

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université de Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الإلكترونيات

Département d'Électrotechnique



Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande Électrique

Thème

Étude de simulation du champ électrique dans un séparateur électrostatique

Présenté par :

1) BOUROUIS Ali

2) BOUAZZA HAMADOUCHE Aymen

Devant le jury :

Dr AOUIMEUR Djillali

Dr BOUDJELLA Fatima Zohra

Pr. ZELMAT Samir

UAT.B.B (Ain Temouchent) Président

UAT.B.B (Ain Temouchent) Examinatrice

UAT.B.B (Ain Temouchent) Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la réussite et la force pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant Samir Zelmat, pour ses orientations précieuses, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire, ainsi que pour leurs remarques pertinentes.

Nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin, par leurs conseils, leur aide ou leur soutien moral.

Enfin, nous adressons nos remerciements à l'ensemble de nos enseignants qui ont contribué à notre formation scientifique et académique durant nos années d'études.

Nous remercions Dieu Tout-Puissant.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------	---

CHAPITRE I : GENERALITES SUR L'ELECTROSTATIQUE

I.1 INTRODUCTION	3
I.2 DEFINITION	3
I.3 LE CHAMP ELECTROSTATIQUE	3
I.3.1 CHAMP ELECTRIQUE	3
I.3.2 LOI DE COULOMB	4
I.3.3 CHAMP ELECTRIQUE UNIFORME	5
I.3.4 LIGNES DE CHAMP ELECTROSTATIQUE	5
I.3.5 MOMENT DIPOLAIRE	6
I.3.6 POLARISATION	6
I.3.7 PHENOMENE DE CHARGE ELECTROSTATIQUE	7
I.4 MECANISME DE LA CHARGE ELECTRIQUE	7
I.4.1 EFFET COURONNE	8
I.4.2 L'ELECTRISATION	8
I.5 CONCLUSION	11

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LE CONVOYEUR A ONDES MOBILES

II.1 INTRODUCTION	13
II.2 DEFINITION DU CONVOYEUR A ONDES MOBILES	13
II.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	14
II.4 TYPES DE CONVOYEURS	14
II.4.1 SELON LE NOMBRE DE PHASES	14
II.4.2 SELON LA GEOMETRIE DES ELECTRODES	16
II.5 APPLICATIONS	17
II.6 LIEN AVEC LA SEPARATION ELECTROSTATIQUE	17
II.7 SEPARATION ELECTROSTATIQUE	17
II.8 CONCLUSION	20

CHAPITRE III : PRESENTATION DU MODELE ETUDIE SOUS COMSOL

MULTIPHYSICS 5.3A	21
-------------------	----

III.1 INTRODUCTION	22
III.2 DESCRIPTION ET PARAMETRES GEOMETRIQUES DU MODELE	23
III.3 PRESENTATION DU LOGICIEL COMSOL MULTIPHYSICS 5.3A	25
III.4 PRESENTATION DES MODELES DE SIMULATION	26
III.4.1 CAS 1 : MODELE SANS PARTICULE	27
III.4.2 CAS 2 : MODELE AVEC PARTICULE EN CUIVRE	29
III.4.3 CAS 3 : MODELE AVEC PARTICULE EN PLASTIQUE	31
III.5 PARAMETRES PHYSIQUES	32
III.5.1 MATERIAUX ET DOMAINES SURFACIQUES	33
III.5.2 REGIONS LINEIQUES	34
III.6 CONCLUSION	35
 CHAPITRE IV:	 36
 ANALYSES DE L'ETUDE DE SIMULATION	 36
 IV.1 INTRODUCTION	 37
IV.2 ZONE ANALYSEE DU CONVOYEUR	37
IV.3 DISTRIBUTION DES LIGNES EQUIPOTENTIELLES	39
IV.4 CALCUL DU CHAMP ELECTRIQUE	43
IV.4.1 CONVOYEUR SANS PARTICULE (CAS N°1)	44
IV.4.2 CONVOYEUR AVEC PARTICULE CUIVRE (CAS N°2)	45
IV.4.3 CONVOYEUR AVEC PARTICULE PVC (CAS N°3)	47
IV.5 COMPARAISON DES RESULTATS	48
IV.5.1 LES VALEURS DU CHAMP ELECTRIQUE DANS LES ELECTRODES	48
IV.5.2 LES VALEURS DU CHAMP ELECTRIQUE DANS LES POINTS A, B, C, D	50
IV.6 CONCLUSION	54
 CONCLUSION GENERALE	 55
 CONCLUSION GENERALE	 56
 BIBLIOGRAPHIE	 57
 RESUME	 60

Liste des figures

CHAPITRE I :

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

CHAPITRE II :

Figure II.1 : Représentation schématique d'un convoyeur biphasé sous forme de deux peignes.	13
Figure II.2 : Schéma de convoyeur biphasé.	14
Figure II.3 : Schéma de convoyeur triphasé.	15
Figure II.4 : schéma de convoyeur à quatre phases.	15
Figure II.5 : Exemples des convoyeurs à configuration 2D d'électrodes.	16
Figure II.6 : Exemples des convoyeurs à configuration 3D d'électrodes.	16
Figure II.7 : Séparateur électrostatique haute tension.	18
Figure II.8 Séparateur électrostatique a chute libre.	19
Figure II.9 Représentation schématique du séparateur électrostatique.	19
Figure II.10 Schéma simplifié du principe de l'électro-séparation.	20

CHAPITRE III :

Figure III.1 : Présentation du convoyeur étudié.	23
Figure III.2 : Vue de coupe en 2D du convoyeur	24
Figure III.3 : Paramètres géométriques du modèle étudié.	25
Figure III.4 : Logo du logiciel COMSOL Multiphysics.	25
Figure III.5: Les étapes d'une étude dans COMSOL Multiphysics 5.3a.	26
Figure III.6 : Menu « Géométrie » du logiciel COMSOL 5.3a.	27
Figure III.7 : Géométrie 2D du modèle sans particule.	28

Figure III.8 : Vue globale sur le maillage du modèle sans particule avec un vue agrandie sur le maillage du coin d'une électrode	28
Figure III.9: Géométrie 2D du modèle avec particule cuivre	29
Figure III.10 : Vue agrandie sur le maillage de la particule cuivre.	30
Figure III.11 : Maillage fin sur le coin supérieur droit de la particule cuivre	30
Figure III.12 : Géométrie 2D du modèle avec particule plastique (PVC).	31
Figure III.13 : Vue agrandie sur le maillage de la particule plastique (PVC).	32
Figure III.14: Maillage fin sur le coin supérieur droit de la particule plastique.	32
Figure III.15: Paramètres créés dans le menu du logiciel COMSOL 5.3a	33
Figure III.16: Potentiel électrique affecté aux électrodes et à la particule de cuivre (cas N°2).	34

CHAPITRE IV:

Figure IV.1: Partie centrale du convoyeur considérée dans l'étude.	37
Figure IV.2 : Vue d'ensemble sur la répartition des lignes équipotentiell	38
Figure IV.3 : Illustration de l'effet de bord au niveau de l'extrémité du convoyeur.	38
Figure IV.4 : Potentiel électrique des sept électrodes de la partie centrale du convoyeur.	39
Figure IV.5 : Distribution des lignes équipotentiell	41
Figure IV.6 : Vue agrandie de la distribution des lignes équipotentiell	42
Figure IV.7 : Exemple d'un chemin tracé dans l'isolant passant par le haut des électrodes	43
Figure IV.8 : Position des points repère pour le calcul du champ électrique au niveau des pointes de la particule	44
Figure IV.9 : Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas 1).	45
Figure IV.10 : Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas 2).	46
Figure IV.11 : Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas 3).	47
Figure IV.12 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant au niveau des électrodes du convoyeur pour les trois cas étudiés.	50
Figure IV.13 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'air au niveau des coins de la particule pour les trois configurations.	52
Figure IV.14 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant Kapton au niveau des coins de la particule pour les trois cas étudiés.	53

Liste des tableaux

Tableau II.1 : les démontions de la géométriques du modèle étudié	24
Tableau III.1 : Matériaux et propriétés diélectriques affectés aux régions surfaciques du modèle.	33
Tableau IV.1 : Valeurs du champ électrique au niveau des points repères (cas_N°1).	45
Tableau IV.2 : Valeurs du champ électrique aux coins de la particule cuivre (cas_N°2).	46
Tableau IV.3 : Valeurs du champ électrique aux coins de la particule PVC (cas_N°3).	48
Tableau IV.4 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant au niveau du coin de l'électrode.	49

Introduction

Générale

Introduction générale

Introduction Générale

Le développement de technologies dédiées au tri des déchets d'équipements électriques et électroniques est motivé par la nécessité d'une production plus rentable et d'une gestion plus responsable de ces produits en fin de vie. Le recyclage des plastiques issus de ces déchets constitue par ailleurs une priorité de recherche à l'échelle mondiale.

Parmi les technologies susceptibles de faciliter la séparation des mélanges de matériaux conducteurs et non conducteurs, les systèmes de convoyeurs à ondes mobiles occupent une place importante. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail, dont l'objectif principal est d'analyser l'intensité du champ électrique dans un convoyeur à ondes mobiles biphasé pour trois configurations différentes pouvant se produire lors de son fonctionnement : un convoyeur sans particule, un convoyeur avec une particule de PVC (flottante) et un convoyeur avec une particule de cuivre (posée).

L'originalité de ce travail réside dans la comparaison de nos résultats de simulation, obtenus à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics 5.3a, avec ceux d'une étude antérieure réalisée sous Flux 2D. Cette démarche comparative permet d'évaluer la cohérence et la fiabilité des résultats obtenus par deux outils de simulation différents sur le même problème physique.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre présente les notions fondamentales de l'électrostatique. Le deuxième chapitre est consacré aux convoyeurs à ondes mobiles et à leurs différents types. Le troisième chapitre décrit le modèle étudié ainsi que sa mise en œuvre sous COMSOL Multiphysics 5.3a, en détaillant les étapes de construction du modèle, ses caractéristiques physiques (géométrie, maillage, conditions aux limites, paramètres physiques) ainsi que les résultats de simulation obtenus. Enfin, le quatrième chapitre est dédié à l'analyse et à la comparaison des résultats des trois configurations étudiées, ainsi qu'à leur confrontation avec les résultats de l'étude antérieure réalisée sous FLUX 2D.

Chapitre I

Généralités sur

l'électrostatique

I.1 Introduction

L'électrostatique est une branche fondamentale de la physique qui étudie les charges électriques au repos, les forces qu'elles exercent ainsi que les champs électriques qu'elles produisent. Elle constitue une base essentielle pour comprendre de nombreux phénomènes naturels et industriels, tels que l'attraction de particules légères, les décharges électrostatiques, la polarisation des matériaux et la séparation électrostatique des particules. Dans le cadre de ce travail, l'étude de l'électrostatique permet d'expliquer les mécanismes physiques intervenant dans le fonctionnement d'un convoyeur à ondes mobiles. Ce type de dispositif utilise un champ électrique contrôlé pour déplacer, orienter ou séparer des particules selon leurs propriétés électriques.

I.2 Définition

L'électrostatique se définit comme la branche de la physique qui s'intéresse à l'étude des charges électriques au repos et à l'ensemble des phénomènes et interactions qui en découlent. Cette discipline repose sur l'idée fondamentale que toute charge électrique, qu'elle soit positive ou négative, exerce une influence sur son environnement, influence qui se manifeste sous la forme d'un champ électrique immobile. Cette interaction est au cœur des forces électrostatiques, qui peuvent être attractives ou répulsives en fonction de la nature des charges impliquées. [1]

I.3 Le champ électrostatique

I.3.1 Champ électrique

Le champ électrique est une grandeur vectorielle fondamentale qui décrit l'influence d'une charge sur son environnement. Défini comme la force exercée sur une unité de charge positive, il existe indépendamment de toute charge d'essai, ce qui permet d'étudier les interactions dans l'espace. Toute charge génère un champ dont l'intensité dépend de sa valeur et diminue proportionnellement au carré de la distance. Pour une charge ponctuelle, ce champ présente une symétrie radiale : il est sortant pour une charge positive et rentrant pour une charge négative. Enfin, en présence de multiples sources, le champ total en un point est déterminé par le principe de superposition, correspondant à la somme vectorielle des champs individuels. [2]

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

$$E = k \cdot q / r^2 \dots\dots\dots (1)$$

Avec :

E: l'intensité de champ électrique

K: la constante de coulomb

q: la charge de particule (C)

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

I.3.2 Loi de Coulomb

La loi de Coulomb nous donne la possibilité de déterminer la force électrique entre deux charges et d'anticiper leur réaction face à d'autres charges. On l'emploie dans un grand nombre d'applications comme la réalisation de circuits électriques et l'évaluation de la charge électrique.

La loi de Coulomb permet de déterminer la force électrique agissant entre deux objets fixes et chargés. [3]

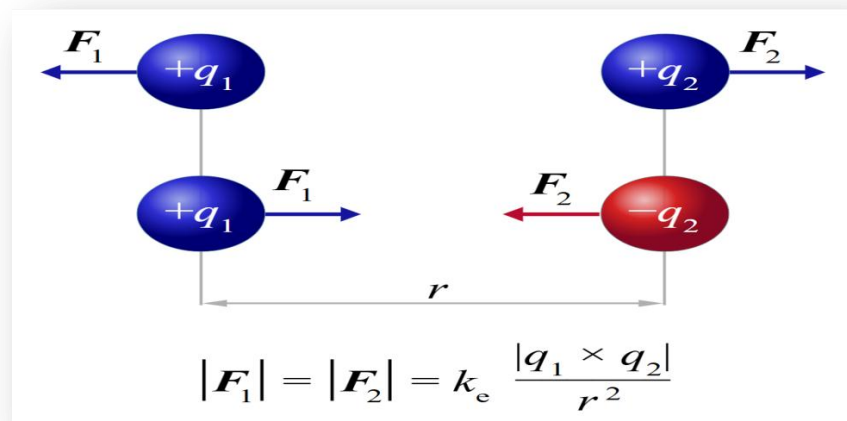


Figure I.1 : La loi de coulomb. [3]

I.3.3 Champ électrique uniforme

Le champ électrique uniforme est un cas particulier du champ électrostatique dans lequel le vecteur champ électrique conserve la même direction, le même sens et la même intensité en tout point d'une région donnée de l'espace. [4]

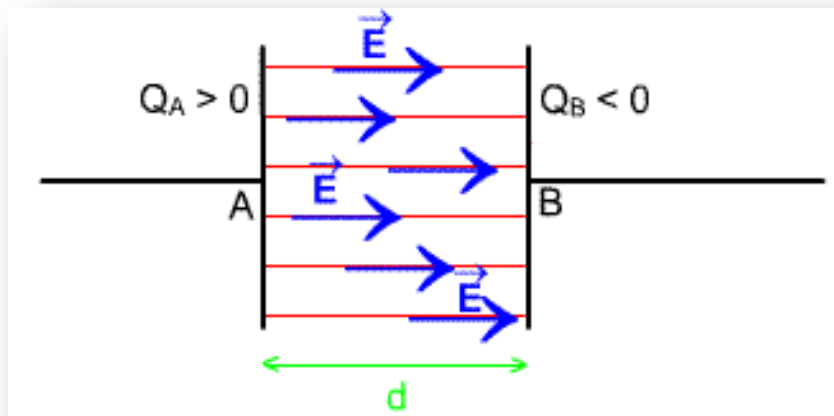


Figure I.2 : Exemple d'un champ uniforme.[5]

I.3.4 Lignes de champ électrostatique

Les lignes de champ électrique constituent une représentation graphique et intuitive du champ électrostatique, permettant de visualiser son comportement dans l'espace sans recourir uniquement aux équations mathématiques. Elles sont définies comme des courbes imaginaires dont la tangente en chaque point donne la direction du vecteur champ électrique en ce point. Par convention, ces lignes partent des charges positives et se dirigent vers les charges négatives, ce qui permet de représenter le sens du champ électrique de manière cohérente. [6]

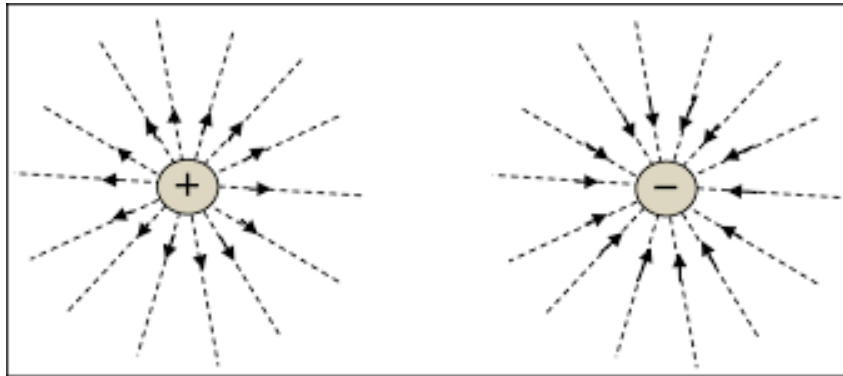


Figure I.3 : Les lignes de champ électrostatique d'une charge (+) et (-) [7]

I.3.5 Moment dipolaire

Le moment dipolaire électrique constitue une grandeur vectorielle fondamentale permettant de caractériser un système composé de deux charges électriques de même intensité mais de signes opposés, séparées par une distance donnée.

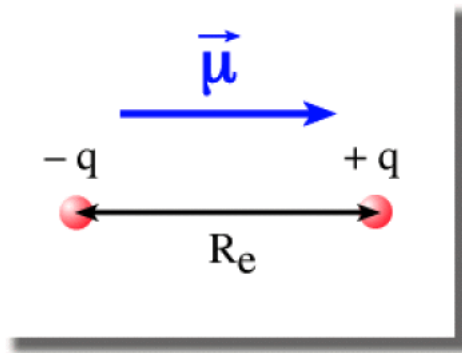


Figure I.4 : Moment dipolaire entre deux charges opposées[8]

Ce système, appelé dipôle électrique, représente l'une des configurations les plus importantes en électrostatique, car il constitue un modèle simplifié de nombreuses structures physiques et moléculaires. [9]

I.3.6 Polarisation

La polarisation électrique est un phénomène fondamental qui décrit la modification de la répartition des charges électriques au sein d'un matériau lorsqu'il est soumis à un champ électrique extérieur. Ce phénomène est particulièrement important dans les matériaux isolants,

appelés diélectriques, dans lesquels les charges ne sont pas libres de se déplacer sur de grandes distances, contrairement aux conducteurs. Sous l'effet d'un champ électrique appliqué, les charges positives et négatives présentes à l'échelle microscopique subissent de légers déplacements relatifs, ce qui entraîne la formation de dipôles électriques induits ou l'orientation des dipôles déjà existants. Ainsi, la polarisation se manifeste comme une réponse interne de la matière visant à s'opposer partiellement au champ extérieur appliqué. [10]

I.3.7 Phénomène de charge électrostatique

Le phénomène de charge électrostatique désigne l'accumulation ou la perte de charges électriques à la surface ou à l'intérieur d'un matériau, conduisant à un déséquilibre électrique entre différentes régions d'un système. Ce phénomène se manifeste principalement lorsque deux corps entrent en contact, frottement ou interaction indirecte, provoquant un transfert d'électrons d'un matériau à un autre selon leurs propriétés électriques et leur affinité électronique. Ainsi, un corps peut devenir chargé positivement lorsqu'il perd des électrons, ou négativement lorsqu'il en gagne. Ce déséquilibre de charges est à l'origine de nombreux effets observables dans la vie quotidienne, tels que l'attraction de petits objets légers, les décharges électriques entre deux surfaces ou encore les étincelles produites lors du contact avec un conducteur. [10]

I.4 Mécanisme de la charge électrique

Le mécanisme de la charge électrique regroupe l'ensemble des processus physiques par lesquels un corps acquiert, perd ou redistribue des charges électriques, conduisant à un état d'équilibre ou de déséquilibre électrostatique. Ce mécanisme repose essentiellement sur le comportement des électrons, qui sont les porteurs de charge les plus mobiles dans la matière. Selon la nature des matériaux et les conditions d'interaction, ces charges peuvent être transférées d'un corps à un autre ou simplement déplacées à l'intérieur d'un même système, sans création ni destruction de charges, conformément au principe de conservation de la charge électrique. Ce phénomène est à la base de toutes les manifestations d'électricité statique observées dans la nature et dans les applications technologiques. [11]

I.4.1 Effet couronne

L'effet couronne est un phénomène électrostatique qui se produit lorsqu'un conducteur soumis à une tension électrique élevée génère un champ électrique suffisamment intense pour ioniser localement le milieu environnant, généralement l'air. Ce phénomène apparaît principalement au voisinage des zones de forte courbure d'un conducteur, telles que les pointes, les arêtes ou les fils fins, où la densité de charge est particulièrement élevée. [12]

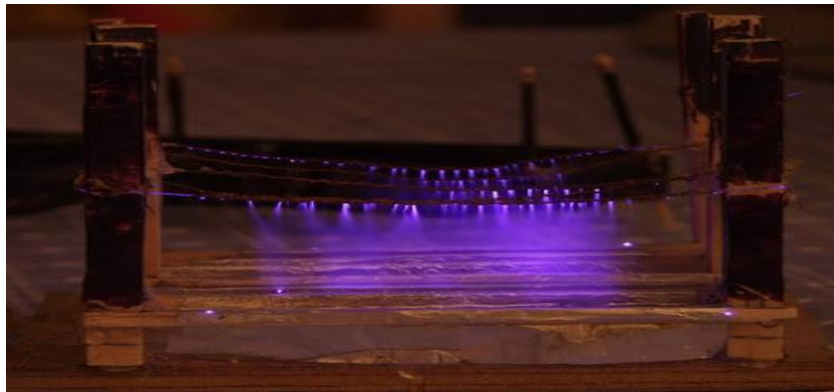


Figure I.5 : Effet de couronne. [13]

I.4.2 L'électrisation

L'électrisation désigne le processus par lequel un corps acquiert une charge électrique nette, positive ou négative, à la suite d'interactions avec un autre corps ou avec un champ électrique externe. Ce phénomène repose fondamentalement sur le transfert ou la redistribution des électrons entre les matériaux, sans modification du nombre total de charges dans le système global, ce qui respecte le principe de conservation de la charge électrique. [14]

I.4.2.1 Par frottement

Le frottement augmente considérablement le nombre de points de contact microscopiques entre les surfaces, ce qui favorise les échanges d'électrons. Même si les surfaces semblent lisses à l'œil nu, elles présentent en réalité des irrégularités qui multiplient les zones d'interaction. [14]

En cette expérience on frotte une tige en verre avec un tissu en laine. On approche alors la tige de petits morceaux de papier. Ces derniers sont alors attirés par la tige. [15]

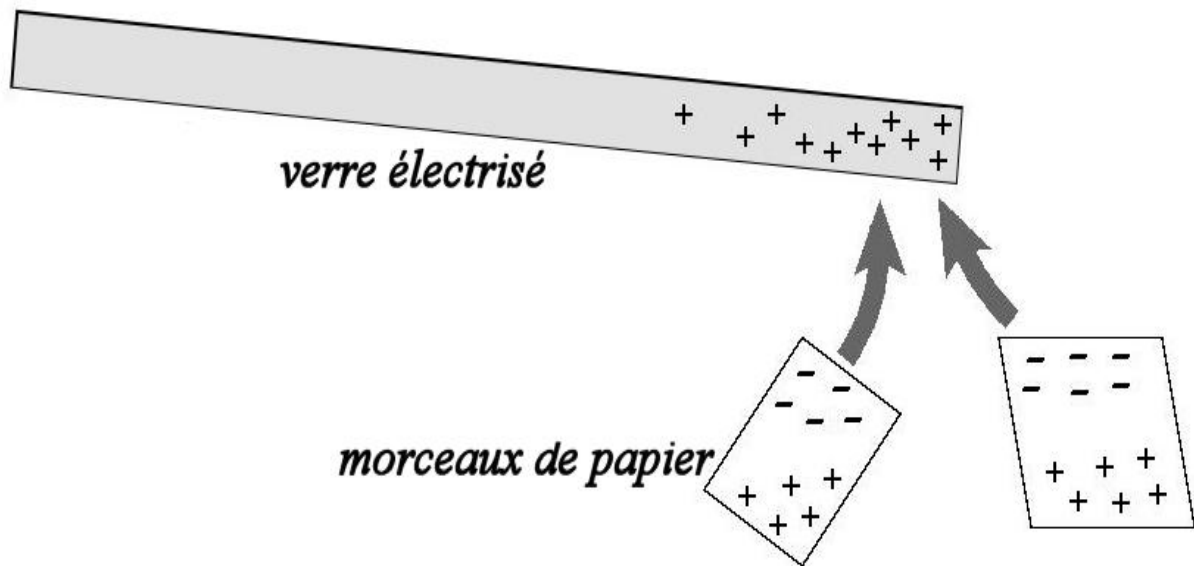


Figure I.6 : Electrification par frottement. [15]

I.4.2.2 Par contact

L'électrification par contact est un processus fondamental de l'électrostatique qui se produit lorsqu'un corps chargé entre en contact direct avec un autre corps initialement neutre ou présentant une charge différente. Lors de ce contact, il se produit un transfert de charges électriques, principalement des électrons, entre les deux matériaux afin de tendre vers un état d'équilibre électrostatique. [16]

Dans ces expériences ce sont toujours les électrons qui se déplacent parce qu'ils sont légers et moins liés au noyau que les nucléons chargés positivement. On approche d'un pendule électrique (petite boule suspendue à un fil isolant) un bâton d'ébonite chargé négativement. [17]

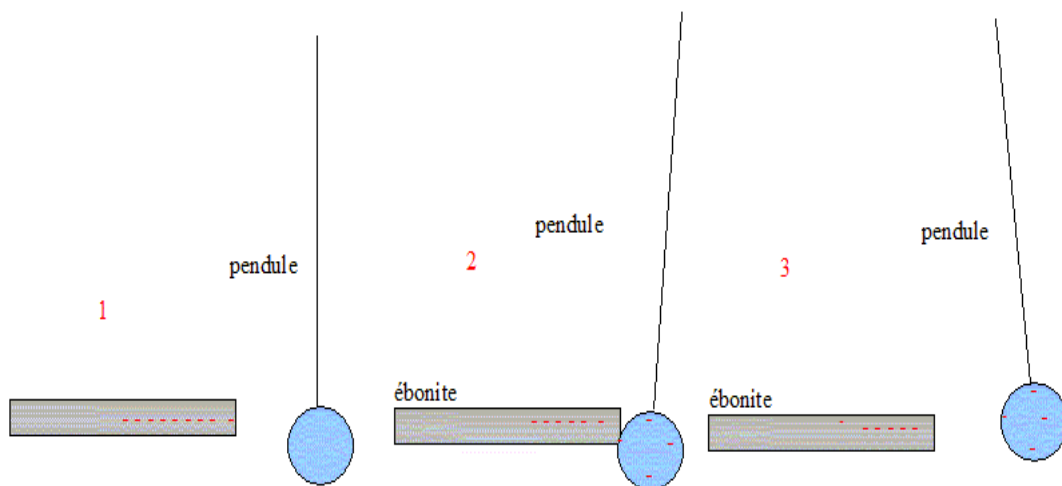


Figure I.7: Electrification par contact [17]

I.4.2.3 Par influence

Un électroscope à feuilles se compose d'une tige métallique qui soutient deux feuilles étroites et extrêmement minces en or ou en aluminium. L'électroscope est contenu dans une enceinte transparente et isolante. Lorsque l'on s'approche d'une baguette électrisée, les feuilles de l'électroscope se déploient. Si on retire la baguette de l'électroscope, les feuilles se détachent. [18]

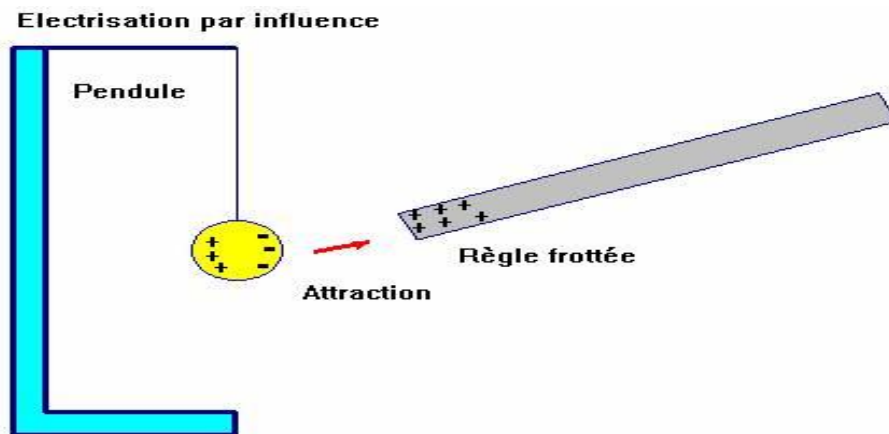


Figure I.8 : Electrification par influence. [18]

I.5 Conclusion

L'étude des phénomènes électrostatiques présentée dans ce chapitre permet de mettre en évidence l'importance fondamentale des charges électriques au repos et des interactions qu'elles génèrent dans différents milieux. À travers l'analyse des notions de champ électrique, de loi de Coulomb, de champ uniforme, de lignes de champ, de potentiel électrique, ainsi que des phénomènes de dipôle et de polarisation, il apparaît clairement que l'électrostatique constitue un cadre théorique cohérent et structuré permettant de décrire avec précision les interactions entre charges et la manière dont elles influencent leur environnement. Ces concepts fondamentaux offrent une base essentielle pour comprendre non seulement les phénomènes naturels liés à l'électricité statique, mais également un grand nombre d'applications technologiques modernes reposant sur le contrôle et la manipulation des charges électriques.

L'examen des mécanismes de charge électrique, notamment l'effet couronne, l'électrisation par frottement, par contact et par influence, montre que la production de charges électriques peut résulter de processus variés, tous basés sur le transfert ou la redistribution des électrons. Ces mécanismes illustrent la diversité des interactions possibles entre les matériaux et les champs électriques, ainsi que l'influence déterminante des propriétés physiques et géométriques des corps impliqués. De plus, l'étude de l'interaction champ-particule met en évidence la complexité du comportement des particules conductrices et isolantes lorsqu'elles sont soumises à un champ électrique, en soulignant l'importance de la polarisation, de l'orientation et de la nature du matériau dans la réponse globale du système.

Chapitre II

Généralités sur le

convoyeur à ondes

mobile

Chapitre II Généralités sur le convoyeur à ondes mobiles

II.1 Introduction

Le développement constant de l'industrie incite les fabricants à investir dans des technologies avancées afin d'optimiser les performances et de diminuer les coûts d'exploitation. Parmi les systèmes innovants utilisés dans ce domaine, les convoyeurs à ondes mobiles (COM) jouent un rôle essentiel dans le déplacement des matériaux isolants micronisés. Ces dispositifs sont constitués d'électrodes parallèles alimentées par des tensions alternatives déphasées, organisées généralement en deux, trois ou quatre phases. Ce fonctionnement permet de créer une onde mobile assurant le transport des particules de manière efficace, tout en limitant le contact mécanique et l'usure des équipements industriels.

II.2 Définition du convoyeur à ondes mobiles

Le convoyeur à ondes mobiles (COM) est un dispositif électrostatique utilisé pour transporter ou déplacer des particules solides, liquides ou des matériaux isolants micronisés sans contact mécanique direct. Son principe de fonctionnement repose sur la création d'une onde électrique mobile générée par un ensemble d'électrodes parallèles alimentées par des tensions alternatives déphasées. Cette onde produit des forces électrostatiques capables d'entraîner les particules le long de la surface du convoyeur. Les COM sont particulièrement utilisés dans les domaines industriels nécessitant une manipulation précise, propre et sans usure mécanique des matériaux. [19]

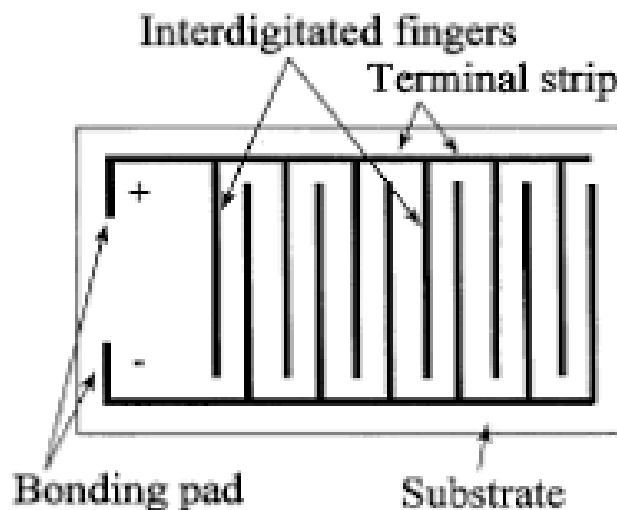


Figure II.1 : Représentation schématique d'un convoyeur biphasé sous forme de deux peignes [20]

Chapitre II Généralités sur le convoyeur à ondes mobiles

II.3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du convoyeur à ondes mobiles repose sur la génération d'un champ électrique progressif. Les électrodes sont alimentées par des tensions alternatives déphasées entre elles. Cette alimentation produit une onde mobile qui se propage à la surface du convoyeur. Lorsqu'une particule isolante ou faiblement conductrice est placée sur cette surface, elle subit des forces électrostatiques qui provoquent son déplacement dans le sens de propagation de l'onde [21]. La vitesse de déplacement dépend de plusieurs paramètres :

- la fréquence d'alimentation ;
- l'amplitude de la tension appliquée ;
- le nombre de phases ;
- la nature des particules transportées.

II.4 Types de convoyeurs

II.4.1 Selon le nombre de phases

Les convoyeurs à ondes mobiles peuvent être classés selon le nombre de phases utilisées pour alimenter les électrodes :

- **Convoyeur biphasé** : utilise deux tensions alternatives déphasées de 180° .

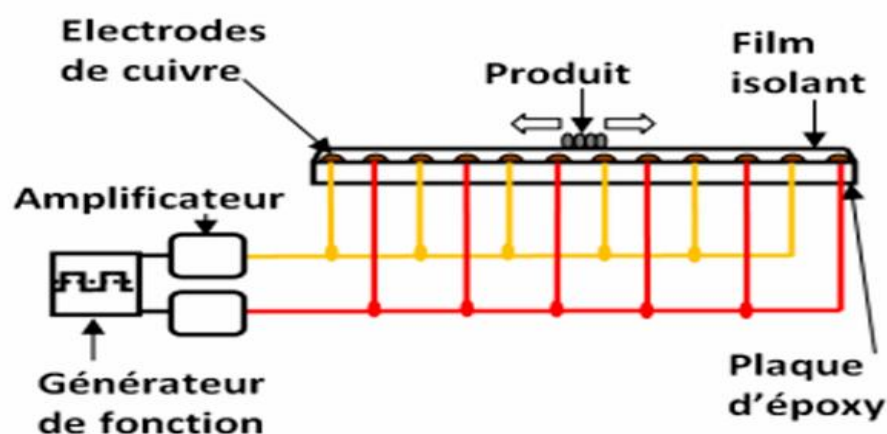


Figure II.2 : Schéma de convoyeur biphasé [35]

Chapitre II Généralités sur le convoyeur à ondes mobiles

- **Convoyeur triphasé** : fonctionne avec trois tensions déphasées de 120° , assurant une onde plus régulière.

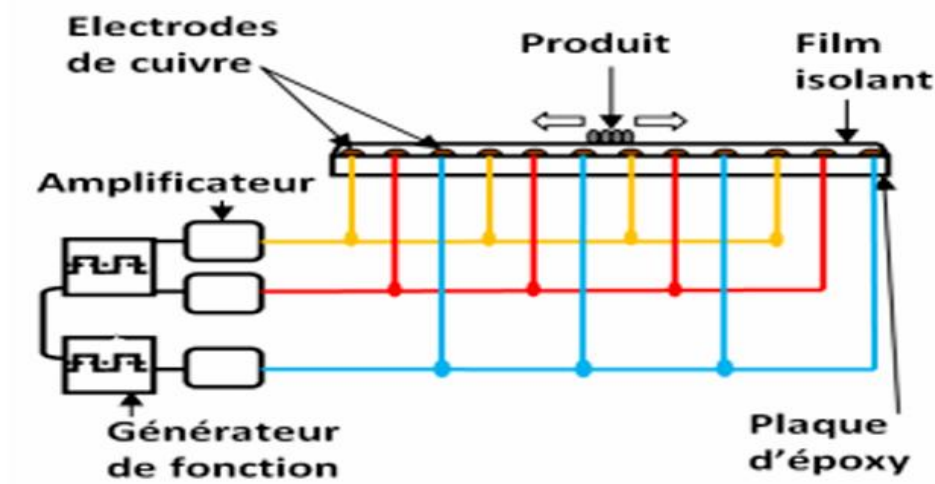


Figure II.3 : Schéma de convoyeur triphasé [35]

- **Convoyeur tétraphasé** : utilise quatre phases pour améliorer la stabilité du transport et la précision du mouvement.

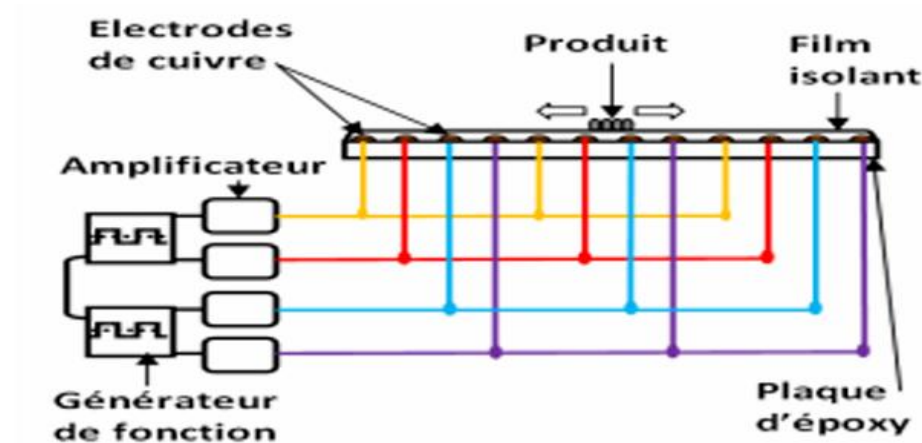


Figure II.4 : schéma de convoyeur à quatre phases [35]

L'augmentation du nombre de phases permet généralement d'obtenir une meilleure continuité de l'onde électrique et une amélioration du déplacement des particules. [22]

Chapitre II Généralités sur le convoyeur à ondes mobiles

II.4.2 Selon la géométrie des électrodes

Les convoyeurs peuvent avoir des configurations 2D ou 3D d'électrodes. Les électrodes 2D sont planaires et fabriquées en utilisant des procédés de photolithographie et métallisation conventionnels. Le champ créé affecte principalement les particules proches de la surface.. [23]

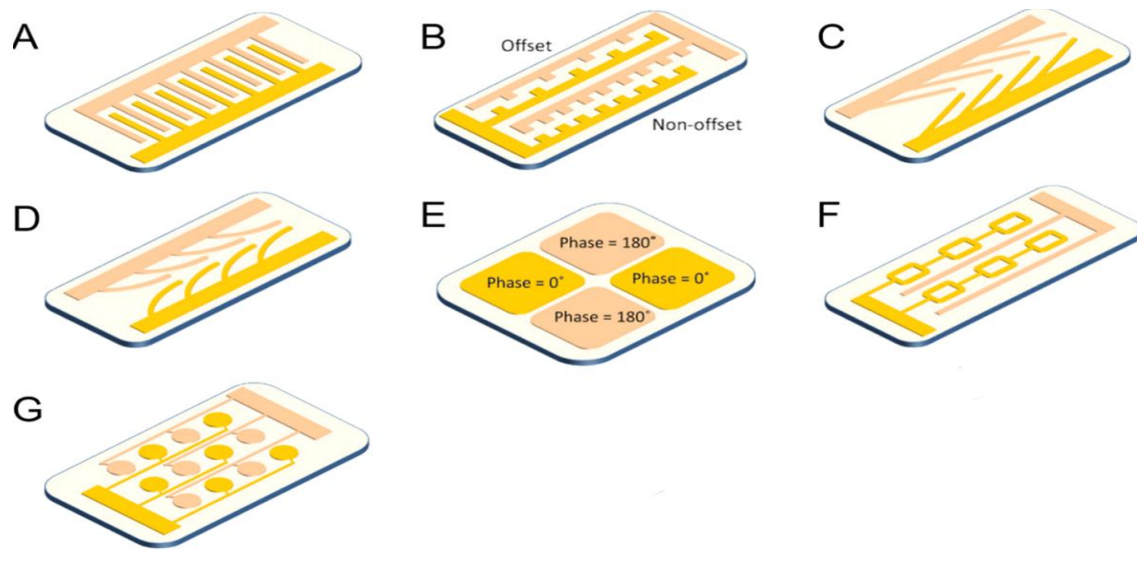


Figure II.5: Exemples des convoyeurs à configuration 2D d'électrodes.[24]

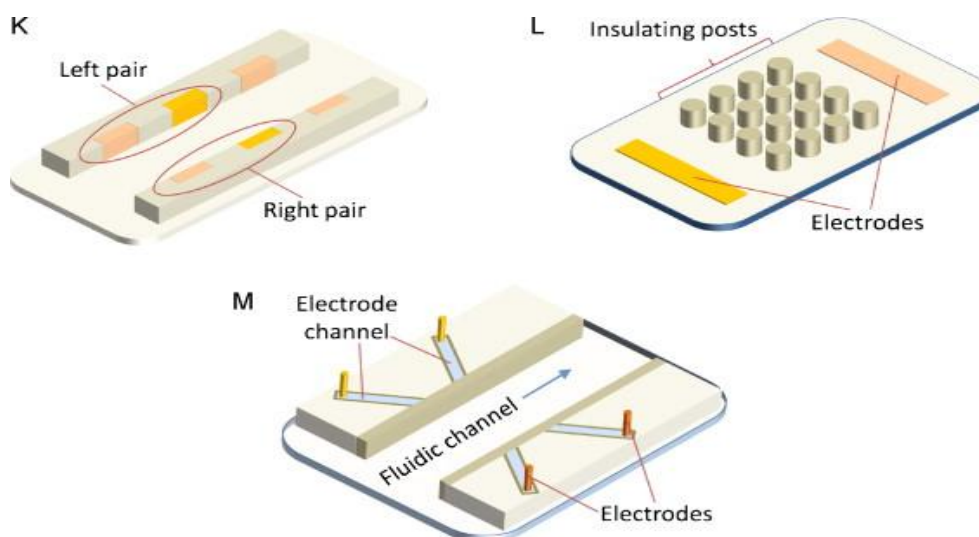


Figure II.6 : Exemples des convoyeurs à configuration 3D d'électrodes [24]

Chapitre II Généralités sur le convoyeur à ondes mobiles

II.5 Applications

Les convoyeurs à ondes mobiles sont utilisés dans plusieurs secteurs industriels et scientifiques grâce à leur capacité de transport sans contact mécanique. Parmi leurs principales applications :

- le transport des poudres fines et matériaux isolants ;
- les systèmes de tri électrostatique ;
- l'industrie électronique ;
- les technologies de microfabrication ;
- les procédés pharmaceutiques et alimentaires ;
- les systèmes de manipulation de particules dans les laboratoires.

Ces systèmes sont particulièrement appréciés pour leur précision et leur faible niveau d'usure mécanique. [25]

II.6 Lien avec la séparation électrostatique

Le convoyeur à ondes mobiles est directement lié à la séparation électrostatique, car les deux systèmes utilisent les forces électriques pour agir sur les particules. La séparation repose sur les propriétés électriques des matériaux comme la conductivité et la permittivité. Le convoyeur permet d'optimiser le déplacement des particules durant ce processus. [26]

II.7 Séparation électrostatique

L'industrie du recyclage des déchets utilise de plus en plus la méthode de séparation électrostatique pour trier les métaux et les matériaux non conducteurs présents dans un mélange granulaire. Lorsque les particules sont insérées dans les séparateurs électrostatiques, elles gagnent une charge électrique et se comportent de manière distincte en fonction de leurs caractéristiques conductrices ou isolantes. On note également l'utilisation de la technologie à ondes mobiles pour le classement des particules micronisées dans un environnement liquide ou aérien. Cette technique, qui repose sur l'effet de la force diélectrique, a démontré son efficacité dans divers domaines d'application. Dans le passé, la société américaine CARPCO Inc a été pionnière dans l'application réussie de l'électro-séparation PVC-Cuivre à cylindre rotatif par le biais de la décharge couronne. L'utilisation des technologies de séparation

Chapitre II Généralités sur le convoyeur à ondes mobiles

électrostatiques est répandue dans le recyclage des résidus industriels et la purification de produits minéraux. Les champs électriques sont particulièrement performants pour la séparation des mélanges de matériaux conducteurs et isolants issus des déchets d'équipements électriques (DEEE). On peut constater la diversité des équipements destinés à la séparation de mélanges granulaires en consultant les nombreuses publications techniques et scientifiques des deux dernières décennies.[27]



Figure II.7 : Séparateur électrostatique haute tension. [28]

Selon le même principe, il existe plusieurs modèles de séparation ; nous en présentons trois à titre d'exemples, comme indiqué dans le Figure II.9, Figure II.10 et Figure II.11.

Chapitre II Généralités sur le convoyeur à ondes mobiles

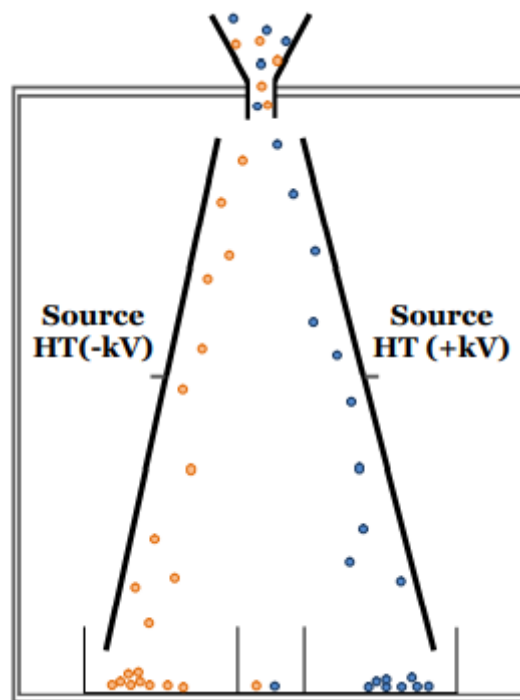


Figure II.8 Séparateur électrostatique a chute libre. [29]

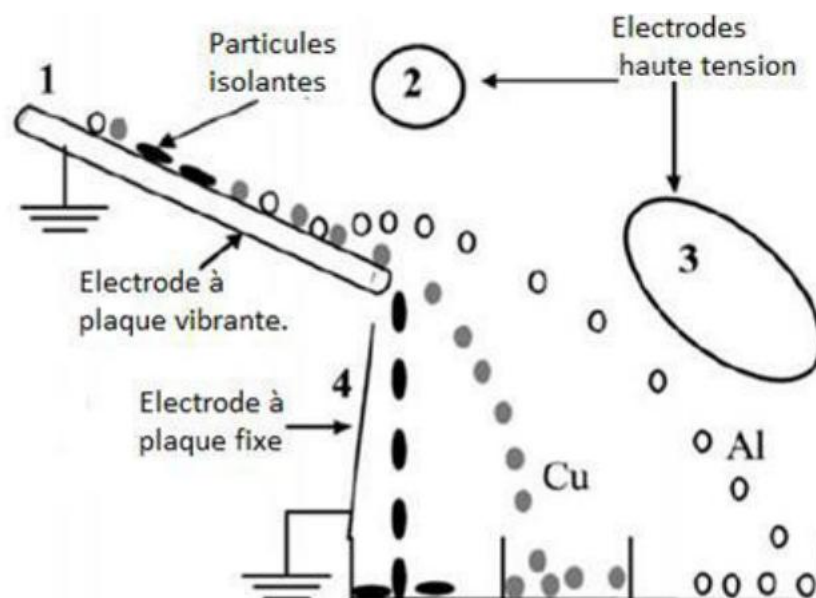


Figure II.9 Représentation schématique du séparateur électrostatique. [30]

- (1) Plaque vibrante métallique reliée à la terre ;
- (2) Electrode cylindrique reliée à la haute tension ;

Chapitre II Généralités sur le convoyeur à ondes mobiles

(3) Electrode elliptique reliée à la haute tension ;

(4) Electrode plaque reliée à la terre

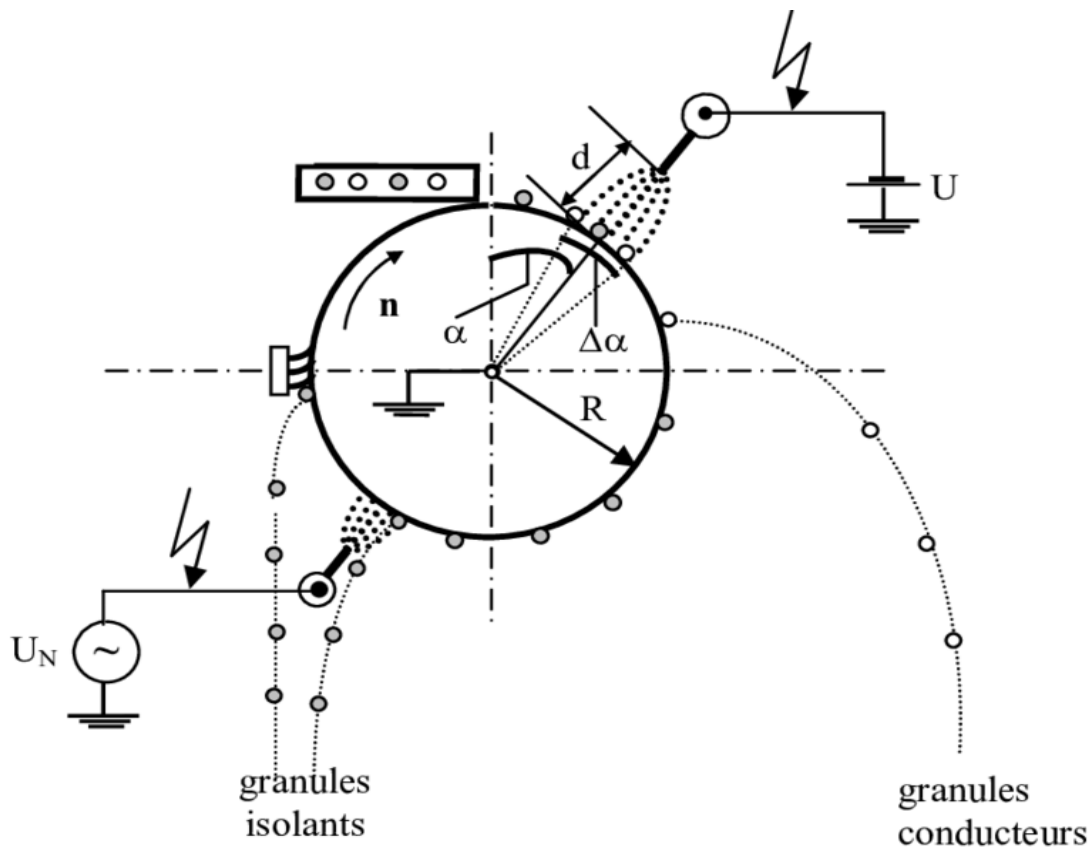


Figure II.10 Schéma simplifié du principe de l'électro-séparation. [31]

II.8 Conclusion

Le convoyeur à ondes mobiles est une technologie moderne basée sur les forces électrostatiques permettant le transport sans contact mécanique. Il améliore la précision du transport et réduit l'usure des systèmes industriels, ce qui le rend très utilisé dans les applications industrielles.

Chapitre III

Présentation du

modèle étudié sous

COMSOL

Multiphysics 5.3a

III.1 Introduction

Le développement des techniques de transport électrostatique a permis l'émergence de nouveaux systèmes capables d'assurer le déplacement de particules sans contact mécanique direct. Parmi ces technologies, le convoyeur à ondes mobiles (COM) constitue un dispositif électrostatique innovant, particulièrement adapté aux domaines industriels nécessitant une manipulation précise et propre des matériaux, tels que le transport de poudres fines et les procédés de tri sélectif.

Dans le cadre de ce travail, le dispositif étudié est appliqué à la séparation électrostatique de mélanges granulaires composés de particules de cuivre (conductrices) et de plastique PVC (isolantes). L'efficacité d'un tel procédé repose fondamentalement sur la distribution des forces électrostatiques, elle-même directement liée à la topologie du champ électrique à la surface du convoyeur. Une analyse approfondie du comportement électrique du COM s'avère donc indispensable pour optimiser ses performances de séparation.

Pour ce faire, nous avons recours à la simulation numérique par éléments finis, qui représente une démarche incontournable pour analyser finement la distribution du potentiel et l'évolution spatiale du champ électrique. Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation bidimensionnelle (2D) d'un convoyeur à ondes mobiles biphasé, réalisée à l'aide du logiciel **COMSOL Multiphysics 5.3a**. Cette modélisation s'inscrit dans une démarche comparative avec une étude antérieure conduite sous **Flux 2D [34]**, afin d'évaluer la cohérence des résultats obtenus par ces deux outils de simulation distincts sur le même dispositif physique.

Le but principal de notre étude est d'évaluer l'influence de la nature de la particule déposée sur la répartition et l'intensité du champ électrique à la surface active du convoyeur. Notre investigation numérique porte sur trois configurations :

- **Cas 1** : Convoyeur à vide, sans aucune particule déposée sur sa surface.
- **Cas 2** : Particule conductrice en cuivre déposée à la surface du convoyeur.
- **Cas 3** : Particule isolante en plastique (PVC) déposée à la surface du convoyeur.

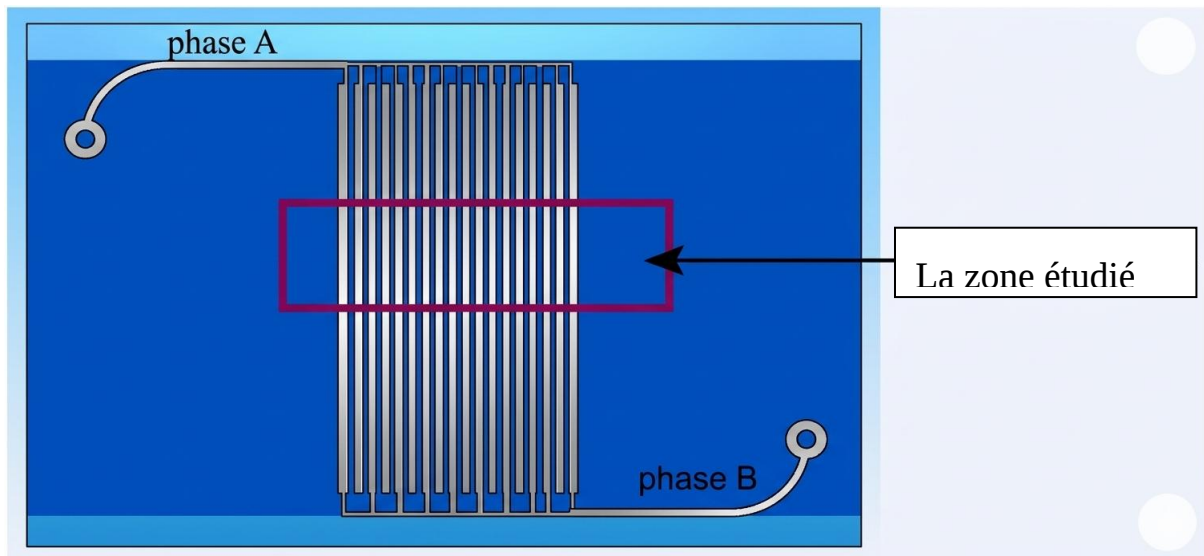


Figure III.1 : Présentation du convoyeur étudié.

Les résultats de simulation obtenus pour chaque configuration permettront d'une part de comparer l'impact de chaque type de matériau sur la distorsion des lignes de champ électrique, et d'autre part de confronter ces résultats à ceux de l'étude antérieure réalisée sous Flux 2D, afin d'en valider la fiabilité et d'en tirer les conclusions nécessaires pour le procédé de tri.

III.2 Description et paramètres géométriques du modèle

Le système global considéré dans notre étude est schématisé dans la **Figure III.1**, qui met en évidence la zone d'intérêt géométrique particulièrement ciblée pour les simulations numériques. Le convoyeur étudié est de type biphasé. Ses Électrodes se présentent sous la forme de deux peignes inter-digités (imbriqués) et reliés à deux sources de tension alternatives de forme rectangulaire, présentant un déphasage parfait de 180° . Les amplitudes de ces tensions sont fixées à $\pm 2\text{kV}$ (soit $+2\text{kV}$ pour la Phase 1 et -2kV pour la Phase 2).

Pour mener à bien la simulation sur **COMSOL Multiphysics 5.3a**, une coupe bidimensionnelle (2D) du dispositif a été définie comme modèle géométrique. Ce modèle, illustré par la vue en coupe de la **Figure III.2**, est constitué de 18 électrodes en cuivre rectangulaires, déposées sur un support isolant en FR4 d'une épaisseur de 2mm. Afin de prévenir tout phénomène de claquage diélectrique entre les électrodes successives soumises à

des potentiels opposés, l'ensemble de la structure est recouvert et protégé par un film isolant en KAPTON d'une épaisseur de 100 μ m.

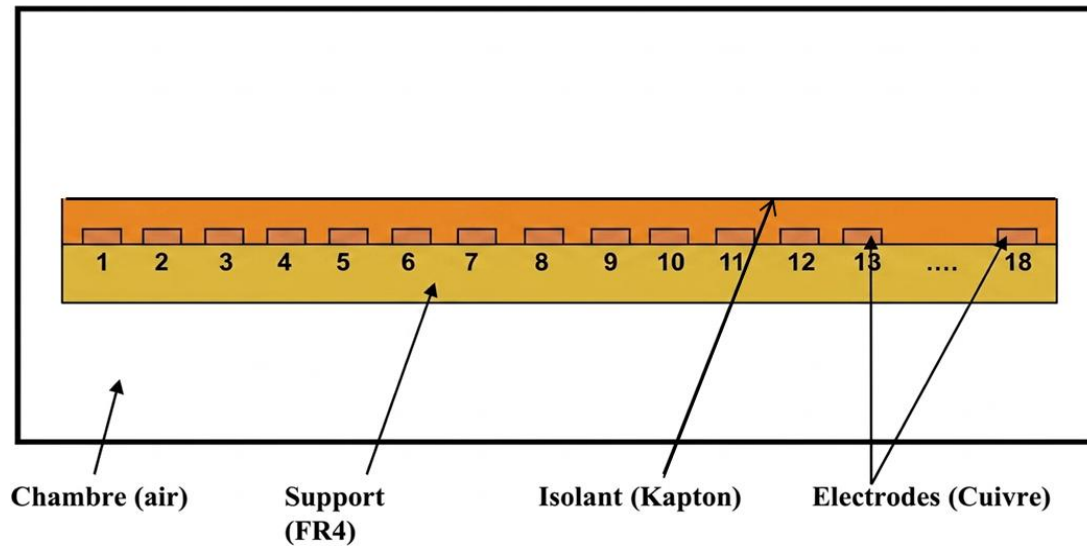


Figure III.2 : Vue de coupe en 2D du convoyeur

Les paramètres géométriques précis implémentés dans le sous-programme de calcul sont illustrés dans la **Figure III.3** et normalisés selon les valeurs suivantes :

Symbole	Description du paramètre	Valeur nominale
Ch	Chambre isolante (milieu ambiant constitué d'air)	-
X	Longueur d'une électrode en cuivre	1mm
Y	Hauteur (épaisseur) d'une électrode en cuivre	35 μ m
E	Distance inter-électrodes (espace entre deux électrodes successives)	2mm
I	Épaisseur du film isolant de protection (Kapton)	100 μ m
S	Épaisseur du substrat/support (FR4)	2mm

Tableau II.1 : valeurs des paramètres géométriques du convoyeur

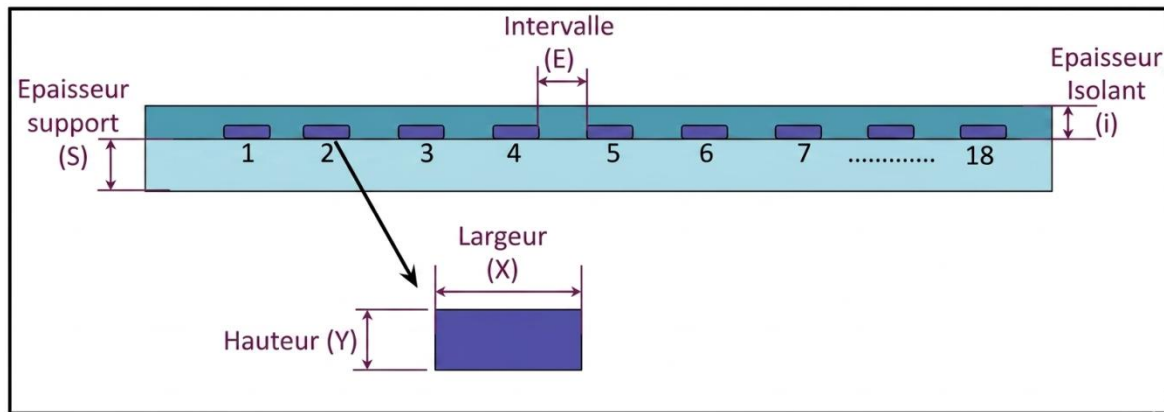


Figure III.3 : Paramètres géométriques du modèle étudié.

III.3 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics 5.3a

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis, dédié à la modélisation et à l'analyse des phénomènes multiphysiques. Développé par la société COMSOL AB, il permet de coupler plusieurs domaines physiques tels que l'électrostatique, la thermique, la mécanique et l'électromagnétisme au sein d'un même environnement de simulation.



Figure III.4 : Logo du logiciel COMSOL Multiphysics. [32]

Le logiciel offre une interface conviviale et flexible, facilitant la création de modèles géométriques, l'attribution des matériaux, la définition des conditions aux limites ainsi que la résolution numérique des équations physiques. La version 5.3a de COMSOL introduit des

améliorations significatives en termes de performance, de précision des solveurs et d'outils de post-traitement, permettant une visualisation avancée des résultats.

Aujourd'hui, COMSOL Multiphysics est largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie et de la recherche scientifique, grâce à sa capacité à simuler des systèmes complexes et à optimiser les conceptions. Il constitue une référence internationale pour l'analyse multiphysique et continue d'évoluer grâce aux contributions de la communauté scientifique et industrielle. [32]

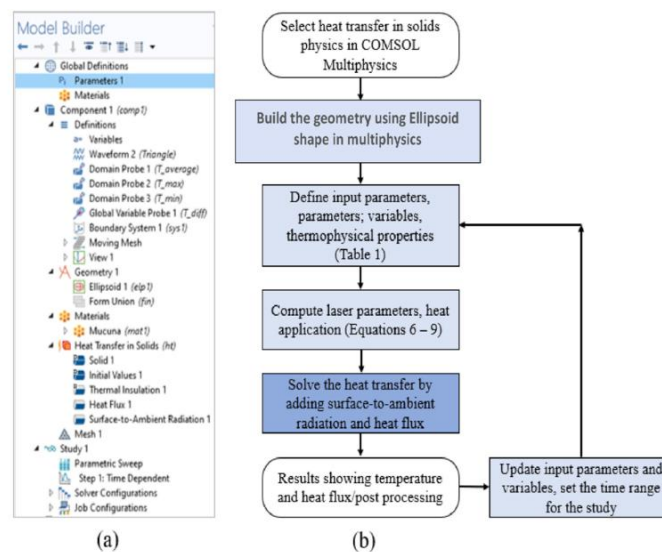


Figure III.5: Les étapes d'une étude dans COMSOL Multiphysics 5.3a. [33]

III.4 Présentation des modèles de simulation

Dans cette étude, le convoyeur à ondes mobiles est modélisé sous COMSOL Multiphysics 5.3a en approche bidimensionnelle (2D). Le système étudié est un convoyeur biphasé constitué d'électrodes imbriquées déposées sur un substrat isolant. Les électrodes, alimentées par des tensions alternatives déphasées, génèrent une onde électrique mobile responsable du déplacement des particules par forces électrostatiques. Le domaine de simulation comprend les électrodes, le substrat isolant et l'air environnant.

Trois modèles ont été analysés :

- un modèle sans particule servant de référence pour étudier la distribution du potentiel et du champ électrique,

- un modèle avec une particule conductrice (cuivre) pour observer la déformation du champ,
- un modèle avec une particule isolante (plastique) afin d'évaluer l'effet des propriétés diélectriques.

Cette approche permet de comparer l'influence de la nature des particules sur le comportement électrostatique du système.

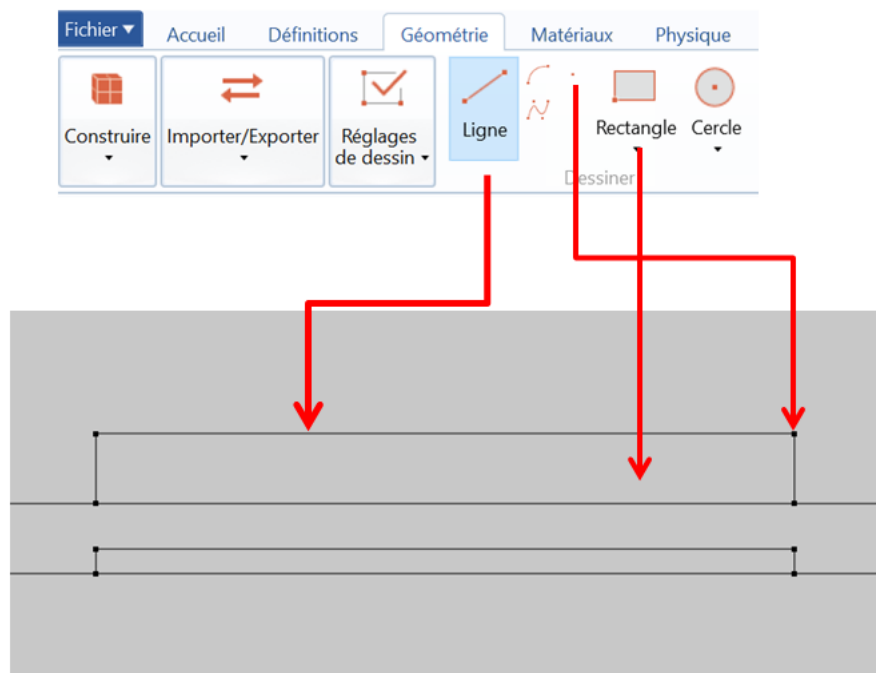


Figure III.6 : Menu « Géométrie » du logiciel COMSOL 5.3a.

III.4.1 Cas 1 : Modèle sans particule

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

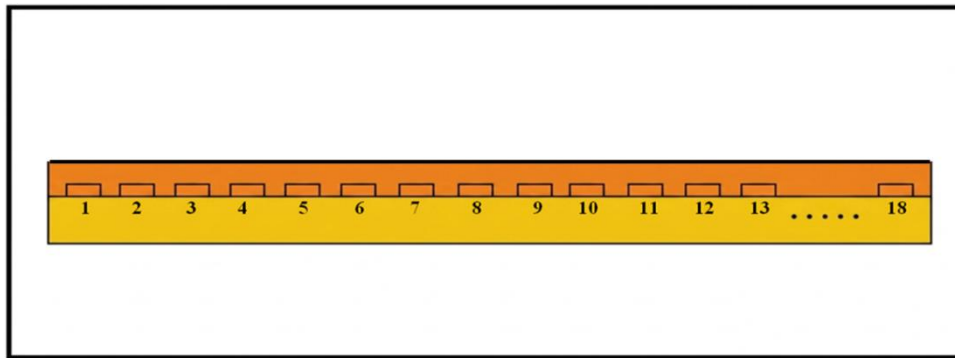


Figure III.7 : Géométrie 2D du modèle sans particule.

La figure III.8 illustre la grille complète de la géométrie. Une attention particulière a été portée aux régions les plus critiques, auxquelles une grille plus dense et plus précise a été attribuée afin de garantir une précision maximale des calculs de champ électrique dans ces zones. Ces régions correspondent au périmètre des électrodes supérieures, autour duquel le champ électrique est censé être maximal en raison de l'effet de pointe dû à leur configuration géométrique (angles droits aux quatre coins de l'électrode rectangulaire).

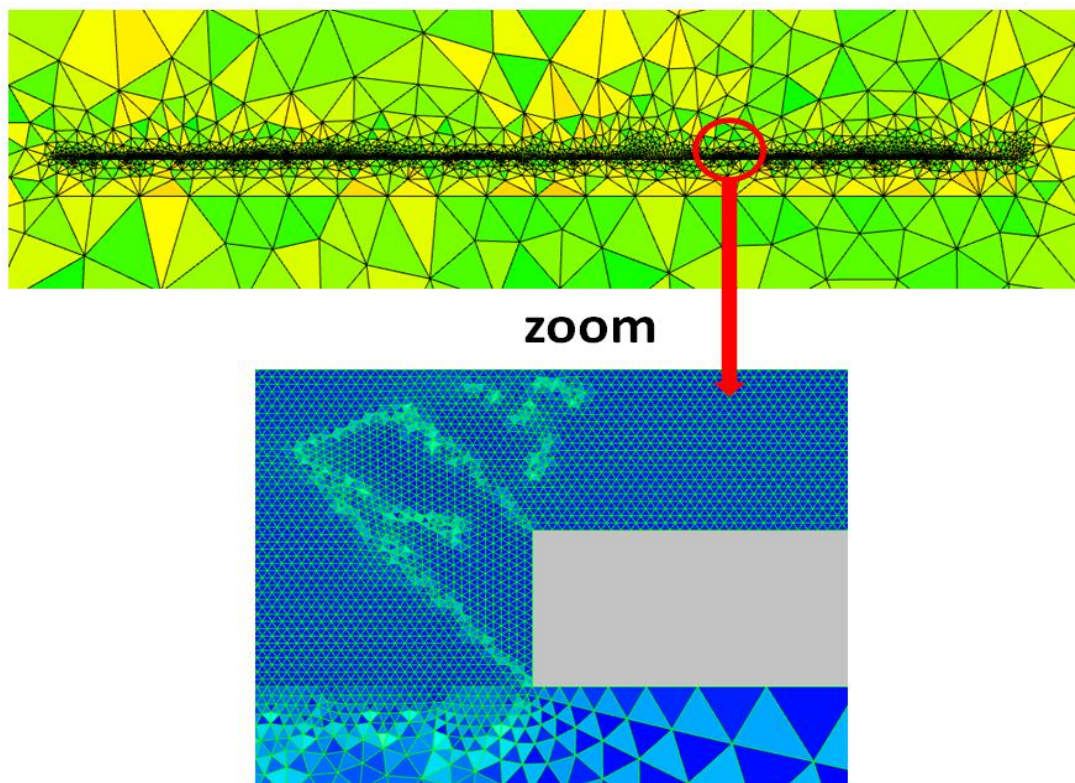


Figure III.8 : Vue globale sur le maillage du modèle sans particule avec un vue agrandie sur le maillage du coin d'une électrode

III.4.2 Cas 2 : Modèle avec particule en cuivre

On considère dans cette étude le cas où une particule de cuivre est déposée à la surface du convoyeur. Cette particule est supposée de forme rectangulaire, avec une hauteur de 100 μm et une largeur de 1 mm. Sa position est estimée approximativement au centre de la surface du convoyeur, directement au-dessus de l'électrode n°9, comme illustré à la Figure III.9.

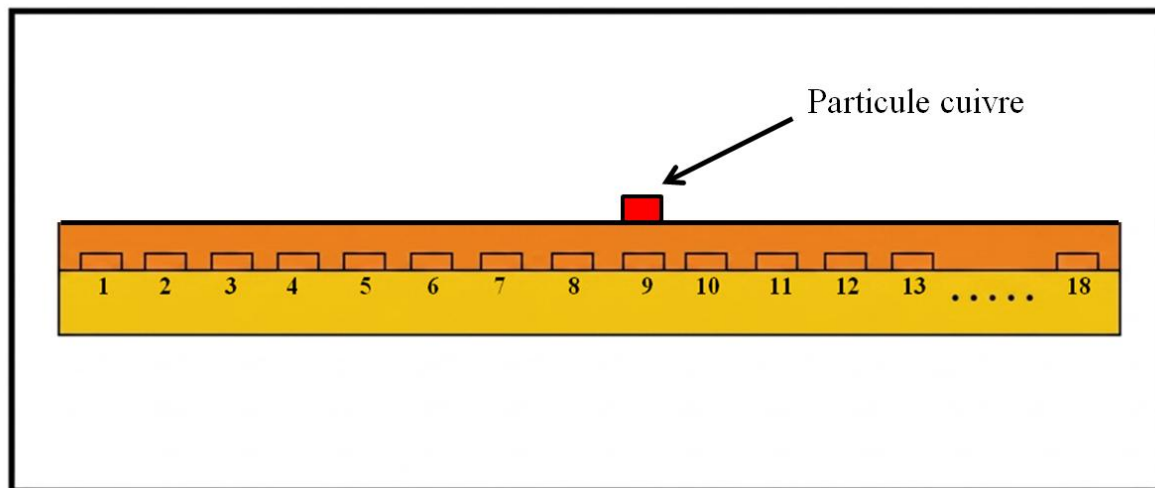


Figure III.9: Géométrie 2D du modèle avec particule cuivre

La Figure III.10 présente un agrandissement du maillage de la particule de cuivre placée sur l'isolant au-dessus de l'électrode n°9. Étant donné que le champ électrique est nul à l'intérieur d'un conducteur, le volume interne de la particule n'a pas été discrétisé, de même que celui des 18 électrodes du convoyeur. En revanche, les zones correspondant aux coins des électrodes ainsi qu'aux quatre arêtes de la particule, où le champ électrique atteint théoriquement ses valeurs maximales, ont fait l'objet d'un maillage plus raffiné. Ceci est notamment illustré par la Figure III.11, qui met en évidence le maillage au niveau du coin supérieur de la particule.

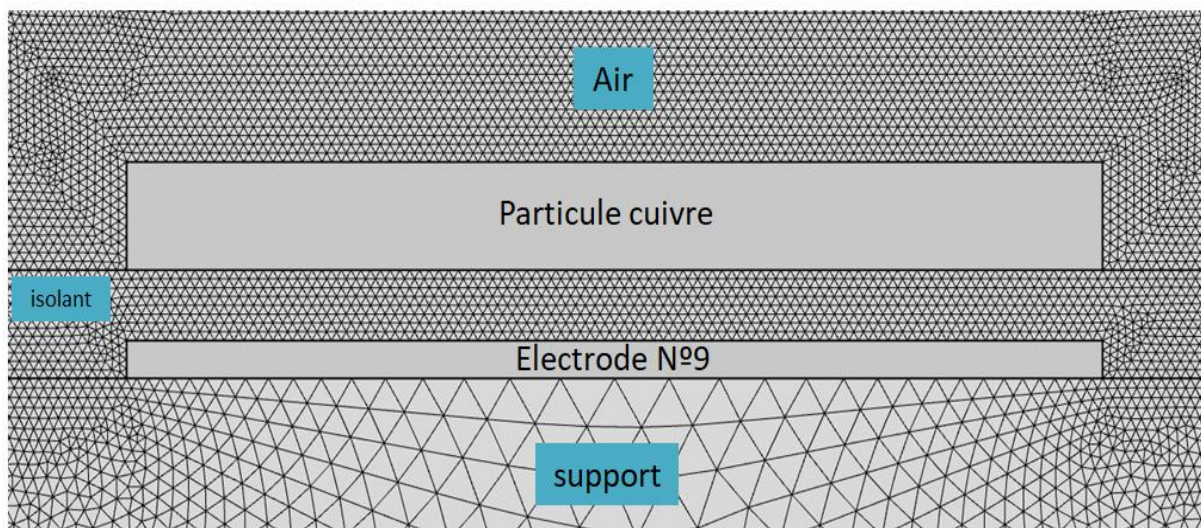


Figure III.10 : Vue agrandie sur le maillage de la particule cuivre.

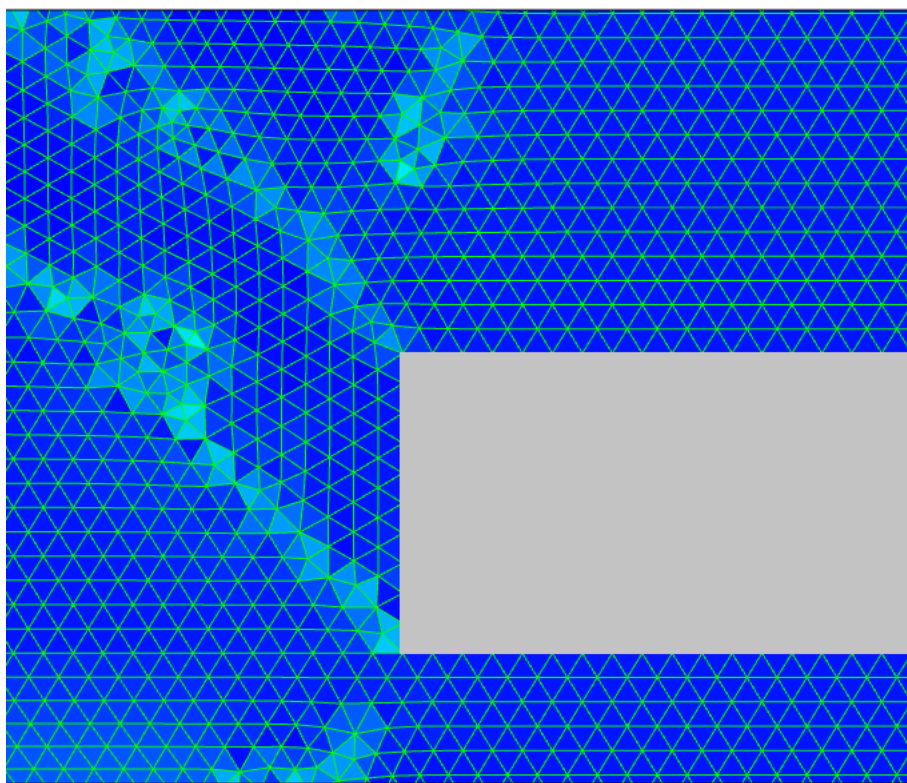


Figure III.11 : Maillage fin sur le coin supérieur gauche de la particule cuivre

III.4.3 Cas 3 : Modèle avec particule en plastique

Dans cette section, on étudie le cas d'une particule en plastique (PVC) déposée à la surface du convoyeur. On suppose que sa forme, ses dimensions ainsi que sa position sont identiques à celles considérées précédemment pour la particule en cuivre. La Figure III.12 illustre la géométrie adoptée pour ce modèle incluant la particule en PVC.

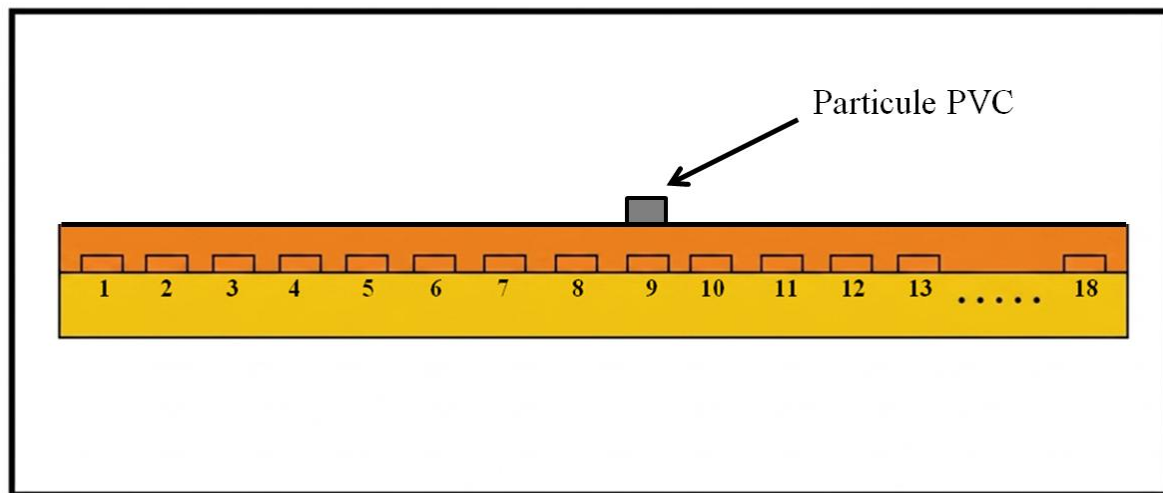


Figure III.12 : Géométrie 2D du modèle avec particule plastique (PVC).

Contrairement au cas de la particule conductrice, le maillage de la particule plastique inclut également son volume interne. La Figure III.13 présente un zoom sur le maillage de la particule en PVC placée sur l'isolant, juste au-dessus de l'électrode n°9. De plus, les coins des électrodes ainsi que les quatre coins de la particule, où le champ électrique est susceptible d'atteindre des valeurs élevées, ont été discrétisés avec un maillage plus fin. Cela est mis en évidence sur la Figure III.14, qui montre le raffinement du maillage au niveau du coin supérieur de la particule.

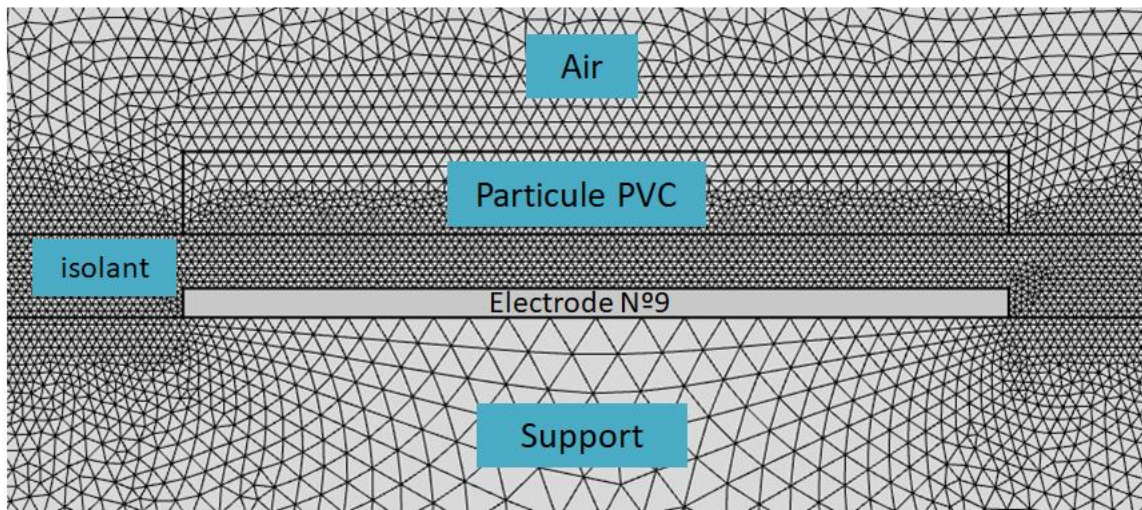


Figure III.13 : Vue agrandie sur le maillage de la particule plastique (PVC).

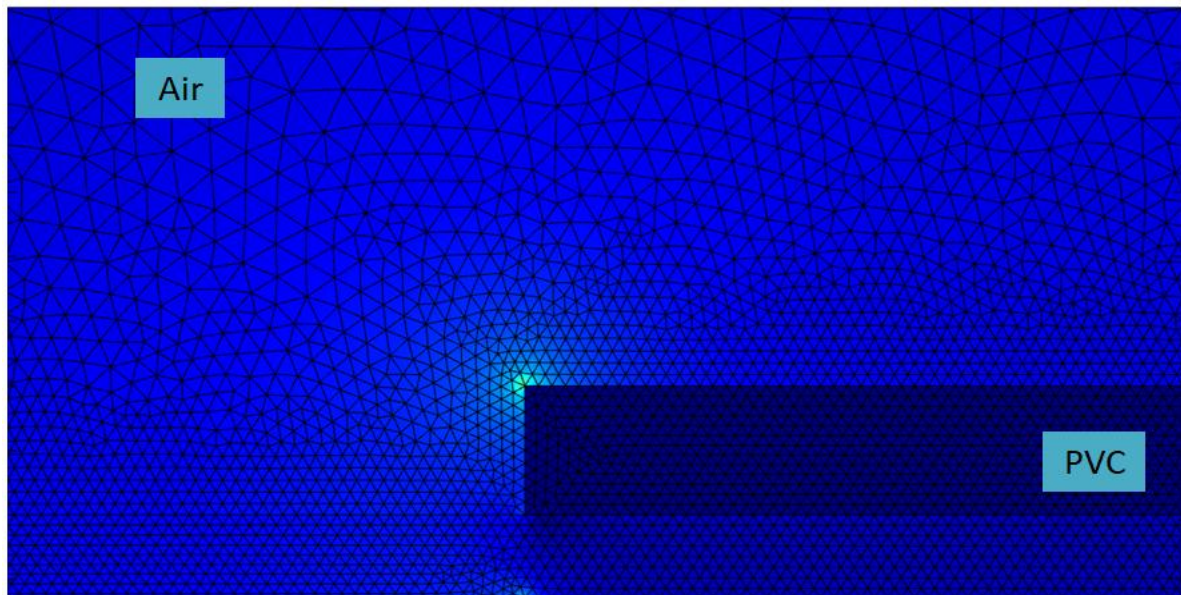


Figure III.14: Maillage fin sur le coin supérieur gauche de la particule plastique.

III.5 Paramètres physiques

Cette étape constitue la phase finale précédant la résolution du modèle. Elle consiste à attribuer les propriétés physiques aux différentes entités de la géométrie de la simulation. À cet effet, plusieurs paramètres physiques indispensables ont été définis afin de permettre la résolution des modèles, comme illustré à la Figure III.15.

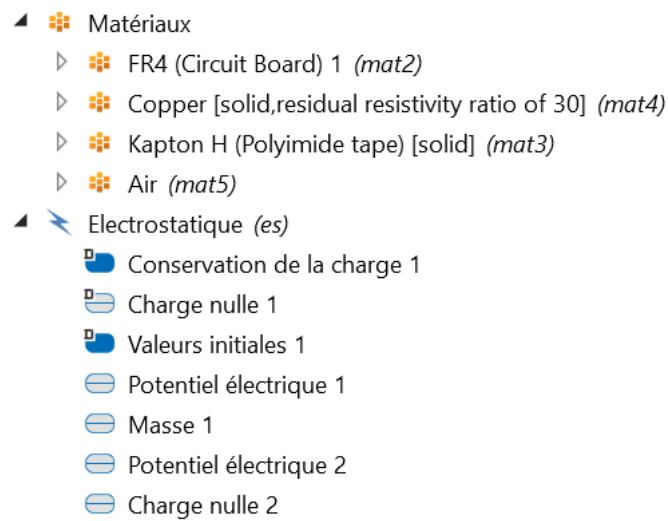


Figure III.15: Paramètres créés dans le menu du logiciel COMSOL 5.3a

III.5.1 Matériaux et domaines surfaciques

Cette étude met en œuvre quatre matériaux diélectriques distincts. Une plaque en FR4 sert de support au convoyeur, tandis qu'un film en Kapton constitue la couche isolante recouvrant les électrodes. Les particules plastiques sont modélisées en PVC, et l'ensemble du dispositif est immergé dans l'air. Dans l'environnement de simulation COMSOL 5.3a, chacun de ces matériaux est attribué à des entités géométriques spécifiques, définies comme des « régions surfaciques ». Les valeurs des permittivités relatives introduites dans le logiciel pour la résolution numérique sont consignées dans le Tableau III.1.

Matériau	Région surfacique	Permittivité relative (ϵ_r)
Air	Chambre (espace autour du convoyeur)	1
FR4	Support du convoyeur	4,70
Kapton	Isolant qui recouvre les électrodes	3,35
PVC	Particule plastique	3,39

Tableau III.1 : Matériaux et propriétés diélectriques affectés aux régions surfaciques du modèle.

III.5.2 Régions linéiques

Cette étape consiste à attribuer des potentiels électriques aux lignes correspondant aux éléments conducteurs de la géométrie, à savoir les électrodes en cuivre ainsi que la particule conductrice du cas n°2. Ces lignes, qui définissent les contours des électrodes et de la particule, sont appelées « régions linéiques ».

Comme indiqué précédemment, le convoyeur étudié est de type biphasé. Deux régions linéiques ont donc été définies pour représenter les deux groupes d'électrodes, alimentés respectivement par des tensions de +2 kV et -2 kV pour les phases 1 et 2. Dans le cas n°2, une troisième région linéique a été ajoutée afin d'appliquer un potentiel flottant aux contours de la particule de cuivre placée à la surface du convoyeur. La Figure III.16 illustre ce cas en montrant les potentiels électriques appliqués aux 18 électrodes ainsi qu'à la particule conductrice.

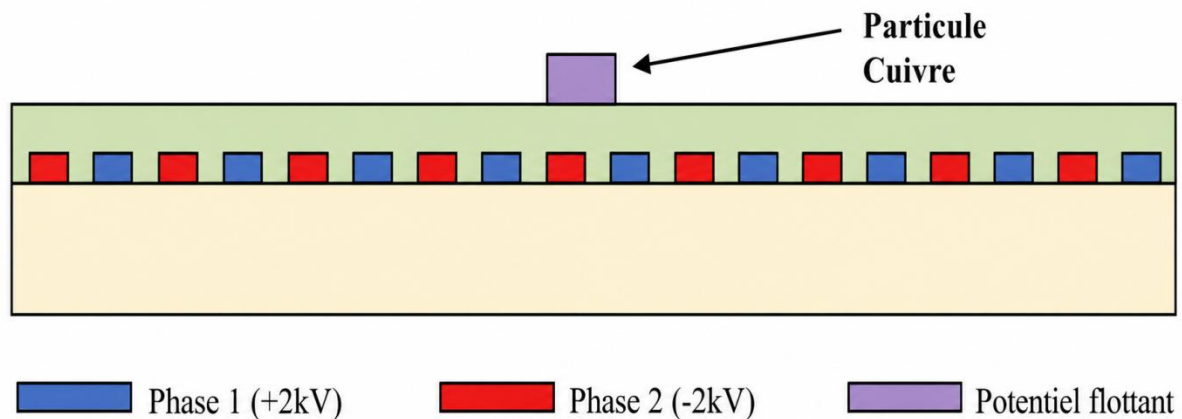


Figure III.16: Potentiel électrique affecté aux électrodes et à la particule de cuivre (cas N°2).

III.6 Conclusion

Ce chapitre présente une simulation 2D d'un convoyeur à ondes mobiles sous COMSOL, en étudiant trois cas : sans particule, avec particule conductrice (cuivre) et isolante (PVC). Les résultats montrent que les particules influencent le champ électrique, avec un effet plus important pour le cuivre. Cette étude constitue une base pour l'optimisation du système.

Chapitre IV:

Analyses de l'étude de **simulation**

IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse et à la comparaison des résultats de simulation obtenus pour les trois configurations étudiées dans le chapitre précédent. Pour rappel, notre travail porte sur un convoyeur à ondes mobiles biphase, pour lequel nous avons simulé trois cas distincts : un convoyeur à vide, un convoyeur avec une particule de cuivre et un convoyeur avec une particule en PVC. Pour chacun de ces cas, le champ électrique a été calculé afin d'en déterminer la valeur maximale dans l'isolant recouvrant les électrodes, dans le but d'identifier la configuration la plus défavorable en termes de risque de claquage électrique.

Au-delà de cette comparaison entre configurations, ce chapitre poursuit un second objectif tout aussi important : confronter nos résultats obtenus sous COMSOL Multiphysics 5.3a avec ceux issus d'une étude antérieure réalisée sous Flux 2D sur le même dispositif [34]. Cette démarche comparative nous permettra d'évaluer la cohérence entre les deux approches de simulation et de valider la fiabilité de notre modèle numérique.

IV.2 Zone analysée du convoyeur

Le convoyeur étudié comprend 18 électrodes au total. Cependant, nous nous limiterons dans ce qui suit aux résultats de simulation des sept électrodes centrales, situées au milieu du convoyeur. Ce choix s'explique par le fait que les électrodes aux extrémités sont soumises à l'effet de bord, qui peut perturber les calculs dans ces zones et conduire à des résultats peu représentatifs, voire erronés. En se concentrant sur la partie centrale, on s'éloigne suffisamment de ces perturbations et on garantit une meilleure fiabilité des résultats. La Figure IV.1 illustre la zone centrale qui fera l'objet de notre analyse.

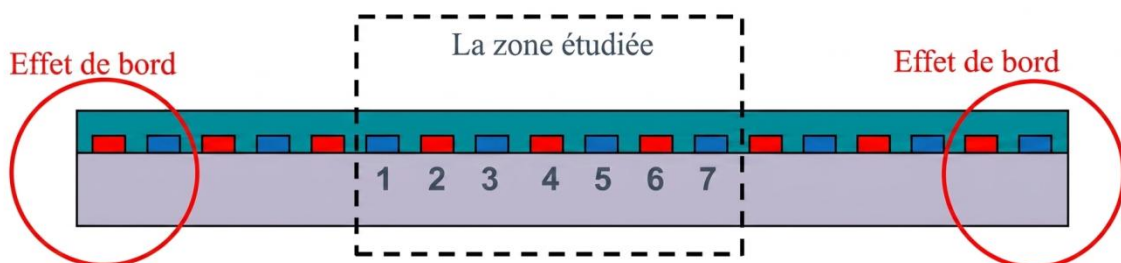


Figure IV.1: Partie centrale du convoyeur considérée dans l'étude.

La Figure IV.2 illustre l'effet de bord sur la répartition des lignes équipotentiels. On y observe clairement la distorsion de ces lignes aux extrémités du convoyeur, tandis que la partie centrale s'en trouve suffisamment éloignée pour ne pas être affectée.

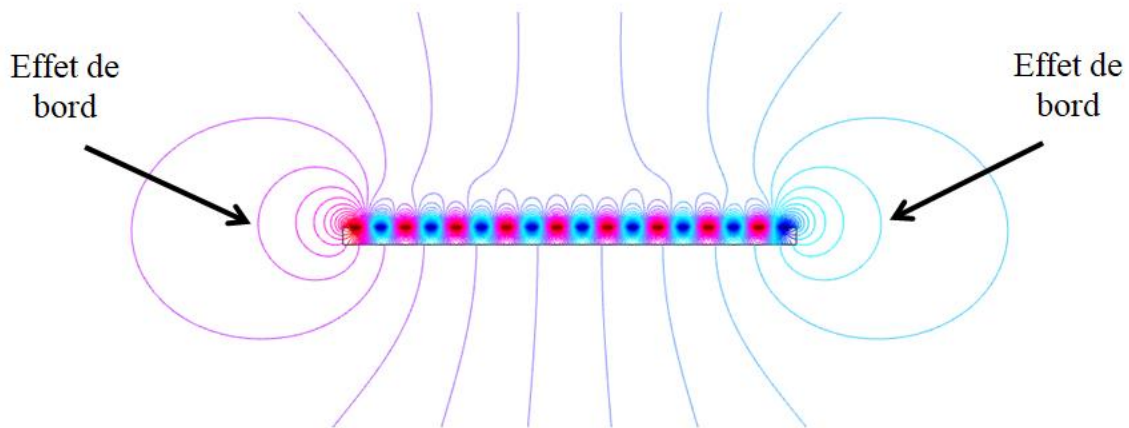


Figure IV.2 : Vue d'ensemble sur la répartition des lignes équipotentiels

La Figure IV.3 présente un zoom sur l'extrémité du convoyeur, où l'effet de bord est nettement visible.

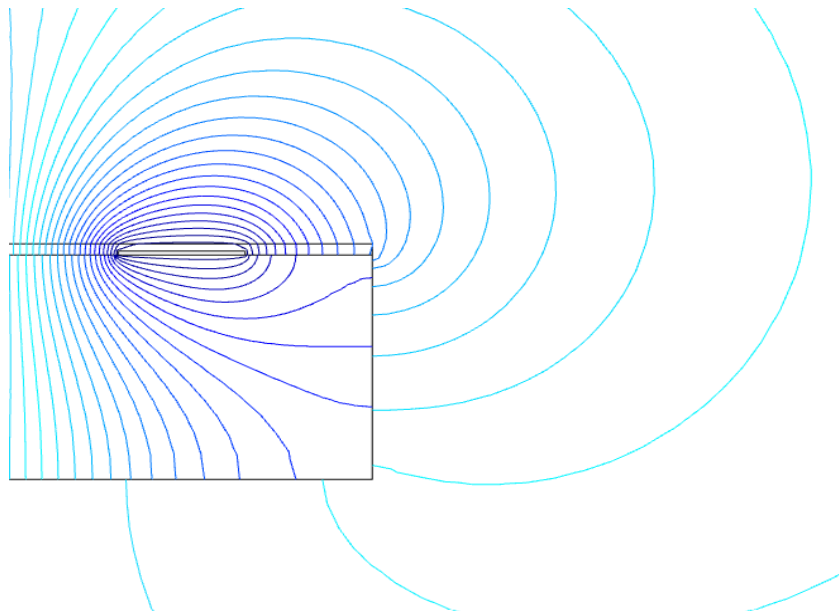


Figure IV.3 : Illustration de l'effet de bord au niveau de l'extrémité du convoyeur.

IV.3 Distribution des lignes équipotentielles

Le convoyeur à ondes mobiles considéré dans cette étude est un convoyeur biphasé, composé de 18 électrodes regroupées en deux peignes inter-digités, reliés à deux sources de tension alternatives de forme rectangulaire, déphasées de 180° . Les amplitudes de ces tensions sont de +2 kV pour la phase 1 et de -2 kV pour la phase 2. Ainsi, à chaque instant t , une moitié des électrodes se trouve à un potentiel de +2 kV tandis que l'autre moitié est à -2 kV, et les rôles s'inversent à chaque demi-période. De ce fait, toute électrode portée à +2 kV est systématiquement encadrée par deux électrodes à -2 kV, et inversement.

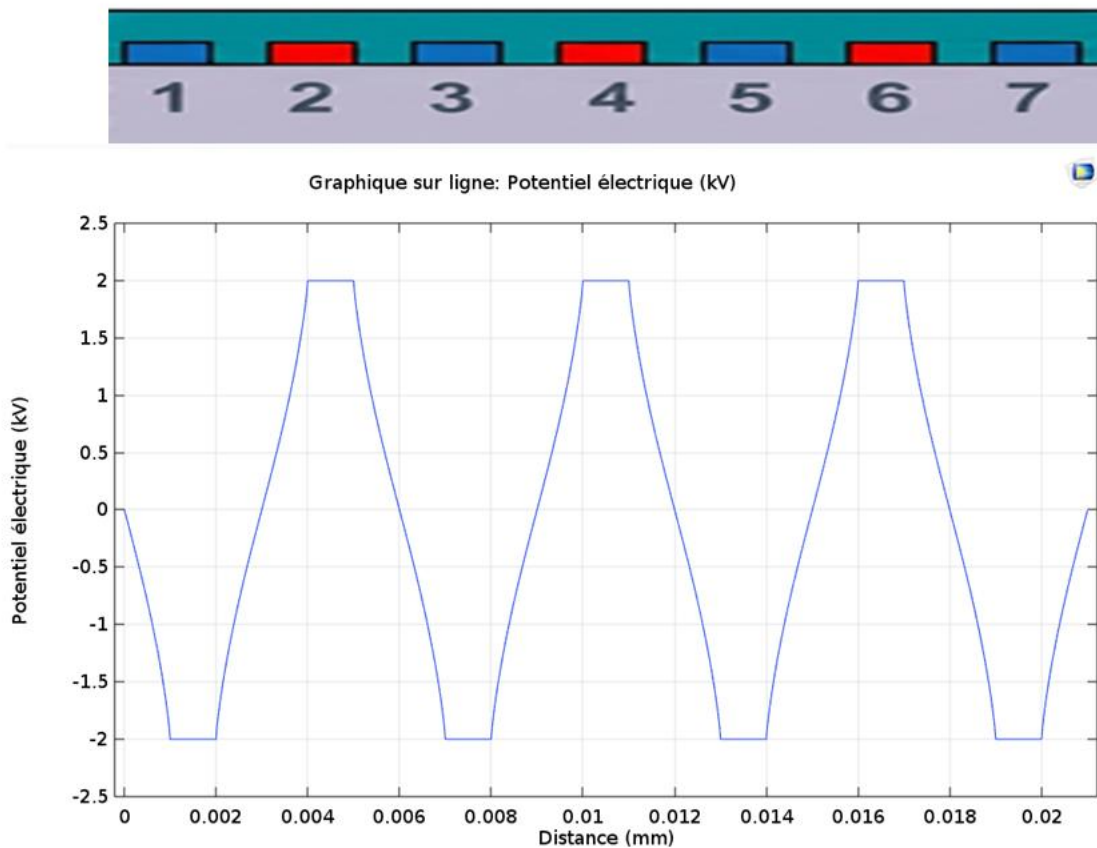
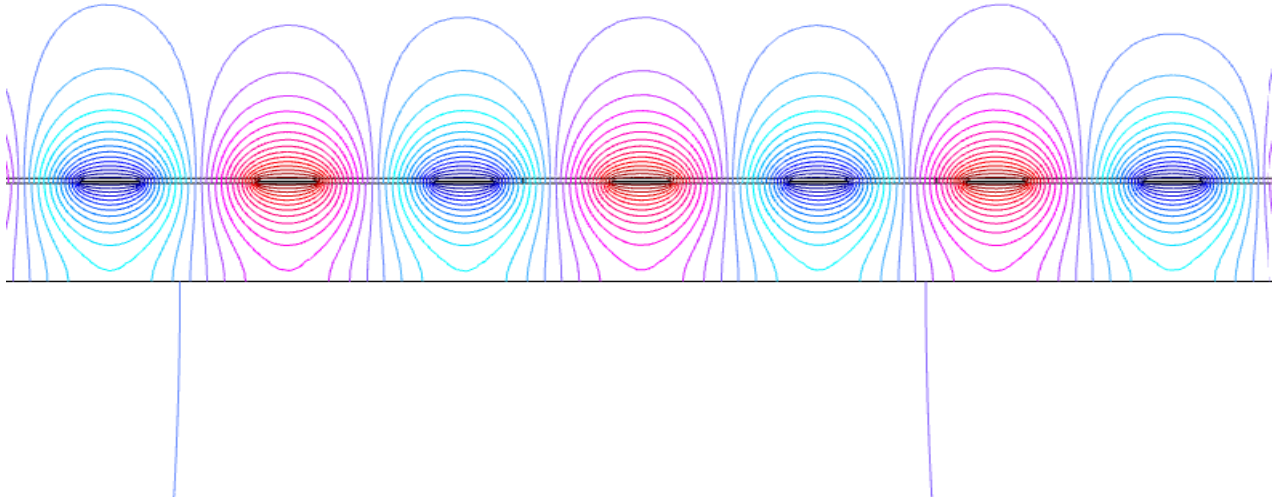


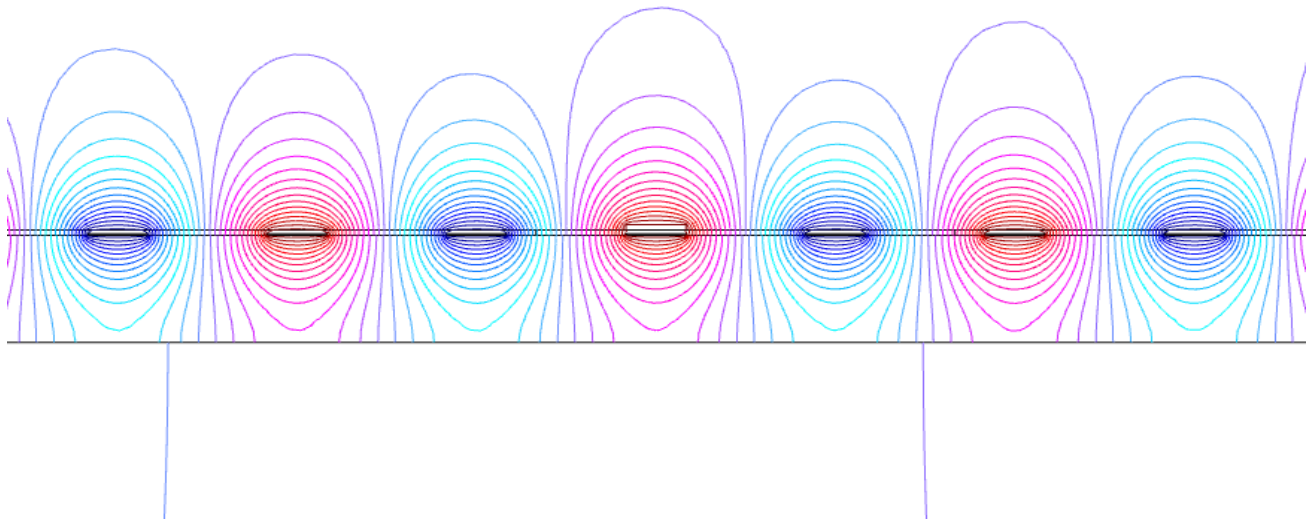
Figure IV.4 : Potentiel électrique des sept électrodes de la partie centrale du convoyeur.

La Figure IV.4 illustre bien cette alternance de potentiel et montre son évolution le long des sept électrodes de la zone centrale. On peut y observer, par exemple, que l'électrode N°4 est à +2 kV, tandis que ses deux électrodes adjacentes N°3 et N°5 sont à -2 kV. Par ailleurs, dans

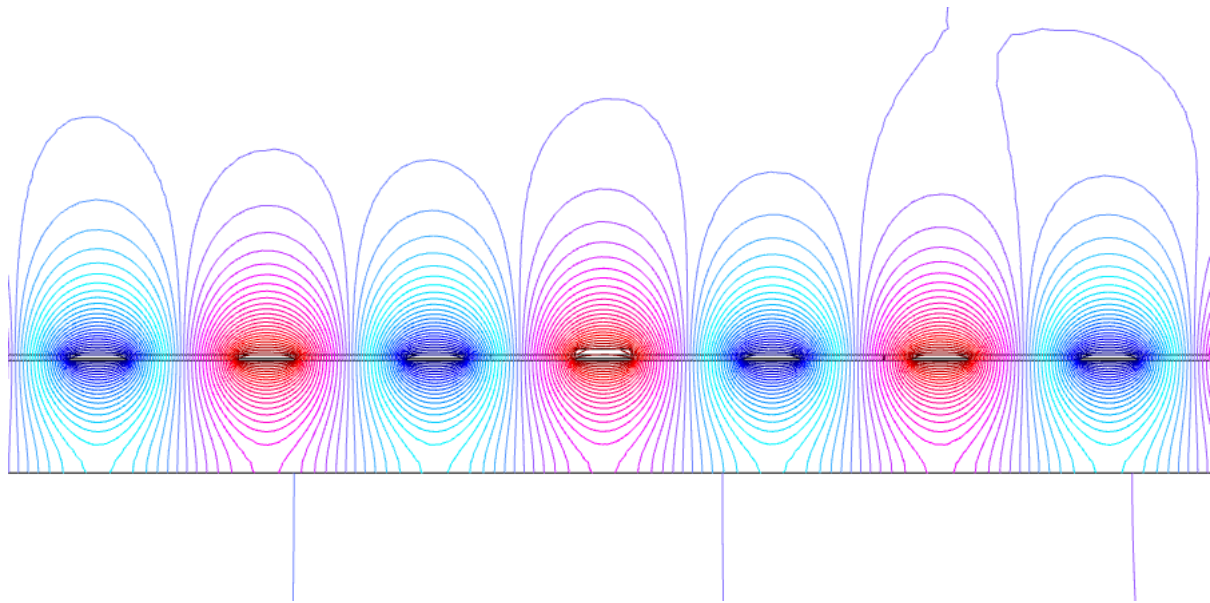
l'espace situé entre deux électrodes successives, le potentiel n'est pas constant mais évolue progressivement entre les valeurs de potentiel de ces deux électrodes.



a) Sans particule



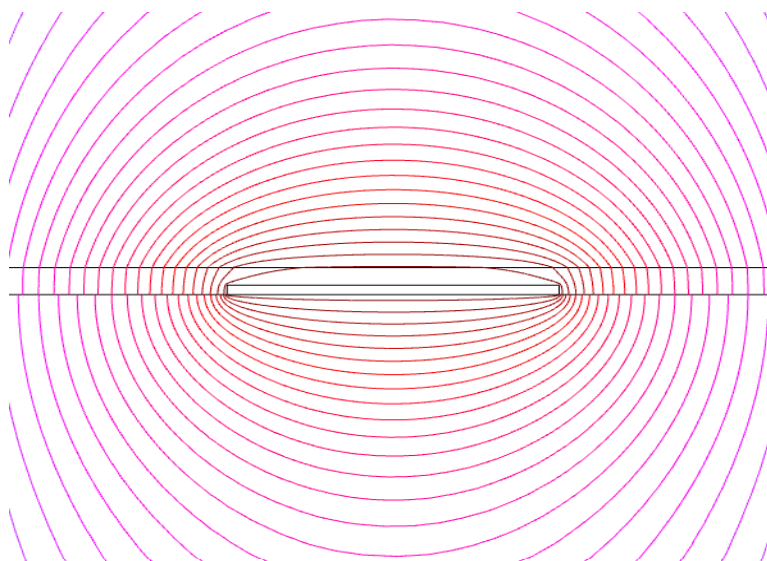
b) Particule cuivre



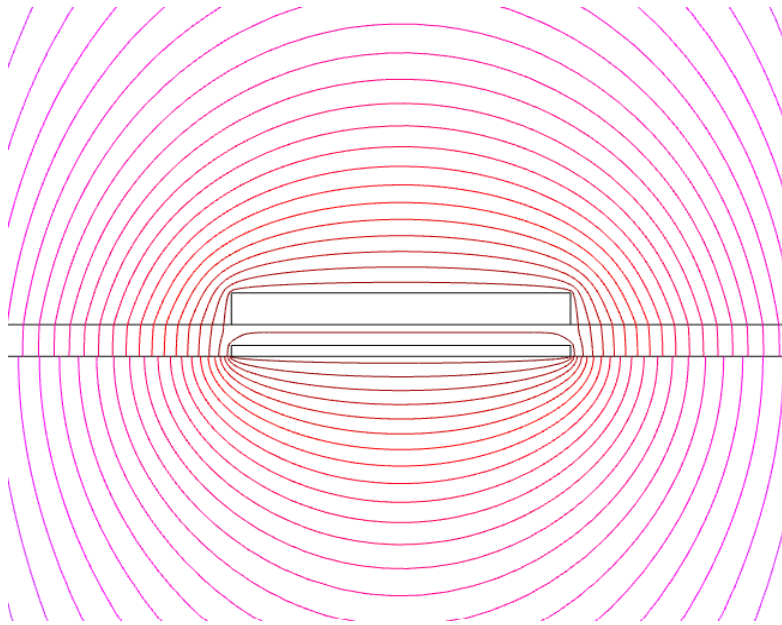
c) Particule PVC

Figure IV.5 : Distribution des lignes équipotentiels dans la zone centrale du convoyeur pour les trois cas étudiés

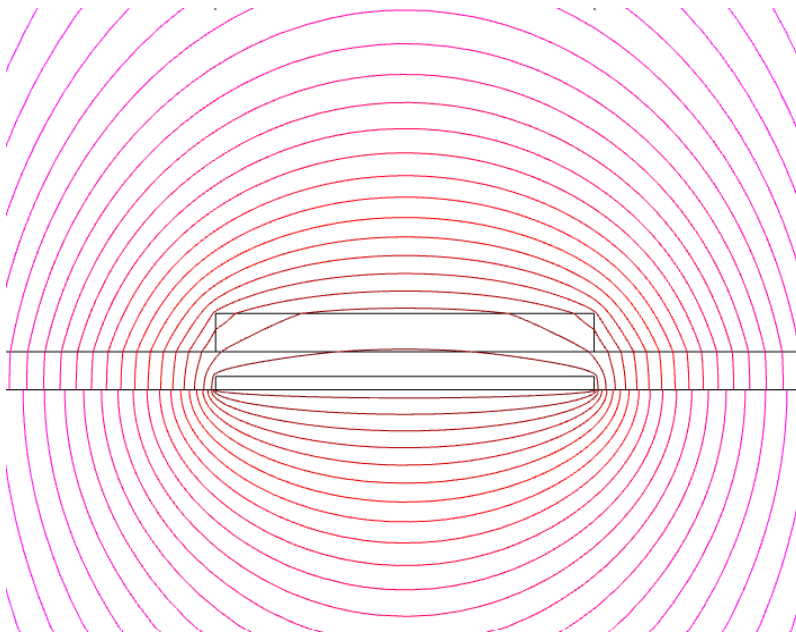
La Figure IV.5 présente la répartition des lignes équipotentiels dans la zone centrale du convoyeur pour les trois cas étudiés : sans particule, avec une particule en cuivre, et avec une particule en PVC. On constate que la distribution du potentiel varie selon la présence ou non d'une particule, ainsi que selon sa nature, qu'elle soit conductrice ou isolante.



a) Sans particule



b) Particule cuivre



c) Particule PVC.

Figure IV.6 : Vue agrandie de la distribution des lignes équipotentiels autour de l'électrode N°4 pour les trois cas étudiés

Cette différence entre les trois cas est mise en évidence dans la Figure IV.6, qui offre une vue agrandie de la distribution du potentiel autour de l'emplacement de la particule. On y observe également que les lignes équipotentielles se resserrent au niveau des angles des électrodes ainsi que de ceux de la particule, ce qui est caractéristique d'un champ électrique élevé dans ces zones, en raison de l'effet de pointe. C'est donc précisément dans ces régions que nous allons extraire les valeurs maximales du champ électrique, afin de les comparer pour les trois cas étudiés.

IV.4 Calcul du champ électrique

Pour calculer le champ électrique dans COMSOL Multiphysics 5.3a, on définit une ligne de coupe dans la zone d'intérêt, le long de laquelle le champ électrique est évalué en chaque point.

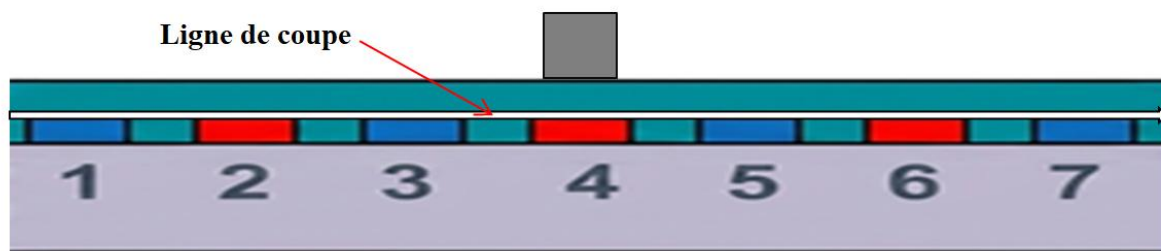


Figure IV.7 : Exemple d'un chemin tracé dans l'isolant passant par le haut des électrodes

La Figure IV.7 illustre un exemple de cette ligne de coupe, tracée au-dessus des électrodes, permettant de visualiser la variation du champ électrique dans l'isolant Kapton le long de ce tracé. Cette approche permet notamment d'identifier les valeurs maximales du champ électrique, qui se situent précisément au niveau des coins supérieurs des électrodes.

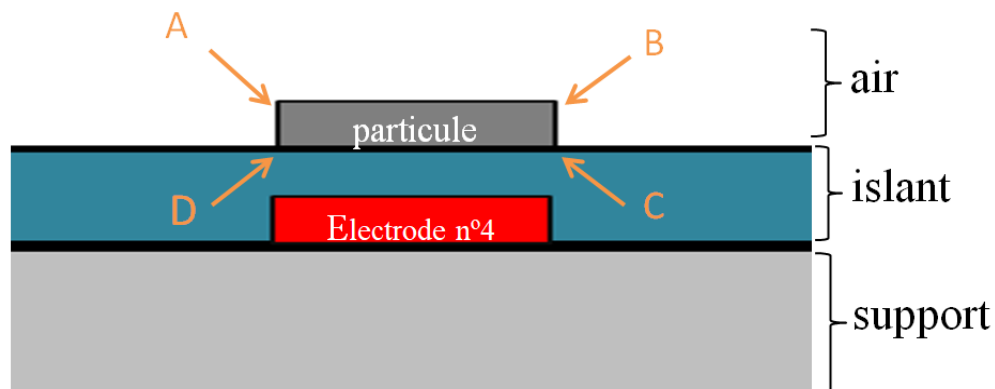


Figure IV.8 : Position des points repère pour le calcul du champ électrique au niveau des pointes de la particule

Concernant les valeurs maximales du champ électrique au niveau des coins de la particule, des points repères ont été placés sur chacun d'eux, comme illustré dans la Figure IV.8. Le champ électrique est ensuite mesuré en ces points afin d'évaluer l'accroissement local dû à l'effet de pointe. Il est à noter que les points A et B fournissent des valeurs du champ électrique uniquement dans l'air, tandis que les points C et D, situés à l'interface entre l'air et l'isolant, permettent d'obtenir des valeurs dans ces deux milieux à la fois.

Il convient de préciser que contrairement à Flux 2D, COMSOL Multiphysics 5.3a ne dispose pas d'une fonctionnalité automatique permettant de mesurer simultanément le champ électrique dans deux milieux différents (l'air et l'isolant) en un même point d'interface. Pour les points C et D, les valeurs dans chacun des deux milieux seront donc déterminées manuellement, en évaluant le champ électrique de part et d'autre de l'interface.

IV.4.1 Convoyeur sans particule (cas N°1)

Le champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes est calculé le long de la ligne de coupe décrite précédemment dans la Figure IV.7. La variation du champ électrique dans l'isolant le long des sept électrodes centrales, présentée dans la Figure IV.9, révèle une valeur maximale de 68.42 kV/mm, atteinte au niveau du coin supérieur gauche de l'électrode numéro 2.

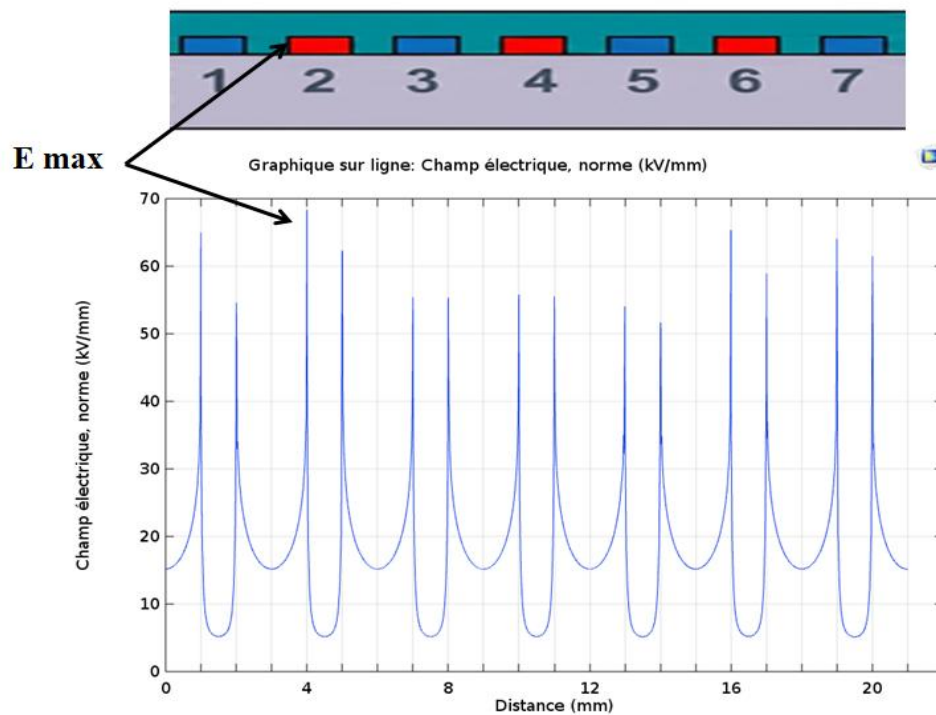


Figure IV.9 : Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas 1).

Les valeurs du champ électrique aux points repères définis dans la Figure IV.8 sont regroupées dans le Tableau IV.1. On notera que les points A et B ne présentent pas de valeur dans l'isolant, ces deux points étant situés uniquement dans l'air.

Champ E (kV/mm)	A	B	C	D
Air	2.48	2.48	3.46	3.46
Isolant (Kapton)			2.15	2.15

Tableau IV.1 : Valeurs du champ électrique au niveau des points repères (cas_N°1).

IV.4.2 Convoyeur avec particule cuivre (cas N°2)

En introduisant une particule de cuivre sur le convoyeur, la variation du champ électrique dans l'isolant au niveau des électrodes présente une différence notable par rapport au cas précédent. En effet, la valeur maximale du champ électrique se déplace vers l'électrode N°5, avec une valeur de **68.76 kV/mm**, comme le montre la Figure IV.10. Ce déplacement du

maximum s'explique par la distorsion des lignes équipotentielles engendrée par la présence de la particule conductrice en cuivre, qui modifie localement la distribution du champ électrique dans cette zone.

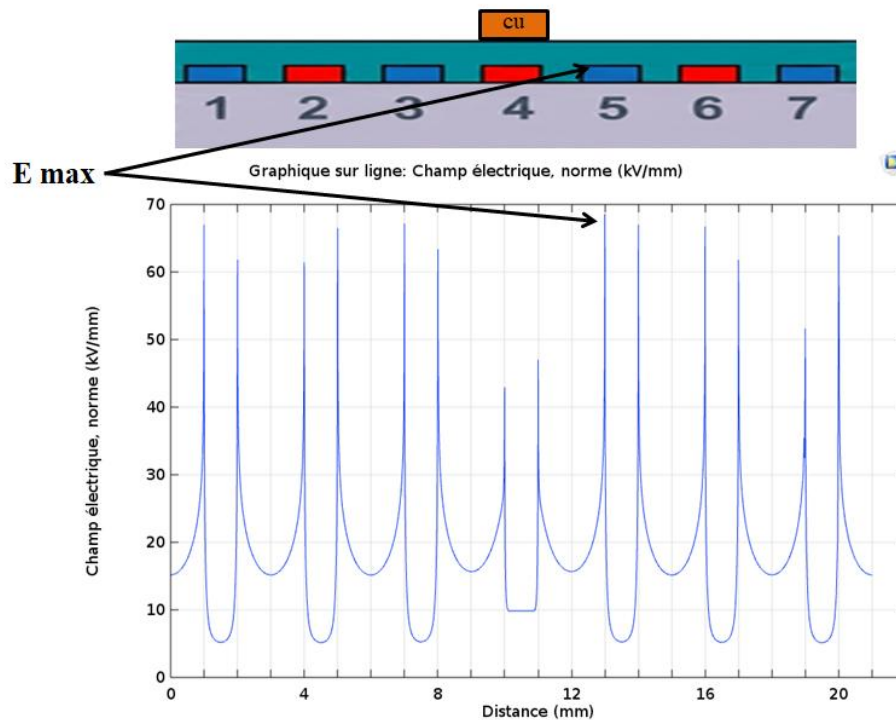


Figure IV.10 : Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas 2).

Cette perturbation se répercute sur les valeurs du champ électrique au niveau des coins de la particule, avec une augmentation assez notable, comme en témoignent les résultats du Tableau IV.2.

Champ E (kV/mm)	A	B	C	D
Air	58.75	43.59	50.50	46.82
Isolant (Kapton)			14.08	14.11

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

IV.4.3 Convoyeur avec particule PVC (cas N°3)

En remplaçant la particule de cuivre par une particule plastique en PVC, on constate que la valeur maximale du champ électrique se situe cette fois au niveau de l'électrode N°3, avec une valeur de **67.34 kV/mm**, comme le montre la Figure IV.11. Ce déplacement du maximum par rapport aux deux cas précédents s'explique par la nature isolante du PVC, qui perturbe différemment la répartition des lignes équipotentielles comparativement à la particule conductrice en cuivre.

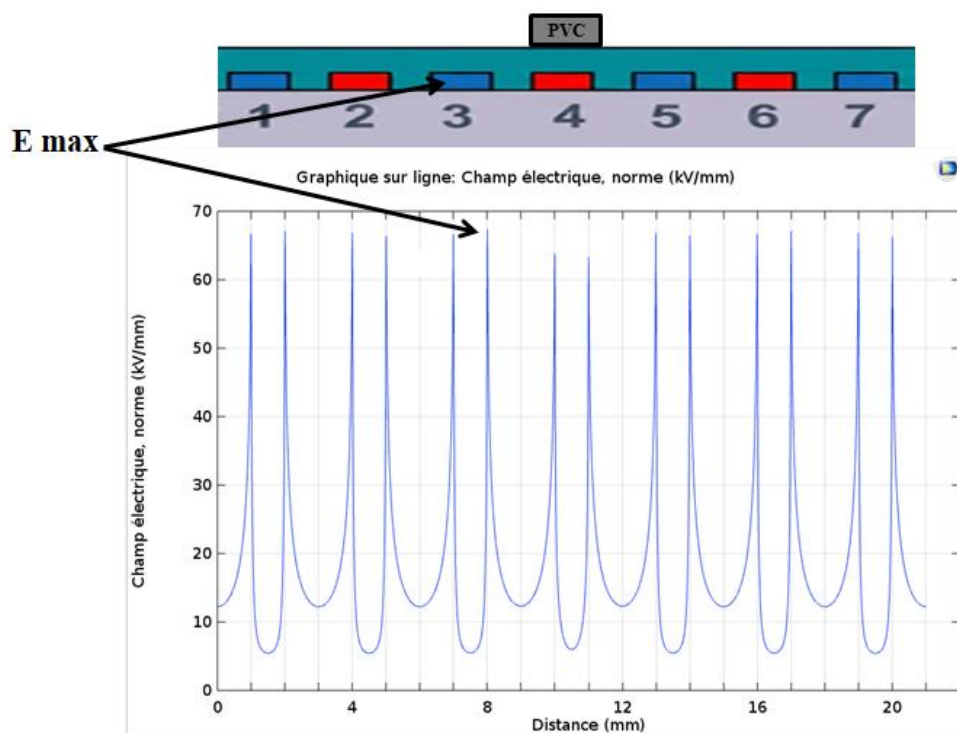


Figure IV.11 : Variation du champ électrique dans l'isolant en haut des électrodes (cas 3).

Par ailleurs, les valeurs du champ électrique aux coins de la particule PVC se rapprochent davantage de celles obtenues dans le cas sans particule, et sont nettement inférieures à celles relevées aux coins de la particule de cuivre, ainsi que le confirme le Tableau IV.3.

Champ E (kV/mm)	A	B	C	D
Air	4.05	4.06	15.66	15.65
Isolant (Kapton)			2.32	2.32

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

IV.5 Comparaison des résultats

Dans le but d'évaluer la fiabilité du modèle numérique développé, une comparaison quantitative et qualitative est effectuée entre les résultats de simulation obtenus par **COMSOL Multiphysics 5.3a** et ceux issus de l'étude antérieure réalisée sous **Flux 2D**, portant sur la distribution du champ électrique et les valeurs maximales relevées dans l'isolant pour les trois configurations simulées.

IV.5.1 Les valeurs du champ électrique dans les électrodes

Dans cette partie, nous analysons les valeurs maximales du champ électrique **E_{max}** induites dans le matériau isolant au niveau du coin de l'électrode pour les trois configurations étudiées: en l'absence de particules (Cas N°1), en présence d'une particule de cuivre (Cas N°2), et en présence d'une particule de PVC (Cas N°3).

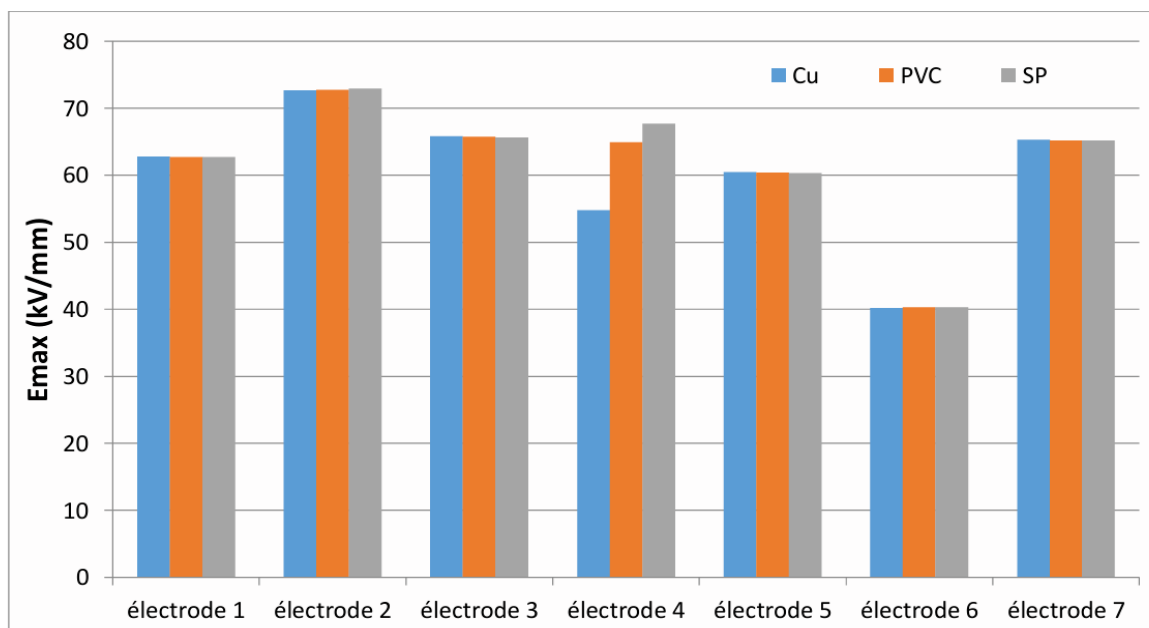
- **Convergence des résultats numériques** : les résultats numériques montrent une forte convergence. L'analyse comparative révèle une convergence significative et notable des valeurs maximales du champ électrique entre les deux logiciels pour tous les cas étudiés. L'écart absolu entre les valeurs obtenues avec COMSOL et Flux 2D varie de 3,94 kV/mm à 5,53 kV/mm (Environ 5.5 % à 7.5 %), une différence faible et scientifiquement acceptable, principalement due aux différentes méthodes de génération de maillage et aux algorithmes de calcul internes de chaque logiciel.

	Détails	E max (kV/mm) (COMSOL 5.3a)	E max (kV/mm) (FLUX 2D)
Cas N°1	Sans particule	68.42	72.90
Cas N°2	Particule cuivre	68.76	72.70
Cas N°3	Particule PVC	67.34	72.87

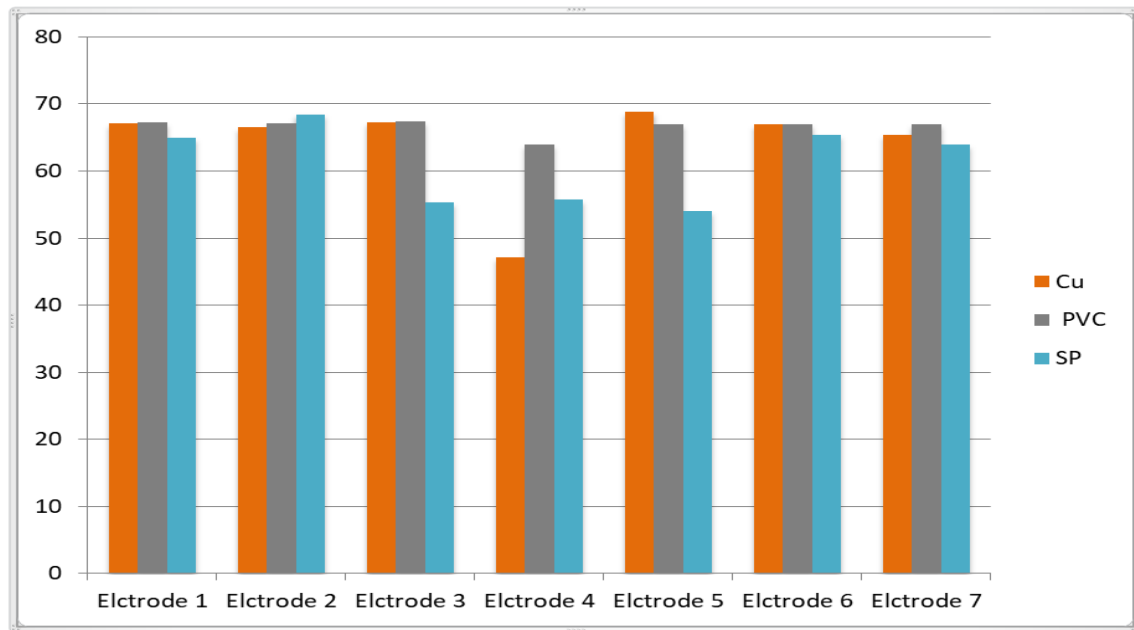
Tableau IV.4 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant au niveau du coin de l'électrode.

• **Influence de la nature des particules :**

- Sous **COMSOL 5.3a**, on note que l'introduction d'une particule conductrice en cuivre (Cas N°2) engendre une légère élévation du champ électrique maximal par rapport au cas sain (sans particule), tandis que la particule diélectrique en PVC (Cas N°3) provoque une légère atténuation de ce dernier.
- Sous **Flux 2D**, les valeurs affichent une stabilité relative quasi-constante autour de 72.8 kV/mm. Cela démontre que l'impact direct de la nature des impuretés au niveau strict des coins d'électrodes reste confiné par rapport à leur influence dans les zones adjacentes du convoyeur.



A) Flux 2D. [34]



B) COMSOL 5.3a

Figure IV.12 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant au niveau des électrodes du convoyeur pour les trois cas étudiés.

- **Corrélation du comportement géométrique (Figure IV.12) :** Les profils graphiques mettent en évidence une parfaite similitude dans le comportement de la distribution du champ le long des différentes électrodes (de l'électrode 1 à 7) pour les deux logiciels. Les variations locales, à l'instar de la chute de tension observée de manière identique au niveau de l'électrode N°4 sur les deux simulations, confirment la robustesse et la haute-fidélité du modèle développé sous COMSOL 5.3a.

IV.5.2 Les valeurs du champ électrique dans les points A, B, C, D

L'objectif de cette sous-section est d'analyser l'impact topologique et local de la présence des particules sur la distribution du champ électrique maximal au niveau de quatre points critiques spécifiques (A, B, C, D). Il convient de préciser que contrairement à Flux 2D, COMSOL Multiphysics 5.3a ne dispose pas d'une fonctionnalité automatique permettant de mesurer simultanément le champ électrique dans deux milieux différents (l'air et l'isolant) en un même point d'interface. Pour les points C et D, les valeurs dans chacun des deux milieux seront donc déterminées manuellement, en évaluant le champ électrique de part et d'autre de l'interface.

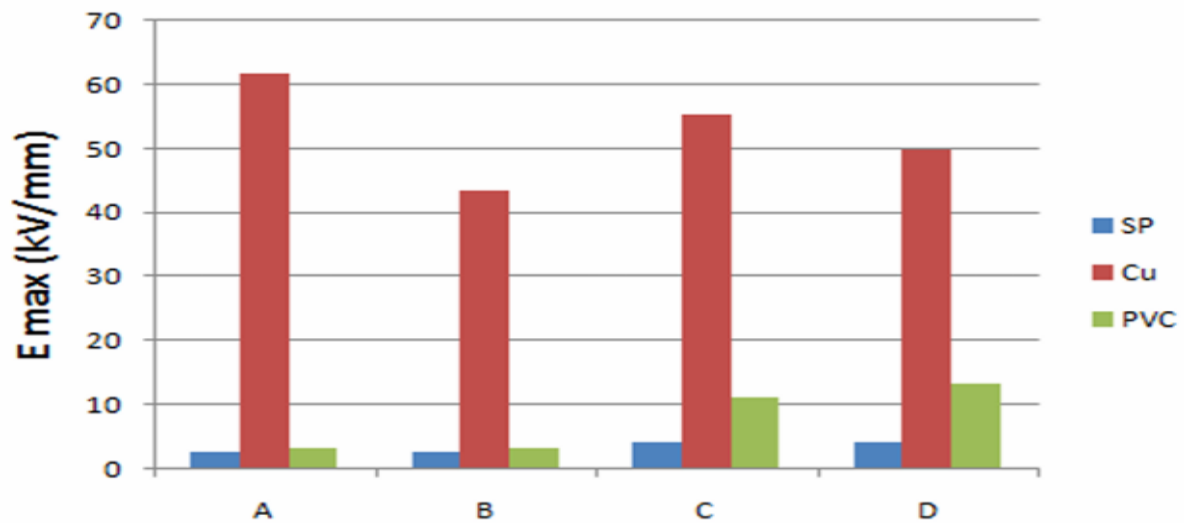
Ces points représentent les coins de la particule déposée directement sur la couche isolante au-dessus de l'électrode N°4, où :

- Les points **A, B, C** et **D** désignent les coins supérieurs de la particule, situés dans le milieu gazeux (**dans l'air**).
- Les points **C** et **D** désignent les coins inférieurs de la particule, en contact direct avec l'interface de la couche isolante (**dans l'isolant Kapton**).

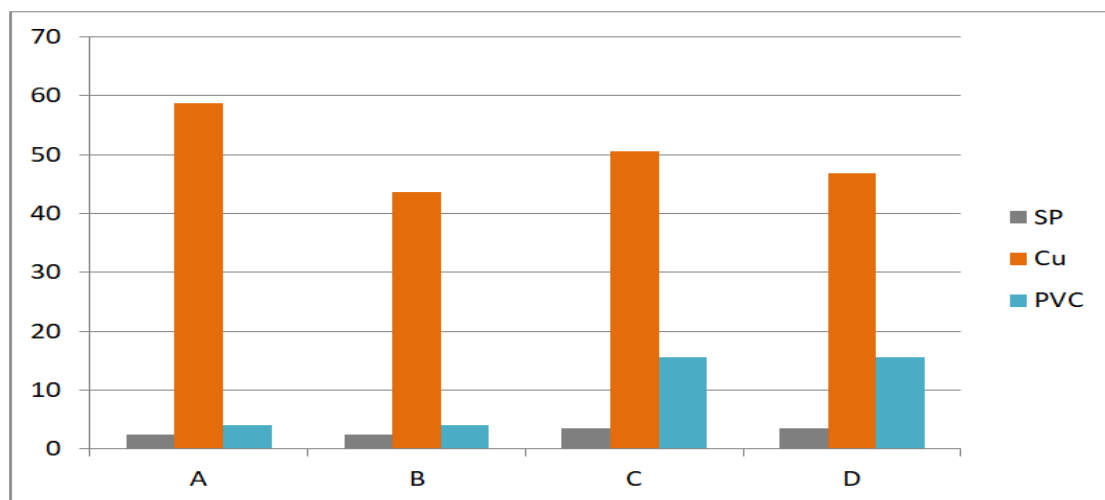
Analyse et interprétation des résultats :

Les Figures (IV.13) et (IV.14) illustrent respectivement les valeurs maximales du champ électrique calculées au niveau des coins de la particule dans l'air (points A et B) et dans l'isolant Kapton (points C et D), pour les deux codes de calcul (Flux 2D et COMSOL 5.3a). L'analyse comparative de ces résultats permet de dégager les conclusions suivantes :

- **Analyse dans le milieu de l'air (Figure IV.13) :** L'examen de la Figure (IV.13) indique que pour le cas sain (Sans Particule - SP) et pour le cas de la particule en PVC, les intensités du champ électrique sont très faibles au niveau des points C et D, et quasi-nulles aux points A et B. Cependant, l'introduction d'une particule conductrice en cuivre (**Cu**) engendre une concentration intense du champ électrique dans l'air. Au niveau des points supérieurs A et B, le champ maximal atteint environ 43 à 62 kV/mm. Aux points inférieurs C et D (analysés dans l'air), le champ s'élève à environ 11 kV/mm sous **Flux 2D** contre près de 14 kV/mm sous **COMSOL 5.3a**. Cette forte distorsion est due à la conductivité élevée du cuivre.



A) Flux 2D. [34]

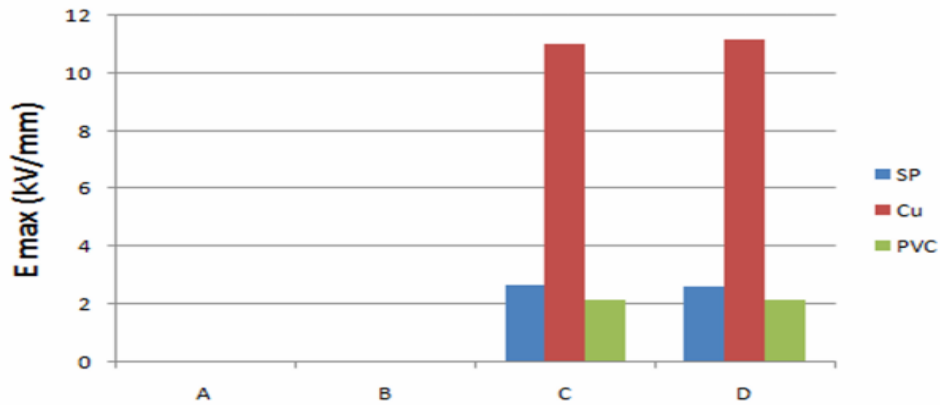


B) COMSOL 5.3a

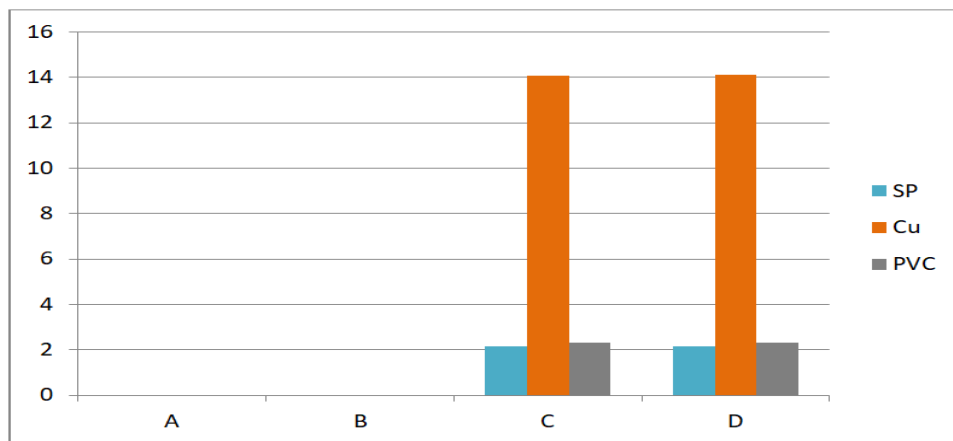
Figure IV.13 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'air au niveau des coins de la particule pour les trois configurations.

- Analyse dans le milieu isolant Kapton (Figure IV.14) :** La Figure (IV.14) révèle le comportement du champ électrique calculé spécifiquement à l'intérieur du matériau isolant. Comme prévisible, les valeurs sont nulles aux points A et B car ces derniers se situent en dehors de l'isolant. En revanche, au niveau des points inférieurs C et D (analysés dans le Kapton), le champ électrique reste confiné à des valeurs très faibles (environ 2 kV/mm pour le cas sain (SP) et le cas du PVC. Dès l'insertion de la

particule de cuivre, le champ subit une hausse majeure au cœur de l'isolant à ces points précis, atteignant environ 11 kV/mm sous **Flux 2D** et 14 kV/mm sous **COMSOL 5.3a**.



A) Flux 2D. [34]



B) COMSOL 5.3a

Figure IV.14 : Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolant Kapton au niveau des coins de la particule pour les trois cas étudiés.

- **Synthèse comparative globale** : Ces constatations confirment que les deux logiciels (**COMSOL 5.3a** et **Flux 2D**) prédisent avec exactitude le même phénomène physique : la présence d'une impureté métallique (cuivre) constitue un point critique majeur augmentant drastiquement les risques de claquage diélectrique ou de décharges partielles. Les légères divergences quantitatives observées entre les pics de tension 11 kV/mm contre 14 kV/mm sont intrinsèquement liées au raffinement du maillage au

niveau des nœuds de singularité, dont la formulation numérique diffère d'un solveur à l'autre.

IV.6 Conclusion

Les résultats confirment que la nature des particules influence significativement la distribution du champ électrique : une particule de cuivre génère une concentration de champ critique pouvant entraîner un claquage diélectrique, tandis qu'une particule de PVC a un effet négligeable sur le champ par rapport à une situation sans particule. Une comparaison entre COMSOL Multiphysics 5.3a et Flux 2D montre une convergence satisfaisante entre les deux programmes, avec un écart relatif compris entre 5,5 % et 7,5 %, confirmant ainsi la fiabilité et la précision du modèle numérique développé.

Conclusion

générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a été consacré à l'étude et à la modélisation d'un convoyeur électrostatique à ondes mobiles appliqué à la séparation de particules issues de mélanges cuivre/plastique. L'objectif principal était d'analyser l'influence de la nature des particules sur la distribution du champ électrique, élément clé dans le fonctionnement de ce type de dispositif.

Dans un premier temps, les bases théoriques de l'électrostatique ont été présentées, permettant de comprendre les phénomènes fondamentaux liés aux charges électriques, au champ électrique ainsi qu'aux interactions entre particules et champs. Ensuite, une étude détaillée des convoyeurs à ondes mobiles a été réalisée, mettant en évidence leur principe de fonctionnement, leurs différentes configurations ainsi que leurs domaines d'application, notamment dans le domaine de la séparation électrostatique.

La modélisation numérique du système a été effectuée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics 5.3a, en considérant une approche bidimensionnelle. Trois cas ont été étudiés afin de comparer le comportement du champ électrique en absence de particule, en présence d'une particule conductrice (cuivre) et d'une particule isolante (PVC). Cette démarche a permis de mettre en évidence l'influence significative des propriétés électriques des matériaux sur la répartition du champ.

Enfin, une comparaison avec une étude antérieure réalisée sous Flux 2D a été envisagée afin d'évaluer la cohérence des résultats obtenus par deux outils de simulation différents. Cette analyse comparative constitue une étape importante pour valider la fiabilité du modèle développé et pour mieux comprendre les écarts éventuels liés aux méthodes numériques utilisées.

En perspective, ce travail pourrait être approfondi par une extension à une modélisation tridimensionnelle (3D), l'étude du comportement dynamique des particules sous l'effet de l'onde mobile, ainsi que l'optimisation des paramètres électriques et géométriques du convoyeur afin d'améliorer les performances du procédé de séparation.

Bibliographie

- [1] Emile Durand, *Électrostatique et magnétostatique*, Masson, Paris, 1ère édition, 1953, 774 p.
- [2] Richard Feynman, *Le cours de physique – Électromagnétisme II*, Dunod, Paris, 1ère édition, 1979, 460 p.
- [3] Site Internet : <https://fr.wikipedia.org> . Consulté 06/2026
- [4] Tamer Bécherrawy, *Électromagnétisme : équations de Maxwell*, Hermès, Paris, 2012, 291 p.
- [5] Site Internet : <https://openclassrooms.com/forum/sujet/expression-d-un-champs-electrique-uniforme> Consulté 06/2026
- [6] José-Philippe Pérez, *Électromagnétisme : fondements et applications*, Masson, Paris, 1996, 300 p.
- [7] Site Internet : https://www.researchgate.net/figure/Ligne-du-champ-electrique_fig3_340487489 Consulté 06/2026
- [8] Site Internet : https://uel.unisciel.fr/chimie/strucmic/strucmic_ch05/co/apprendre_ch05_19.html Consulté 06/2026
- [9] Michel Bertin, *Électromagnétisme : Équations de Maxwell et relativité*, Dunod, Paris, 1979, 225 p.
- [10] Samir Khene, *Électricité : notions de base et électrostatique*, Université Annaba, 2010, 595 p.
- [11] David J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, Pearson, USA, 4th ed., 2017, 600 p.
- [12] John D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, Wiley, USA, 3rd ed., 1998, 832 p.
- [13] Site Internet : <http://mauswiesel.free.fr/coronav2.htm> Consulté 06/2026
- [14] Claude Gignoux, *Cours d'électromagnétisme*, Ellipses, Paris, 2010, (400-402) p.
- [15] Site Internet : <https://www.maxicours.com/se/cours/experiences-simples-d-electrisation/> Consulté 06/2026
- [16] Bernard Cagnac, *Physique – Électricité et magnétisme*, Dunod, Paris, 1998, 480 p.
- [17] Site Internet : <https://www.chimix.com/an5/prem5/hotp5/electrisation.htm> Consulté 06/2026
- [18] Site Internet : <https://physiquechimie.lycee.com/1stp01phc.htm> Consulté 06/2026
- [19] Y. Hamasaki, *Electrostatic Traveling-Wave Conveyer for Powder Transportation*, Journal of Electrostatics, Vol. 63, 2005, pp. 543-554.
- [20] Site Internet : <https://doi.org/10.1063/1.5002470> Consulté 06/2026
- [21] Masuda S., Kamimura T., *Principles of Electrostatic Traveling Wave Transport*, IEEE Transactions on Industry Applications, 1977.

[22] John Melcher, *Continuum Electromechanics*, MIT Press, 1981.

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

[24] **Site Internet :**

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956566310006366> Consulté 06/2026

[25] T. B. Jones, *Electromechanics of Particles*, Cambridge University Press, 1995.

[26] Rahmani S., Hadj Ahmed F., *Étude et simulation d'un séparateur électrostatique à tambour pour le tri des déchets granulaires*, Mémoire de Master, Université Dr Moulay Tahar de Saïda, Saïda, Algérie, 2022.

[27] Gontran Richard « Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires » thèse de doctorat, Université Poitiers 2018.

[28] **Site Internet :** https://fr.made-in-china.com/co_gelinmachinery/product_Electrostatic-Separator-for-Copper-Ore-and-Aluminium-Recycling_uonuygnniy.html Consulté 06/2026

[29] **Site Internet :** https://www.researchgate.net/figure/Separateur-electrostatique-a-chute-libre-10_fig11_361713606 Consulté 06/2026

[30] **Site Internet :** <https://ds.univ-oran2.dz:8443/jspui/bitstream/123456789/7594/1/chape%2001%20officielle%201.pdf>
Consulté 06/2026

[31] **Site Internet :** https://www.researchgate.net/figure/Schema-simplifie-du-principe-de-lelectro-separation_fig4_283516594 Consulté 06/2026

[32] **Site Internet :** COMSOL AB, "COMSOL Multiphysics Documentation," Available: www.comsol.com/documentation, Consulté 06/2026

[33] **Site Internet :** https://www.researchgate.net/figure/Flow-chart-illustrating-simulation-procedure-in-COMSOL-multiphysics-a-simulation-steps-b_fig1_353462993 Consulté 06/2026

[34] kaddouri walid - driss chaimaa < Effet des particules sur le champ électrique d'un convoyeur à ondes mobiles > (page36-37). Université Belhadj Bouchaib.Ain Temouchent 2021- 2022.

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

Résumé

Résumé

Ce travail porte sur la modélisation numérique bidimensionnelle d'un convoyeur électrostatique à ondes mobiles biphasé, appliqué à la séparation de mélanges granulaires cuivre/PVC. La simulation est réalisée sous COMSOL Multiphysics 5.3a par la méthode des éléments finis, pour trois configurations : convoyeur à vide, avec une particule conductrice en cuivre, et avec une particule isolante en PVC. L'analyse porte sur la distribution du potentiel électrique et l'intensité du champ électrique, notamment au niveau des électrodes et des coins des particules. Les résultats obtenus sont comparés à ceux d'une étude antérieure réalisée sous Flux 2D, révélant une convergence satisfaisante entre les deux solveurs avec un écart relatif de 5,5 % à 7,5 %. Il est démontré que la nature de la particule influence significativement la topologie du champ électrique, la particule conductrice en cuivre engendrant une concentration critique du champ susceptible de provoquer un claquage diélectrique.

Mots-clés : Vecteur à onde mobile — Séparation électrostatique — Champ électrique — Méthode des éléments finis — COMSOL Multiphysics — Flux 2D — Modélisation numérique

Abstract

This work focuses on the two-dimensional numerical modeling of a two-phase moving-wave electrostatic conveyor, applied to the separation of granular copper/PVC mixtures. The simulation was performed using COMSOL Multiphysics 5.3a with the finite element method, for three configurations: a vacuum conveyor, one with a conductive copper particle, and one with an insulating PVC particle. The analysis examines the distribution of the electric potential and the intensity of the electric field, particularly at the electrodes and particle corners. The results obtained are compared to those of a previous study performed with Flux 2D, revealing satisfactory convergence between the two solvers with a relative difference of 5.5% to 7.5%. It is demonstrated that the nature of the particle significantly influences the topology of the electric field, with the conductive copper particle generating a critical field concentration capable of causing dielectric breakdown.

Keywords: Moving-wave carrier — Electrostatic separation — Electric field — Finite element method — COMSOL Multiphysics — Flux 2D — Numerical modeling

ملخص

يركز هذا العمل على النمذجة العددية ثنائية الأبعاد لنقل كهروساكن ثنائي الطور ذي موجة متحركة، مُطبق على فصل بتقنية العناصر COMSOL Multiphysics 5.3a أُجريت المحاكاة باستخدام برنامج PVC/مخاليط حبيبية من النحاس عازل. يدرس PVC المحدودة، لثلاثة تكوينات: ناقل فراغي، وآخر مزود بجسيم نحاسي موصل، وثالث مزود بجسيم التحليل توزيع الجهد الكهربائي وشدة المجال الكهربائي، لا سيما عند الأقطاب الكهربائية وزوايا الجسيمات. قورنت النتائج ، وكشفت عن تقارب مُرضٍ بين البرنامجين بفارق Flux 2D المُتحصل عليها بنتائج دراسة سابقة أُجريت باستخدام برنامج نسبي يتراوح بين 5.5% و 7.5%. وقد ثبت أن طبيعة الجسيم تؤثر بشكل كبير على طوبولوجيا المجال الكهربائي، حيث يُولد الجسيم النحاسي الموصل تركيزًا حرجًا للمجال قادر على إحداث انهيار عازل

الكلمات المفتاحية

COMSOL — ناقل الموجات المتحركة — الفصل الكهروستاتيكي — المجال الكهربائي — طريقة العناصر المنتهية
Multiphysics — Flux 2D — النمذجة العددية