

R épublique Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Khenchela
Faculté des sciences et de la technologie
Département de Génie électrique



Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commandes Électriques

Thème

**Optimisation et commande par l'approche MSR
d'un séparateur électrostatique modélisé par
éléments finis**

Réalisé par : RAHALI Mouni

Devant le jury :

Président : Dr. AMIEUR Oualid

Encadrant : Dr. NADJEM Abdelkader

Examineur : Dr. DJELAILIA Okba

Université de Tébessa

Université de Khenchela

Université de Khenchela

Année universitaire :2025/2026

Remerciements:

Je commence par louer Dieu , Celui qui a éclairé mon chemin et m'a donné la force et la patience jusqu'à atteindre ce moment que j'ai façonné après un long effort.

- **À ma chère mère...**

Toi qui m'as élevée, éduquée et as enveloppé ma fatigue avant même ma joie...Tu as été le refuge qui ne se lasse jamais, le soutien qui ne change pas, et la prière qui m'a portée chaque fois que je faiblissais...Tu es le début de toute réussite dans ma vie et son aboutissement.

- **À mon cher père...**

Tu m'as appris que la persévérance est le chemin du succès, et que la force naît de la patience...Tu as été ma motivation pour avancer et m'accrocher à mon rêve malgré les difficultés.

- **À mes sœurs, Ibtissam et Hassiba...**

Vous êtes un morceau de mon cœur et la douceur de mes jours...Avec vous, la vie n'a jamais été lourde, mais plus légère et plus belle...Vous avez été la sérénité de mon âme, mes compagnes de route et la lumière dans mes moments de fatigue...Votre présence dans ma vie est une bénédiction inestimable et votre place dans mon cœur est indescriptible.

- **À mes frères, Yassine, Aziz et Riyad...**

Vous êtes mon pilier sur lequel je m'appuie, et la force inébranlable en moi grâce à vous...Vous êtes mon dos qui ne se courbe pas et ma sécurité à chaque pas que je fais...Avec vous, je me sens entourée d'une force invincible et d'un amour inaltérable...Que Dieu vous protège et fasse de vous une couronne au-dessus de ma tête et un soutien éternel.

- **À mes neveux et nièces...Taj eddine , Chaith , Ghaith, Nadjem Eddine et Ranim**

...Vous êtes la joie et la lumière de la vie, que Dieu vous protège et vous garde toujours source de bonheur dans ma vie.

À ma cousine Hiba, ma sœur...Un morceau proche de mon cœur, une sœur que ma mère n'a pas mise au monde...Ta présence dans ma vie a été un soutien, une chaleur et un refuge sur mon chemin.

- **À mes chères amies...**

Yasmine Merdaci , ton soutien a toujours été une lumière qui m'accompagne. **Oumaima Liani**, tu m'as appris à me choisir avant tout. **Soumia Bouaziz**, avec toi j'ai appris à tracer mon chemin avec calme et détermination. ...**Kenza Abidi**, une amie d'enfance et de réussite. et **Karima Silem** Vous avez été de beaux souvenirs dans un parcours inoubliable.

- **À mon encadrant Dr. Abdelkader Nadjem**

- Nous sommes infiniment reconnaissants envers les membres du jury, **Dr. AMIEUR Oualid** et **Dr. DJELAILIA Okba** qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

Tu as été une empreinte académique inoubliable et un impact qui restera présent sur mon chemin.

Enfin...

Je me remercie moi-même, pour sa patience, sa persévérance, et pour chaque fois où elle a refusé de tomber et a choisi de continuer...

Je la remercie parce qu'elle a cru, persévéré et réussi malgré tout.

Dédicace :

À ma mère et à mon père

À ceux qui, **après la volonté de Dieu**, ont été la raison de mon arrivée à ce stade
À ceux dont les prières et la patience ont été la continuité de mon chemin malgré toute la fatigue
Je vous dédie cette réussite avec tout mon amour et ma reconnaissance.

À ma chère mère

À celle qui a été le véritable soutien dans chaque moment de faiblesse, et la compagne de la tristesse avant la joie
À celle qui a veillé sur moi, m'a entourée et m'a donné la force lorsque j'en avais le plus besoin
Ta présence a été la sécurité qui m'a permis de poursuivre mon chemin.

À mon cher père

Je t'ai promis un jour de réussir et de ne jamais m'arrêter avant d'y parvenir
Je t'ai promis de te rendre fier de moi parce que je suis ta fille
Le chemin n'a pas été facile, mais cette promesse a été ma motivation pour continuer malgré toutes les circonstances.
J'ai toujours été parmi les premières, et je le resterai, si Dieu le veut, fidèle à mon chemin jusqu'au bout.
Aujourd'hui, je tiens ma promesse et je t'offre cette réussite avec fierté et gratitude.

À mes frères et sœurs

Je vous dédie ma réussite, mais ma plus grande réussite est votre présence à mes côtés et votre soutien qui a été mon pilier à chaque étape de mon parcours

À mes chères amies

Je vous dédie ma réussite, car vous avez été une source de motivation pour moi tout au long de mon parcours.

Enfin

À moi-même

À celle qui a lutté, qui a persévéré et qui a souffert en silence tout en continuant malgré toutes les difficultés
À celle qui n'a jamais abandonné ses rêves, malgré tout ce qu'elle a traversé
Cette dédicace est pour toi, avant tout et après tout .

Table des matière

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : État de l'art sur les techniques de séparation électrostatique	
1.1 Introduction	3
1.2 Les matières plastiques	3
1.2.1 Les principales catégories de plastiques	3
1.2.2 Les sources et origines des déchets plastiques	4
1.2.2.1 Les déchets plastiques industriels	4
1.2.2.2 Les déchets plastiques de post-consommation	5
1.2.3 Focus sur les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)	5
1.3 Technologies de séparation des matériaux plastiques	6
1.3.1 Principe général de fonctionnement de la séparation électrostatique	6
1.3.2 Rôle et influence du champ électrique dans le séparateur	8
1.3.3 Paramètres influençant le processus de séparation	8
1.3.3.1 Caractéristiques des matériaux granulaires isolants	8
1.3.3.2 Paramètres du dispositif de chargement (triboélectrification)	8
1.3.3.3 Paramètres de conception et de réglage du séparateur	10
1.3.3.4 Influence des conditions atmosphériques (humidité, température)	10
1.4 Classification des séparateurs tribo-électrostatiques	10
1.4.1 Séparateur à chute libre	10
1.4.2 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses	11
1.4.3 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants	12
1.4.4 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales	12
1.5 Conclusion	13
	14
Chapitre 2 : Modélisation d'un séparateur électrostatique à chute libre	
2.1 Introduction	14
2.2 Modélisation par la méthode des éléments finis (MEF)	14
2.2.1 Principe de la MEF	14
2.2.2 Étapes de la MEF	15
2.2.3 Avantages de la MEF	15
2.2.4 Inconvénients de la MEF	16
2.3 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics	16
2.4 Méthodologie de la simulation	21
2.4.1 Conception expérimentale de la simulation	21
2.4.2 Simulations par la Méthode des Éléments Finis (MEF)	21
2.5 Résultats et discussion	22
2.5.1 Influence de la tension	22
2.5.1.1 Simulation du potentiel et champ électriques	22
2.5.1.2 Analyse de la distribution du champ électrique	23
2.5.2 Influence de l'espacement entre électrodes	25
2.5.2.1 Simulation du potentiel et champ électriques	25
2.5.2.2 Analyse de la distribution du champ électrique	26
2.5.3 Influence de l'angle d'inclinaison	28
2.5.3.1 Simulation du potentiel et champ électriques	28
2.5.3.2 Analyse de la distribution du champ électrique	29
2.6 Conclusion	31

Chapitre 3 : Optimisation et commande d'un séparateur électrostatique à chute libre conventionnel

3.1 Introduction	33
3.2 Méthodologie	33
3.2.1 Conception expérimentale de la simulation	33
3.2.2 Approche MSR-MEF	34
3.2.2.1 Méthodologie de Plan d'Expériences (MPE)	34
3.2.2.3 Simulation et analyse des données	35
3.3 Résultats et analyse	36
3.3.1 Analyse du champ électrique lors d'essais expérimentaux simulés	36
3.3.2 Validation statistique des données PCC	38
3.3.2.1 Conception des expériences de simulation	38
3.3.2.2 Analyse de variance (ANOVA) et résumé de l'ajustement	40
3.3.2.3 Effet des facteurs indépendants	42
3.3.2.4 Effet d'interaction des paramètres d'entrée	45
3.3.3 Optimisation	46
3.4 Conclusion	48

Chapitre 4 : Optimisation et commande d'un séparateur électrostatique à chute libre avec électrodes segmentées

4.1 Introduction	49
4.2 Méthodologie	49
4.2.1 Conception expérimentale de la simulation	49
4.2.2 Approche MSR-MEF	50
4.3 Résultats et analyse	51
4.3.1 Analyse du champ électrique lors d'essais expérimentaux simulés	51
4.3.2 Validation statistique des données PCC	52
4.3.2.1 Conception des expériences de simulation	52
4.3.2.2 Analyse de variance (ANOVA) et résumé de l'ajustement	54
4.3.2.3 Effet des facteurs indépendants	56
4.3.2.4 Effet d'interaction des paramètres d'entrée	58
4.3.2.5 Contribution des termes	59
4.3.3 Optimisation	61
4.3.4 Analyse comparative des configurations d'électrodes	61
4.4 Conclusion	63
Conclusion générale	64
Références bibliographiques	65

Liste des figures et tableaux

Liste des figures et tableaux

Liste des figures

Figure 1.1 : exemple sur les déchets d'équipement électrique et électronique	6
Figure 1.2 : Organigramme de la séparation tribo-électrostatique pour les déchets plastiques	6
Figure 1.3 : Principe de la séparation électrostatique : a) effet couronne et b) triboélectrique	7
Figure 1.4 : L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux surfaces : 1. Surface A neutre, particule B est neutre ; 2. La surface A et la particule B sont en contact ; 3. Après la séparation, la surface A a la tendance de se charger négativement, et la particule B positivement	9
Figure 1.5 : Séparateur tribo-électrostatique à chute libre. (a) : Photographie du dispositif ; (b) : Schéma du dispositif [28]	11
Figure 1.6 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses. (a) : Photographie du dispositif, (b) : Schéma du dispositif [19]	11
Figure 1.7 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournant. (a) : Photographie du dispositif, (b) : Schéma du dispositif	12
Figure 1.8 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales. (a) : Photographie du dispositif, (b) : Schéma du dispositif	13
Figure 2.1 : Interface du logiciel COMSOL Multiphysics 5.6	17
Figure 2.2 : Maillage triangulaire d'une géométrie d'électrodes	20
Figure 2.3 : Modèle 3D du séparateur électrostatique à chute libre	21
Figure 2.4 : Influence de la tension sur le potentiel et le champ électriques ($d = 150 \text{ mm}$ et $\theta = 4,29^\circ$)	23
Figure 2.5 : Variation du champ électrique en fonction de la tension appliquée	24
Figure 2.6 : Variation du champ électrique moyen en fonction de la tension	24
Figure 2.7 : Variation de l'écartement inférieur en fonction de la tension	25
Figure 2.8 : Variation de la non-uniformité du champ électrique en fonction de la tension	25
Figure 2.9 : Influence de l'espacement sur le potentiel et le champ électriques ($U = \pm 10 \text{ kV}$ et $\theta = 4,29^\circ$)	26
Figure 2.10 : Variation du champ électrique en fonction de la distance	26
Figure 2.11 : Variation du champ électrique moyen en fonction de la distance	27
Figure 2.12 : Variation de l'écartement inférieur en fonction de la distance	27
Figure 2.13 : Variation de la non-uniformité du champ électrique en fonction de la distance	28
Figure 2.14 : Influence de l'angle d'inclinaison sur le potentiel et le champ électriques ($U = \pm 10 \text{ kV}$ et $d = 15 \text{ cm}$)	29
Figure 2.15 : Variation du champ électrique en fonction de l'angle d'inclinaison	30
Figure 2.16 : Variation du champ électrique moyen en fonction de l'angle d'inclinaison	30
Figure 2.17 : Variation de l'écartement inférieur en fonction de l'angle d'inclinaison	31
Figure 2.18 : Variation de la non-uniformité du champ électrique en fonction de l'angle d'inclinaison	31
Figure 3.1 : Modèle 3D du séparateur électrostatique à chute libre	34
Figure 3.2 : Surfaces et lignes de contour du champ électrique pour les 16 essais expérimentaux simulés : variation du champ électrique en fonction des facteurs indépendants	37
Figure 3.3 : Distribution du champ électrique le long de l'axe y (région centrale) pour les 16 essais simulés	37
Figure 3.4 : Graphiques de corrélation des valeurs réelles vs. valeurs prédites : a) Y1 : Emoy, b) Y2 : D et c) Y3 : NUF	39

Figure 3.5 : Profils de prévision des réponses en fonction des facteurs indépendants	43
Figure 3.6 : Graphiques 3D des surfaces de réponse illustrant les interactions entre facteurs : (a, b et c) réponse Emoy pour les interactions X_1X_2 , X_1X_3 et X_2X_3 ; (d) réponse NUF pour l'interaction X_2X_3	46
Figure 3.7 : Surfaces et lignes de contour du champ électrique pour la configuration optimale	47
Figure 4.1 : Modèle 3D du séparateur électrostatique à chute libre avec des électrodes segmentées	49
Figure 4.2 : Surfaces et lignes de contour du champ électrique pour les 10 essais expérimentaux simulés : variation du champ électrique en fonction des deux facteurs	51
Figure 4.3 : Distribution du champ électrique le long de l'axe y (région centrale) pour les 10 essais simulés	52
Figure 4.4 : Graphiques de corrélation des valeurs réelles vs. valeurs prédites : a) Y_1 : Emoy, b) Y_2 : D et c) Y_3 : NUF	54
Figure 4.5 : Profils de prévision des réponses en fonction des facteurs indépendants	57
Figure 4.6 : Graphiques de surface de réponse 3D des interactions entre facteurs	59
Figure 4.7 : Contribution des termes à Emoy	60
Figure 4.8 : Contribution des termes à D	60
Figure 4.9 : Contribution des termes à NUF	60
Figure 4.10 : Surfaces et lignes de contour du champ électrique pour les configurations optimales : (a) conventionnelle et (b) proposée	62
Figure 4.11 : Distribution du champ électrique le long de l'axe y pour les configurations optimales	62

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Facteurs étudiés et leurs niveaux pour la conception du PCC	35
Tableau 3.2 : Essais expérimentaux simulés basés sur la méthode PCC et leurs réponses	38
Tableau 3.3 : Analyse de la variance (ANOVA) et résumé de l'ajustement des modèles pour le plan composite centré (PCC)	40
Tableau 3.4 : Les paramètres de signification statistique du PCC	41
Tableau 3.5 : Estimations des coefficients de l'analyse ANOVA	42
Tableau 3.6 : Configurations optimales des variables étudiées	47
Tableau 4.1 : Facteurs étudiés et leurs niveaux pour la conception du PCC	50
Tableau 4.2 : Essais expérimentaux simulés basés sur la méthode PCC et leurs réponses	53
Tableau 4.3 : Analyse de la variance (ANOVA) et résumé de l'ajustement des modèles pour le plan composite centré (PCC)	54
Tableau 4.4 : Les paramètres de signification statistique du PCC	55
Tableau 4.5 : Estimations des coefficients de l'analyse ANOVA	56
Tableau 4.6 : Configurations optimales des variables étudiées	61

Introduction générale

Introduction générale

Le recyclage et la valorisation des déchets plastiques issus des équipements électriques et électroniques en fin de vie constituent aujourd'hui l'une des problématiques majeures, tant sur le plan environnemental qu'économique. Cela s'explique par l'augmentation continue des quantités de ces déchets ainsi que par la complexité de leur structure, ce qui renforce la nécessité de développer des techniques de séparation plus performantes afin d'optimiser la récupération et la réutilisation des matériaux.

Dans ce contexte, les techniques de tri basées sur les propriétés physiques des matériaux suscitent un intérêt croissant. Parmi celles-ci, la séparation électrostatique se distingue comme l'une des méthodes les plus efficaces pour le traitement des matériaux isolants mixtes. Cette technique repose sur la charge des particules, puis sur leur déviation et leur séparation sous l'effet d'un champ électrique, en fonction de la nature de la charge qu'elles portent.

Les performances d'un séparateur électrostatique de type chute libre dépendent de plusieurs facteurs, notamment les caractéristiques géométriques du dispositif ainsi que les paramètres électriques appliqués. En raison de la complexité des phénomènes physiques impliqués, en particulier la distribution du champ électrique et le comportement des particules chargées, il est nécessaire de recourir à des méthodes avancées de modélisation et d'analyse.

Dans le cadre de ce travail, une étude, une modélisation et une optimisation d'un séparateur électrostatique de type chute libre, destiné au traitement d'un mélange isolant–isolant, sont proposées. L'objectif est d'améliorer les performances du système à travers l'analyse de l'influence des différents paramètres de fonctionnement, ainsi que la proposition d'une conception plus efficace.

Pour atteindre cet objectif, une méthodologie combinant la méthode des éléments finis (MEF) et la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) a été adoptée, afin d'analyser l'influence des différents facteurs et de déterminer les conditions opératoires optimales. Ainsi, ce travail vise à améliorer les performances du séparateur électrostatique de type chute libre en augmentant l'homogénéité du champ électrique et en renforçant l'efficacité de la séparation.

Ce travail de recherche est structuré en quatre chapitres interdépendants, visant à présenter une étude complète du séparateur électrostatique :

- Le premier chapitre présente les bases théoriques relatives aux matériaux plastiques, ainsi que les concepts fondamentaux de l'électricité statique et les différents types de séparateurs.
- Le deuxième chapitre met l'accent sur l'influence des paramètres électriques et géométriques du séparateur.
- Le troisième chapitre présente l'étude de l'influence des principaux paramètres de fonctionnement (tension, distance et angle) sur les performances de la configuration conventionnelle, en utilisant une méthodologie hybride qui combine la simulation numérique et l'analyse statistique.
- Le quatrième chapitre traite de l'optimisation des performances du séparateur électrostatique proposé (configuration avec électrodes segmentées), en s'appuyant sur la même méthodologie utilisée dans le chapitre précédent, afin de déterminer les valeurs optimales des paramètres de fonctionnement.

Chapitre 1

État de l'art sur les techniques de séparation électrostatique

1.1 Introduction

Face au défi environnemental posé par l'augmentation continue de la production plastique et l'accumulation des déchets qui en découle, le développement de méthodes de tri et de recyclage performantes est devenu une nécessité absolue pour une valorisation optimale de ces ressources [1, 2]. Dans ce contexte, les séparateurs électrostatiques, et plus particulièrement les dispositifs tribo-électrostatiques, émergent comme une technologie de pointe [3-6].

En exploitant les différences de propriétés électriques des matériaux, ils permettent d'atteindre des niveaux de précision de sélection inégalés par les méthodes conventionnelles. Ce chapitre a pour objectif de dresser un état de l'art sur ce sujet. Il présentera les caractéristiques fondamentales des plastiques, l'origine et la typologie de leurs déchets, avant de détailler les principes physiques de la séparation électrostatique ainsi que ses différentes déclinaisons technologiques.

1.2 Les matières plastiques

Le plastique est une matière synthétique composée de polymères, qui a la propriété d'être moulée ou modelée facilement après chauffage et qui peut être souple ou rigide. On appelle polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes. La majorité des plastiques (99%) utilisés dans le monde est fabriqués à partir de pétrole et de gaz naturel [7].

1.2.1 Les principales catégories de plastiques

Il existe trois grandes catégories de polymères: les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

a. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques se déforment sous l'action de la chaleur et gardent cette forme en refroidissant et ils ne sont pas biodégradables et ont une « durée de vie » de plusieurs centaines d'années. En fonction de la polymérisation on obtient différents produits qui sont [8]:

- les PVC (Chlorure de Polyvinyle),
- les polyéthylènes,
- les polystyrènes,

- les polypropylènes.

b. Les thermodurcissables

Qualifie un polymère ne pouvant être mis en œuvre qu'une seule fois et qui devient infusible et insoluble après polymérisation. Une fois durci, leur forme ne peut plus être modifiée. Les thermodurcissables sont des polymères «alvéolés» [9]. Les plus connus sont les phénoplastes (ou bakélite) (PF21), les polyesters (UP), les époxydes (araldite) (EP), les polyuréthanes (PUR).

c. Les élastomères

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Les élastomères sont caractérisés par leur grande déformabilité (6 à 8 fois leur longueur initiale), et sont obtenus à partir de polymères linéaires caractérisés par des liaisons extrêmement faibles [8]. A côté du caoutchouc naturel, il existe de nombreuses nuances obtenues à partir de dérivés du pétrole: butyle (IIR), Silicone (SI), polyacrylate (ACM), butadiène acrylonitrile (NBR), élastomère fluoré (FKM)... [10].

1.2.2 Les sources et origines des déchets plastiques

1.2.2.1 Les déchets plastiques industriels

Il s'agit de l'ensemble des déchets issus des processus de production des résines (essentiellement trouvés dans les sites pétrochimiques) et de transformation des résines en objets finis (principalement trouvés dans la filière de la plasturgie):

▪ Les déchets de production

Ils proviennent des arrêts de réacteur de polymérisation, des purges de réacteurs et des lots déclassés. Ils sont homogènes et présentent la particularité d'avoir un degré de pollution faible, voire inexistant. On y retrouve, en très grande majorité, les polymères de grande diffusion (PE, PP, PS et PVC) [11].

▪ Les déchets de transformation

Ils proviennent de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage,...). On y retrouve, précisément, les lisières et bordures de ces opérations de thermoformage, les pièces présentant des défauts, ou encore, les chutes de démarrage et d'arrêt de machine. Ces déchets peuvent être homogènes comme

fortement hétérogènes (mélanges provenant de la Co-extrusion, Co-injection, ...) sont, en général, très peu souillés [11].

1.2.2.2 Les déchets plastiques de post-consommation

Comme leur nom l'indique, il s'agit de l'ensemble des déchets issus de la consommation industrielle ou des particuliers. On distingue:

- **Les déchets agricoles**

On retrouve essentiellement les films, sacs, liens, fûts et bidons de produits phytosanitaires. La particularité de ce gisement réside dans ses fortes contamination (terre, cailloux) et pollution. Il s'agit pour l'essentiel de polyoléfines (PEBD, PEHD et PP) [11].

- **Les déchets commerciaux ou de distribution**

Il s'agit des emballages industriels et commerciaux qui sont en général de bonne qualité. Il y a également les fûts, sacs de grande contenance, conteneurs présents dans les secteurs de la chimie, l'agroalimentaire, le bâtiment et les travaux publics, pour le conditionnement et le transport de divers autres produits. Ces deux premiers gisements sont le domaine prépondérant des polyoléfines en majorité écrasante. Enfin, on peut aussi citer le cas des emballages en polystyrène expansé utilisés pour le calage lors du transport de produits fragiles, et dans une proportion moindre, pour les caisses à poisson et les plateaux horticoles [11].

- **Les déchets électriques et électroniques**

C'est un gisement issu de la filière de tous les produits électriques et électroniques tels que les ordinateurs, téléphones, appareils électroménagers et câbles en tout genre [11].

- **Les déchets ménagers**

Ils sont essentiellement constitués par les emballages. Pour ce gisement, trois matières principales sont concernées: le PET (bouteilles de boissons gazeuses, eaux minérales,...), le PEHD (bouteilles de lait, produits lessiviels,...), et le PVC (bouteilles d'eau minérale,...) [11].

1.2.3 Focus sur les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)

Selon l'Université des Nations Unies (UNU), le plastique représente un enjeu crucial du recyclage des DEEE. Dans l'Union européenne, si 50% de ce plastique était réutilisé, cela

économiserait 5 millions de kilowattheures d'énergie et 2 millions de tonnes d'émission de CO₂, soit l'équivalent de 1,6 millions d'allers - retours Paris New-York en avion [12].

Les déchets d'équipements électriques et électroniques sont une catégorie de déchets constituée des équipements en fin de vie, fonctionnant à l'électricité ou via des champs électromagnétiques, ainsi que les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs (Figure 1.1) [13].



Figure 1.1: exemple sur les déchets d'équipement électrique et électronique.

1.3 Technologies de séparation des matériaux plastiques

1.3.1 Principe général de fonctionnement de la séparation électrostatique

La séparation électrostatique est une méthode de tri ou de concentration des matériaux qui repose sur les différences de conductivité électrique (résistivité) entre les composants d'un mélange de particules, sous l'influence d'un champ électrique. L'origine de l'appellation "séparation électrostatique" remonte aux premiers séparateurs purement électrostatiques qui ont été développés, sans recourir au prétendu "flux ionique". Cependant, de nos jours, des dispositifs sont utilisés dans lesquels l'énergie est appliquée sous forme de flux ionique [14].

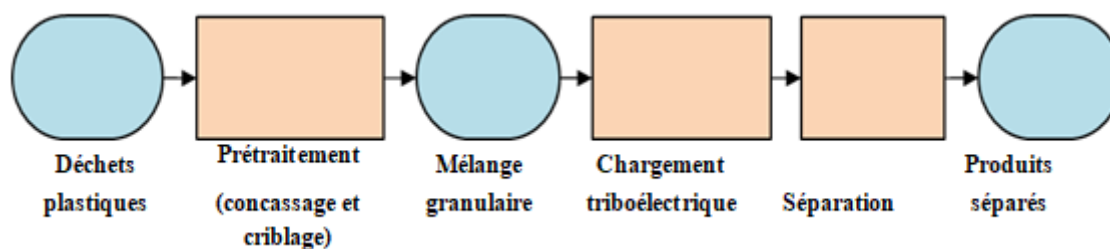


Figure 1.2: Organigramme de la séparation tribo-électrostatique pour les déchets plastiques.

Deux conditions essentielles sont nécessaires pour la séparation électrostatique : un champ électrique d'une intensité suffisante pour séparer une particule électriquement chargée, et des particules présentant une charge électrique superficielle ou susceptibles de subir une polarisation induite, ce qui leur permet de réagir à l'influence du champ électrique. L'électrification par induction se produit lorsqu'une particule non chargée entre en contact avec une surface conductrice mise à la terre (rotor) en présence d'un champ électrique, en supposant la même polarité et le même potentiel que toute surface. L'électrification dans ce cas dépend de l'intensité du champ et de la nature des particules. Par le biais de l'induction, à la fois le matériau conducteur et le matériau diélectrique acquièrent une charge électrique, ce dernier acquérant une polarisation due au transfert de charges. Ainsi, les particules conductrices prennent rapidement le potentiel du rotor (opposé à l'électrode de décharge) et sont attirées vers l'électrode, tandis que les particules non conductrices, celles qui sont incapables d'acquérir une charge, sont attirées vers le rotor ou restent polarisées, traversant largement le champ électrique sans être altérées. Cela permet la séparation des matériaux contenant des particules conductrices de ceux contenant des particules non conductrices. Les particules peuvent acquérir une charge de surface principalement par trois mécanismes : l'attrition (séparation triboélectrique), le bombardement ionique (effet couronne) [15].

Dans les systèmes à décharge corona, les électrodes haute tension créent une décharge corona qui charge les particules dans un flux gazeux, conduisant à leur séparation en fonction de leur charge.

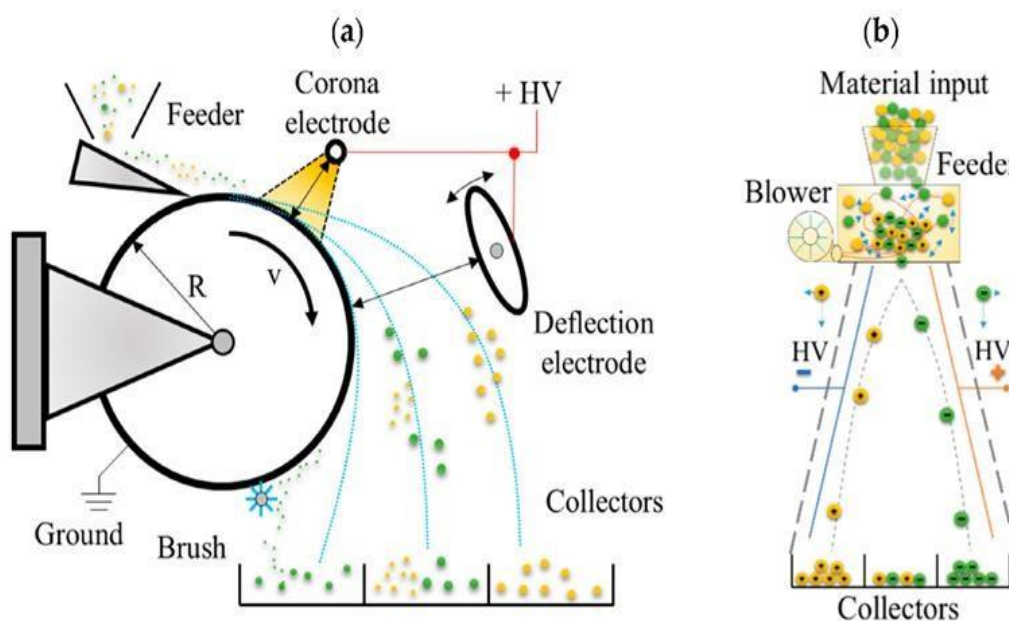


Figure 1.3: Principe de la séparation électrostatique : a) effet couronne et b) triboélectrique.

1.3.2 Rôle et influence du champ électrique dans le séparateur

Dans un séparateur électrostatique, le champ électrique joue un rôle fondamental dans la déflexion et la séparation des particules en fonction de leur conductivité électrique. Il est généralement généré par une haute tension appliquée entre une électrode cylindrique et une électrode plane ou entre deux électrodes de géométries adaptées. Ce champ ionise l'air environnant, créant des charges électriques qui viennent modifier la trajectoire des particules. Les particules conductrices perdent rapidement leurs charges au contact de l'électrode mise à la terre, tandis que les particules isolantes conservent leur charge et sont déviées différemment. L'influence du champ électrique dépend de plusieurs paramètres : sa valeur moyenne, sa répartition spatiale, la forme des électrodes, la distance inter-électrodes, ainsi que la tension appliquée. Une intensité de champ bien choisie permet d'optimiser le taux de récupération des matériaux valorisables et la pureté des fractions séparées. En revanche, un champ trop faible réduit l'efficacité de séparation, tandis qu'un champ excessif peut provoquer des claquages électriques (arcs) nuisant à la stabilité du procédé. Ainsi, la maîtrise du champ électrique constitue un levier essentiel pour la performance des séparateurs électrostatiques.

1.3.3 Paramètres influençant le processus de séparation

L'efficacité d'un séparateur électrostatique dépend de plusieurs paramètres liés aux caractéristiques des matériaux traités, aux conditions de chargement, à la conception de l'appareil ainsi qu'à l'environnement de fonctionnement.

1.3.3.1 Caractéristiques des matériaux granulaires isolants

La nature des particules isolantes (taille, forme, masse volumique, constante diélectrique, taux d'humidité interne) influence directement leur capacité à acquérir et à conserver une charge électrostatique [16]. Les particules de petite taille ont généralement une surface spécifique plus élevée, favorisant les échanges de charges, mais leur faible masse les rend plus sensibles aux forces aérodynamiques et aux perturbations du champ électrique. La forme irrégulière des grains modifie la répartition locale du champ et peut entraîner une déviation imprévisible des trajectoires.

1.3.3.2 Paramètres du dispositif de chargement (triboélectrification)

Le chargement triboélectrique repose sur le contact et le frottement des particules entre elles ou contre une surface spécifique (paroi, cyclone, tube en matériau approprié). Les paramètres clés incluent la nature des matériaux en contact (position dans la série

triboélectrique), la vitesse relative, la durée de contact, la pression de contact et la rugosité des surfaces. Un chargement insuffisant réduit la déviation des particules dans le séparateur, tandis qu'un sur-chargement peut provoquer des effets de répulsion entre particules identiques, nuisant à la sélectivité [17].

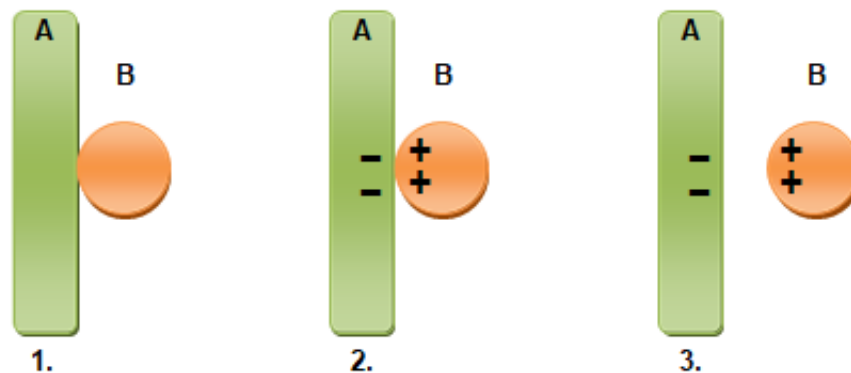


Figure 1.4: L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux surfaces:

- 1. Surface A neutre, particule B est neutre;*
- 2. La surface A et la particule B sont en contact;*
- 3. Après la séparation, la surface A a la tendance de se charger négativement, et la particule B positivement.*

L'effet triboélectrique permet le chargement électrique des matériaux isolants à l'aide d'une grande variété de dispositifs mécaniques ou aérodynamiques (alimentations vibrantes, tubes rotatifs, lits fluidisé, ...).

L'efficacité du chargement dépend de plusieurs facteurs principaux :

- Vitesse de l'air ou intensité du flux dans les systèmes pneumatiques : une augmentation de la vitesse accroît le frottement et donc la charge générée.
- Durée du contact ou du frottement entre les granulés ou avec les parois de l'appareil : plus le contact dure longtemps, plus la charge augmente jusqu'à atteindre l'équilibre.
- Nature du matériau de la paroi ou de la surface frottante : la différence des propriétés électriques entre les deux matériaux influence directement le sens et la valeur du transfert d'électrons.
- Vitesse de rotation dans le cas des tubes ou cylindres rotatifs : une vitesse plus élevée augmente le nombre de collisions et le frottement.
- Pression de l'air dans les systèmes à lit fluidisé ou micro-cyclone, qui contrôle l'intensité du mouvement à l'intérieur de l'appareil.
- Humidité relative : une humidité élevée réduit la charge, car une fine couche d'eau facilite le déchargement des électrons à la surface.

Ainsi, un contrôle précis de ces paramètres permet d'optimiser l'efficacité du chargement triboélectrique et d'assurer une séparation efficace des particules dans le champ électrique.

1.3.3.3 Paramètres de conception et de réglage du séparateur

Les paramètres géométriques (distance inter-électrodes, forme et inclinaison des électrodes, position de l'alimentation, longueur de la zone de séparation) et électriques (tension appliquée) sont déterminants [18-21]. Un réglage optimal de la tension permet d'obtenir un champ électrique suffisant pour dévier les particules chargées sans provoquer de claquage diélectrique (arc électrique). L'angle et la position des déflecteurs mécaniques ajustent également la trajectoire post-déviations.

1.3.3.4 Influence des conditions atmosphériques (humidité, température)

L'humidité relative de l'air ambiant joue un rôle majeur [22, 23]: une humidité élevée favorise la formation d'une couche d'eau superficielle sur les particules, augmentant leur conductivité de surface et accélérant la fuite des charges. Cela réduit l'efficacité de la séparation. À l'inverse, une atmosphère trop sèche (humidité très faible) peut entraîner une accumulation excessive de charges statiques, provoquant des décharges intempestives. La température influence également la mobilité des charges et la rigidité diélectrique de l'air. Une élévation de température peut diminuer la résistivité des matériaux isolants et favoriser les claquages. Le contrôle des conditions ambiantes est donc essentiel pour garantir la reproductibilité et la performance du procédé.

1.4 Classification des séparateurs tribo-électrostatiques

1.4.1 Séparateur à chute libre

Le séparateur électrostatique à chute libre présenté sur la Figure 1.5 a été conçu pour la recherche fondamentale et applicative dans le domaine de la tribo-électrisation, de la séparation des matériaux granulaires plastiques et de la purification des minerais [24-26]. Dans un séparateur électrostatique à chute libre, les deux produits composant le mélange granulaire sont préalablement chargés par un dispositif de chargement triboélectrique, l'un avec une charge négative et l'autre avec une charge positive. Le mélange tombe ensuite dans une zone inter électrodes où un champ électrique intense est créé par les électrodes reliées à des sources de haute tension de polarités opposées. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode de signe opposé à leur charge acquise [27].

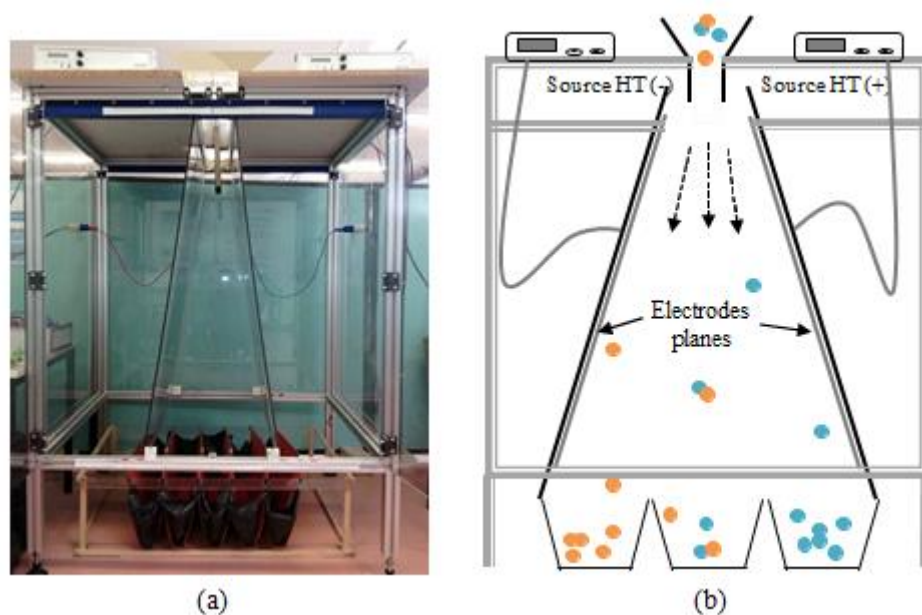


Figure 1.5: Séparateur tribo-électrostatique à chute libre. (a) : Photographie du dispositif ; (b) : Schéma du dispositif. [28].

1.4.2 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses

Les électrodes qui vont attirer la matière granulaire fluidisée sont deux bandes transporteuses du tapis roulant, elles sont à base d'une matière conductrice (Figure 1.6) et s'appuient sur des tambours isolants. Leurs entraînements sont assurés par des moteurs triphasés alternatifs, commandés par des variateurs de fréquence. Les particules chargées collent sur la surface des bandes transporteuses contrairement polarisées, pour être transportées vers la zone de récupération [29, 30].

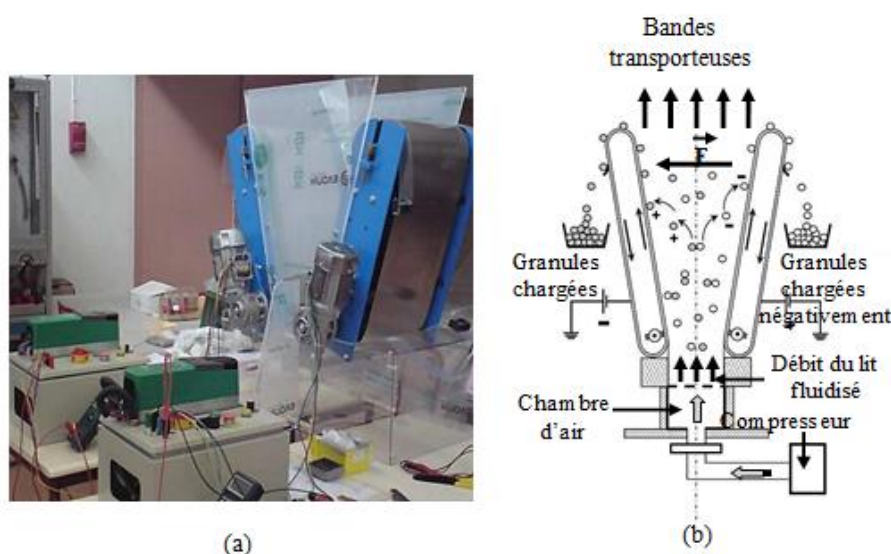


Figure 1.6 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses. (a) : Photographie du dispositif, (b) : Schéma du dispositif. [19].

1.4.3 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants

C'est une installation adaptée particulièrement à la séparation des particules fines de plastique. Deux disques métalliques sont montés sur le même arbre (Figure 1.7), entraîné par un moteur électrique, afin de les tourner dans un mélange de particules fluidisé. Les deux disques qui sont alimentés par deux sources de haute tension de polarités opposées, soulèvent les particules chargées. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques [27, 28,].

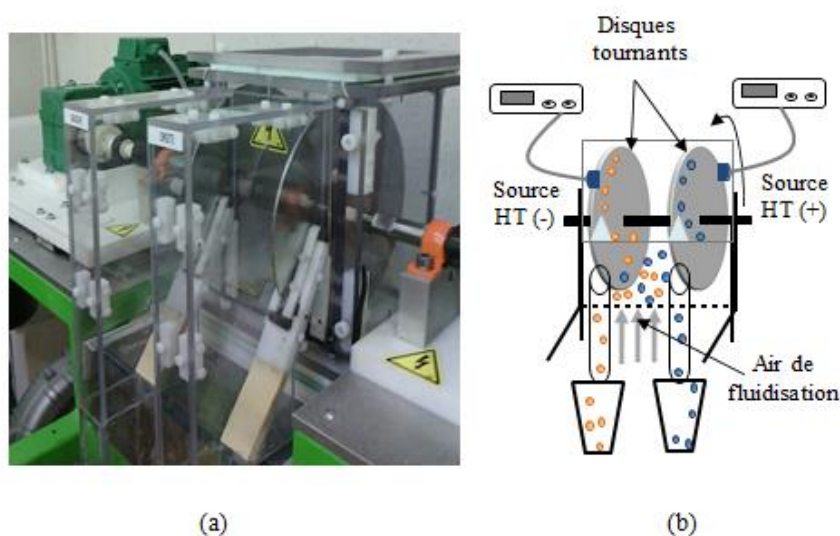


Figure 1.7: Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournant. (a) : Photographie du dispositif, (b) : Schéma du dispositif.

1.4.4 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales

Dans ce dispositif, les deux opérations de chargement et séparation sont combinées en une seule opération. Les granules sont chargés et séparés simultanément. Un des avantages de cette solution réside dans le fait que les particules moins chargées ne quitteront pas la zone active du séparateur jusqu'à ce qu'ils acquièrent une charge suffisante pour permettre aux forces électriques de les conduire à l'électrode de polarité opposée [27].

Le dispositif se compose de deux électrodes verticales à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique isolante, reliées à deux alimentations haute tension continue de polarités opposées. La fluidisation est réalisée par injection d'air en utilisant un souffleur d'air à vitesse variable. Les deux électrodes attirent les particules chargées de signe opposé et repoussent celles de même signe, pour les dévier vers les collecteurs.

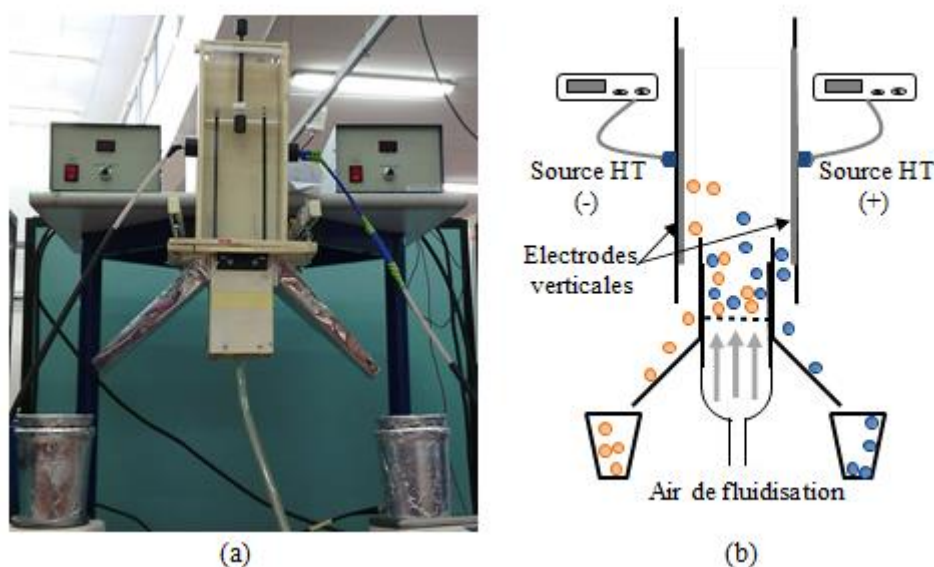


Figure 1.8: Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales. (a) : Photographie du dispositif, (b) : Schéma du dispositif.

1.5 Conclusion

La séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants repose essentiellement sur la capacité du champ électrique à dévier les particules selon leur charge triboélectrique. Ce procédé, propre et efficace, permet de valoriser des mélanges de matériaux difficilement séparables par des voies classiques (densité, aimantation, etc.). L'efficacité de la séparation dépend étroitement de la maîtrise du champ électrique : intensité, répartition spatiale, stabilité et absence de claquage. Un champ bien réglé assure une déviation optimale des particules chargées, tandis qu'un champ mal calibré dégrade la pureté des fractions obtenues. Ainsi, le champ électrique ne se limite pas à un simple paramètre de réglage : il constitue le cœur actif du procédé, dont la compréhension et le contrôle conditionnent directement les performances industrielles et la reproductibilité de la séparation.

Chapitre 2

Modélisation d'un séparateur électrostatique à chute libre

2.1 Introduction

Après avoir établi, dans le chapitre précédent, le contexte théorique et les fondamentaux relatifs à la modélisation du champ électrique dans les séparateurs électrostatiques, le présent chapitre vise à examiner l'influence des paramètres géométriques et électriques sur sa distribution au sein du séparateur à chute libre. La configuration du champ électrique entre les électrodes dépend en effet de multiples facteurs, parmi lesquels la tension appliquée, l'espacement entre les électrodes et leur angle d'inclinaison jouent un rôle prépondérant.

À l'aide d'un modèle numérique développé sous COMSOL Multiphysics® à partir d'une géométrie conçue sous SOLIDWORKS, nous réaliserons une étude paramétrique systématique pour évaluer l'effet de ces trois facteurs sur les caractéristiques essentielles du champ — sa valeur moyenne, sa distribution et son degré d'uniformité. Pour chaque cas, nous examinerons comment la variation du facteur considéré affecte simultanément ces indicateurs de performance, en cherchant à déterminer si son action constitue une amélioration ou une détérioration des performances recherchées.

Cette approche permettra de mettre en lumière les tendances individuelles et les éventuels compromis à envisager, dans le but ultime d'approfondir la compréhension des phénomènes en jeu et de formuler des recommandations visant à améliorer l'efficacité du processus de séparation.

2.2 Modélisation par la méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis (MEF) a pris un essor considérable avec le développement des moyens informatiques. Dès les années 1960, elle est devenue, par sa souplesse d'emploi et sa très grande généralité, une méthode numérique indispensable pour la résolution des problèmes aux dérivées partielles [31].

2.2.1 Principe de la MEF

Le principe de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis (appelé maillage). C'est une étape très importante, puisque le choix de la forme de l'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci, qui soient les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude [32].

Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que :

- Des triangles, des rectangles, des quadrilatères arbitraires pour les problèmes à deux dimensions.
- Des tétraèdres, des hexaèdres, des cubes, des prismes pour des problèmes à trois dimensions.

2.2.2 Étapes de la MEF

Pour une analyse par éléments finis, tout un travail de préparation et de finalisation doit être effectué. C'est ce que nous décrivons dans les étapes suivantes :

1. Discrétisation du domaine : elle consiste à sélectionner la forme des éléments de maillage et à construire celui-ci sur l'ensemble du domaine, ainsi qu'à procéder à la numérotation des nœuds, des éléments et des coordonnées.
2. Sélection de la fonction d'interpolation.
3. Dérivation de la formulation variationnelle de l'équation aux dérivées partielles pour un élément typique.
4. Dérivation de la matrice de rigidité des éléments.
5. Assemblage de la matrice de rigidité globale.
6. Imposition des conditions aux limites.
7. Solution de l'équation globale assemblée.
8. Représentation des résultats sous forme de tableau ou de graphique.

Actuellement, il existe différents logiciels qui utilisent cette méthode comme le Femlab, Maxwell, Flux2D et FEMM. Dans la suite de ce travail, nous allons utiliser le logiciel COMSOL Multiphysics [31].

2.2.3 Avantages de la MEF

- La flexibilité est l'un des plus importants avantages de la MEF. Les éléments peuvent avoir plusieurs formes variées et peuvent donc s'adapter facilement à n'importe quelles formes géométriques complexes, et aussi tenir compte des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.
- Les matrices formant le système final d'équations sont symétriques.
- La MEF a fait ses preuves dans beaucoup de domaines en ingénierie. De plus, avec son développement important, il existe de très bons logiciels commerciaux qui sont basés sur cette méthode et qui la rendent très accessible. Et par conséquent, elle est applicable à beaucoup de problèmes sans que nous connaissions nécessairement la MEF en détail [32].

2.2.4 Inconvénients de la MEF

- La solution calculée reste toujours dépendante des données numériques initiales
- (caractéristiques des matériaux, ...) conditions aux limites. En ce sens, l'influence de ces paramètres sur les résultats requiert un nouveau calcul avec d'autres valeurs.
- La modification d'une partie de la géométrie entraîne un nouveau maillage et, donc une remise à zéro dans les calculs.
- Un mauvais choix du maillage proposé automatiquement par les logiciels, limite la précision des résultats. L'utilisateur doit donc porter une attention particulière lors de cette étape. Le traitement d'une problématique par la MEF implique une connaissance parfaite du domaine géométrique et des conditions aux limites. Ce qui complique la mise en œuvre de ce traitement lorsque ce n'est pas le cas [32].

2.3 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

Le logiciel COMSOL Multiphysics (version 5.6) est un outil sophistiqué pour les simulations numériques. Il sert à résoudre les équations différentielles partielles en se basant sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de modéliser et de simuler divers phénomènes physiques, comme le transfert de chaleur, la mécanique des fluides, l'électromagnétisme et la mécanique des matériaux. Il offre une grande bibliothèque de modèles physiques qui peuvent être combinés dans un seul environnement de simulation.

Le logiciel s'appuie sur une interface graphique interactive qui rend possible la création de modèles physiques et la spécification des conditions aux limites ainsi que des propriétés physiques des systèmes étudiés. Il permet aussi d'analyser les résultats et de les représenter graphiquement. De plus, le logiciel peut être associé à d'autres programmes d'ingénierie pour simplifier la création des modèles géométriques.

Dans cette étude, SOLIDWORKS a été employé pour la conception du modèle géométrique en raison de sa grande précision dans le dessin des formes géométriques complexes et de sa facilité à contrôler leurs dimensions. Ce modèle a ensuite été importé dans COMSOL Multiphysics pour effectuer les simulations numériques et analyser les résultats.

▪ Interface du logiciel COMSOL Multiphysics 5.6

L'interface utilisateur de COMSOL 5.6 s'articule autour de trois fonctions principales : le constructeur de modèle, les paramètres de géométrie, et la fenêtre graphique.

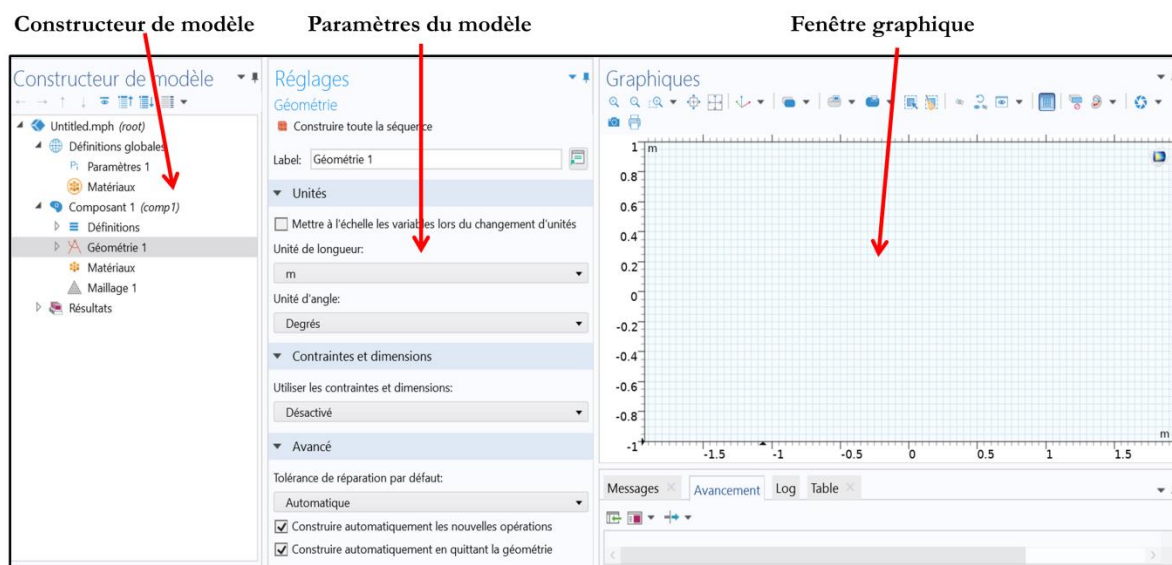


Figure 2.1: Interface du logiciel COMSOL Multiphysics 5.6.

a) Construction du modèle

L'interface comprend un constructeur de modèle situé à gauche, qui permet de définir les paramètres du problème. Cette section inclut également le modèle avec les composants suivants:

- ☐ **Géométrie** : Pour créer et modifier des formes en 2D ou en 3D.
- ☐ **Matériaux** : Sert à définir les propriétés physiques des matériaux, comme la conductivité, la densité et la capacité thermique.
- ☐ **Physique** : Pour la sélection des modèles physiques qui s'appliquent à chaque domaine (électrique, mécanique, thermique, etc.).
- ☐ **Maillage** : Permet de définir la taille et le type de maillage, avec des options manuelles et automatiques.

Le constructeur de modèle contient aussi l'étude, qui sert à choisir le type d'étude (stationnaire, temporelle, fréquentielle) et les paramètres du solveur. La fenêtre résultats permet de voir les résultats après la simulation.

La colonne de droite présente les propriétés de l'élément sélectionné (objet géométrique, matériau ou paramètre physique), et permet de modifier les valeurs, de choisir les unités et de définir les paramètres initiaux de la simulation.

b) Déclaration des paramètres physiques

COMSOL 5.6 permet de saisir les paramètres électriques, mécaniques et physiques de chaque domaine dans la fenêtre Physique. Par exemple:

- Tension électrique ;
- Courant ou induction ;
- Conductivité ;
- Propriétés mécaniques ou thermiques.

Chaque paramètre peut être modifié dans la fenêtre Propriétés qui correspond à l'élément.

c) Représentation graphique

La fenêtre Graphiques, habituellement située en haut à droite, sert à:

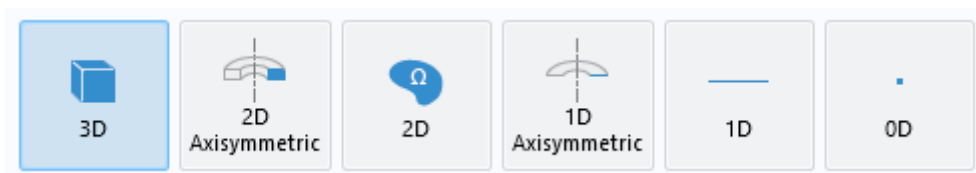
- ☐ Afficher la géométrie, le maillage ou les résultats de la simulation.
- ☐ Modifier l'angle de vue en 2D ou en 3D.
- ☐ Sélectionner les objets, les domaines, les frontières ou les points.
- ☐ Zoomer, dézoomer ou faire pivoter le modèle.

Dans la version 5.6, certaines options interactives des versions récentes (comme le View Cube ou le passage perspective/orthographique) ne sont pas offertes, mais les fonctions de base sont incluses.

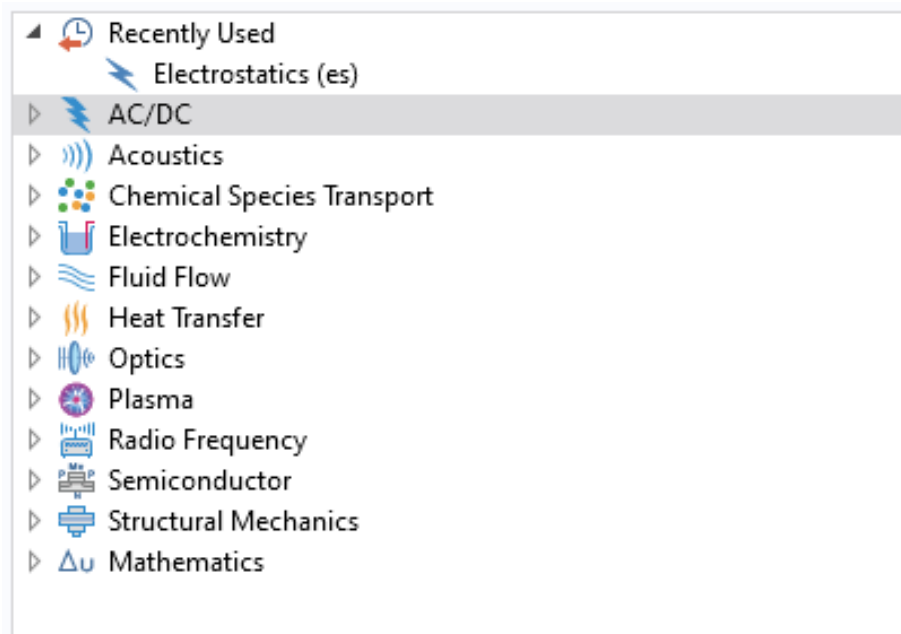
Le plan de décisions et de construction était comme suit :

1. Création du modèle de simulation

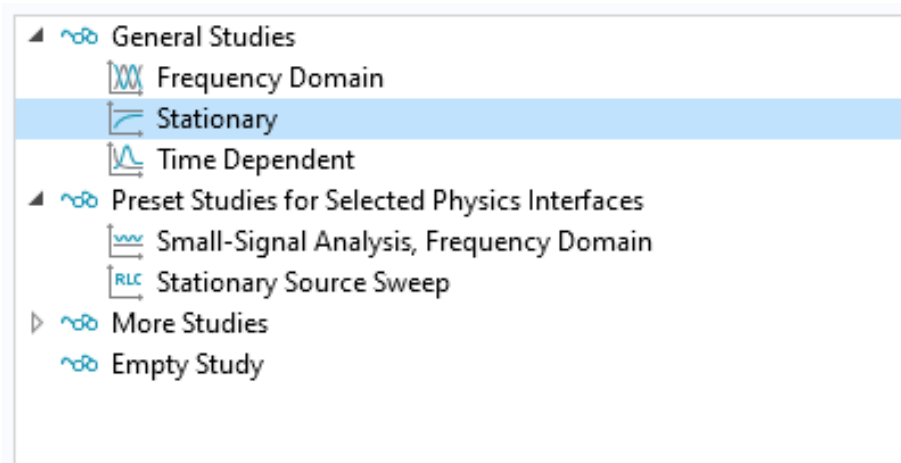
- ✓ Choix de la dimension d'espace: pour raison de simplification, la dimension a été prise en 2D.



- ✓ Choix du modèle physique approprié: on a sélectionné Electrostatique dans la catégorie AC/DC.



- ✓ Choix du type d'étude : l'étude a été faite en régime stationnaire.



2. Définition des paramètres globaux et création de la géométrie

- ✓ **Choix de l'unité** : L'unité de longueur utilisée dans cette étude est le mètre (mm).
- ✓ **Construction de la géométrie** : La géométrie du séparateur électrostatique a été réalisée en utilisant le logiciel de conception assistée par ordinateur SOLIDWORKS. Ce logiciel a permis de modéliser les différents éléments du dispositif en définissant leurs dimensions, leurs positions ainsi que leurs orientations.

Après la création du modèle géométrique, celui-ci a été exporté puis importé dans le logiciel de simulation numérique COMSOL Multiphysics afin de réaliser l'étude électrostatique.

3. Ajout des propriétés des matériaux composant l'installation

- ✓ **Choix des matériaux** : Une bibliothèque de matériaux est à disposition dans COMSOL, le navigateur des matériaux nous a permis d'associer les propriétés des matériaux à chaque domaine. Le choix de matériaux était comme suit :

- L'air pour l'environnement,
- L'aluminium pour les 2 électrodes,

4. Ajout des conditions frontières

- ✓ **Paramétrage des modules physiques** : on a imposé des conditions sur certaines frontières en introduisant les valeurs des hautes tensions appliquées aux deux électrodes.

5. Maillage

Après avoir établi les principes physiques, la géométrie est divisée en un réseau d'éléments plus petits pour simplifier la résolution des équations.

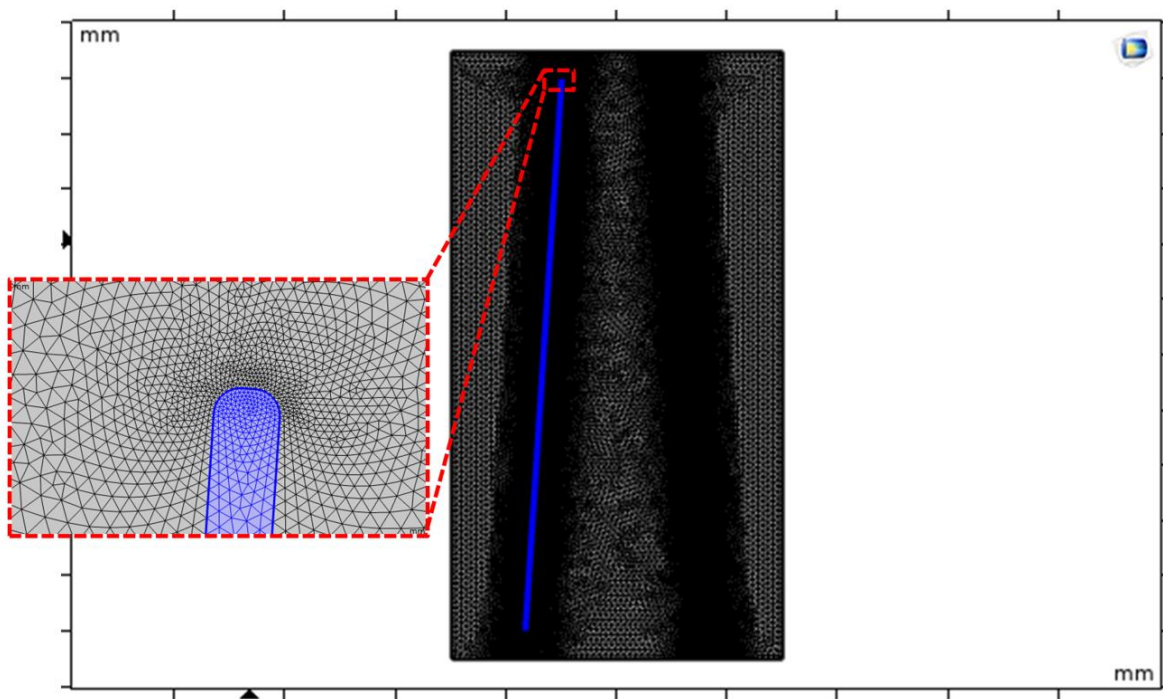


Figure 2.2: Maillage triangulaire d'une géométrie d'électrodes.

6. Simulation et traitement des résultats

Après le calcul basé sur la méthode des éléments finis, on obtient les résultats de la simulation. Ces résultats peuvent être représentés sous plusieurs formes : distribution du potentiel, représentation vectorielle du champ électrique, répartition des lignes équipotentiellles.

2.4 Méthodologie de la simulation

2.4.1 Conception expérimentale de la simulation

Le modèle utilisé dans cette étude est un séparateur électrostatique à chute libre, constitué d'électrodes planes (Figure 2.3). Chaque électrode présente une longueur de 1000 mm et une largeur de 150 mm.

L'étude visait à évaluer l'influence de trois facteurs (la tension appliquée, l'espacement et l'angle d'inclinaison) sur deux paramètres caractéristiques du champ électrique — à savoir sa valeur moyenne et sa non-uniformité — ainsi que sur l'écartement inférieur entre les électrodes de polarité opposée.

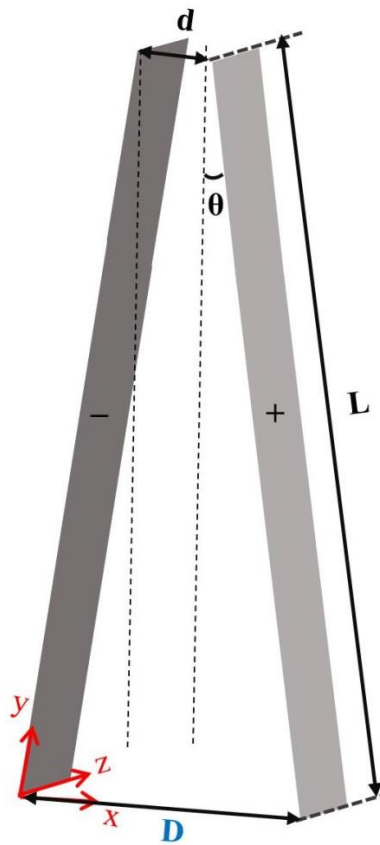


Figure 2.3: Modèle 3D du séparateur électrostatique à chute libre.

2.4.2 Simulations par la Méthode des Éléments Finis (MEF)

Des simulations numériques ont été réalisées par la méthode des éléments finis (MEF) à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics (version 5.6 ; COMSOL Inc., Burlington, Massachusetts). L'influence des facteurs clés a été analysée à l'aide du module Électrostatique de COMSOL.

Chaque modèle bidimensionnel intégrait des frontières rectangulaires pour délimiter le domaine de calcul et l'air environnant, garantissant ainsi une simulation précise du champ électrique dans la région cible. Les domaines ont été discrétisés en une densité élevée d'éléments finis, avec un maillage extrêmement fin appliqué aux zones critiques pour assurer la précision des résultats.

La permittivité relative de l'air a été fixée à 1. Toutes les électrodes en aluminium présentaient une épaisseur de 1 mm et un rayon de courbure de 0,4 mm. La distribution du champ électrique a été simulée dans la région centrale du dispositif.

Les valeurs de E_{max} et E_{min} ont été extraites directement de COMSOL, tandis que E_{moy} a été calculée le long de l'axe y par intégration des courbes de champ électrique à l'aide de la méthode des trapèzes [33]. La non-uniformité du champ électrique (NUF) a été calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$NUF = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{moy}} \quad (4)$$

où E_{max} , E_{min} et E_{moy} représentent respectivement les valeurs maximale, minimale et moyenne du champ électrique.

Cet indice quantifie la dispersion du champ par rapport à son intensité moyenne. Une valeur élevée de NUF indique une mauvaise uniformité, caractérisée par de forts gradients de champ, tandis qu'une valeur faible de NUF (tendant vers zéro) traduit une meilleure uniformité.

2.5 Résultats et discussion

Pour obtenir de bonnes performances en séparation électrostatique, la valeur moyenne du champ électrique, son uniformité et l'écartement inférieur entre les électrodes doivent être élevés. Ces conditions sont nécessaires, d'une part, pour assurer la traction efficace des particules et, d'autre part, pour minimiser les collisions entre les particules et les électrodes, deux problèmes majeurs auxquels ce procédé est constamment confronté.

2.5.1 Influence de la tension

2.5.1.1. Simulation du potentiel et champ électriques

La Figure 2.4 suivante illustre la distribution du potentiel électrique et du champ électrique le long de l'axe horizontal du séparateur pour différentes tensions appliquées (± 5

kV à ± 15 kV). Le potentiel électrique (graphique supérieur) décroît progressivement entre les électrodes positive et négative, avec une amplitude proportionnelle à la tension appliquée. Le champ électrique (graphique inférieur) augmente avec la tension. La distribution du champ est non-uniforme ; cette non-uniformité s'explique par la géométrie des électrodes, la région de champ intense correspondant à la zone de plus forte variation du potentiel.

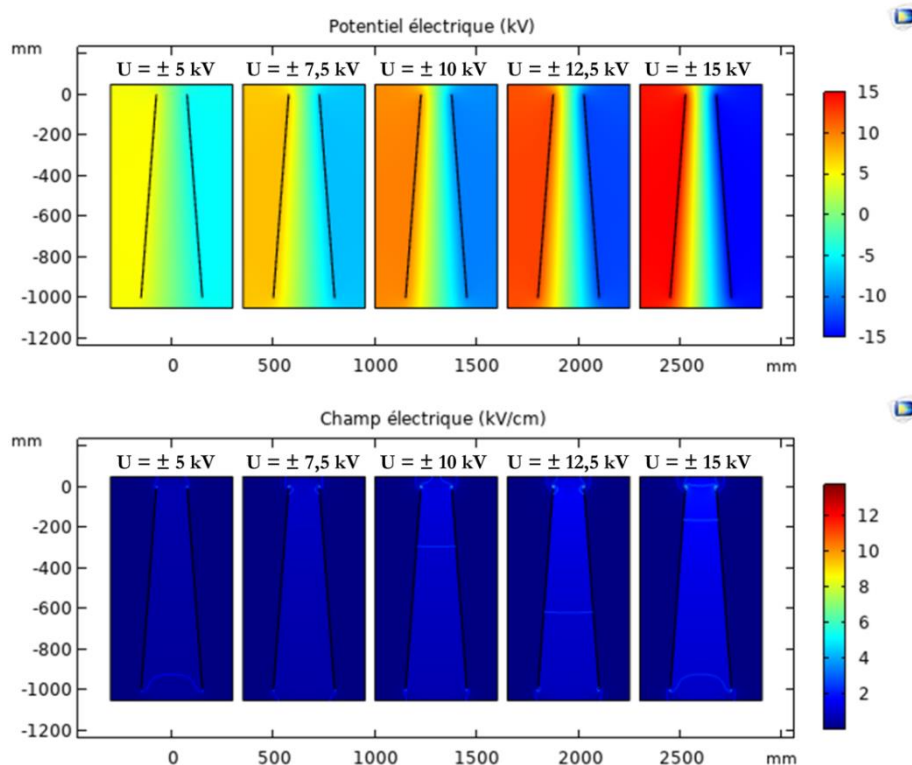


Figure 2.4: Influence de la tension sur le potentiel et le champ électriques ($d = 150$ mm et $\theta = 4,29^\circ$).

2.5.1.2. Analyse de la distribution du champ électrique

La Figure 2.5 présente la distribution du champ électrique le long de la hauteur du séparateur (de 0 à 1000 mm) pour différentes valeurs de tension appliquée, comprises entre ± 5 kV et ± 15 kV.

L'intensité du champ électrique varie considérablement le long de la hauteur du séparateur, avec une nette diminution dans la région inférieure (vers 800-1000 mm). Cette distribution non-uniforme est caractéristique de la géométrie des électrodes inclinées.

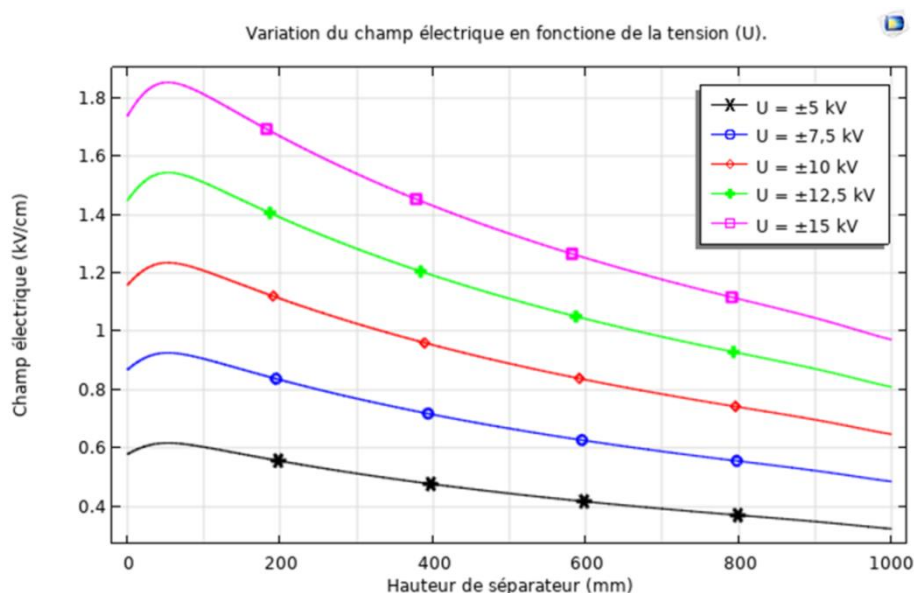


Figure 2.5: Variation du champ électrique en fonction de la tension appliquée.

La Figure 2.6 représente l'influence de la tension sur la valeur moyenne du champ électrique (E_{moy}). La tension est un paramètre électrique qui agit directement sur l'intensité du champ. Conformément à la relation fondamentale liant la différence de potentiel à la distribution du champ électrique, l'augmentation de la tension accroît proportionnellement la valeur de E_{moy} .

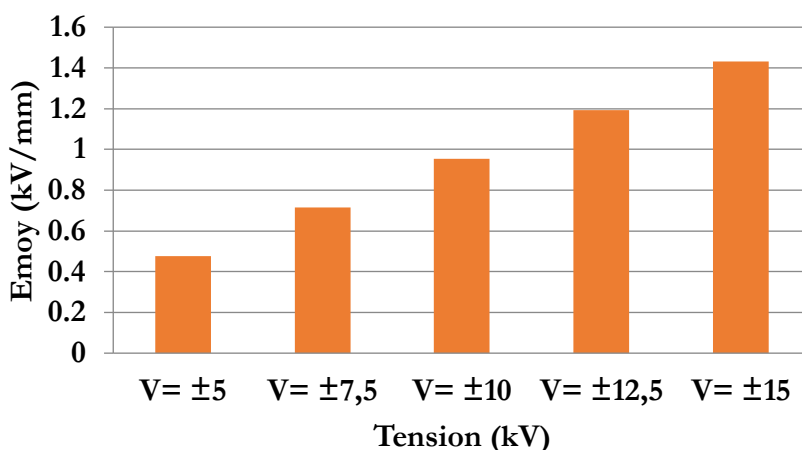


Figure 2.6: Variation du champ électrique moyen en fonction de la tension.

Les Figures 2.7 et 2.8 représentent l'influence de la tension sur l'écartement inférieur (D) et la non-uniformité du champ électrique (NUF). À partir de ces figures, on observe que la tension n'affecte ni la configuration géométrique du système ni la distribution spatiale des lignes de champ, ce qui explique pourquoi ni D ni NUF ne varient avec la tension.

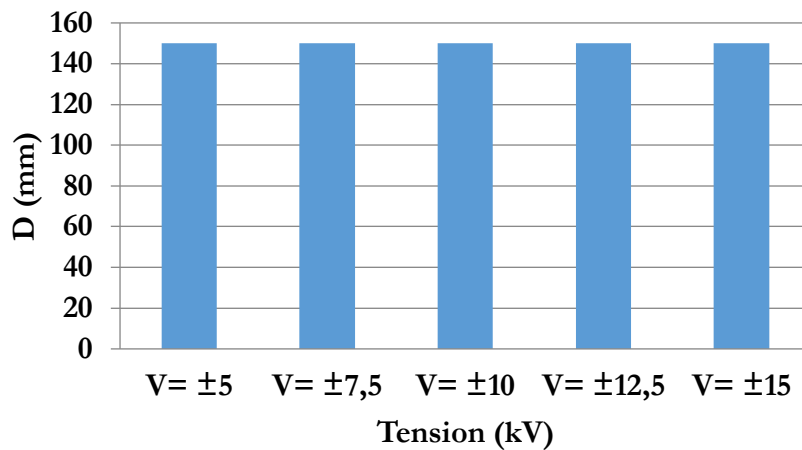


Figure 2.7: Variation de l'écartement inférieur en fonction de la tension.

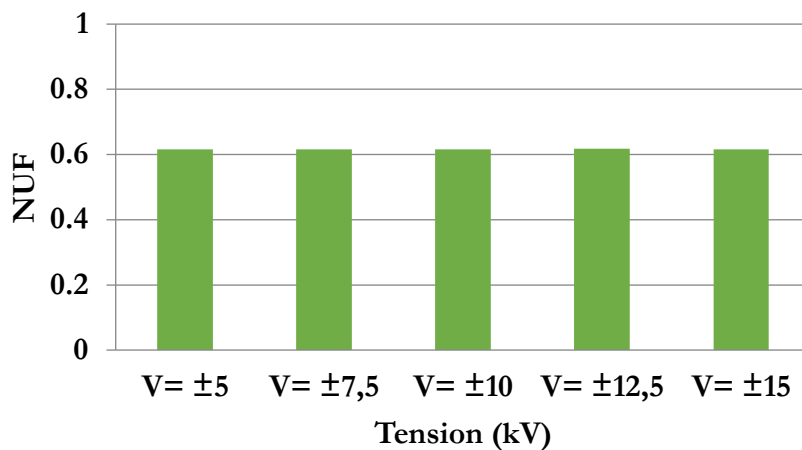


Figure 2.8: Variation de la non-uniformité du champ électrique en fonction de la tension.

2.5.2 Influence de l'espacement entre électrodes

2.5.2.1. Simulation du potentiel et champ électriques

La Figure 2.9 suivante illustre la distribution du potentiel électrique et du champ électrique le long de l'axe horizontal du séparateur pour différentes valeurs d'espacement entre électrodes ($d = 10$ cm à 20 cm). Le potentiel électrique (graphique supérieur) décroît progressivement entre les électrodes positive et négative avec une amplitude constante (environ ± 10 kV), mais sa pente de décroissance est d'autant plus rapide que l'espacement est faible. Le champ électrique (graphique inférieur) voit son intensité maximale diminuer lorsque l'espacement augmente. La distribution du champ est non-uniforme : un faible espacement génère un champ intense mais concentré, tandis qu'un grand espacement produit un champ plus faible mais mieux réparti spatialement.

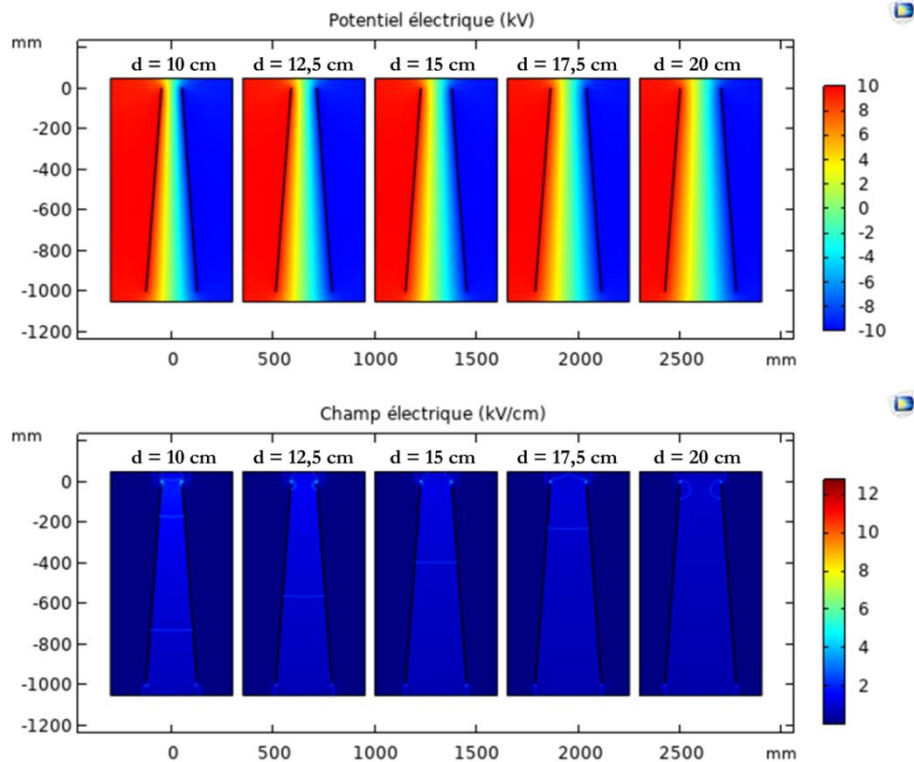


Figure 2.9: Influence de l'espacement sur le potentiel et le champ électriques ($U=\pm 10$ kV et $\theta = 4,29^\circ$).

2.5.2.2. Analyse de la distribution du champ électrique

La Figure 2.10 présente la variation du champ électrique le long de la hauteur du séparateur (de 0 à 1000 mm) pour différentes distances de séparation d , allant de 10 cm à 20 cm.

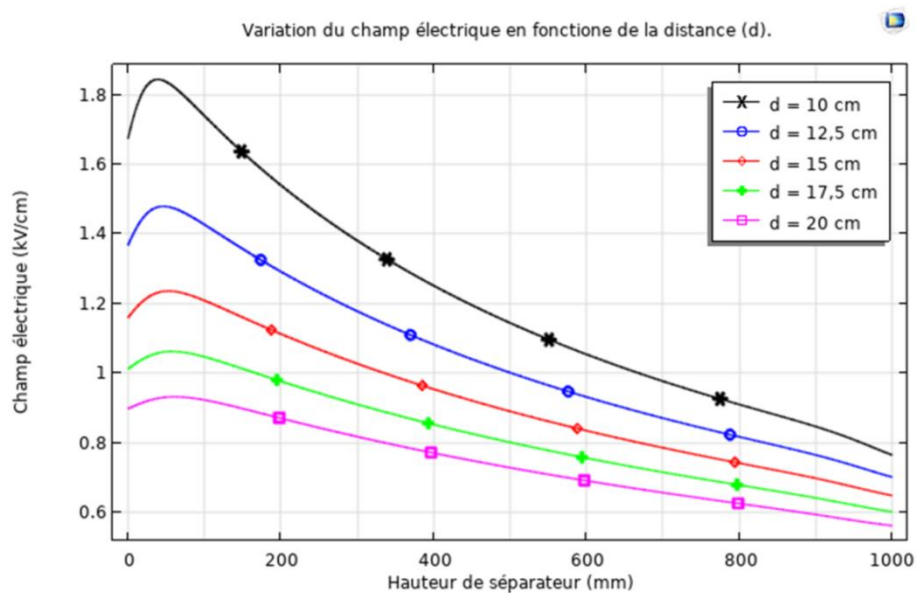


Figure 2.10: Variation du champ électrique en fonction de la distance.

L'intensité du champ électrique diminue globalement lorsque la distance d augmente, ce qui est attendu étant donné que le champ est inversement proportionnel à la distance pour une tension donnée.

La Figure 2.11 représente l'influence de l'espacement sur la valeur moyenne du champ électrique (E_{moy}). L'espacement entre les électrodes est un paramètre géométrique qui agit aussi sur l'intensité du champ. Conformément à la relation fondamentale liant la différence de potentiel à l'espacement, l'augmentation de l'espacement décroît proportionnellement la valeur de E_{moy} .

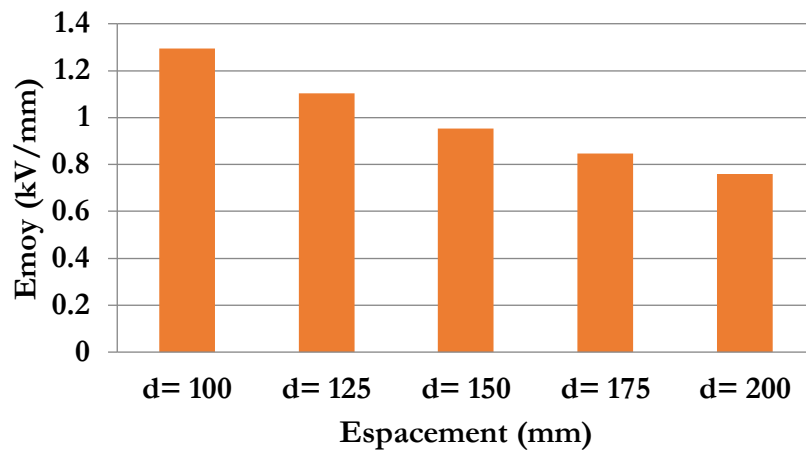


Figure 2.11: Variation du champ électrique moyen en fonction de la distance.

La Figure 2.12 illustre l'effet de l'espacement sur l'écartement inférieur entre les électrodes (D). L'augmentation de d élargit naturellement D , d'où l'effet positif observé.

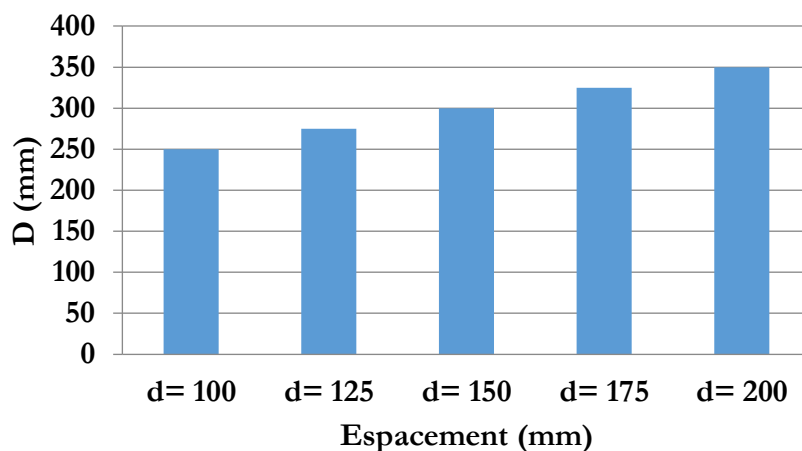


Figure 2.12: Variation de l'écartement inférieur en fonction de la distance.

La Figure 2.13 représente la variation de l'écartement inférieur entre les électrodes (D) en fonction de l'espacement (d). On observe que l'augmentation de d entraîne une diminution de la NUF, traduisant ainsi une amélioration de l'uniformité du champ électrique.

Ce résultat s'explique par les effets de bord : un espacement plus important atténue ces effets, responsables des fortes hétérogénéités locales. En éloignant les électrodes, on réduit les zones de concentration du champ, ce qui améliore l'uniformité globale (diminution de la NUF).

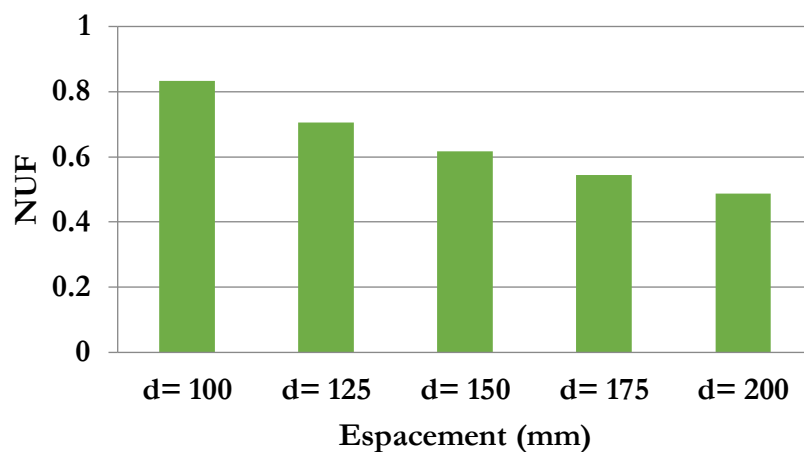


Figure 2.13: Variation de la non-uniformité du champ électrique en fonction de la distance.

2.5.3 Influence de l'angle d'inclinaison

2.5.3.1. Simulation du potentiel et champ électriques

La Figure 2.14 illustre la distribution du potentiel électrique (graphique du haut) et du champ électrique (graphique du bas) le long de l'axe horizontal du séparateur pour différents angles d'inclinaison A , allant de 0° à $8,53^\circ$.

Le potentiel électrique décroît de manière monotone entre l'électrode positive et l'électrode négative. On observe que l'augmentation de l'angle d'inclinaison modifie la forme de cette décroissance : plus l'angle est grand, plus la chute de potentiel devient prononcée dans la région médiane.

L'intensité du champ électrique diminue avec l'angle d'inclinaison. La distribution reste symétrique, mais la zone de champ intense se resserre autour du centre pour les angles les plus élevés.

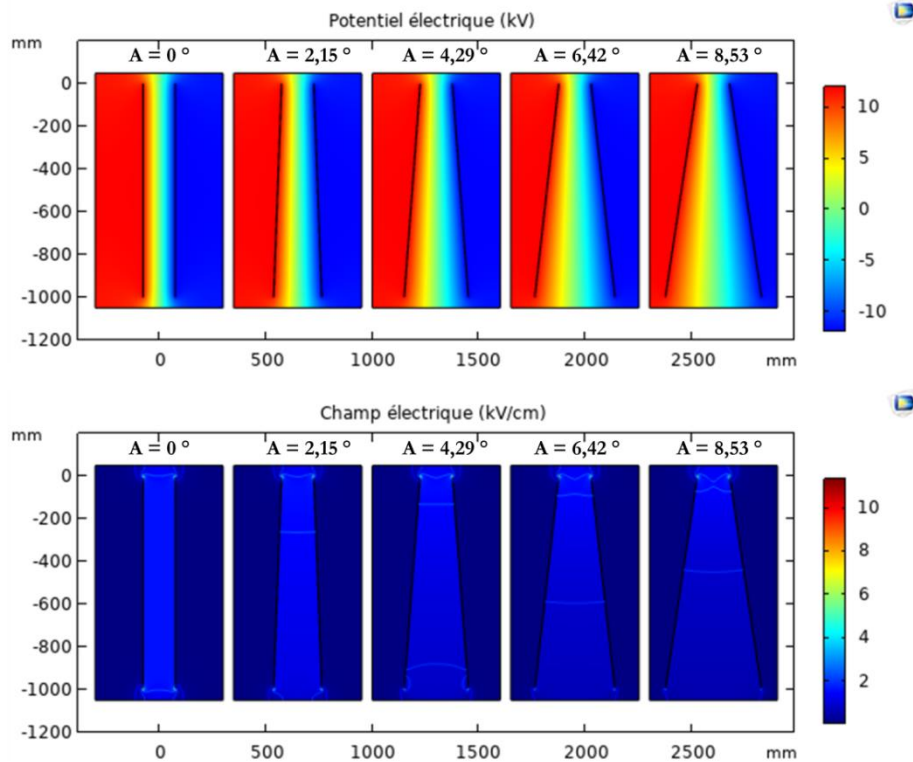


Figure 2.14: Influence de l'angle d'inclinaison sur le potentiel et le champ électriques ($U=\pm 10$ kV et $d=15$ cm).

2.5.3.2. Analyse de la distribution du champ électrique

La Figure 2.15 présente la distribution du champ électrique le long de la hauteur du séparateur (de 0 à 1000 mm) pour différents angles d'inclinaison A , allant de 0° à $8,53^\circ$. L'intensité du champ électrique varie de manière significative le long de la hauteur, avec une nette augmentation dans la région inférieure pour les angles les plus élevés.

On observe également que l'intensité du champ électrique diminue globalement avec l'angle d'inclinaison. Pour un angle nul ($A=0^\circ$), le champ atteint des valeurs maximales proches de 1,6 kV/cm dans la partie supérieure du séparateur et uniforme sur toute la hauteur. En revanche, pour les angles les plus élevés ($A=8,53^\circ$), le champ est relativement faible dans la partie inférieure du séparateur et non-uniforme.

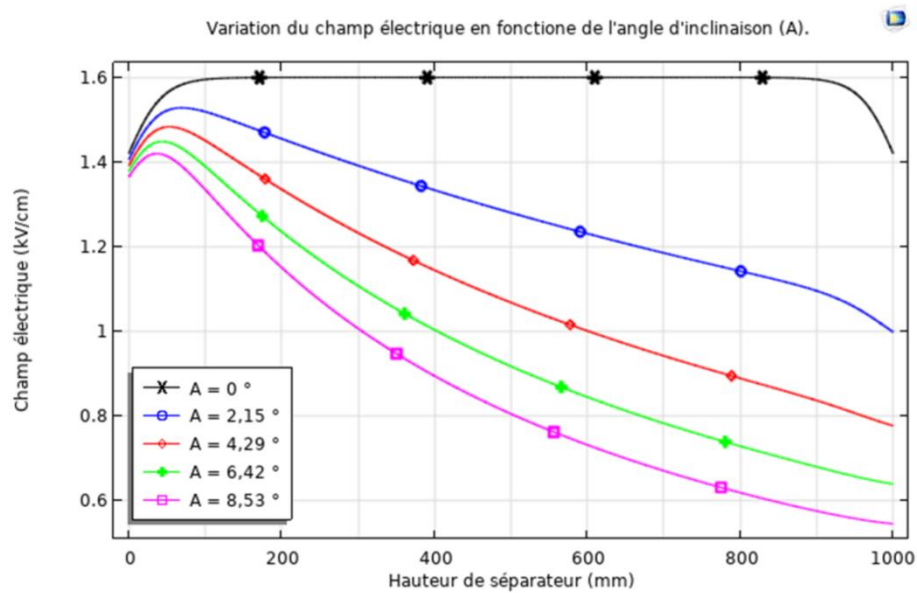


Figure 2.15: Variation du champ électrique en fonction de l'angle d'inclinaison.

La Figure 2.16 représente l'influence de l'angle d'inclinaison sur la valeur moyenne du champ électrique (E_{moy}).

La figure montre que E_{moy} diminue avec l'angle ; l'augmentation de l'angle accroît l'écartement inférieur (D), ce qui réduit l'intensité du champ électrique, particulièrement dans la partie inférieure du séparateur.

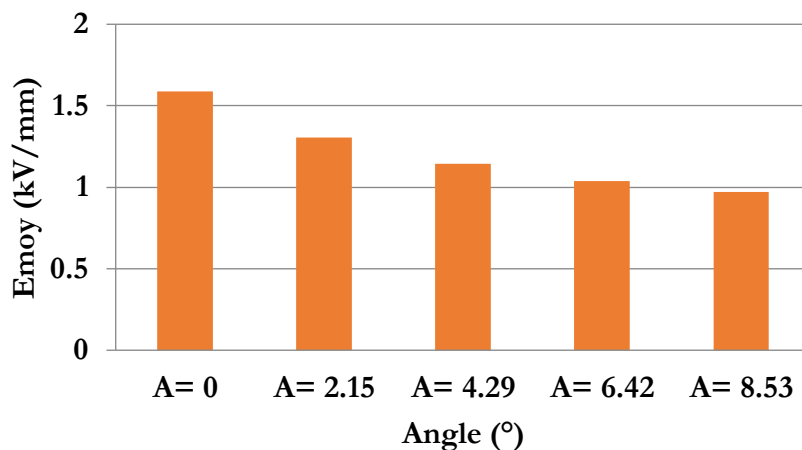


Figure 2.16: Variation du champ électrique moyen en fonction de l'angle d'inclinaison.

La Figure 2.17 illustre l'effet de l'angle sur l'écartement inférieur entre les électrodes (D). L'augmentation de θ élargit naturellement D, d'où l'effet positif observé.

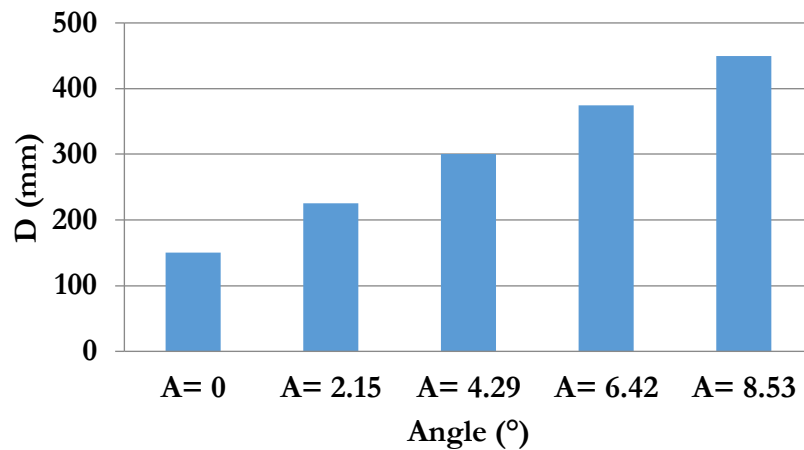


Figure 2.17: Variation de l'écartement inférieur en fonction de l'angle d'inclinaison.

La Figure 2.18 représente la variation de la NUF en fonction de l'angle. L'augmentation de θ entraîne une augmentation de la NUF, car ce paramètre géométrique génère un gradient de distance le long des électrodes, produisant ainsi un champ dont l'intensité varie spatialement, ce qui accroît la non-uniformité.

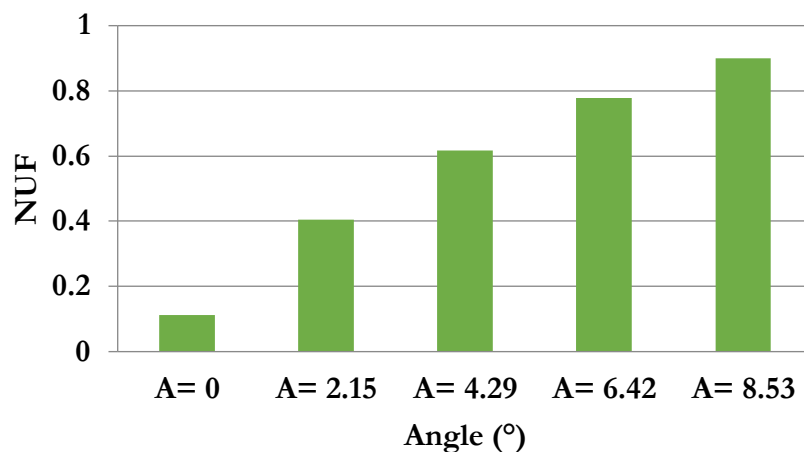


Figure 2.18: Variation de la non-uniformité du champ électrique en fonction de l'angle d'inclinaison.

2.6 Conclusion

L'étude paramétrique menée dans ce chapitre a permis de quantifier l'influence individuelle de la tension, de l'espacement et de l'angle sur les trois indicateurs de performance que sont le champ électrique moyen, l'écartement inférieur entre les électrodes et la non-uniformité du champ.

Les résultats ont mis en évidence des tendances distinctes pour chaque facteur :

- La tension a un effet bénéfique univoque : son augmentation améliore significativement le champ électrique moyen, sans toutefois affecter l'écartement inférieur ni la non-uniformité du champ.
- L'espacement présente un effet plus nuancé. Si son augmentation dégrade le champ électrique moyen (qui diminue), il s'avère favorable pour les deux autres critères : il accroît l'écartement inférieur et améliore l'uniformité du champ en réduisant sa non-uniformité.
- L'angle, quant à lui, améliore principalement l'écartement inférieur. En revanche, son augmentation réduit le champ électrique moyen et dégrade l'uniformité du champ.

En synthèse, cette analyse révèle des interactions complexes et des évolutions contradictoires. Il est donc difficile, voire impossible, d'améliorer simultanément toutes les caractéristiques du champ (c'est-à-dire augmenter le champ moyen et son uniformité) et d'augmenter l'écartement inférieur entre les électrodes en agissant sur un seul facteur.

Face à cette complexité, le prochain chapitre sera consacré à l'étude de l'influence combinée de l'ensemble de ces facteurs. Nous aurons recours à la méthodologie des plans d'expériences, qui permettra non seulement de quantifier les effets principaux de chaque paramètre de manière plus robuste, mais surtout de mettre en évidence d'éventuelles interactions entre eux, afin d'identifier la configuration optimale répondant au mieux à l'ensemble des objectifs.

Chapitre 3

Optimisation et commande d'un séparateur électrostatique à chute libre conventionnel

3.1 Introduction

L'analyse paramétrique menée au chapitre précédent a permis de quantifier l'influence individuelle de la tension, de l'espacement et de l'angle sur la distribution du champ électrique. En isolant l'effet de chaque facteur, nous avons pu établir des tendances claires concernant leur impact sur la valeur moyenne du champ, l'écartement inférieur entre les électrodes et le degré de non-uniformité. Cependant, cette approche uni-variée, bien que nécessaire, ne rend pas compte des interactions potentielles entre ces facteurs ni ne permet d'identifier la configuration optimale répondant simultanément à l'ensemble des critères de performance, souvent antagonistes.

Face à cette complexité, il devient indispensable de recourir à une méthodologie d'analyse plus globale et systématique. L'objectif de ce troisième chapitre est donc de mettre en œuvre la Méthodologie de Plan d'Expériences (MPE) afin d'optimiser conjointement les deux réponses caractérisant le champ électrique (la valeur moyenne et la non-uniformité) et l'écartement inférieur entre les électrodes de polarité opposée. Cette optimisation sera réalisée à l'aide du logiciel d'analyse statistique JMP Pro, en appliquant la Méthodologie de Surface de Réponse (MSR). Pour ce faire, nous nous appuierons sur un Plan d'expériences Composite Centré (PCC), dont la structure est particulièrement adaptée à l'estimation des courbures et à la recherche d'un optimum dans un domaine expérimental défini.

Dans un premier temps, nous décrirons la construction de ce plan d'expériences, en justifiant le choix des domaines de variation pour les trois facteurs retenus (tension, espacement, angle). Nous présenterons ensuite la matrice d'expériences générée et les résultats des simulations associées. L'analyse statistique des données, via JMP Pro, permettra d'établir des modèles mathématiques précis pour chacune des trois réponses. Enfin, ces modèles serviront de base à une procédure d'optimisation multi-réponses, dont l'objectif sera de déterminer la combinaison de facteurs offrant le meilleur compromis, validant ainsi une configuration optimale du séparateur électrostatique.

3.2 Méthodologie

3.2.1 Conception expérimentale de la simulation

Le modèle utilisé dans ce chapitre est le même modèle utilisé dans le chapitre précédent. L'optimisation de divers paramètres opératoires — notamment la tension appliquée et l'espacement entre les électrodes — permet d'améliorer la distribution du champ électrique.

Cette maîtrise du champ favorise un meilleur contrôle des trajectoires des particules chargées et, par conséquent, optimise leur séparation.

Un réglage précis de ces facteurs contribue également à réduire les phénomènes de rebond des particules après impact avec les électrodes. Ces rebonds, généralement provoqués soit par un champ électrique trop intense, soit par un espacement insuffisant entre les électrodes de polarité opposée, peuvent ainsi être atténués. Cette optimisation facilite par ailleurs la collecte des particules dans les chambres dédiées.

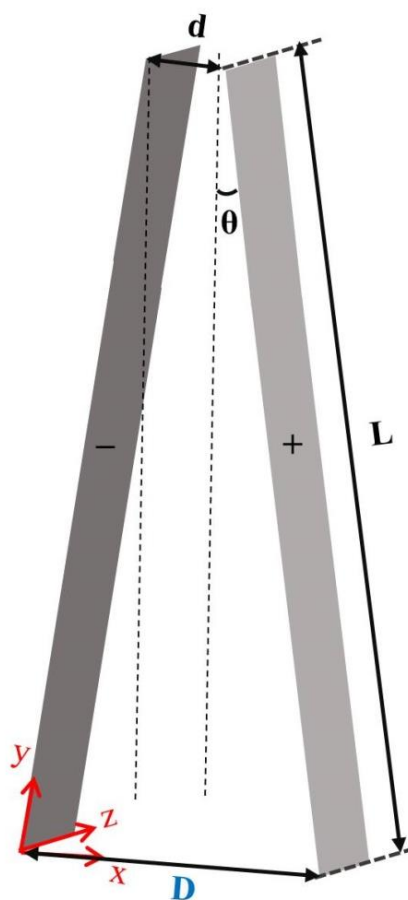


Figure 3.1: Modèle 3D du séparateur électrostatique à chute libre.

3.2.2 Approche MSR-MEF

3.2.2.1 Méthodologie de Plan d'Expériences (MPE)

Une méthodologie de plan d'expériences (MPE) a été mise en œuvre à l'aide du logiciel d'analyse statistique JMP Pro (version 14.0.0 ; SAS Institute Inc., Cary, NC, États-Unis). L'étude visait à optimiser simultanément plusieurs réponses grâce à la méthodologie de surface de réponse (MSR), basée sur un plan d'expériences composite centré (PCC).

Objectifs de l'étude

Trois objectifs principaux ont été définis :

- Maximiser le champ électrique maximal (E_{moy} (Y1)) ;
- Maximiser l'écartement inférieur entre les électrodes de polarité opposée (D (Y2)) ;
- Minimiser la non-uniformité du champ électrique (NUF (Y3)).

Facteurs étudiés

Trois facteurs indépendants ont été sélectionnés pour le plan composite centré :

- X1 : Tension appliquée (U) ;
- X2 : Espacement entre électrodes (d) ;
- X3 : Angle d'inclinaison (A).

Le tableau 3.1 présente les facteurs étudiés ainsi que leurs niveaux respectifs.

Tableau 3.1: Facteurs étudiés et leurs niveaux pour la conception du PCC.

Facteurs	Symbole	Unité	Niveaux		
			Bas	Centre	Haut
Tension appliquée	$V (X_1)$	kV	5	10	15
Espacement	$d (X_2)$	mm	100	150	200
Angle d'inclinaison	$A (X_3)$	°	2,85	5,7	8,55

Selon la méthodologie PCC, le nombre total d'essais expérimentaux simulés (N) a été calculé comme suit :

$$N = 2^k + 2k + pc \quad (1)$$

où k représente le nombre de facteurs indépendants et pc indique le nombre de répétitions du point central.

3.2.2.3 Simulation et analyse des données

Les résultats obtenus à partir des simulations COMSOL et des calculs analytiques (basé sur les conditions du plan d'expériences) ont été traités à l'aide du logiciel JMP afin d'analyser l'effet des paramètres sur les performances du système et d'identifier les facteurs statistiquement significatifs. Les interactions et les effets quadratiques des variables indépendantes sur les réponses ont été évalués au moyen d'un modèle polynomial du second ordre [34], tel qu'exprimé dans l'équation (2).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{\substack{j=1 \\ i < j}}^k \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (2)$$

Dans ce modèle, Y représente la réponse prédite, k désigne le nombre de facteurs indépendants, et X_i et X_j correspondent aux niveaux codés de ces facteurs. Les coefficients β_0 (ordonnée à l'origine), β_i (termes linéaires), β_{ii} (termes quadratiques) et β_{ij} (termes d'interaction) quantifient les effets respectifs, tandis que ϵ représente le terme d'erreur.

L'analyse de la variance (ANOVA) a été employée pour l'analyse statistique, le traitement des résultats et la validation des modèles.

3.3. Résultats et analyse

3.3.1. Analyse du champ électrique lors d'essais expérimentaux simulés

Dans cette étude, un cadre expérimental simulé à trois facteurs et trois niveaux a été employé, nécessitant un total de $N = 16$ simulations, tel que déterminé par la méthodologie de planification spécifique et décrit dans l'équation (1). L'optimisation de la géométrie des électrodes est cruciale en séparation électrostatique pour garantir une distribution du champ électrique à haute intensité et spatialement uniforme sur l'ensemble de la zone de séparation. Les paramètres électriques et géométriques de l'électrode — en particulier la tension appliquée (U), l'écartement (d) et l'angle d'inclinaison (A) — influencent significativement la distribution du champ électrique. Ceci affecte à son tour les forces agissant sur les particules chargées, déterminant en fin de compte l'efficacité de la séparation.

Les simulations ont exploré les plages de paramètres suivantes : U de 5 à 15 kV, d de 100 à 200 mm et θ de 2,85 à 8,55 °. Les 16 simulations ont été réalisées selon une méthodologie de plan composite centré (PCC), et la Figure 3.2 illustre la variation résultante de l'intensité du champ électrique en fonction de ces paramètres indépendants.

La figure présente la distribution spatiale du champ électrique sous forme de surface colorée et de lignes de contour. On observe nettement que la variation des paramètres géométriques ou électriques modifie à la fois l'intensité et l'uniformité du champ. La région de champ intense, représentée par les teintes chaudes, se concentre principalement au voisinage des électrodes, tandis que la zone centrale présente un champ plus faible et relativement uniforme. Cette répartition hétérogène illustre l'effet combiné de la configuration des électrodes.

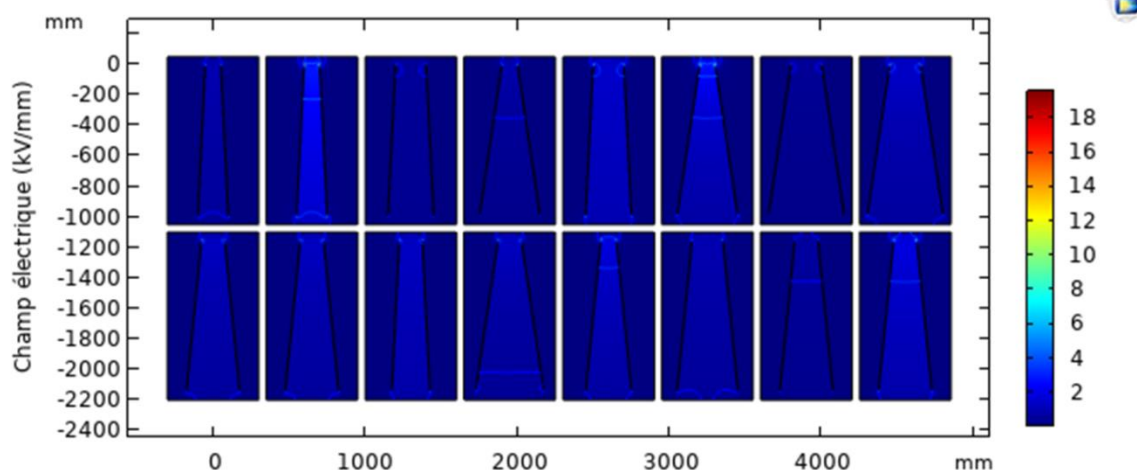


Figure 3.2: Surfaces et lignes de contour du champ électrique pour les 16 essais expérimentaux simulés : variation du champ électrique en fonction des facteurs indépendants.

La Figure 3.3 illustre les composantes selon l'axe y du champ électrique dans la région centrale pour les 16 essais expérimentaux simulés.

L'un des résultats les plus importants est que l'intensité du champ électrique E augmente avec U et diminue avec d (expériences 2 et 6), indépendamment de l'angle d'inclinaison. Cette variation s'explique par le fait que le potentiel électrique est un facteur électrique qui influe directement sur l'intensité du champ. Par ailleurs, la diminution de la distance entre les électrodes conductrices rapproche les bords des électrodes de polarité opposée, ce qui entraîne une plus grande densité des lignes de champ E et, par conséquent, une amplification de l'intensité du champ local [35].

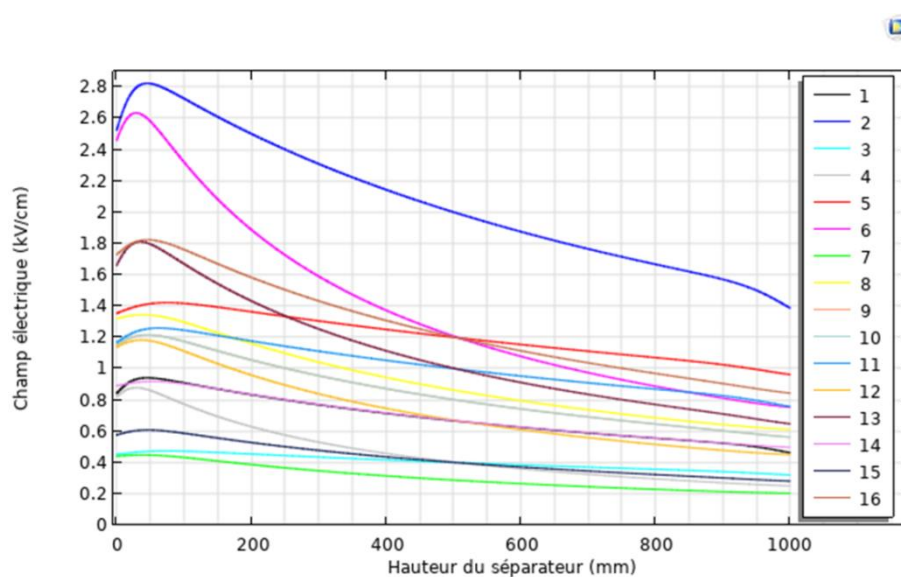


Figure 3.3: Distribution du champ électrique le long de l'axe y (région centrale) pour les 16 essais simulés.

3.3.2. Validation statistique des données PCC

3.3.2.1. Conception des expériences de simulation

Le tableau 3.2 présente les résultats des simulations COMSOL, détaillant les effets des facteurs étudiés sur les réponses. Le tableau inclut l'ensemble des 16 essais expérimentaux réalisés selon le plan composite centré (PCC), ainsi que les niveaux factoriels correspondants et les réponses mesurées.

Cette structure expérimentale comprend :

- 8 points factoriels (pour évaluer rigoureusement les effets principaux et les interactions à deux facteurs) ;
- 6 points axiaux (pour capturer précisément le comportement quadratique) ;
- 2 points centraux (pour valider la robustesse du modèle et évaluer la cohérence expérimentale).

La colonne "Plan" (Pattern) représente la matrice de planification codée pour le PCC, où :

- + et – désignent respectivement les points factoriels haut et bas ;
- 0 indique les points centraux ;
- a et A représentent respectivement les points axiaux bas et haut.

Tableau 3.2: Essais expérimentaux simulés basés sur la méthode PCC et leurs réponses.

Essais	Plan	Facteurs			Réponses		
		X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃
		V (kV)	d (mm)	θ (°)	E_{moy} (kV/mm)	D (mm)	NUF
1	----	5	100	2,85	0,72	199,84	0,67
2	+---	15	100	2,85	2,15	199,84	0,67
3	--+	5	200	2,85	0,41	299,84	0,38
4	---+	5	100	8,55	0,54	396,56	1,16
5	++-	15	200	2,85	1,23	299,84	0,37
6	+++	15	100	8,55	1,63	396,56	1,15
7	-++	5	200	8,55	0,33	496,56	0,75
8	+++	15	200	8,55	0,98	496,56	0,75
9	0	10	150	5,7	0,89	348,93	0,74
10	0	10	150	5,7	0,89	348,93	0,74
11	00a	10	150	2,85	1,03	249,84	0,49
12	00A	10	150	8,55	0,81	446,56	0,91
13	0a0	10	100	5,7	1,2	298,93	0,97
14	0A0	10	200	5,7	0,72	398,93	0,59
15	a00	5	150	5,7	0,45	348,93	0,73
16	A00	15	150	5,7	1,34	348,93	0,73

La Figure 3.4 présente les graphiques de corrélation entre les valeurs réelles (issues des simulations COMSOL) et les valeurs prédites (par le modèle JMP).

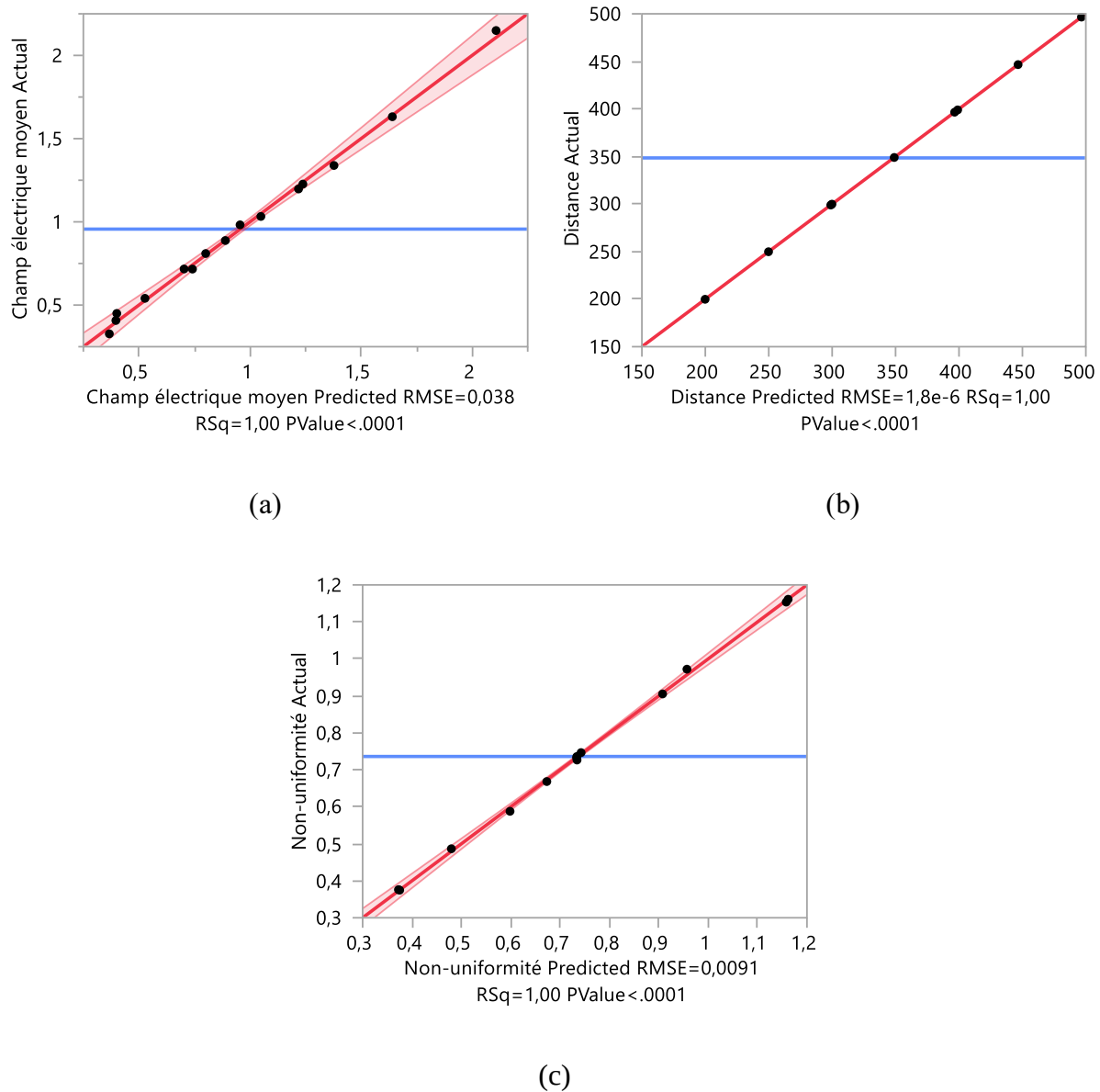


Figure 3.4: Graphiques de corrélation des valeurs réelles vs. valeurs prédites : a) Y_1 : E_{moy} , b) Y_2 : D et b) Y_3 : NUF .

Ces graphiques de corrélation sont des outils de validation essentiels. Ils comparent, pour chaque essai, la valeur prédite par le modèle statistique (JMP) à la valeur calculée par la simulation numérique (COMSOL), cette dernière servant de référence.

Si les points sur le graphique sont proches de la ligne diagonale (bissectrice, pente = 1), cela signifie que les prédictions du modèle correspondent très bien aux simulations. Idéalement, on observe :

- Une distribution aléatoire des points autour de la diagonale (pas de motif en entonnoir ou en arc, ce qui indiquerait une variance non constante).
- Un coefficient de corrélation (R^2) élevé, proche de 1, indiquant que la majeure partie de la variabilité du champ électrique est expliquée par le modèle.

Cette étape est cruciale car elle valide que le modèle polynomial du second ordre (équation 2) peut être utilisé comme un "méta-modèle" fiable pour des études ultérieures d'optimisation ou de sensibilité.

L'analyse confirme que les modèles développés approximent avec précision le comportement du champ électrique simulé, démontrant à la fois leur précision prédictive et leur fiabilité.

3.3.2.2. Analyse de variance (ANOVA) et résumé de l'ajustement

Tableau 3.3 Représente l'ANOVA et la qualité d'ajustement des modèles pour le plan composite centré.

Tableau 3.3: Analyse de la variance (ANOVA) et résumé de l'ajustement des modèles pour le plan composite centré (PCC).

Réponses	Source	DDL	Somme des carrés	Carré Moyen	Rapport F	Prob > F
E_{moy}	Modèle	8	3,4259927	0,428249	296,1264	<,0001
	Erreur	7	0,0101232	0,001446		
	Total Cor.	15	3,4361159			
D	Modèle	8	121755,68	15219,5	$4,57 \times 10^{15}$	<,0001
	Erreur	7	$2,3333 \times 10^{-11}$	3,33e-12		
	Total Cor.	15	121755,68			
NUF	Modèle	8	0,79257875	0,099072	1191,170	<,0001
	Erreur	7	0,00058221	0,000083		
	Total Cor.	15	0,79316096			

DDL = Degrés de Liberté

Total Cor. = Total Corrigé (ou Total ajusté)

Prob > F = Probabilité associée à la valeur de F (p-value).

Le premier modèle explique extrêmement bien la variabilité du champ électrique moyen. La somme des carrés du modèle (3,426) est très grande par rapport à la somme des carrés de l'erreur (0,010), indiquant que la quasi-totalité de la variation est due aux facteurs étudiés. Le modèle est fiable pour prédire E_{moy} .

Le rapport F est exceptionnellement élevé ($4,57 \times 10^{15}$), ce qui indique un ajustement quasi-parfait du deuxième modèle. La somme des carrés de l'erreur est extrêmement faible ($2,33 \times 10^{-11}$), pratiquement nulle. Cela signifie que le modèle prédit D avec une précision presque parfaite - les valeurs prédites coïncident quasiment avec les valeurs observées.

Dans le troisième modèle, le rapport F de 1191 est extrêmement élevé, bien au-dessus des valeurs critiques typiques. La somme des carrés du modèle (0,793) est massive comparée à l'erreur résiduelle (0,00058). Le modèle capture presque parfaitement la relation entre les facteurs et l'uniformité du champ électrique. La précision est excellente, avec une erreur résiduelle très faible.

Les trois modèles développés sont statistiquement significatifs et présentent une excellente capacité prédictive. Les valeurs de $p < 0,0001$ confirment que les facteurs indépendants (la tension, l'écartement et l'angle) ont un effet réel et mesurable sur les réponses étudiées.

Ces modèles peuvent être utilisés avec confiance pour l'optimisation et la prédiction dans le domaine expérimental étudié [36, 37]. Le tableau 3.4 présente les paramètres de signification statistique du PCC.

Tableau 3.4: Les paramètres de signification statistique du PCC.

Source	E_{moy}	D	NUF
Coefficient de détermination (R^2)	0,997054	1	0,999266
R^2 ajusté ($R^2_{adj.}$)	0,993687	1	0,998427
$R^2 - R^2_{adj}$	0,003367	0	0,000839
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,038029	$1,826 \times 10^{-11}$	0,00912
Moyenne de la réponse (ou Moyenne observée)	0,9564	348,4721	0,736138
Nombre d'Observations (ou Somme des poids)	16	16	16

Les valeurs de R^2 ($<0,997$) et R^2 ajusté ($<0,993$) sont très élevées et proches l'une de l'autre pour les trois réponses (E_{moy} , D et NUF), ce qui indique une excellente qualité d'ajustement des modèles sans sur-ajustement significatif (la différence $R^2 - R^2$ ajusté est très faible, $< 0,003$). Le RMSE est faible, confirmant la bonne précision prédictive des modèles.

3.3.2.3. Effet des facteurs indépendants

Le tableau suivant représente l'estimation des coefficients de l'analyse ANOVA.

Tableau 3.5: Estimations des coefficients de l'analyse ANOVA.

Réponse	Terme	Estimation	Erreur standard	t Ratio	Prob.> t
Y₁ : E_{moy} (kV/cm)	Constante	0,8892409	0,017199	51,70	<,0001*
	X1:U(5,15)	0,48876	0,012026	40,64	<,0001**
	X2:d(100,200)	-0,2575	0,012026	-21,41	<,0001**
	X3:A(2,85,8,55)	-0,12414	0,012026	-10,32	<,0001**
	X1:U*X2:d	-0,131275	0,013445	-9,76	<,0001**
	X1:U*X3:A	-0,0633	0,013445	-4,71	0,0022**
	X2:d*X3:A	0,046075	0,013445	3,43	0,0110*
	X2:d*X2:d	0,0717773	0,022204	3,23	0,0144*
	X3:A*X3:A	0,0356773	0,022204	1,61	0,1521 ^{ns}
Y₂ : D (mm)	Constante	348,9278	8,257e-7	4,2e+8	<,0001**
	X1:U(5,15)	-4,02e-31	5,774e-7	-0,00	1,0000 ^{ns}
	X2:d(100,200)	50	5,774e-7	8,7e+7	<,0001**
	X3:A(2,85,8,55)	98,36345	5,774e-7	1,7e+8	<,0001**
	X1:U*X2:d	0	6,455e-7	0,00	1,0000 ^{ns}
	X1:U*X3:A	-1,34e-15	6,455e-7	-0,00	1,0000 ^{ns}
	X2:d*X3:A	-1,14e-14	6,455e-7	-0,00	1,0000 ^{ns}
	X2:d*X2:d	-5,94e-15	1,066e-6	-0,00	1,0000 ^{ns}
	X3:A*X3:A	-0,72905	1,066e-6	-7e+5	<,0001**
Y₂ : NUF	Constante	0,7338705	0,004125	177,92	<,0001**
	X1:U(5,15)	-0,00036	0,002884	-0,12	0,9042 ^{ns}
	X2:d(100,200)	-0,17916	0,002884	-62,12	<,0001**
	X3:A(2,85,8,55)	0,21391	0,002884	74,17	<,0001**
	X1:U*X2:d	0,0007625	0,003224	0,24	0,8198 ^{ns}
	X1:U*X3:A	-0,000813	0,003224	-0,25	0,8083 ^{ns}
	X2:d*X3:A	-0,029388	0,003224	-9,11	<,0001**
	X2:d*X2:d	0,0438386	0,005325	8,23	<,0001**
	X3:A*X3:A	-0,040211	0,005325	-7,55	0,0001**

** : hautement significatif ($p < 0,0001$);

* : significatif ($0,0001 < p < 0,05$);

ns : non significatif ($p > 0,05$).

L'analyse révèle que :

- **Le facteur U (tension appliquée)** exerce un effet positif statistiquement significatif sur la valeur moyenne du champ électrique (E_{moy} , $p < 0,0001$). En revanche, son influence n'est pas significative sur l'écartement inférieur entre électrodes (D , $p = 1,00 > 0,05$) ni sur le degré de non-uniformité du champ (NUF , $p = 0,9042 > 0,05$).

- **Le facteur d (espacement entre électrodes)** présente un impact négatif statistiquement significatif sur deux des réponses caractérisant le champ électrique, à savoir E_{moy} et NUF. Par ailleurs, il exerce un effet positif statistiquement significatif sur D ($p < 0,0001$).
- **Le facteur θ (angle d'inclinaison)** a un effet négatif statistiquement significatif sur E_{moy} , mais un effet positif statistiquement significatif à la fois sur D et sur NUF ($p < 0,0001$ pour les trois réponses).

La Figure 3.5 présente les effets principaux des facteurs indépendants, tels que déterminés par la fonction de désirabilité.

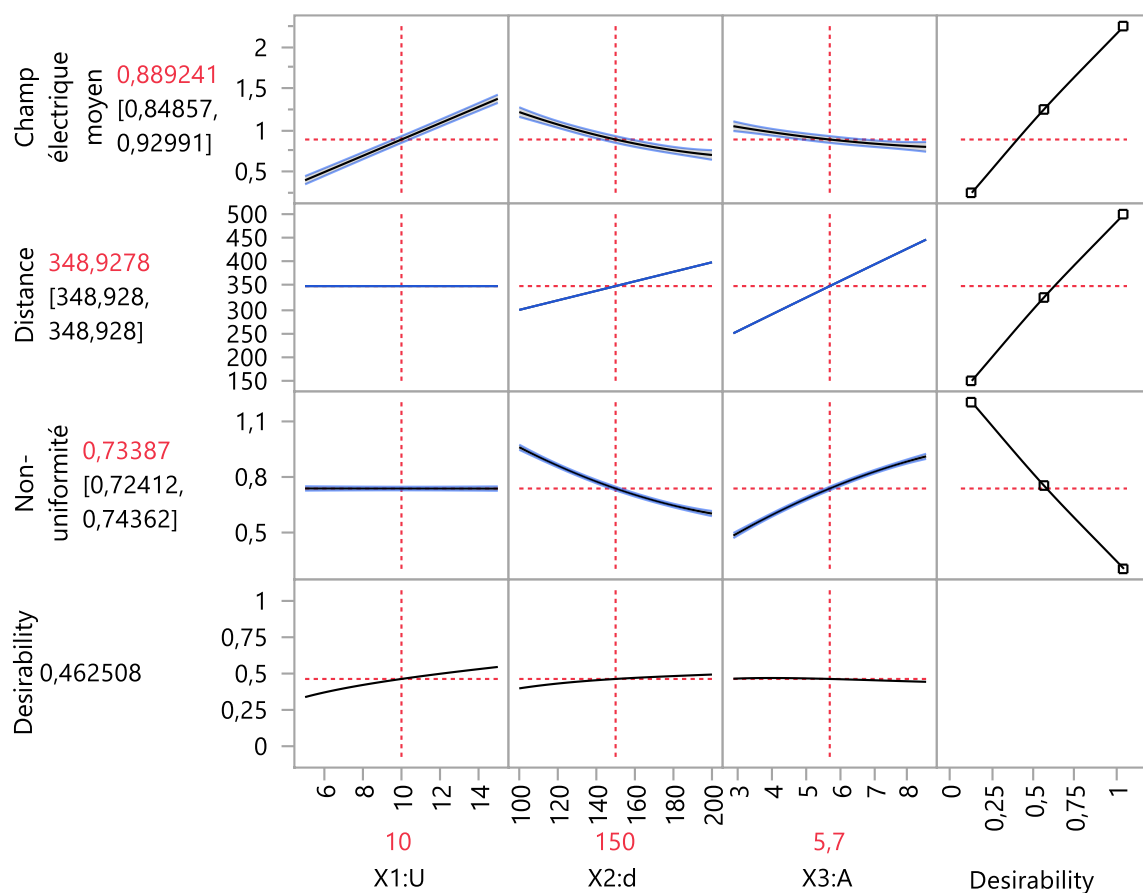


Figure 3.5 : Profils de prévision des réponses en fonction des facteurs indépendants.

Interprétation physique des résultats

Influence de la tension appliquée (U) :

La tension est un paramètre électrique qui agit directement sur l'intensité du champ. Conformément à la relation fondamentale liant la différence de potentiel à la circulation du champ électrique, l'augmentation de la tension accroît proportionnellement la valeur moyenne du champ (E_{moy}). En revanche, la tension n'affecte ni la configuration géométrique du système

(D) ni la distribution spatiale des lignes de champ (NUF), ce qui explique l'absence de significativité statistique observée pour ces deux réponses.

Influence de l'espacement entre électrodes (d) :

L'espacement est un paramètre géométrique dont l'effet découle directement de la relation inverse entre le champ électrique et la distance inter-électrodes. L'augmentation de d réduit l'intensité du champ (E_{moy}), conformément à l'expression du champ dans une configuration plan-parallèle ($E = U/d$). Par ailleurs, un espacement plus important atténue les effets de bord, responsables des fortes hétérogénéités locales. En éloignant les électrodes, on réduit ces zones de concentration du champ, ce qui améliore l'uniformité globale (diminution de NUF). Enfin, l'augmentation de d élargit naturellement l'écartement inférieur entre les électrodes (D), d'où l'effet positif observé.

Influence de l'angle d'inclinaison (θ) :

L'angle d'inclinaison est également un paramètre géométrique, mais son action est plus complexe car il modifie la configuration relative des électrodes de manière asymétrique. L'augmentation de θ accroît l'écartement inférieur (D) tout en maintenant constant l'écartement supérieur. Cette asymétrie géométrique a deux conséquences directes :

- Elle réduit l'intensité moyenne du champ (E_{moy}) en augmentant la distance moyenne entre les électrodes ;
- Elle génère un gradient de distance le long des électrodes, produisant un champ dont l'intensité varie spatialement, ce qui accroît la non-uniformité (NUF).

Ainsi, contrairement à l'espacement d qui améliore l'uniformité en éloignant uniformément les électrodes, l'angle θ introduit une dissymétrie qui rend le champ plus hétérogène.

Les modèles polynomiaux de second ordre développés (équations 7, 8 et 9) prédisent les réponses du système en utilisant uniquement les termes statistiquement significatifs, après omission de ceux qui ne le sont pas.

$$Y_1 = 0.89 + 0.49 * X_1 - 0.26 * X_2 - 0.12 * X_3 - 0.13 * X_1 X_2 - 0.06 * X_1 X_3 + 0.04 * X_2 X_3 + 0.07 * X_2^2 \quad (7)$$

$$Y_2 = 348.9 + 50 * X_2 + 98.36 * X_3 - 0.73 * X_3^2 \quad (8)$$

$$Y_3 = 0.73 - 0.18 * X_2 + 0.21 * X_3 - 0.03 * X_2 X_3 + 0.04 * X_2^2 - 0.04 * X_3^2 \quad (9)$$

Étant donné que cette étude vise à maximiser les réponses E_{moy} et D et à minimiser la NUF, un coefficient négatif (–) dans l'équation (9) indique un effet favorable à la minimisation, tandis qu'un coefficient positif (+) favorise un effet défavorable à la maximisation.

3.3.2.4 Effet d'interaction des paramètres d'entrée

La Figure 3.6 présente les graphiques 3D des surfaces de réponse, générés à partir des modèles statistiquement validés. Cette figure illustre les effets interactifs de deux facteurs sur les réponses, tandis que le troisième est maintenu constant.

L'analyse des interactions révèle des comportements complexes qui complètent les effets principaux précédemment établis. La réponse E_{moy} est significativement influencée par toutes les interactions ($X1*X2$, $X1*X3$ et $X2*X3$, avec des valeurs de p respectives de $p < 0,0001$, $0,0022$ et $0,0110$). La réponse NUF est significativement influencée par l'interaction $X2*X3$, avec une valeur de $p < 0,0001$.

La réponse E_{moy}

- **Interaction $X1*X2$** : Conformément à la relation fondamentale $E = U/d$, E_{moy} est directement proportionnel à la tension et inversement proportionnel à l'espacement. Leur augmentation simultanée produit un effet contrasté : l'accroissement de U tend à augmenter E_{moy} , tandis que celui de d tend à le diminuer. Le résultat net est une légère diminution de l'intensité du champ, indiquant que l'effet de la distance domine légèrement celui de la tension dans cette interaction (Figure 3.6(a)).
- **Interaction $X1*X3$** : L'augmentation de l'angle θ réduit l'intensité du champ en éloignant les électrodes dans leur partie inférieure. Cependant, cette diminution est compensée par l'effet de la tension lorsque celle-ci augmente (Figure 3.6(b)). L'intensité du champ atteint ses valeurs maximales lorsque la tension est élevée, tandis que l'angle est maintenu à leur niveau le plus bas.
- **Interaction $X2*X3$** : L'accroissement simultané de l'espacement et de l'angle entraîne une diminution significative de l'intensité du champ (Figure 3.6(c)). Cette synergie s'explique par l'effet cumulatif de deux paramètres géométriques qui, tous deux, augmentent la distance inter-électrodes (d uniformément sur toute la hauteur, θ spécifiquement dans la partie inférieure).

La réponse NUF

En ce qui concerne l'homogénéité du champ électrique, l'interaction entre les paramètres géométriques joue un rôle déterminant. L'augmentation simultanée de l'espacement d et de l'angle θ améliore significativement l'uniformité du champ (diminution de NUF (Figure 3.6(d))). Ce résultat peut sembler contre-intuitif au premier abord, car θ introduit une asymétrie géométrique. Cependant, l'effet conjugué s'explique par le fait que l'augmentation de d , en éloignant globalement les électrodes, atténue les effets de bord et les concentrations locales de champ, compensant ainsi l'hétérogénéité induite par l'inclinaison.

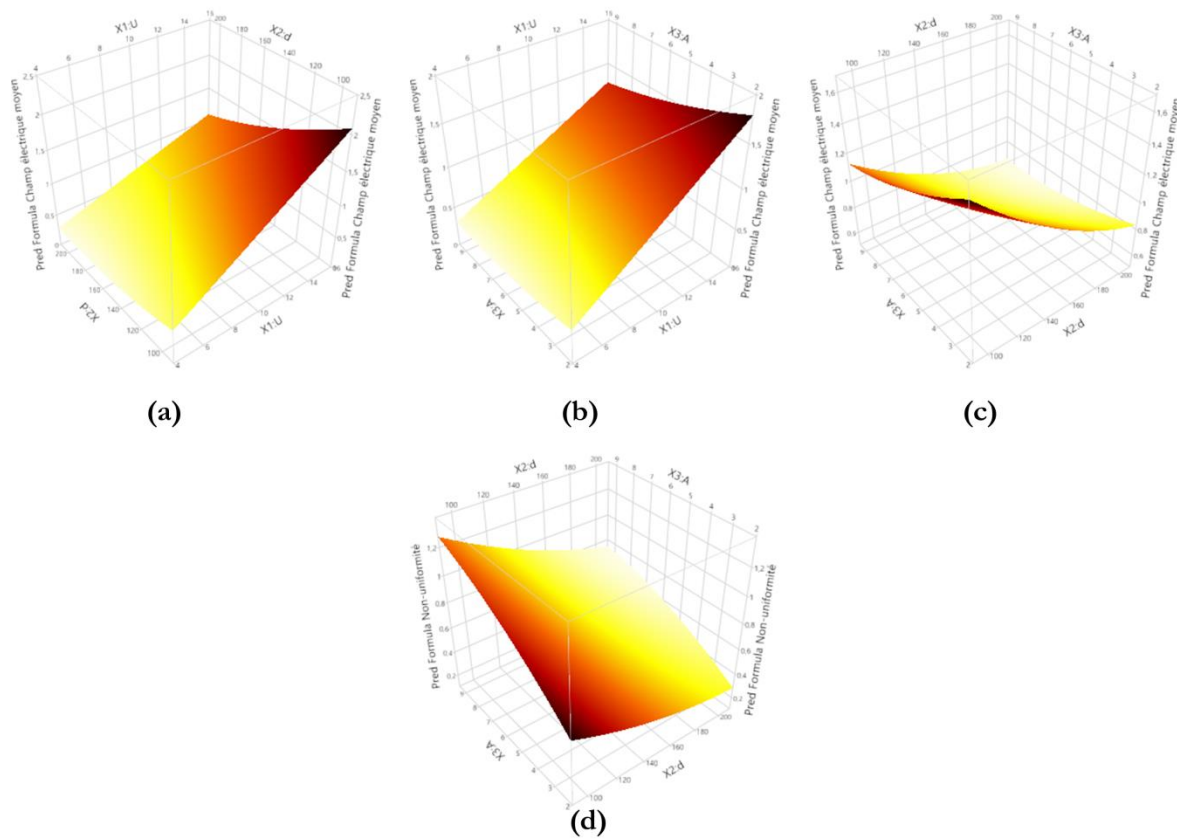


Figure 3.6 : Graphiques 3D des surfaces de réponse illustrant les interactions entre facteurs : (a, b et c) réponse E_{moy} pour les interactions $X1*X2$, $X1*X3$ et $X2*X3$; (d) réponse NUF pour les interaction $X2*X3$.

3.3.3 Optimisation

Les configurations optimales des variables U , d et θ , déterminées en fonction de leurs impacts respectifs sur les paramètres du champ électrique (E_{moy} et INU) et sur la distance inférieure entre les électrodes de polarité opposée (D), sont présentées dans le tableau 3.5. Ce tableau inclut également les valeurs simulées (COMSOL) et prédites (JMP) des réponses. Il

ressort du tableau 3.5 que les valeurs prédites sont en étroite concordance avec les données expérimentales simulées, témoignant d'une forte cohérence entre les deux ensembles de résultats. Il convient de noter que le modèle atteint une désirabilité maximale de 58,08 %, reflétant un bon niveau de performance.

Tableau 3.5: Configurations optimales des variables étudiées.

Configuration	Facteurs			Réponses						Désirabilité (%)
				Simulé (COMSOL)			Prédit (JMP)			
	V (kV)	d (mm)	θ (°)	E_{moy} (kV/cm)	D (cm)	NUF	E_{moy} (kV/cm)	D (cm)	NUF	
Optimale	15	200	3,77	1,14	331,5	0,46	1,17	332,7	0,45	58,08

La Figure 3.7 présente la distribution spatiale du champ électrique (exprimé en kV/cm) dans la configuration optimale déterminée par le logiciel JMP. La visualisation combine des surfaces colorées et des lignes de contour, permettant d'analyser l'uniformité du champ dans la zone d'intérêt.

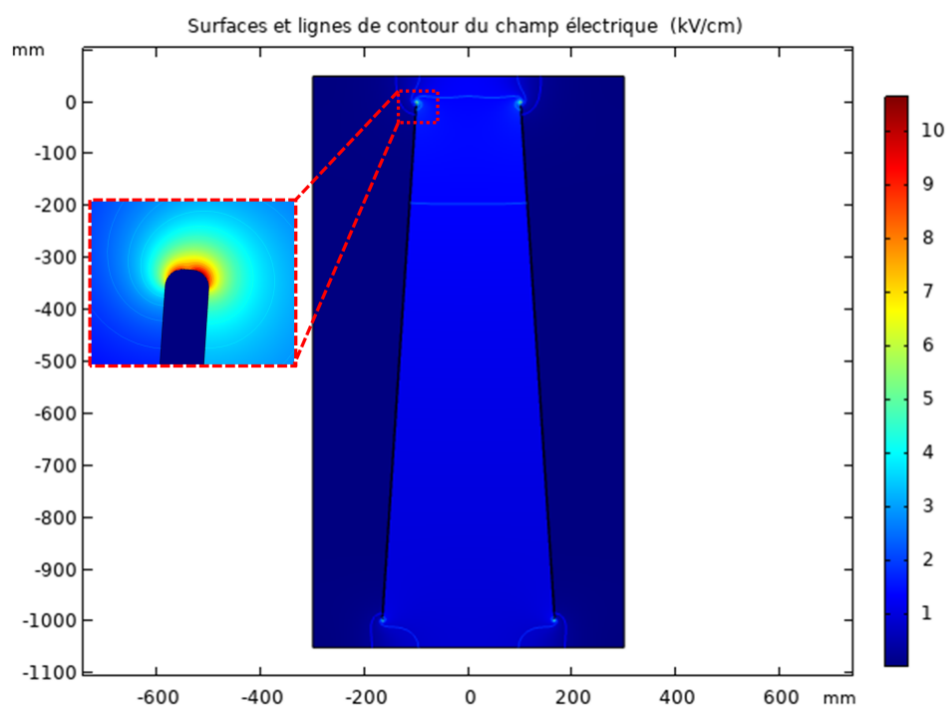


Figure 3.7: Surfaces et lignes de contour du champ électrique pour la configuration optimale.

On observe que la distribution du champ est quasiment uniforme sur l'ensemble de la région représentée, avec un NUF de 0,45. Cette valeur, bien que non nulle, indique une bonne homogénéité, sachant qu'un champ parfaitement uniforme correspondrait à $NUF = 0$. La

légère variation visible en périphérie pourrait être attribuée aux effets de bord ou à la géométrie des électrodes.

3.4 Conclusion

L'étude présentée dans ce chapitre avait pour objectif d'optimiser conjointement les paramètres géométriques et électriques d'un séparateur électrostatique à chute libre par une approche systématique combinant la Méthodologie de Surface de Réponse (MSR) et les simulations par éléments finis (MEF).

La mise en œuvre d'un plan d'expériences composite centré (PCC) à trois facteurs (tension appliquée U , espacement entre électrodes d et angle d'inclinaison θ) a permis de réduire considérablement le nombre de simulations nécessaires (16 essais) tout en garantissant une exploration exhaustive du domaine expérimental. Cette approche méthodique s'est révélée particulièrement adaptée pour appréhender la complexité des interactions entre paramètres, là où l'analyse paramétrique uni-variée du chapitre précédent montrait ses limites.

Ce chapitre a démontré l'efficacité de la démarche couplant plans d'expériences, simulations numériques et optimisation statistique pour la conception optimale des séparateurs électrostatiques. La méthodologie développée constitue un outil d'aide à la décision précieux, permettant non seulement d'identifier les configurations optimales mais aussi de comprendre finement les mécanismes physiques sous-jacents. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des développements futurs, notamment l'extension de cette approche à d'autres configurations d'électrodes ou l'intégration de critères supplémentaires liés à la dynamique des particules.

Chapitre 4

Optimisation et commande d'un séparateur électrostatique à chute libre avec électrodes segmentées

4.1 Introduction

Les séparateurs conventionnels rencontrent plusieurs défis lors du processus de séparation, le plus important étant la collision des particules à séparer avec les électrodes de polarité opposée, ce qui les fait inévitablement dévier de leurs trajectoires prévues, conduisant à de mauvais résultats de séparation. Pour remédier à ce problème, un séparateur électrostatique à électrodes segmentées a été proposé, permettant aux particules de passer entre ces électrodes segmentées et d'éviter les collisions. Dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence de deux facteurs importants (le nombre d'étages (N) et le rapport de segmentation des électrodes (R)) sur le comportement du champ électrique dans un nouveau modèle de séparateur en utilisant une approche qui intègre la simulation numérique et la méthode des surfaces de réponse. Nous avons également effectué une analyse statistique des effets de ces facteurs en utilisant l'analyse de variance (ANOVA).

4.2 Méthodologie

4.2.1 Conception expérimentale de la simulation

Le modèle utilisé dans ce chapitre est un séparateur électrostatique à chute libre avec électrodes segmentées (Figure 4.1).

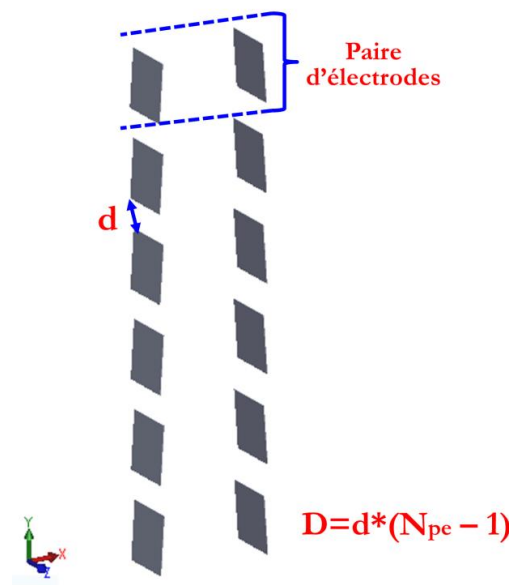


Figure 4.1: *Modèle 3D du séparateur électrostatique à chute libre avec des électrodes segmentées.*

L'optimisation de divers paramètres opératoires (notamment le nombre des étages et le rapport de segmentation des électrodes) permet d'améliorer la distribution du champ

électrique et d'augmenter la distance entre les électrodes de même polarité. Cette maîtrise du champ favorise un meilleur contrôle des trajectoires des particules chargées et, par conséquent, optimise leur séparation.

La précision du réglage de ces facteurs permet également d'atténuer les phénomènes de rebond des particules à la suite d'un impact sur les électrodes. Ces rebonds, provoqués typiquement par un champ électrique trop élevé ou un espacement insuffisant entre électrodes de signes opposés, sont alors diminués. Par ailleurs, cette amélioration facilite la récupération des particules dans les chambres de collecte.

4.2.2 Approche MSR-MEF

Les résultats obtenus à partir des simulations FEM et des calculs analytiques ont été traités à l'aide du logiciel JMP afin d'optimiser simultanément plusieurs réponses grâce à la méthodologie de surface de réponse (MSR), basée sur un plan d'expériences composite centré (PCC).

Objectifs de l'étude

Trois objectifs principaux ont été définis :

- Maximiser le champ électrique maximal (E_{moy} (Y1)) ;
- Maximiser la distance entre les électrodes de même polarité (D (Y2)) ;
- Minimiser la non-uniformité du champ électrique (NUF (Y3)).

Facteurs étudiés

Trois facteurs indépendants ont été sélectionnés pour le plan composite centré :

- X1 : Nombre d'étages (N) ;
- X2 : Rapport de segmentation des électrodes (R) ;

Le tableau 4.1 présente les facteurs étudiés ainsi que leurs niveaux respectifs.

Tableau 4.1: Facteurs étudiés et leurs niveaux pour la conception du PCC.

Facteurs	Symbole	Unité	Niveaux		
			Bas	Centre	Haut
Nombre d'étages	N (X ₁)	/	2	4	6
Rapport de segmentation des électrodes	R (X ₂)	/	1/3	2/3	1

La distance totale entre les électrodes de même polarité (D) a été calculée à l'aide de l'équation (1) :

$$D = (N - 1) * d \quad (1)$$

où N est le nombre des étages et d est la distance entre deux d'électrodes adjacentes de même polarité [38].

4.3. Résultats et analyse

4.3.1 Analyse du champ électrique lors d'essais expérimentaux simulés

Dans cette étude, la méthodologie du plan composite centré (PCC) a été mise en œuvre pour examiner l'influence de deux variables principales sur la distribution du champ électrique : le nombre d'étages (N) et le rapport de segmentation des électrodes (R). Le nombre d'étages a été exploré entre 2 et 6, tandis que le rapport de segmentation a varié de 0,33 à 1. Cette démarche a permis d'organiser une série de simulations numériques structurées visant à mieux comprendre la distribution spatiale du champ électrique dans le séparateur électrostatique.

D'un point de vue descriptif, les résultats révèlent que la variation des deux facteurs change à la fois l'intensité et l'uniformité du champ. On note que l'augmentation du nombre d'étages, de 2 à 6, tend à homogénéiser la distribution du champ, comme en témoigne la régularité croissante des lignes de potentiel dans la zone de séparation.

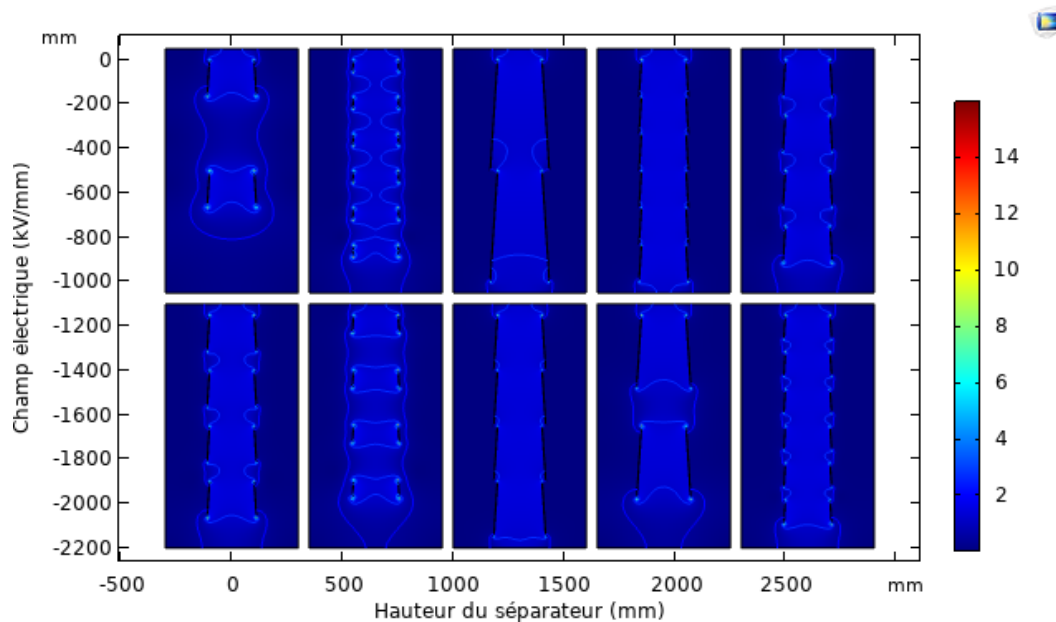


Figure 4.2: Surfaces et lignes de contour du champ électrique pour les 10 essais expérimentaux simulés : variation du champ électrique en fonction des deux facteurs.

La Figure 4.3 illustre la variation du champ électrique le long de l'axe y dans la zone centrale du séparateur, pour l'ensemble des simulations effectuées. Elle offre une compréhension approfondie du comportement du champ dans la région où se déroule effectivement la séparation. Un résultat majeur est que l'intensité du champ électrique s'accroît lorsque le nombre d'étages (N) augmente de 2 à 6. Cette évolution s'explique par la présence d'un plus grand nombre d'électrodes, qui contribue à une meilleure organisation du champ ainsi qu'à une distribution plus homogène des lignes de champ dans la zone centrale. À l'inverse, pour des valeurs faibles de N, le champ présente davantage d'irrégularités et de variations. En ce qui concerne le rapport de segmentation (R), il apparaît que son augmentation de 0,33 à 1 conduit à une homogénéisation accrue du champ dans la région centrale. Cela tient au fait qu'une segmentation plus fine des électrodes limite les concentrations locales du champ et améliore sa diffusion globale.

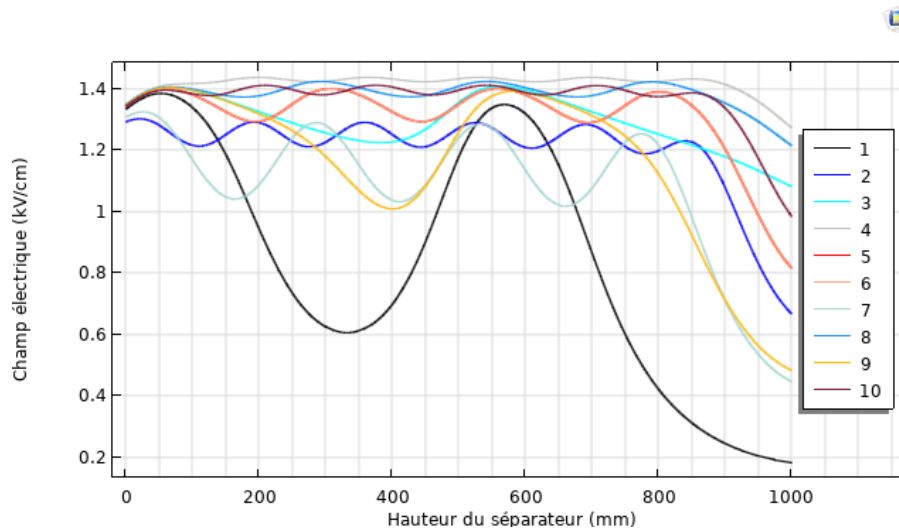


Figure 4.3: Distribution du champ électrique le long de l'axe y (région centrale) pour les 10 essais simulés.

4.3.2 Validation statistique des données PCC

4.3.2.1. Conception des expériences de simulation

Le Tableau 4.2 présente les résultats des simulations COMSOL, détaillant les effets des facteurs étudiés sur les réponses. Le tableau inclut l'ensemble des 10 essais réalisés selon le plan composite centré (PCC), ainsi que les niveaux factoriels correspondants et les réponses mesurées.

Cette structure expérimentale comprend :

- 4 points factoriels (pour évaluer rigoureusement les effets principaux et les interactions à deux facteurs) ;
- 4 points axiaux (pour capturer précisément le comportement quadratique) ;
- 2 points centraux (pour valider la robustesse du modèle et évaluer la cohérence expérimentale).

La colonne "Plan" (Pattern) représente la matrice de planification codée pour le PCC, où :

- + et – désignent respectivement les points factoriels haut et bas ;
- 0 indique les points centraux ;
- a et A représentent respectivement les points axiaux bas et haut.

Tableau 4.2: Essais expérimentaux simulés basés sur la méthode PCC et leurs réponses.

Essais	Plan	Facteurs		Réponses		
		X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃
		N	R	E_{moy} (kV/cm)	D (mm)	NUF
1	—	2	0.33	0.95	335.16	1.26
2	+—	6	0.33	1.21	558.65	0.53
3	—+	2	1.00	1.30	31.92	0.25
4	++	6	1.00	1.42	49.80	0.12
5	0	4	0.67	1.32	257.07	0.44
6	0	4	0.67	1.32	257.07	0.44
7	0a	4	0.33	1.11	496.26	0.79
8	0A	4	1.00	1.39	46.29	0.15
9	a0	2	0.67	1.19	171.43	0.77
10	A0	6	0.67	1.37	285.65	0.31

Les graphiques de corrélation entre les valeurs des simulations et les valeurs prédites sont présentés sur la Figure 4.4.

Les points proches de la diagonale avec un R^2 élevé valident que le modèle polynomial du second ordre approxime fidèlement le champ électrique simulé, confirmant ainsi sa précision prédictive et sa fiabilité pour des études d'optimisation ou de sensibilité.

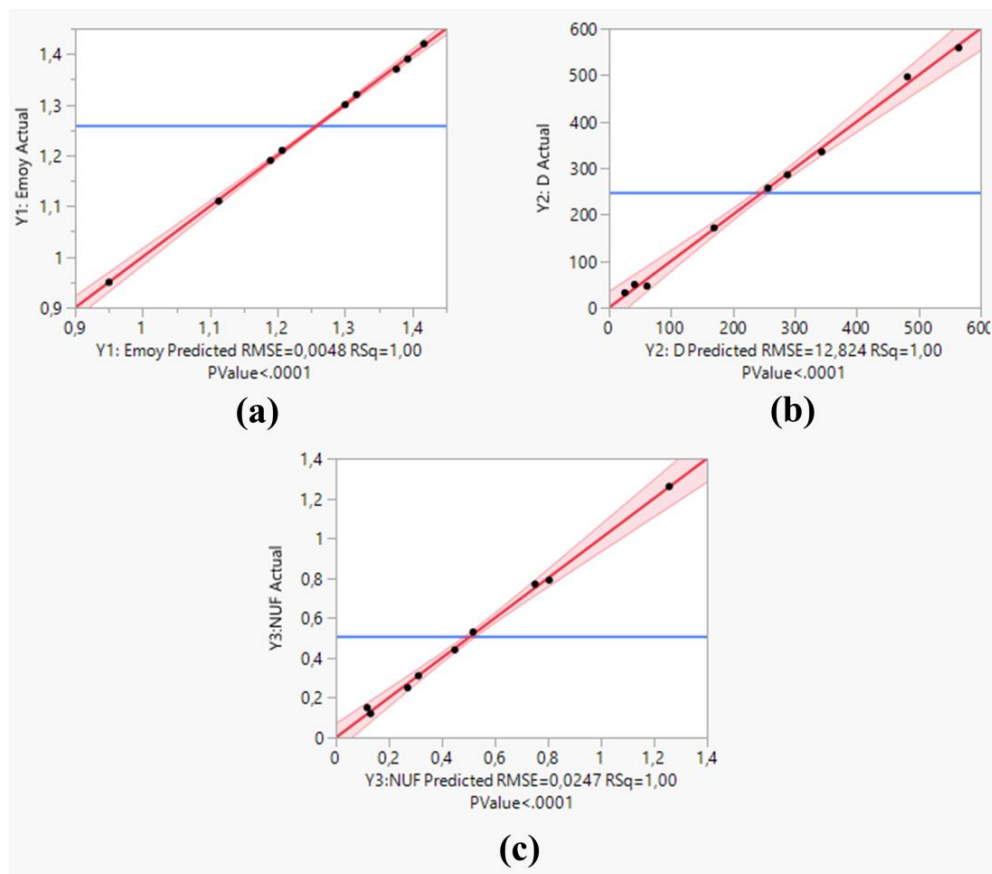


Figure 4.4: Graphiques de corrélation des valeurs réelles vs. valeurs prédites : a) Y1 : Emoy , b) Y2 : D et b) Y3 : NUF.

4.3.2.2 Analyse de variance (ANOVA) et résumé de l'ajustement

Les Tableau 4.3 et 4.4 représentent l'ANOVA et la qualité d'ajustement des modèles et les paramètres de signification statistique du PC, respectivement.

Tableau 4.3: Analyse de la variance (ANOVA) et résumé de l'ajustement des modèles pour le plan composite centré (PCC).

Réponses	Source	DDL	Somme des carrées	Carré Moyen	Rapport F	Prob > F
<i>Emoy</i>	Modèle	5	0.18926952	0.037854	1673.541	<,0001
	Erreur	4	0.00009048	0.000023		
	Total Cor.	9	0.18936			
<i>D</i>	Modèle	5	299172.61	59834.5	363.8426	<,0001
	Erreur	4	657.81	164.5		
	Total Cor.	9	299830.41			
<i>NUF</i>	Modèle	5	1.1053924	0.221078	361.2956	<,0001
	Erreur	4	0.0024476	0.000612		
	Total Cor.	9	1.10784			

DDL = Degrés de Liberté

Total Cor. = Total Corrigé (ou Total ajusté)

Prob > F = Probabilité associée à la valeur de F (p-value).

Tableau 4.4: Les paramètres de signification statistique du PCC.

Source	E_{moy}	D	NUF
Coefficient de détermination (R^2)	0.999522	0.997806	0.997791
R^2 ajusté ($R^2_{adj.}$)	0.998925	0.995064	0.995029
$R^2 - R^2_{adj}$	0.002762	0.002742	0.000597
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.004756	12.82387	0.024737
Moyenne de la réponse (ou Moyenne observée)	1.258	248.93	0.506
Nombre d'Observations (ou Somme des poids)	10	10	10

Le premier modèle rend compte de manière très satisfaisante de la variabilité du champ électrique moyen (E_{moy}). La somme des carrés du modèle (0.18926952) est nettement supérieure à celle de l'erreur (0.00009048), ce qui suggère que l'essentiel de la variation observée peut être attribué aux facteurs considérés. En conséquence, ce modèle se révèle particulièrement robuste pour la prédiction d' E_{moy} . Le rapport F (1673.541) étant considérablement élevé, cela corrobore une excellente adéquation du modèle.

Concernant le deuxième modèle (D), la somme des carrés du modèle (299172.61) dépasse considérablement celle de l'erreur (657.81), ce qui indique que la variation de D est majoritairement expliquée par les variables indépendantes. Par ailleurs, le rapport F (363.8426) est significativement élevé, confirmant la haute signification statistique du modèle. Ceci implique que le modèle est capable de prédire D avec une précision notable.

S'agissant du troisième modèle (NUF), le rapport F (361.2956) se révèle également remarquablement élevé, excédant significativement les valeurs critiques. La somme des carrés du modèle (1.1053924) est nettement plus élevée que celle de l'erreur résiduelle (0.0024476), ce qui atteste que le modèle capture efficacement la relation entre les facteurs et la réponse. La précision s'avère remarquable, caractérisée par une erreur résiduelle particulièrement faible.

Les trois modèles élaborés manifestent une signification statistique robuste et une performance prédictive remarquable. Les valeurs de p inférieures à 0.0001 attestent que les facteurs indépendants, à savoir la tension et l'écartement, exercent un impact substantiel et quantifiable sur les réponses étudiées. Les coefficients de détermination sont particulièrement élevés et en étroite concordance avec les R^2 ajustés, ce qui suggère une absence de sur-apprentissage. En outre, les faibles valeurs de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) corroborent la haute-fidélité de ces modèles.

En conséquence, ces modèles peuvent être exploités avec assurance pour l'optimisation et la prédiction des phénomènes au sein du contexte expérimental considéré.

4.3.2.3. Effet des facteurs indépendants

Le Tableau 4.5 suivant représente l'estimation des coefficients de l'analyse ANOVA.

Tableau 4.5: Estimations des coefficients de l'analyse ANOVA.

Réponse	Terme	Estimation	Erreur standard	t Ratio	Prob.> t
Y₁ : E_{moy} (kV/cm)	Constante	1,317143	0,002842	463,42	<,0001**
	X1:N(2,6)	0,093333	0,001942	48,07	<,0001**
	X2:R(0,33,1)	0,14	0,001942	72,11	<,0001**
	X1:N*X2:R	-0,035	0,002378	-14,72	0,0001*
	X1:N*X1:N	-0,03429	0,003113	-11,01	0,0004*
	X2:R*X2:R	-0,06429	0,003113	-20,65	<,0001**
Y₂ : D (mm)	Constante	256,745	7,663729	33,5	<,0001**
	X1:N(2,6)	59,265	5,235323	11,32	0,0003*
	X2:R(0,33,1)	-210,343	5,235323	-40,18	<,0001**
	X1:N*X2:R	-51,4025	6,411935	-8,02	0,0013*
	X1:N*X1:N	-27,88	8,395194	-3,32	0,0294*
	X2:R*X2:R	14,855	8,395194	1,77	0,1515 ^{ns}
Y₂ : NUF	Constante	0,448571	0,014783	30,34	<,0001**
	X1:N(2,6)	-0,22	0,010099	-21,78	<,0001**
	X2:R(0,33,1)	-0,34333	0,010099	-34	<,0001**
	X1:N*X2:R	0,15	0,012368	12,13	0,0003*
	X1:N*X1:N	0,082857	0,016194	5,12	0,0069*
	X2:R*X2:R	0,012857	0,016194	0,79	0,4717 ^{ns}

****:** hautement significatif ($p < 0,0001$);

*****: significatif ($0,0001 < p < 0,05$);

ns: non significatif ($p > 0,05$).

L'analyse statistique, basée sur le modèle ANOVA, a révélé l'impact significatif des facteurs examinés sur les différentes réponses du système.

Le facteur N (nombre d'électrodes) a exercé une influence positive hautement significatif sur Emoy ($p < 0,0001$) et une influence positive significatif sur D ($p = 0,0003$). À l'inverse, son action sur NUF s'est avérée négative et très significative ($p < 0,0001$), ce qui indique une amélioration marquée de l'uniformité du champ électrique à mesure que ce facteur augmentait. De même, le facteur R (rapport de segmentation des électrodes), a manifesté un effet positif significatif sur Emoy ($p < 0,0001$). Néanmoins, il a influencé négativement et de façon très significative la distance D et le paramètre NUF ($p < 0,0001$), soulignant ainsi son rôle prépondérant dans l'optimisation des performances générales du séparateur.

La Figure 4.5 présente les effets principaux des facteurs indépendants, tels que déterminés par la fonction de désirabilité.

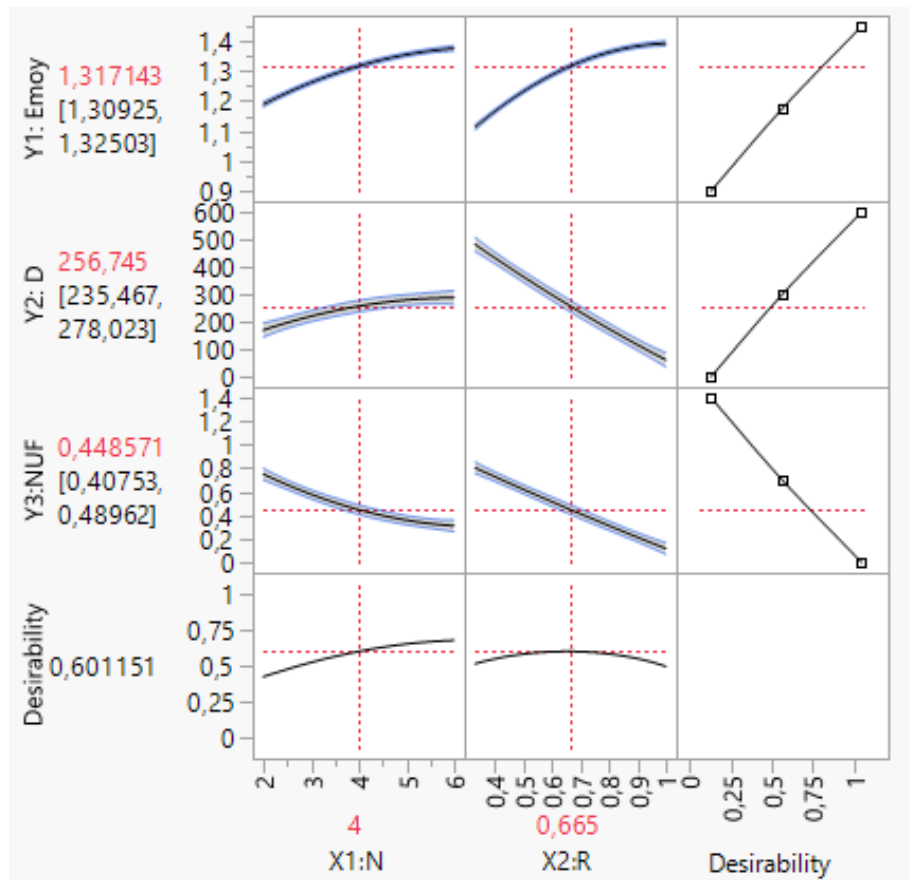


Figure 4.5 : Profils de prévision des réponses en fonction des facteurs indépendants.

Interprétation physique des résultats :

Les données obtenues mettent en lumière une incidence notable des paramètres opératoires sur la réponse du système, laquelle révèle des mécanismes physiques intrinsèquement liés à la génération et à la distribution du champ électrique.

▪ Influence du facteur N :

Le facteur N augmente le champ électrique moyen (Emoy) et l'écartement inférieur (D), tout en réduisant la non-uniformité (NUF). Son coefficient positif pour Emoy et D, et négatif pour NUF, confirme son rôle bénéfique pour l'optimisation.

▪ Influence du facteur R :

Le facteur R augmente Emoy (coefficient positif) et améliore l'uniformité (coefficient négatif pour NUF), mais réduit l'écartement D (coefficient négatif). Il induit donc un compromis entre l'homogénéisation du champ et la contrainte géométrique.

Les modèles polynomiaux de second ordre développés et exprimés sur les équations 2, 3 et 4, prédisent les réponses du système.

$$Y_1 = 1.31 + 0.09 * X_1 + 0.14 * X_2 - 0.03 * X_1X_2 - 0.03 * X_1^2 - 0.06 * X_2^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 256.74 + 59.26 * X_1 - 210.34 * X_2 - 51.40 * X_1X_2 - 27.88 * X_1^2 + 14.85 * X_2^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = 0.44 + 0.22 * X_1 - 0.34 * X_2 + 0.15 * X_1X_2 + 0.08 * X_1^2 + 0.01 * X_2^2 \quad (4)$$

4.3.2.4 Effet d'interaction des paramètres d'entrée

Les effets interactifs des deux facteurs (N*R) sur les réponses sont illustrés sur la Figure 4.6. Cette figure représente les graphiques 3D des surfaces de réponse générés à partir des modèles statistiquement validés.

- **La réponse Emoy :**

Le coefficient négatif associé à l'interaction entre le deux facteurs révèle un effet antagoniste. En effet, alors que chaque facteur pris isolément tend à accroître le champ électrique moyen, leur action combinée conduit à une diminution relative de son intensité. Une interprétation physique de cette tendance suggère une limitation de l'effet amplificateur du champ lorsque les deux paramètres sont simultanément à des niveaux élevés. Cela se manifeste sur la surface de réponse par une zone de courbure atténuée et une pente moins prononcée, ce qui indique l'amorce d'un phénomène de saturation du champ électrique.

- **La réponse D :**

Le coefficient de ce terme d'interaction est négatif, ce qui indique que la réponse diminue lorsque les deux facteurs augmentent simultanément. Bien que l'effet de N soit positif (la réponse augmente avec N), la diminution de la réponse lors de l'augmentation conjointe des deux facteurs souligne la prédominance écrasante du facteur R, qui annule l'influence de N.

- **La réponse NUF :**

Pour cette interaction, le coefficient positif indique un effet synergique. L'augmentation concomitante de deux facteurs se manifeste par une augmentation de la non-uniformité du champ électrique. Cette évolution s'interprète par l'émergence de gradients spatiaux plus prononcés au sein de la distribution du champ. Sur la surface de réponse, cela se traduit par

une élévation notable dans les régions où les deux facteurs atteignent des niveaux élevés, reflétant ainsi une hétérogénéité accrue du champ.

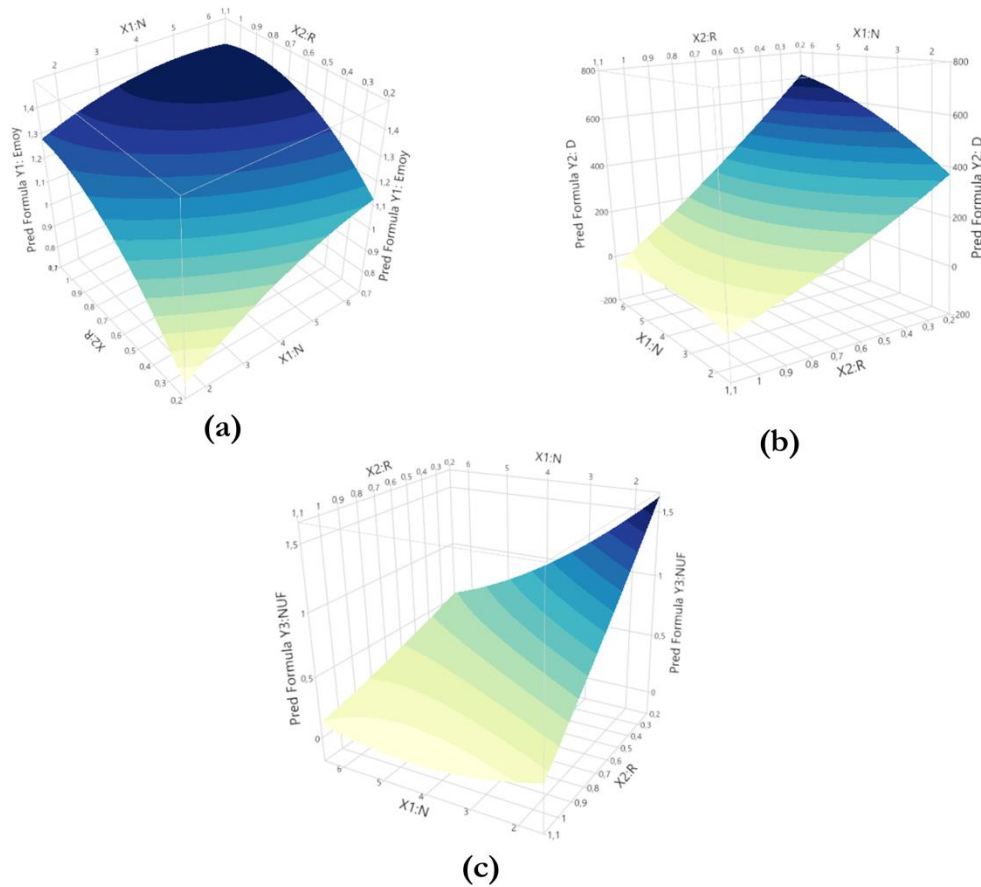


Figure 4.6: Graphiques de surface de réponse 3D des interactions entre facteurs.

4.3.2.5 Contribution des termes

La contribution de chaque terme (analyse du diagramme de Pareto) est illustré sur les Figures 4.7, 4.8, et 4.9.

L'analyse a mis en évidence le rôle prépondérant du rapport de segmentation des électrodes (R) sur les trois réponses du système, en particulier sur la distance entre les électrodes de même polarité (D). Ce facteur a le plus grand impact sur Emoy (56,25 %), D (86,68 %) et NUF (60,14 %). Vient ensuite le deuxième facteur, dont l'impact est faible sur Emoy (25 %), D (8,66 %) et NUF (24,69 %).

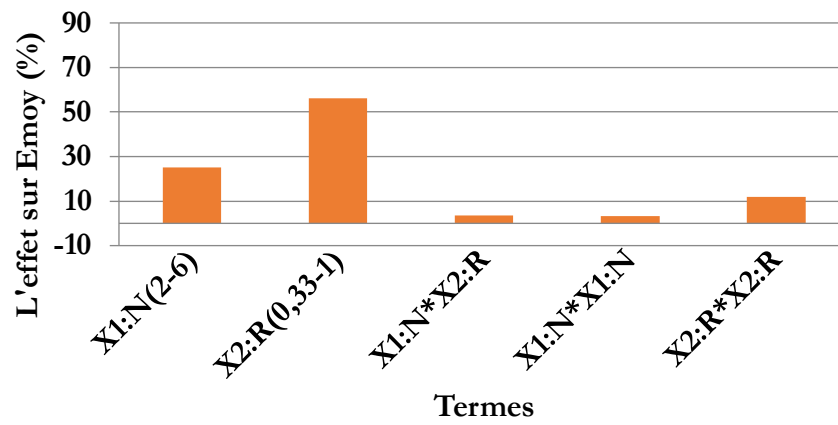


Figure 4.7 : Contribution des termes à Emoy.

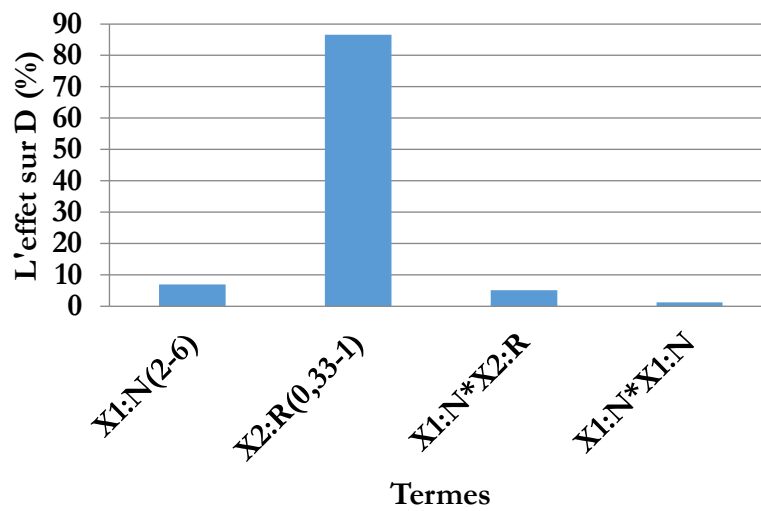


Figure 4.8 : Contribution des termes à D.

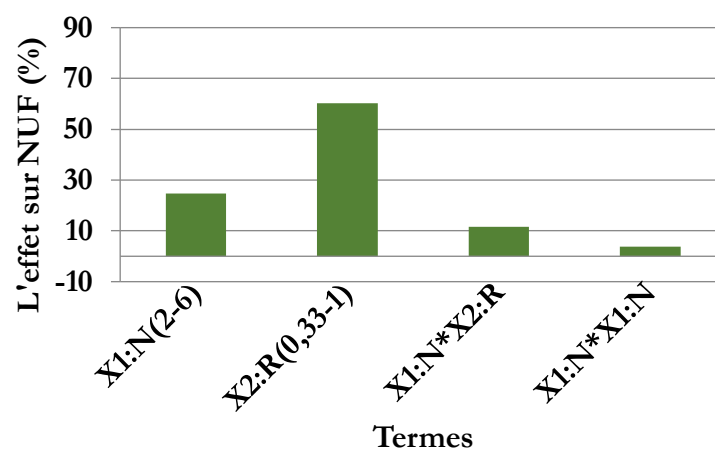


Figure 4.9 : Contribution des termes à NUF.

4.3.3 Optimisation

À partir des impacts respectifs des deux variables N et R sur les réponses (E_{moy} , D et NUF), la configuration optimale de ces variables a été déterminée et est rassemblée dans le Tableau 4.5. Ce même Tableau présente également les valeurs des réponses issues des simulations (COMSOL) et des prédictions (JMP). On observe une excellente correspondance entre ces deux séries de données, ce qui atteste d'une forte cohérence des résultats. Par ailleurs, la désirabilité maximale atteinte par le modèle est de 70,58 %, signe d'une performance remarquable.

Tableau 4.6: Configurations optimales des variables étudiées.

Configuration	Facteurs		Réponses						Désirabilité
			Simulé (COMSOL)			Prédit (JMP)			
	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>E_{moy}</i> (<i>kV/cm</i>)	<i>D</i> (<i>mm</i>)	<i>NUF</i>	<i>E_{moy}</i> (<i>kV/cm</i>)	<i>D</i> (<i>mm</i>)	<i>NUF</i>	
Optimale	6	0,48	1,30	434,25	0,43	1,30 ±0,77%	431,91 ±5,91%	0,418 ±11,74%	70,58

4.3.4 Analyse comparative des configurations d'électrodes

La configuration conventionnelle à une seule paire d'électrodes (configuration optimale du chapitre précédent) a servi de référence pour la comparaison avec la configuration segmentée proposée (configuration optimale de ce chapitre), permettant une évaluation quantitative de leurs impacts respectifs sur les performances du séparateur. La comparaison des deux configurations montre une amélioration significative de l'efficacité des performances de la configuration proposée, grâce à une meilleure uniformité du champ électrique. Cette amélioration a été quantifiée par la réduction relative de la non-uniformité du champ électrique (ΔNUF %), calculée comme suit :

$$\Delta NUF \% = \left(1 - \frac{NUF_p}{NUF_c} \right) \times 100 \quad (5)$$

où NUF_c et NUF_p représentent respectivement les valeurs optimales de non-uniformité pour les configurations conventionnelle et segmentée proposée.

La conception conventionnelle (Figure 4.10(a)) a atteint une performance optimale avec une désirabilité maximale de 58,08 %. En revanche, la conception segmentée optimisée (Figure 4.10(b)) a obtenu une désirabilité maximale de 70,58 % avec six paires d'électrodes, chacune d'une longueur de 8 cm ($R = 0,48$).

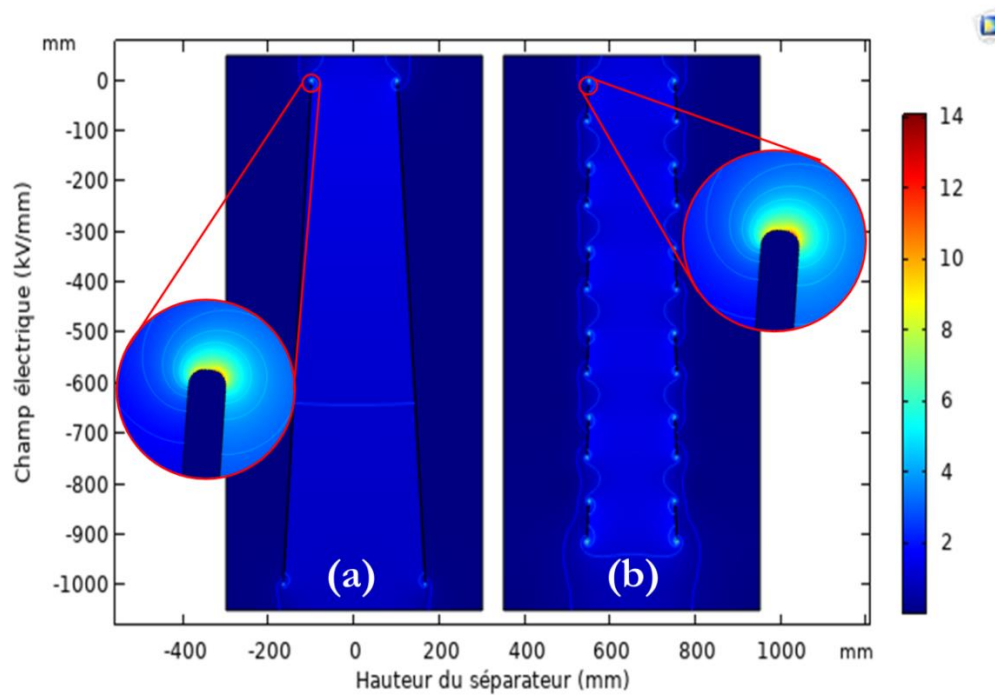


Figure 4.10 : Surfaces et lignes de contour du champ électrique pour les configurations optimales : (a) conventionnelle et (b) proposée.

La Figure 4.11 montre la distribution du champ électrique le long de l'axe y pour les conceptions conventionnelle et segmentée proposées. Comme illustré sur la figure, la conception optimisée proposée présente une intensité de champ électrique plus élevée que la conception conventionnelle. Sur la base de l'équation (5), la conception optimisée réduit la non-uniformité du champ électrique d'environ 9,13 %, ce qui souligne ses performances améliorées.

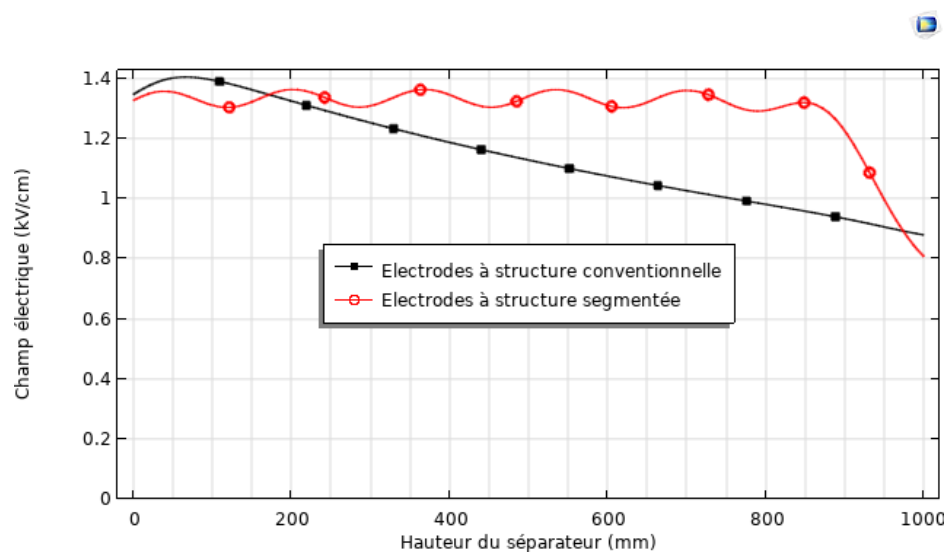


Figure 4.11 : Distribution du champ électrique le long de l'axe y pour les configurations optimales.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a porté sur l'optimisation des paramètres géométriques d'une nouvelle conception à électrodes segmentées pour un séparateur électrostatique à chute libre, dans le but d'améliorer l'uniformité du champ électrique – un facteur clé pour l'efficacité de la séparation. En couplant des simulations par éléments finis (FEM) avec une approche de type plan de surface de réponse (MSR-PCC), nous avons analysé l'influence du nombre de paires d'électrodes (nombre des étages) et du rapport de longueur segmentée sur la non-uniformité du champ électrique ainsi que sur la distance inter-électrodes de même polarité.

Les résultats montrent que le rapport de longueur segmentée est le paramètre le plus influent pour contrôler l'uniformité du champ électrique et la distance entre les électrodes. Les modèles statistiques développés présentent un excellent pouvoir prédictif, avec des coefficients de détermination (R^2) supérieurs à 0,99. La conception optimisée – composée de six paires d'électrodes, chacune d'une longueur de 8 cm – permet une réduction de 9 % de la non-uniformité du champ électrique par rapport à la conception conventionnelle. De plus, la distance entre les électrodes de même polarité a été maximisée jusqu'à environ 434,25 mm. Cette amélioration significative est essentielle pour minimiser les mouvements erratiques des particules, assurer des forces de déviation constantes et prévenir les problèmes de rebond, ce qui se traduit directement par des performances de séparation accrues.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre des efforts visant à développer et améliorer les performances des systèmes de séparation électrostatique, à travers une approche scientifique intégrée basée sur l'interaction entre l'analyse théorique, la modélisation numérique et l'optimisation statistique. L'étude théorique a permis d'établir les fondements physiques relatifs aux matériaux isolants et aux différents types de séparateurs électrostatiques, offrant ainsi une compréhension approfondie des mécanismes de fonctionnement de ces systèmes et définissant le cadre général de l'étude.

Dans une étape ultérieure, une analyse approfondie des paramètres influençant les performances du séparateur a été réalisée, afin d'identifier les facteurs géométriques et électriques les plus déterminants dans le comportement du champ électrique. Les résultats de l'analyse des effets ont mis en évidence la nature complexe et non linéaire des interactions entre ces paramètres, lesquelles constituent un facteur clé dans la qualité de la distribution du champ et la stabilité du mouvement des particules dans la zone de séparation. Sur la base de ces résultats, une nouvelle conception basée sur des électrodes segmentées a été développée, en combinant la méthode des éléments finis (MEF) et la méthodologie de surface de réponse (MSR-PCC), afin d'optimiser les performances de manière rigoureuse et systématique. Les résultats ont montré que cette approche permet d'améliorer significativement l'uniformité du champ électrique.

L'importance scientifique de ce travail réside dans le fait qu'il propose une vision intégrée combinant la compréhension physique approfondie et le comportement numérique du système, permettant ainsi d'orienter la conception des systèmes de séparation électrostatique avec plus de précision et d'efficacité.

Ce travail démontre que l'amélioration de la structure des électrodes et le contrôle précis de la distribution du champ électrique constituent des éléments fondamentaux pour évoluer vers des systèmes de séparation plus avancés, capables d'assurer des performances élevées, en adéquation avec les exigences des applications industrielles modernes. En guise de réflexion finale, bien que la simulation ne puisse jamais remplacer la sagesse et les connaissances acquises par l'expérience directe, elle reste un outil puissant pour la préparation et l'anticipation. Une simulation sans pratique réelle reste une théorie creuse, tandis qu'une expérience sans planification ou simulation préalable peut s'avérer être une aventure coûteuse.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Lange, J. P. (2021). Managing plastic waste— sorting, recycling, disposal, and product redesign. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(47), 15722-15738.
- [2] Pluskal, J., Šomplák, R., Nevrlý, V., Smejkalová, V., & Pavlas, M. (2021). Strategic decisions leading to sustainable waste management: Separation, sorting and recycling possibilities. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123359.
- [3] Phengsaart, T., Julapong, P., Manositchaikul, C., Srichonphaisarn, P., Rawangphai, M., Juntarasakul, O., ... & Ito, M. (2023). Recent studies and technologies in the separation of polyvinyl chloride for resources recycling: a systematic review. *Sustainability*, 15(18), 13842.
- [4] Lleshi, B. (2026). Sustainable management of beach litter: densimetric and tribo-electrostatic separation technologies for material recovery.
- [5] Zhang, H., Gao, X., & Xu, S. (2023). Tribo-charging and electrostatic separation of vehicle polymer particles using a new type of fluidized bed. *Process Safety and Environmental Protection*, 178, 331-341.
- [6] Dwari, R. K., & Rao, K. H. (2009). Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator. *Minerals Engineering*, 22(2), 119-127.
- [7] Brahiman T., “Elaboration et caractérisation d’une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés): Amélioration de la résistance par des charges en argiles”, Thèse de Doctorat en matériaux, Université de Bourgogne Franche-Comté, 2018.
- [8] Traore B., “Elaboration et caractérisation d’une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés) : amélioration de la résistance par des charges en argiles”, Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny, République de Côte d’Ivoire, 2018.
- [9] <https://www.naga44.org/IMG/pdf/plastiques.pdf>
- [10] Chala K., “Elaboration et caractérisation d’un matériau à base de Polyéthylène basse densité recyclé et chargé par le Talc”, Mémoire de Master, Génie des Procédés, Université de Biskra, 2016.
- [11] Coulibaly M., “Modélisation micromécanique et caractérisation expérimentale du comportement des matériaux hétérogènes élastoviscoplastiques: application à la valorisation des polymères recyclés”, Thèse de Doctorat en mécanique des matériaux, Université Paul Verlaine de Metz, France, 2008.
- [12] <http://www.consoglobe.com/recycler-plastiques-4312-cg>
- [13] <http://fr.wikipedia.org/wiki/DEEE>

-
- [14] E. G. Kelly and D. J. Spottiwood, "The theory of electrostatic separations: A review part II. Particle charging," *Miner. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 193–205, Jan. 1989, doi: 10.1016/08926875(89)90040-X.
 - [15] H. M. Veit and A. M. Bernardes, *Electronic Waste*. Cham: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-15714-6.
 - [16] Fabiani, Davide, Gian Carlo Montanari, and Luigi Testa. "Effect of aspect ratio and water contamination on the electric properties of nanostructured insulating materials." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 17.1 (2010): 221-230.
 - [17] Mirkowska, Monika, et al. "Principal factors of contact charging of minerals for a successful triboelectrostatic separation process—a review." *BHM Berg-Und Hüttenmännische Monatshefte* 161.8 (2016): 359-382.
 - [18] Touhami, Seddik, et al. "Evolutionary Optimization of the Shape of the Electrodes Used in a Free-Fall Electrostatic Separator." *IEEE Transactions on Industry Applications* (2025).
 - [19] Aman, Florian, et al. "High-voltage electrode position: a key factor of electrostatic separation efficiency." *IEEE Transactions on Industry Applications* 40.3 (2004): 905-910.
 - [20] Nadjem, Abdelkader, and Karim Rouagdia. "Optimizing electric field uniformity of a segmented-electrode free-fall separator using RSM-FEM coupling." *Journal of Electrostatics* 138 (2025): 104191.
 - [21] Moulai, Hakim, et al. "Effect of high voltage and electrode configuration on the trajectories of metallic particles in roll-type electrostatic separators for granular mixtures." *Journal of Electrostatics* 133 (2025): 104014.
 - [22] Wang, Nan, et al. "Micro-gap Discharge Characteristics of Particles on Insulator Surface under Humidity Environment." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* (2025).
 - [23] Cruise, Reuben D., et al. "The effect of particle size and relative humidity on triboelectric charge saturation." *Journal of Physics D: Applied Physics* 55.18 (2022): 185306.
 - [24] Calin L., Caliap L., Neamtu V., Morar R., Iuga A., Samuila A., Dascalescu L., "tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation", In: *IEEE Transactions on Industries Applications*, vol. 44, pp. 1045-1051, 2008.
 - [25] Calin L., Mihalcioiu A., Das S., Neamtu V., Dragan C., Dascalescu L., Iuga A., "Controlling particle trajectories in free-fall separators", In: *IEEE Transactions on Industries Applications*, vol. 44, pp. 1038-1044, 2008.
 - [26] Calin L., Dragan C., Iuga A., Samuila A., Dascalescu L., "Influence of the air humidity and temperature on fluidised bed triboelectrostatic separation", *MmdE-*
-

-
- 2008&ROMSC2008 Conference at “Politehnica” University of Bucharest, 16-18 June, 2008.
- [27] Mekhalef Benhafssa A., “Etude d’un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges des matériaux poudreux”, Thèse de Doctorat en électrotechnique, Université de Sidi-BelAbbes, 2017.
- [28] NADJEM, A. (2018). *Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques* (Doctoral dissertation).
- [29] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, “Optimization of belt-type electrostatic separation of triboaerodynamically charged granular plastic mixtures,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 4, pp. 1781–1786, 2013.
- [30] M. Miloudi, K. Medles, A. Bendaoud, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, “Improvement of the Industrial Pilot of a Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Binary Mixtures of Granular Insulating Materials,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 4, pp. 3479–3484, 2015.
- [31] M. Boubakeur, M. Mecheri, "Comportement diélectrique et mécanique du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à un vieillissement thermique continu", *Exp. Sci. fr*, Laboratoire de Haute Tension de l'École Nationale Polytechnique, B.P 182, El Harrach, Alger, Algérie 2000.
- [32] Medoukali, H., Guibadj, M., Zegnini, B.: ‘Study of electrical and electromechanical constraints in the insulation of high-voltage cables containing microcavities: effect of space charges, *Int. J. Comput. Exp. Sci. Eng.*, 2017, 1.
- [33] A.N. Tuah, A.B. Ibrahim, S. Dzulkifly, F. Mohammad Yusof, R. Awang Nor, R. Ariffin, Analysis of the Area Under a Curve (AUC) using C-programming: Trapezium and Simpson rules techniques, *J. ICT Educ.* 9 (2022) 143–153. <https://doi.org/10.37134/jictie.vol9.1.12.2022>.
- [34] S.J.S. Chelladurai, K. Murugan, A.P. Ray, M. Upadhyaya, V. Narasimharaj, S. Gnanasekaran, Optimization of process parameters using response surface methodology: A review, *Mater. Today Proc.* 37 (2020) 1301–1304.
- [35] V.K. Gandhi, R. Verma, M. Warriar, A. Sharma, Effect of Electrode Profile and Polarity on Performance of Pressurized Sparkgap Switch, *Plasma* 5 (2022) 130–145.
- [36] R. Christensen, Analysis of Variance, Design, and Regression, *Anal. Variance, Des. Regres.* (2015).
- [37] S.F. Sawyer, Analysis of Variance: The Fundamental Concepts, *J. Man. Manip. Ther.* 17 (2009) 27E-38E.
- [38] Nadjem, A., & Rouagdia, K. (2025). Optimizing electric field uniformity of a segmented-electrode free-fall separator using RSM-FEM coupling. *Journal of Electrostatics*, 138, 104191.
-

يقترح هذا العمل منهجية تجمع بين النمذجة العددية والتخطيط الإحصائي للتحكم في توزيع المجال الكهربائي وتحسين أدائه داخل فاصل كهرباء ساكنة يعمل بمبدأ السقوط الحر. تستخدم المرحلة الأولى برنامج COMSOL Multiphysics القائم على طريقة العناصر المحدودة (FEM) لمحاكاة سلوك المجال الكهربائي في ظل تكوينات مختلفة. أما المرحلة الثانية فتعتمد على منهجية أسطح الاستجابة (RSM) وتحليل التباين (ANOVA) عبر برنامج JMP لتحديد العوامل الأكثر تأثيراً وتحسين أداء الفاصل. يهدف هذا العمل إلى تحسين كفاءة عملية الفصل الكهربائي الساكن، مع تطبيقات استراتيجية في مجال إعادة تدوير البوليمرات العازلة صناعياً.

الكلمات المفتاحية: فصل كهرباء ساكنة، سقوط حر، طريقة العناصر المحدودة، منهجية أسطح الاستجابة، تحليل التباين، تحسين المجال الكهربائي، إعادة تدوير البوليمرات العازلة.

Résumé :

Ce mémoire propose une méthodologie combinant modélisation numérique et planification statistique pour contrôler et optimiser la distribution du champ électrique dans un séparateur électrostatique à chute libre. La première étape utilise COMSOL Multiphysics (méthode des éléments finis) pour simuler le comportement du champ électrique sous différentes configurations. La seconde étape s'appuie sur la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et l'analyse de la variance (ANOVA) via JMP pour identifier les facteurs les plus influents et optimiser les performances du séparateur. Ce travail vise à améliorer l'efficacité du processus de séparation électrostatique, avec des applications stratégiques dans le recyclage industriel des polymères isolants.

Mots-clés : Séparation électrostatique, chute libre, éléments finis, surfaces de réponse, ANOVA, optimisation du champ électrique, recyclage des polymères isolants.

Abstract

This thesis proposes a methodology combining numerical modeling and statistical design to control and optimize the electric field distribution in a free-fall electrostatic separator. The first step uses COMSOL Multiphysics (finite element method) to simulate the behavior of the electric field under different configurations. The second step relies on response surface methodology (RSM) and analysis of variance (ANOVA) via JMP to identify the most influential factors and optimize the separator's performance. This work aims to improve the efficiency of the electrostatic separation process, with strategic applications in the industrial recycling of insulating polymers.

Keywords: Electrostatic separation, free fall, finite element method, response surface methodology, ANOVA, electric field optimization, insulating polymer recycling.