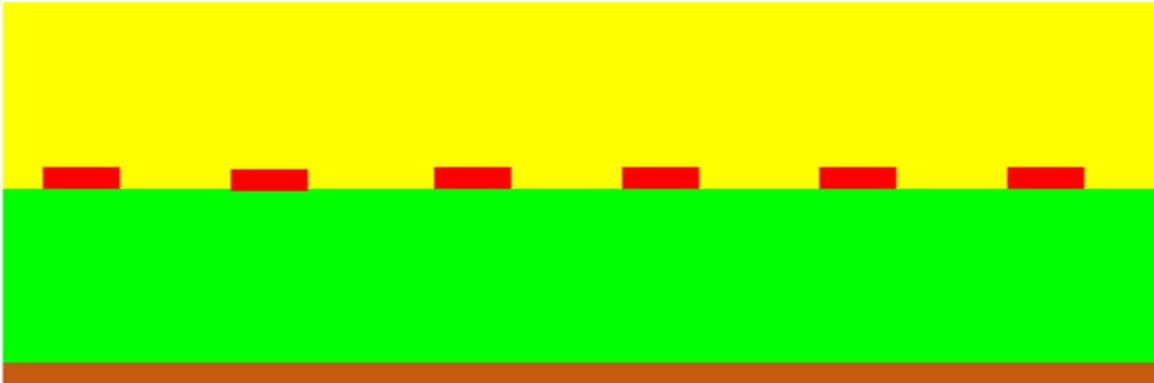


Figure III.13 : Tensions appliquées aux électrodes(en rouge +2kV, en marron 0V).

III.6/ Conclusion :

Dans ce chapitre ; nous avons présenté et montré les étapes suivies dans notre simulation réalisée avec 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.

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. Par ailleurs et du fait que la tension soit appliquée en volume du convoyeur, avec +2000V sur son électrode supérieure (électrode spirale) et 0V sur son électrode inférieure (électrode circulaire), le champ électrique dans le volume du support isolant du convoyeur sera également calculé pour évaluer le risque de claquage dans cette zone.

IV.2/ Distribution des lignes équipotentiels :

Comme expliqué dans le chapitre 3, le caractère symétrique du disque par rapport à son axe central de rotation nous a conduit à réaliser la simulation uniquement sur la demi-vue du disque rotatif en utilisant la fonction « Axisymétrique » du logiciel Flux 2D.

Ainsi, la simulation a été réalisée en utilisant une demi-vue qui ne que contient que dix électrodes sur sa face supérieure (sur un total de vingt électrodes ; les dix autres électrodes étant dans l'autre demi-vue symétriques).

Pa ailleurs, cette demi-vue est sujette à des effets de bords qui se manifestent sur l'extrémité du disque et qui ont pour conséquence de créer une distorsion des lignes équipotentiels dans les bords de la géométrie, ce qui risque de fausser les résultats de calcul du champ électrique dans cette zone. Notre étude ne présentera donc que les résultats de simulation des cinq électrodes qui se trouvent au milieu du convoyeur. En effet, les électrodes de cette partie centrale sont suffisamment loin de l'effet de bord qui existe au niveau des extrémités du convoyeur. La **Figure IV.1** montre la position de cette zone sur le convoyeur.

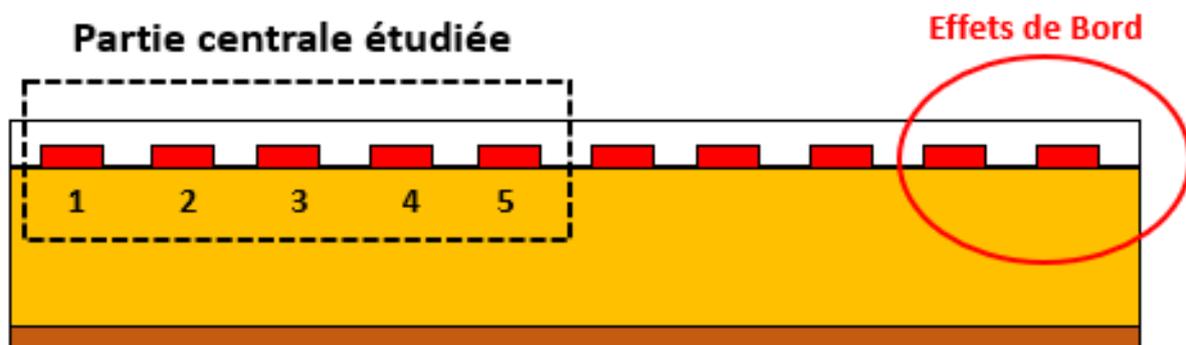


Figure IV.1 : Mise en évidence de la zone étudiée dans le convoyeur.

La répartition des lignes équipotentielles obtenue sur l'ensemble des 10 électrodes du convoyeur est présentée dans la **Figure IV.2**. On observe clairement l'effet de bord au niveau de l'extrémité du convoyeur et on remarque que les cinq électrodes de la partie centrale étudiée sont suffisamment loin de cet effet.

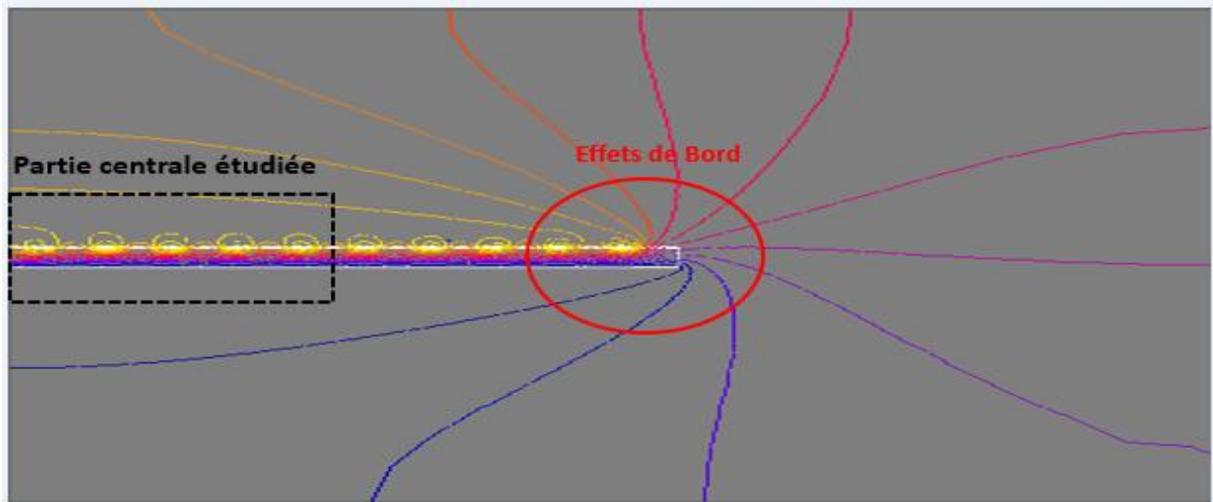


Figure IV.2 : Effet de bord sur la répartition des lignes équipotentielles.

La variation du potentiel électrique le long des cinq électrodes est présentée dans la **Figure IV.3**. Cette variation a été tracée le long d'une ligne (chemin) qui passe par le haut des électrodes. La valeur $d=0\text{mm}$ dans la figure coïncide avec l'axe de symétrie du convoyeur rotatif. La figure montre bien que la tension est bien fixée au niveau des électrodes et prend une valeur de $+2\text{kV}$ et elle décroît dans la distance inter-électrodes dans l'isolant qui les recouvre (film Kapton).

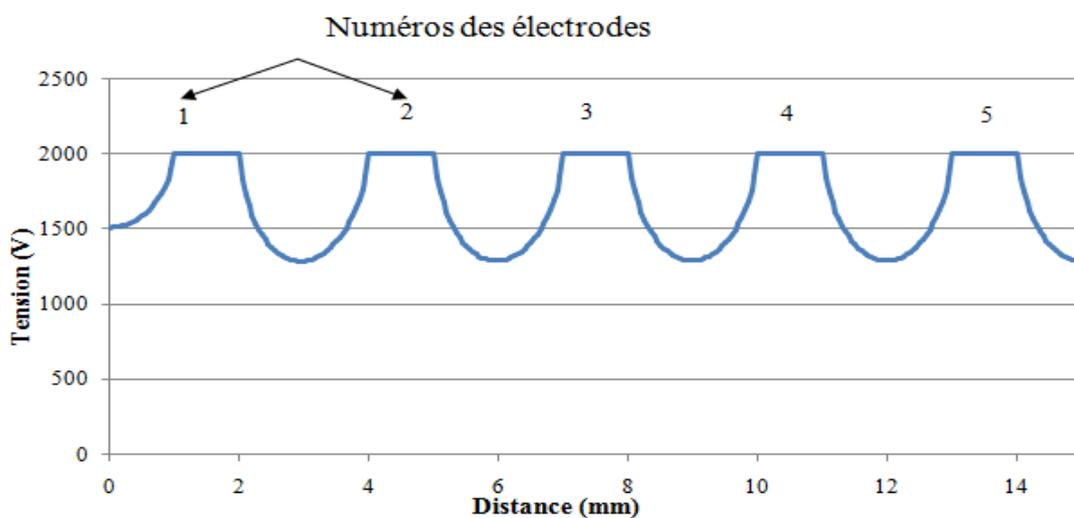


Figure IV.3 : Potentiel électrique des électrodes de la partie centrale du convoyeur.

La **Figure VI.4** montre la répartition des lignes équipotentielles dans la zone des cinq électrodes centrales où on voit la concentration de ces lignes dans le volume du support isolant (FR4) entre le bas des électrodes supérieures et l'électrode inférieure du convoyeur.

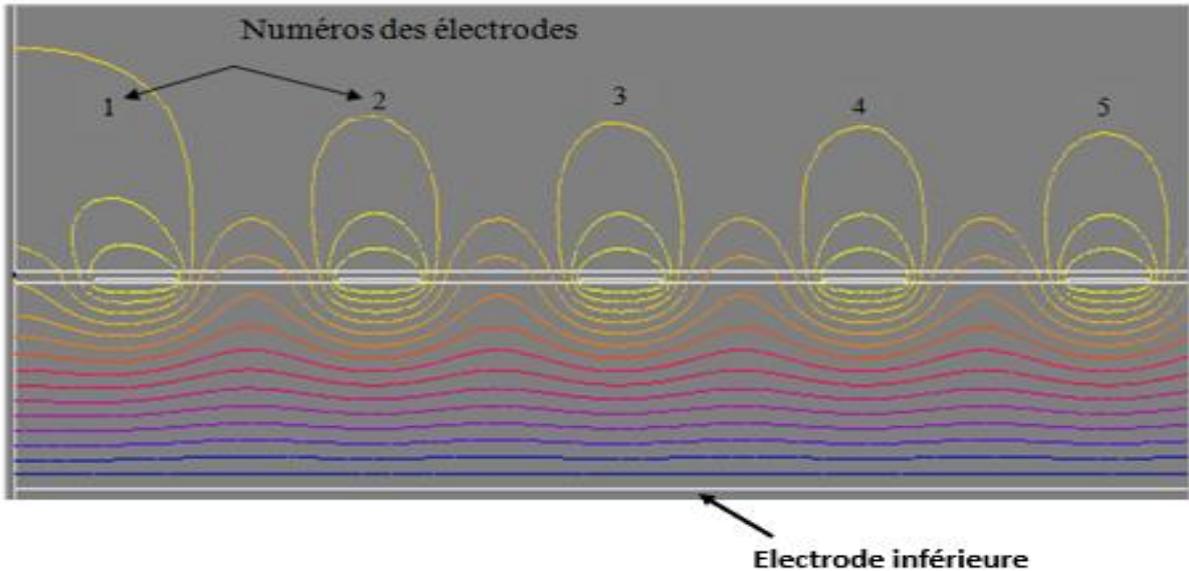


Figure IV.4 : Répartition des lignes équipotentielles sur les 5 électrodes centrales.

IV.3 / Dégradé du champ électrique :

La **Figure IV.5** montre la variation du champ électrique à travers un dégradé de couleurs. Plus la couleur est rouge, plus le champ électrique est élevé. Ainsi on peut observer à travers les couleurs du dégradé de champ aux bords des électrodes que le champ électrique dans l'isolant est plus élevé au niveau des coins des électrodes comme le montre la **Figure IV.6**.

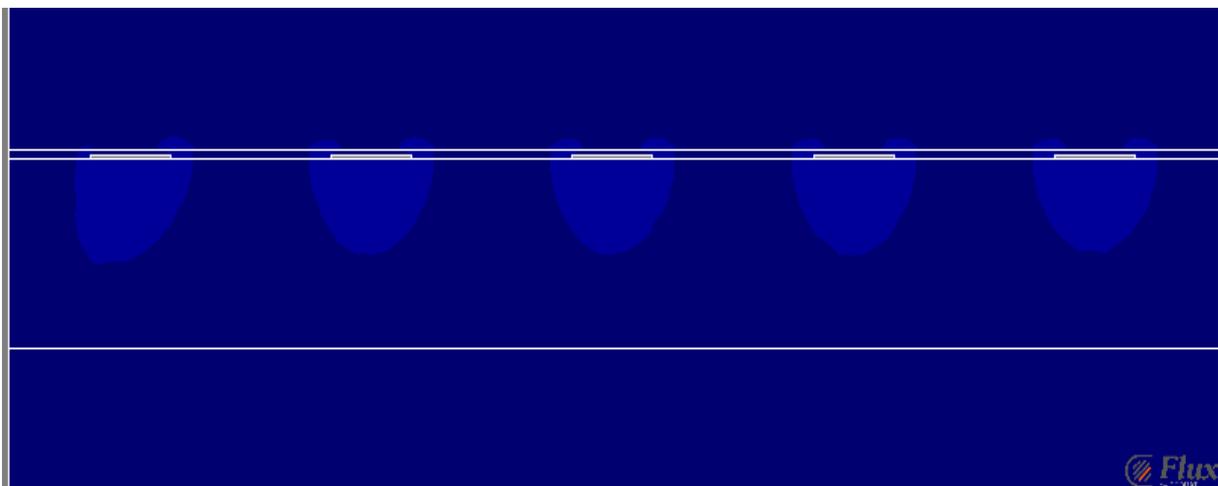


Figure IV.5: Dégradé de champ électrique au niveau des cinq électrodes centrales.

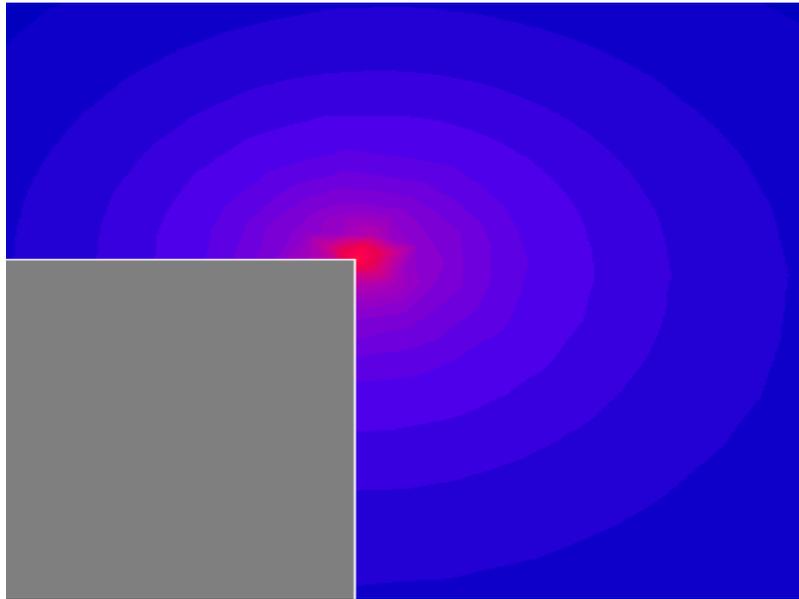


Figure IV.6: Renforcement du champ électrique au niveau du coin supérieur de l'électrode.

Ceci est dû au resserrement des lignes équipotentielles au niveau des angles (coins) des électrodes et qui se manifeste par un champ électrique élevé dans cette zone à cause de l'effet de pointe (**Figure IV.7**).

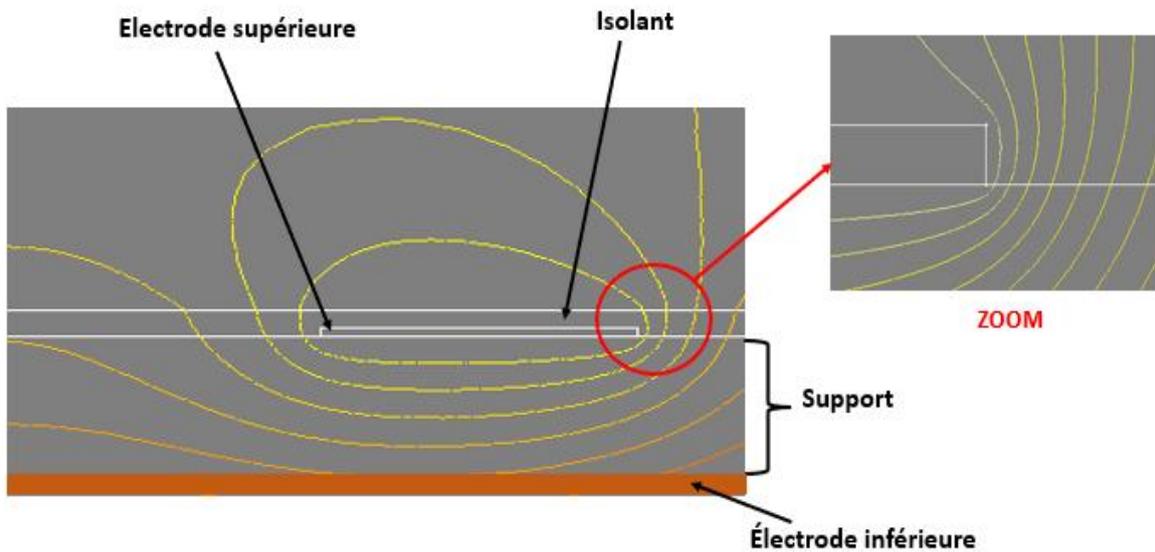


Figure IV.7 : Zoom sur le resserrement des lignes équipotentielles aux coins d'une électrode.

IV.4/ Champ électrique dans l'électrode :

Pour tracer la variation du champ électrique en fonction de la distance dans une zone donnée, on trace une ligne appelée « chemin » dans Flux 2D qui traverse cette zone. Dans notre étude, on veut calculer le champ électrique dans l'isolant qui recouvre les électrodes supérieures (matériau : Kapton) ainsi que dans l'isolant utilisé comme support du convoyeur (matériau : FR4). Pour cette raison, on tracera deux chemins qui passent par les électrodes supérieures car est dans cette zone que le champ électrique est le plus élevée à cause de l'effet de pointe créé par les coins des électrodes. Le chemin N°1 qui passe par les angles supérieurs des électrodes est utilisé pour tracer le champ électrique dans l'isolant le long de ce chemin. Le chemin N°2 passe quand à lui par les angles inférieures des électrodes et permet de tracer le champ électrique dans l'isolant en Kapton et dans le support en FR4 (**Figure IV.8**).

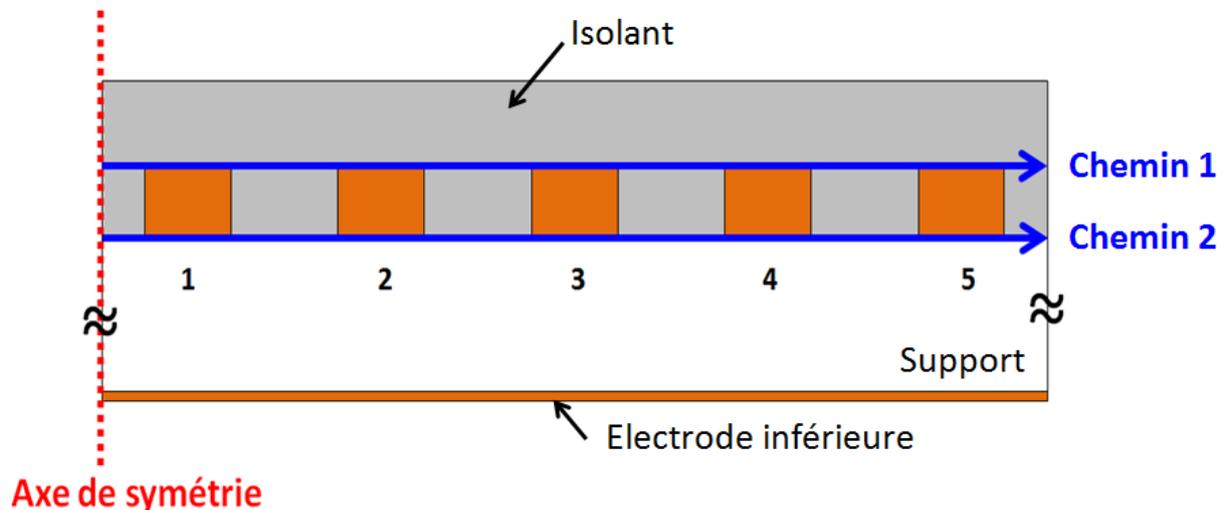


Figure IV.8 : Chemins utilisés pour tracer la variation du champ électrique.

IV.4.1 / Champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes :

Le résultat obtenu est présenté dans la **Figure IV.9** qui montre la variation du champ électrique en fonction de la distance le long du chemin N°1. On remarque que le champ électrique atteint une valeur maximale au niveau du coin supérieur droit de la quatrième électrode. Cette valeur atteint une valeur de 30,69 kV/mm.

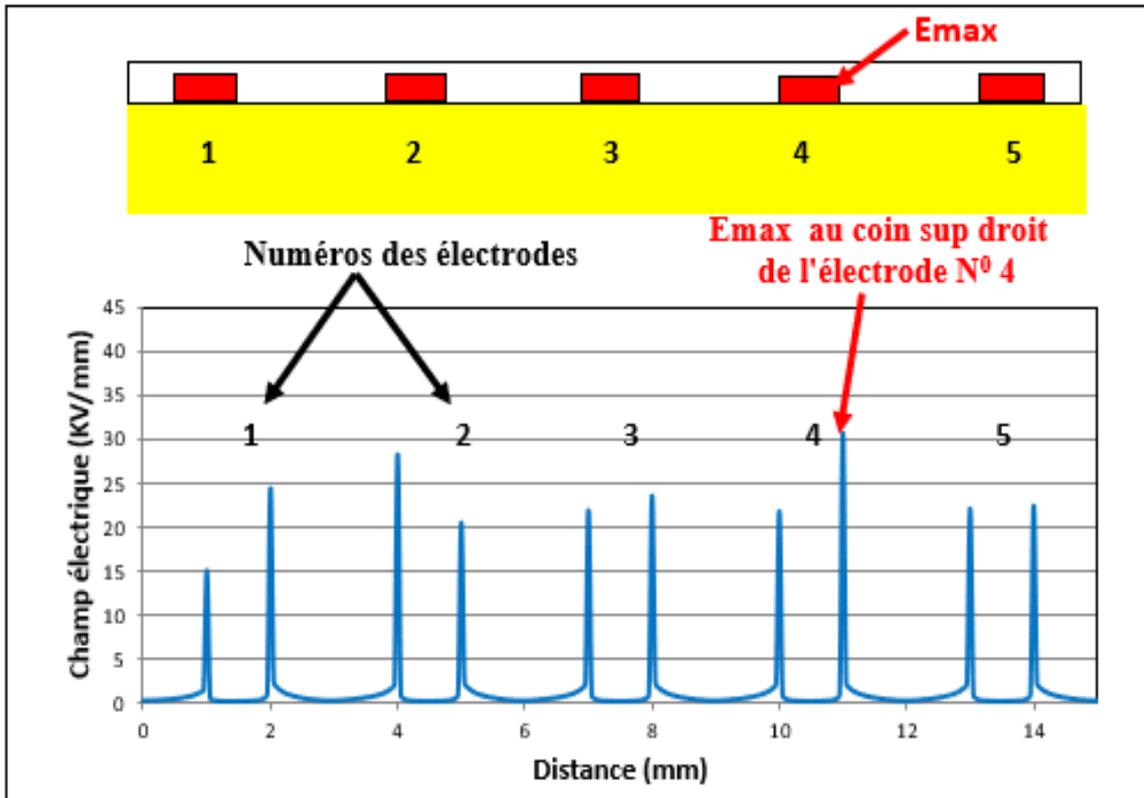


Figure IV.9 : Variation du champ électrique en fonction de la distance dans l'isolant le long du chemin N°1.

IV.4.2 / Champ électrique dans l'isolant en bas des électrodes :

La variation du champ électrique dans l'isolant Kapton en bas des électrodes est tracée dans la **Figure IV.10** en utilisant le chemin N°2. On remarque que le champ électrique atteint une valeur maximale au niveau du coin inférieur droit de la première électrode. Cette valeur atteint une valeur de 40,56 kV/mm.

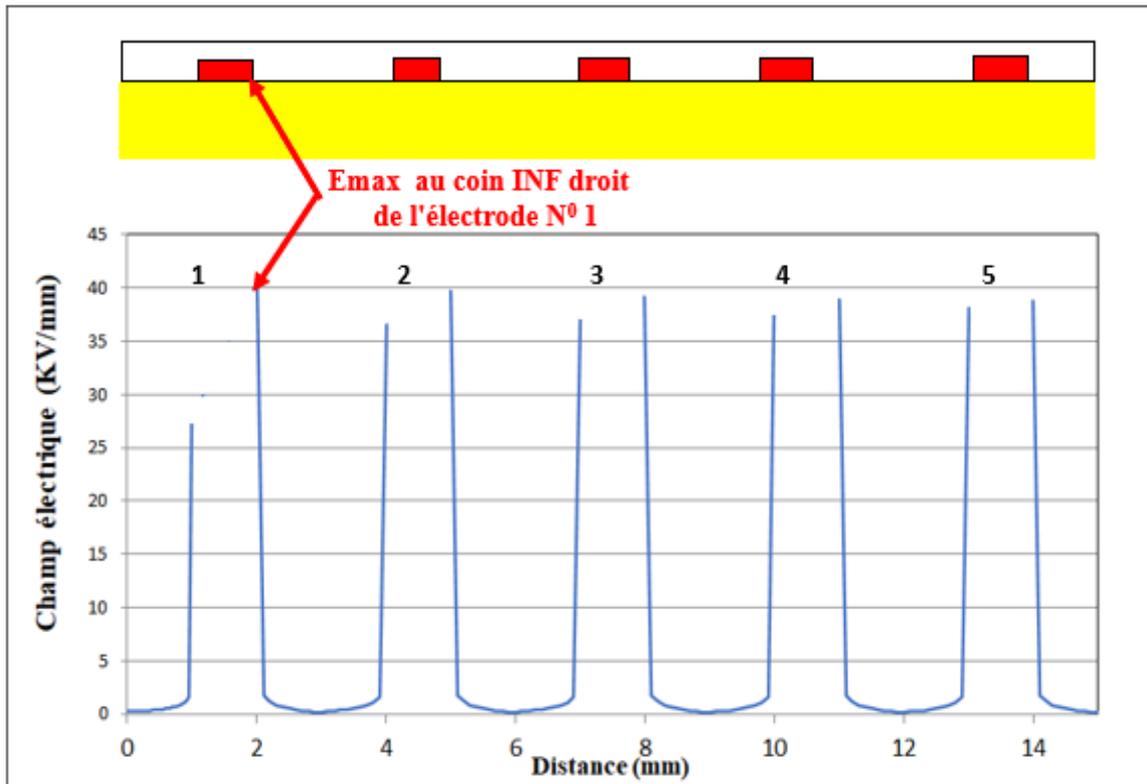


Figure IV.10 : Variation du champ électrique en fonction de la distance dans l'isolant le long du chemin N°2

IV.4.3 / Champ électrique à la surface du support :

La **Figure IV.11** montre la variation du champ électrique dans le support en FR4 le long du chemin N°2. Le champ électrique correspond à celui calculé à la surface du support du convoyeur juste à l'interface avec la partie inférieure des électrodes. On remarque que le champ électrique atteint une valeur maximale au niveau du coin inférieur droit de la quatrième électrode. Cette valeur atteint une valeur de 45,78 kV/mm et est due à la concentration importante des lignes équipotentielles au niveau de cet angle.

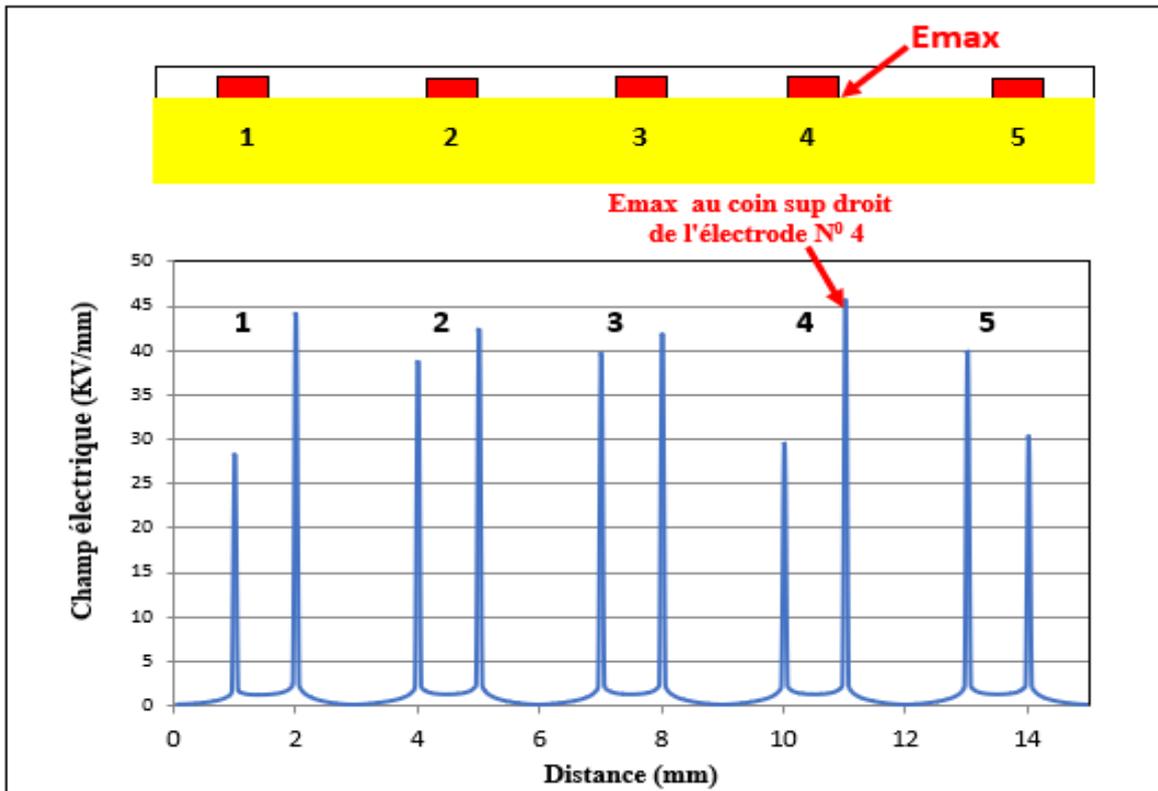


Figure IV.11 : Variation du champ électrique à la surface du support.

IV.4.4/ Champ électrique dans le volume du support :

On souhaite ici calculer la valeur du champ électrique maximal atteint dans le volume du support du convoyeur (réalisé en matériau FR4). Le champ électrique étant maximal au niveau de la quatrième électrode, on a tracé un chemin qui traverse toute les 2mm d'épaisseur du support du convoyeur, en partant de l'angle droit inférieur de l'électrode N°4 jusqu'à l'électrode inférieure portée à la masse. Le chemin utilisé est montré dans la **Figure IV.12**.

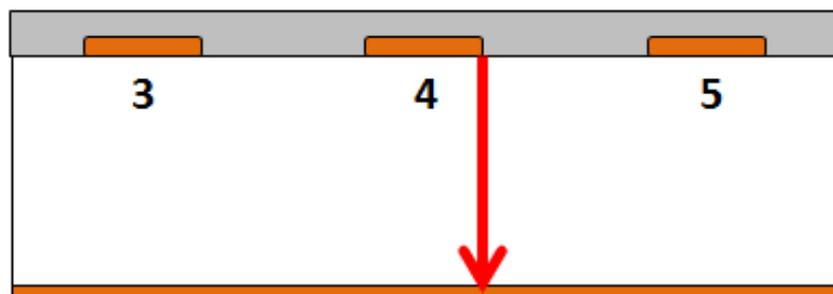


Figure IV.12 : Chemin utilisé pour le calcul du champ électrique dans le volume du support FR4 du convoyeur rotatif.

La variation du potentiel électrique le long de ce chemin est tracée dans la **Figure IV.13**. Elle montre bien que le potentiel électrique passe de +2000V au niveau de l'électrode supérieure, et décroît progressivement dans le volume du support jusqu'à s'annuler au niveau de l'électrode inférieure portée à la masse (0V).

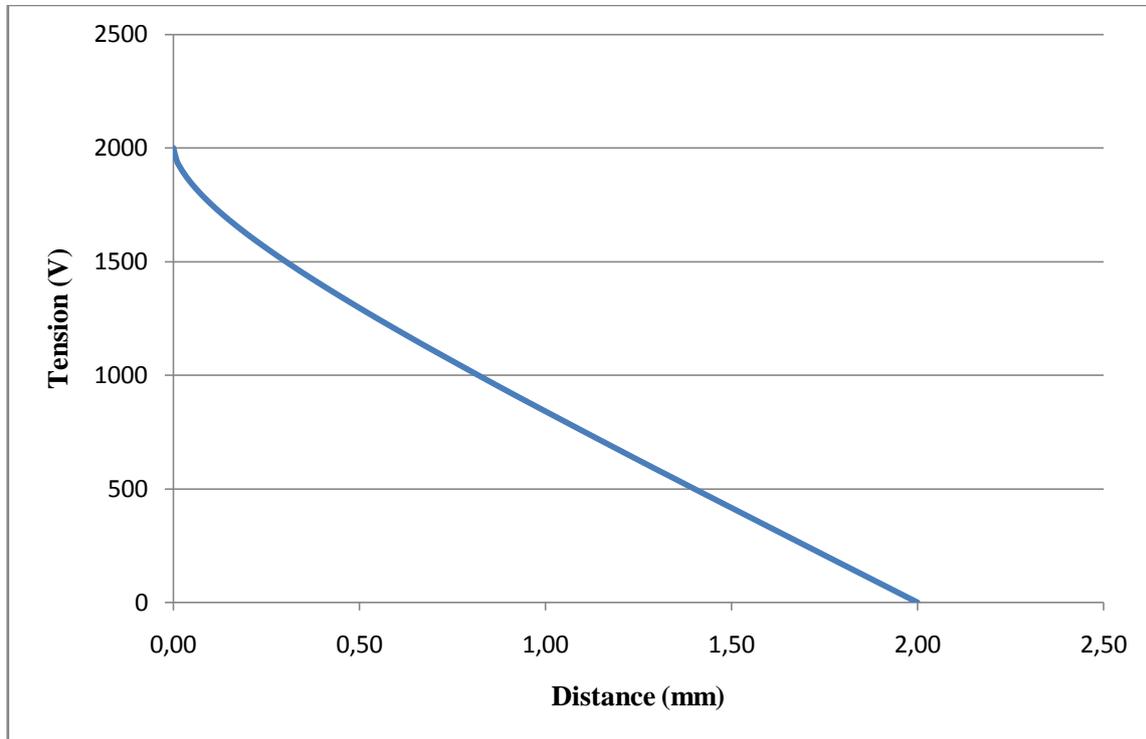


Figure IV.13 : Potentiel électrique des électrodes dans le volume du support.

La **Figure IV.14** montre la variation du champ électrique en fonction de la distance le long des 2mm d'épaisseur du support FR4. Le champ électrique atteint une valeur élevée de 45,78kV/mm en début du chemin mais décroît très rapidement au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'électrode supérieure jusqu'à presque s'annuler (0,83kV/mm) en fin du chemin au niveau de l'électrode inférieure portée à la masse. Cette large variation a été tracée dans une échelle logarithmique/linéaire afin d'avoir une meilleure visibilité.

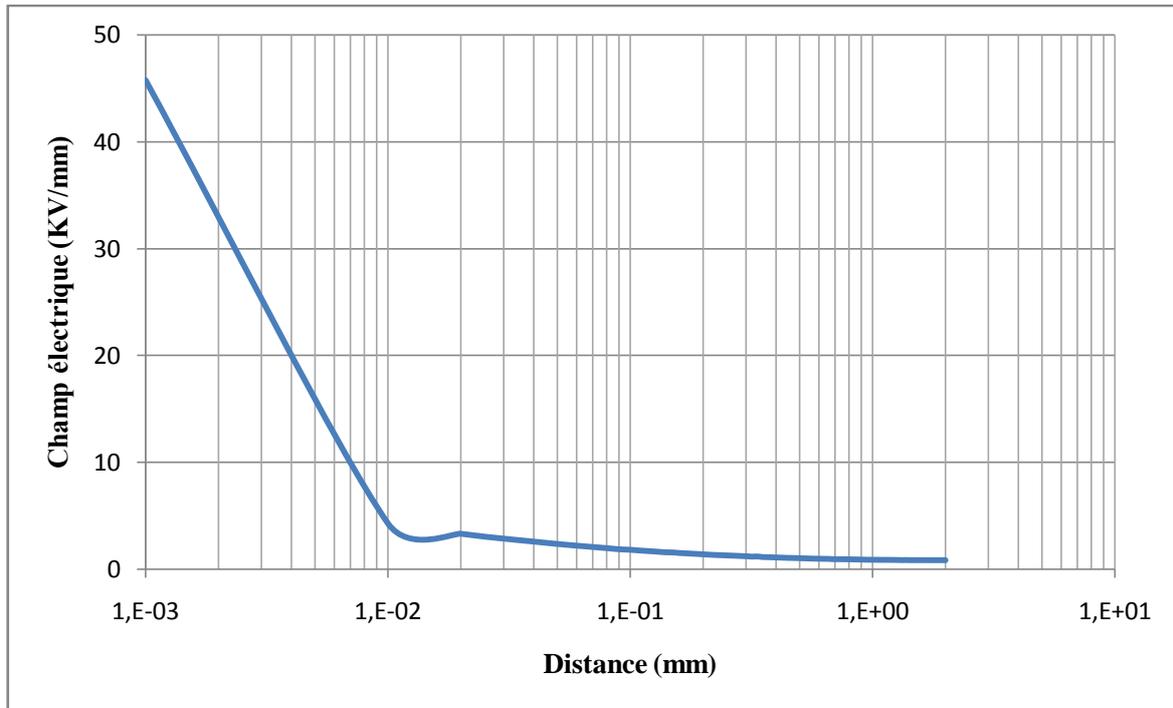


Figure IV.14 : Variation du champ électrique dans le volume du support.

Le tableau suivant récapitule les résultats précédents et donne la valeur maximale du champ électrique atteinte dans chaque cas :

	<i>Isolant en haut des électrodes</i>	<i>Support</i>	<i>Isolant en bas des électrodes</i>
<i>E max (kV/mm)</i>	30,69	45,78	40,56

Tableau IV.1 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant et dans le support du convoyeur.

IV.5/ Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les résultats obtenus par la simulation du convoyeur avec le logiciel FLUX 2D. Les résultats montrent que le champ électrique dans l'isolant est plus élevé au niveau des angles des électrodes. Le champ électrique a également été calculé dans le volume du support du convoyeur et atteint son maximum au voisinage des électrodes supérieures portées à 2kV et décroît progressivement au fur et à mesure qu'on se rapproche de l'électrode inférieure mise à la masse mais en moyenne, le champ électrique reste relativement faible dans le support.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons réalisé une étude de simulation du champ électrique dans un séparateur électrostatique rotatif utilisant la technique des ondes mobiles.

Nous avons fait un rappel sur les séparateurs électrostatiques rotatifs, ainsi que des généralités sur les convoyeurs à ondes mobiles.

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.

Les résultats obtenus de simulation montrent que le champ électrique est plus élevé dans les angles des électrodes à cause de l'effet de pointe. C'est dans cette zone qu'un claquage risque de survenir dans l'isolant qui recouvre la distance inter-électrodes.

Le champ électrique a également été calculé dans le volume du support du convoyeur. Il atteint son maximum au voisinage des électrodes supérieures portées à 2kV et décroît progressivement au fur et à mesure qu'on se rapproche de l'électrode inférieure mise à la masse mais en moyenne, le champ électrique reste relativement faible dans le support.

Ces résultats permettent d'avoir des données intéressantes pour tout travail d'optimisation du convoyeur rotatif, et ceci en fournissant des valeurs de référence pour une meilleure conception du convoyeur et un meilleur choix des matériaux isolants utilisés dans sa réalisation.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] D.M Taylor, and P.E Secker, *"Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements."*Baldock, UK: Research Studies Press, 1994.
- [2] S. Atroune, A. Tilmatine, R. Alkama, A. Samuila, and L. Dascalescu, *"Comparative experimental study of tribo-electric charging of two size-classes of granular plastics."*Part.Sci. &Technol, Vol.33, p.652-658, 2015
- [3] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, and V. Neamtu. *"Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes."*Part. Sci. &Technol., Vol. 16,pp. 25-42, 1998.
- [4] A. Antoniu, B. Tabti, M. Plopeanu and L. Dascalescu, *"Accelerated discharge of corona-charged non-woven fabrics."* IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 46, pp. 1188-1193,2010.
- [5] K. Senouci, A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, S. Das and L. Dascalescu, *"Multivariate statistical process control of electrostatic separation processes."* IEEE Trans. Ind. Appl, Vol. 45, pp. 1079 -1085, 2009.
- [6] L. Dascalescu, A. Mizuno, R. Tobazéon, et al. *"Charges and forces on conductive particles in roll-type corona-electrostatic separators."* IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 31, pp. 947–956, 1995.
- [7] P. Bérard. *"Etude du vent ionique produit par décharge couronne à pression atmosphérique pour le contrôle d'écoulement aérodynamique."*Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, 2008.
- [8] Govi, *"Quelques expériences sur l'induction électrostatique."* J. Phys. Theor. Appl,Vol. 4, pp.264-266, 1875.
- [9] G. Richard, A.R. Salama, K. Medles, C. Lubat, S. Touhami, and L. Dascalescu, *"Electrostatic Separation of two Types of Copper Wires from Electric Cable Wastes."*Proc. Electrostatics Joint Conference, 13-17 June 2016, West Lafayette, USA. (submitted to IEEE Trans Ind Appl.)
- [10] A. Iuga, A. Samuila, R. Morar, M. Bilici, and L. Dascalescu, *"Tribochargingtechniques for the electrostatic separation of granular plastics from waste electric and electronic equipment."* Part. Sci. & Technol, Vol. 34, pp. 45 – 54, 2016.

- [11]** Sara Messal "*Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire*" (page 33). Thèse Pour l'obtention du grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS UFR des sciences fondamentales et appliquées ,Université Poitiers 2016.
- [12]** Site internet : <http://www.hamos.com/infocenter/brochure.html#hamos/22>.
- [13]** 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.
- [14]** 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.
- [15]** Belgacem Abdelkader "Etude du déplacement et de la séparation des particules micronisées avec la technique des ondes mobiles" (page 15). Thèse Doctorat 3^{ème} cycle en Electrotechnique, Université Djilali Liabes . Sidi Bel Abbes .2020.
- [16]** Yahiaoui Ilies, Khechab Mohamed Lakhdar "*Simulation du champ électrostatique dans un convoyeur à ondes mobiles*" (page 15), PFE M2, Centre Universitaire Ain Temouchent 2020.
- [17]** Loucif Fatima Zohra, Maachou Mokhtaria Dounia "*Optimisation des paramètres géométriques d'un convoyeur à onde mobile biphasé*" (page 16), PFE M2, Centre Université Ain Temouchent 2020.
- [18]** Site internet :
<https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Flux2D>.

Résumé

Résumé :

L'objectif de ce travail est de faire une simulation avec le logiciel « Flux 2D » pour déterminer la valeur du champ électrique dans un convoyeur à ondes mobiles afin de pouvoir optimiser sa conception et prévenir tout risque de claquage électrique à sa surface ou dans son volume. Les résultats obtenus montrent que le champ électrique est plus élevé au niveau des angles des électrodes à cause de l'effet de pointe. Le champ électrique dans le volume du support du convoyeur reste relativement faible en moyenne mais atteint localement des valeurs élevées au voisinage des électrodes supérieures.

Mots clés : Champ électrique – Ondes mobiles - Flux2D – simulation – séparation électrostatique.

Abstract:

The aim of this work is to make a modeling with finite element software "Flux 2D" to determine the value of the electric field in a traveling wave conveyor in order to be able to optimize its design and prevent any risk of electrical breakdown on its surface or in its volume. The results obtained show that the electric field is higher at the edges of the electrodes due to the point effect. The average electric field in the volume of the conveyor support remains relatively low but reaches locally high values at the interface of the upper electrodes.

Key words: Electric field – Traveling waves - Flux2D – Modeling - electrostatic separation

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو إجراء محاكاة باستخدام برنامج "Flux 2D" لتحديد قيمة المجال الكهربائي في ناقل موجة متحركة، من أجل التمكن من تحسين تصميمه ومنع أي خطر من الإنهيار الكهربائي على سطحه أو في داخله . أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن المجال الكهربائي أعلى عند زوايا الأقطاب الكهربائية بسبب تأثير الشكل المدبب، يظل المجال الكهربائي في داخل الناقل ضعيفاً نسبياً في المتوسط ولكنه يصل محلياً إلى قيم عالية بالقرب من الأقطاب الكهربائية العلوية.

الكلمات المفتاحية : المجال الكهربائي - الموجات المتحركة - Flux2D - المحاكاة - التفرقة الإلكترونية