



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Électrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master académique
en Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

Thème

***Modélisation du champ électrique autour d'une chaîne
d'isolateurs polluée à l'aide du plan composite centré
(CCD)***

Réalisé par :

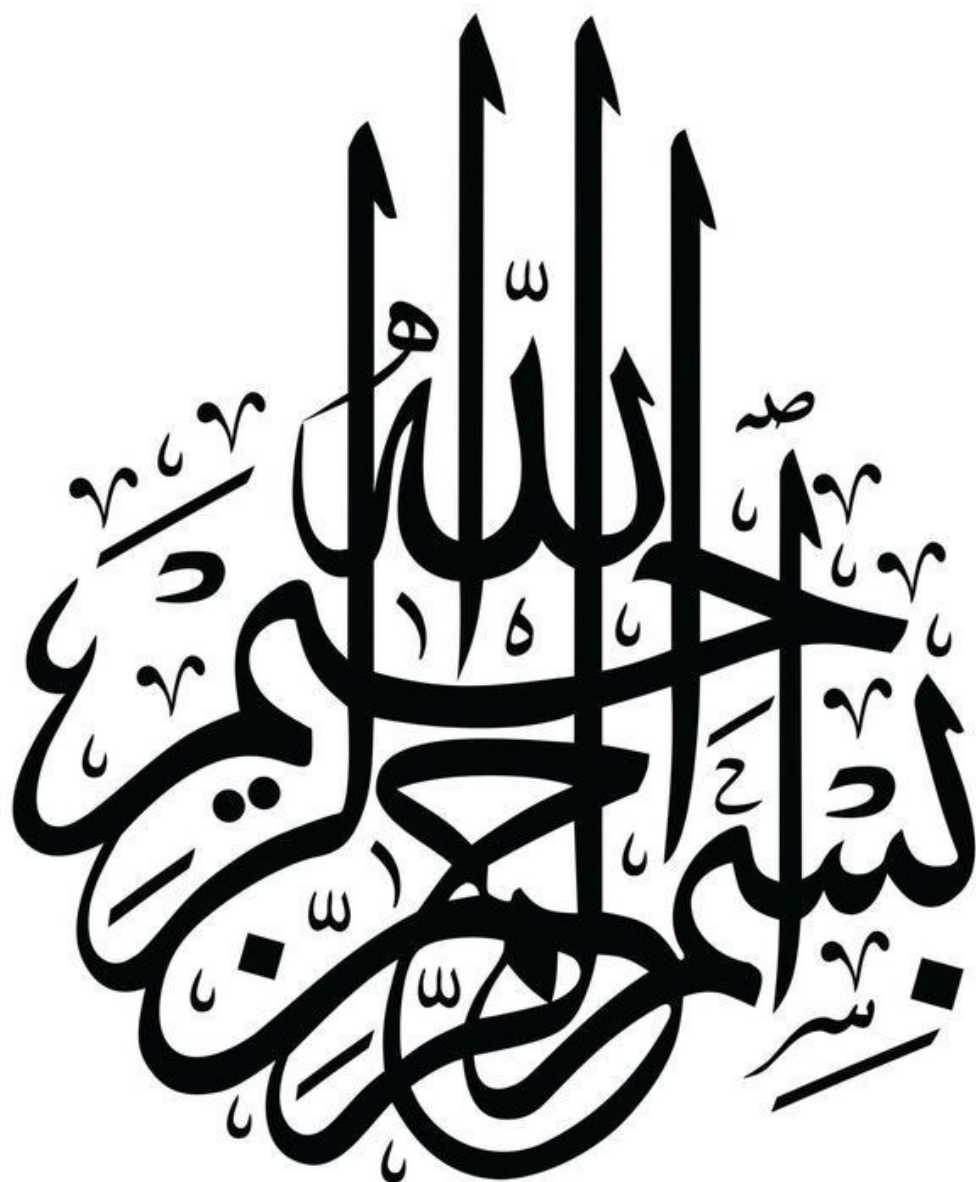
- ***Zeghidi Bessma***
- ***Khedir Nour Elyakine***

Devant le jury composé de:

Pr. Guia Talal
Dr. Mida Idris
Dr. Khechekhouche Ali

Président
Examineur
Encadrant

Année universitaire : 2025–2026



الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى نمذجة المجال الكهربائي حول سلسلة عوازل زجاجية من نوع NJ120 تحت تأثير حالات مختلفة من التلوث غير المنتظم، بالاعتماد على منهجية التصميم المركب المركزي (CCD) ضمن إطار منهجية أسطح الاستجابة (RSM). اعتمدت الدراسة على بيانات تجريبية تم الحصول عليها من مخبر الجهد العالي بجامعة الوادي تحت جهد ثابت مقداره 80 kV وباستعمال محلول ملوث ذي ناقلية 1.97 mS/cm.

اعتمدت الدراسة على عاملين كميين هما المسافة الأفقية D_h والمسافة العمودية D_v ، مع دراسة أربعة سيناريوهات مختلفة لتوزيع التلوث على سلسلة العوازل. وبسبب الطبيعة النوعية لموضع التلوث، تم تطوير أربعة نماذج مستقلة باستعمال مخطط CCD.

أظهرت النتائج دقة عالية للنماذج المطورة، حيث تراوحت قيم معامل التحديد R^2 بين 0.988 و 0.999، كما بينت أن التلوث المتمركز بالقرب من القطب عالي الجهد يؤدي إلى أعلى شدة للمجال الكهربائي مقارنة ببقية الحالات. تؤكد هذه النتائج فعالية منهجية CCD في تقليل عدد التجارب وبناء نماذج تنبؤية دقيقة لدراسة وتحسين أنظمة العزل الكهربائي.

الكلمات المفتاحية:

المجال الكهربائي – العوازل الزجاجية – التلوث غير المنتظم – التصميم المركب المركزي (CCD) – منهجية أسطح الاستجابة (RSM) – الجهد العالي.

Résumé

Cette étude vise à modéliser le champ électrique autour d'une chaîne d'isolateurs en verre de type NJ120 soumise à différents scénarios de pollution non uniforme, en utilisant la méthode du Central Composite Design (CCD) dans le cadre de la méthodologie des surfaces de réponse (RSM). Les données expérimentales ont été obtenues au laboratoire de haute tension de l'Université d'El Oued sous une tension constante de 80 kV et une conductivité de solution polluante de 1,97 mS/cm.

L'étude est basée sur deux facteurs quantitatifs : la distance horizontale D_h et la distance verticale D_v , avec quatre configurations de pollution. Quatre modèles indépendants ont été développés à l'aide du CCD.

Les résultats montrent une excellente précision des modèles avec des coefficients de détermination R^2 compris entre 0,988 et 0,999. L'étude a également montré que la pollution située près de l'électrode haute tension produit les intensités de champ les plus élevées.

Mots-clés :

Champ électrique – isolateurs en verre – pollution non uniforme – CCD – RSM – haute tension.

Abstract

This study aims to model the electric field around a NJ120 glass insulator string under different non-uniform pollution conditions using the Central Composite Design (CCD) method within the framework of Response Surface Methodology (RSM). Experimental data were obtained from the High Voltage Laboratory of the University of El Oued under a constant voltage of 80 kV and pollution conductivity of 1.97 mS/cm.

Two quantitative factors were considered: the horizontal distance D_h and the vertical distance D_v , with four pollution scenarios. Four independent CCD models were developed.

The results showed high model accuracy with R^2 values ranging from 0.988 to 0.999. The study also revealed that pollution near the high-voltage electrode generates the highest electric field intensity.

Keywords:

Electric field – glass insulators – non-uniform pollution – CCD – RSM – high voltage.

Remerciements

Louange à Allah, nous Le remercions et Lui rendons grâce, car sans Sa bénédiction et Son soutien, nous n'aurions jamais pu réussir ni achever ce travail.

Je dédie ce travail à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation et qui m'ont accompagnée tout au long de ce parcours.

À mes chers parents, qui ont toujours été une source de force, de patience et de soutien permanent.

À ma chère famille, qui a été mon soutien dans les moments de faiblesse et de fatigue, et qui reste pour moi une source de sécurité et de réconfort.

À mes amis, pour leurs encouragements sincères et leur soutien durant toutes les étapes de ce parcours.

À mes enseignants, qui ont contribué à ma formation scientifique et académique.

À toutes les personnes qui ont cru en moi, m'ont aidée ou encouragée, même par une simple parole bienveillante.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à tous ceux qui ont eu un impact, même minime, dans l'accomplissement de ce travail, par leur aide, leurs conseils ou leur soutien moral.

À vous tous, je dédie le fruit de ce modeste effort avec tout mon respect et ma reconnaissance.

Dédicaces

Louange à Allah, nous Le remercions et Lui rendons grâce, car sans Sa bénédiction et Son soutien, nous n'aurions jamais pu réussir ni achever ce travail.

Je dédie ce travail à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation et qui m'ont accompagnée tout au long de ce parcours.

À mes chers parents, qui ont toujours été une source de force, de patience et de soutien permanent.

À ma chère famille, qui a été mon soutien dans les moments de faiblesse et de fatigue, et qui reste pour moi une source de sécurité et de réconfort.

À mes amis, pour leurs encouragements sincères et leur soutien durant toutes les étapes de ce parcours.

À mes enseignants, qui ont contribué à ma formation scientifique et académique.

À toutes les personnes qui ont cru en moi, m'ont aidée ou encouragée, même par une simple parole bienveillante.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à tous ceux qui ont eu un impact, même minime, dans l'accomplissement de ce travail, par leur aide, leurs conseils ou leur soutien moral.

À vous tous, je dédie le fruit de ce modeste effort avec tout mon respect et ma reconnaissance.

Bessma

Dédicaces

Celui qui dit : « J'en suis capable » l'obtiendra, et même si cela vient à lui malgré lui, c'est lui qui l'aura atteint.

Louange à Allah, par la grâce duquel les bonnes œuvres s'accomplissent, par la faveur duquel les souhaits se réalisent et avec l'aide duquel les pas atteignent leurs objectifs. À Lui reviennent les louanges, au début comme à la fin, pour tous Ses bienfaits, Sa générosité et Son soutien.

À celui qui a embelli mon nom des plus beaux titres, qui m'a donné de la force sans même le savoir et qui m'a appris que l'effort est le chemin de la réussite,
à mon cher père.

À mon cœur rempli d'amour et de tendresse, et aux prières qui m'ont accompagnée à chaque étape, lumière qui a éclairé mon chemin dans les moments les plus difficiles,
à ma chère mère.

À ma chère famille, qui a toujours été mon soutien et ma sécurité dans tous les moments.

À mon cher mari, qui a été mon soutien et mon appui tout au long de ce parcours, et qui a partagé avec moi les moments de fatigue avant ceux de joie.

À mes chers enseignants, qui ont contribué à ma formation scientifique et académique et m'ont guidée par leurs conseils et leur soutien.

Aujourd'hui, j'ai récolté le fruit de mon travail, grâce à Allah le Tout-Puissant. Louange à Allah pour ce qu'Il m'a accordé, pour Son aide et pour la réussite qu'Il m'a permis d'atteindre.

Nour Elyakine

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale

Introduction générale.....	1
Problématique.....	2
Chapter I Influence de la pollution sur le champ électrique des isolateurs	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Techniques expérimentales	4
I.3 Résultats expérimentaux et interprétations	6
I.3.1 Chaîne des isolateurs à l'état propre et sec	6
I.3.2 Chaîne des isolateurs à surfaces inférieures polluées	8
I.3.3 Chaîne moignon à isolateurs propres et secs	9
I.3.4 Présence d'anneaux de garde.....	11
I.4 Conclusion.....	17
Chapter II Modélisation et approche théorique du Central Composite Design.....	18
II.1 Introduction aux plans d'expériences	19
II.2 Définition du Central Composite Design (CCD)	20
II.2.1 Principe du CCD.....	21
II.2.2 Objectifs du CCD	22
II.2.3 Avantages du CCD.....	22
II.2.4 Intérêt dans les applications en ingénierie	23
II.3 Structure mathématique du Central Composite Design (CCD).....	23
II.3.1 Modèle mathématique général.....	23
II.3.2 Codage des variables	24
II.3.3 Organisation matricielle du modèle.....	24
II.3.4 Nombre de termes du modèle	25
II.4 Condition de validité du modèle.....	25

II.5 Démarche de construction du Central Composite Design (CCD)	26
II.5.1 Analyse par régression multiple	27
II.6 Exploitation du modèle	27
II .7 Conclusion	29
Chapter III Modélisation du champ électrique par le plan composite centré (CCD)	
III.1 Introduction	30
III.2 Méthodologie des surfaces de réponse	31
III.2.1 Principe général	31
III.2.2 Avantages de la méthodologie	31
III.2.3 Plans d'expériences classiques pour la RSM	32
III.3 Le plan composite centré (CCD)	32
III.3.1 Structure générale	32
III.3.2 Variantes du plan composite centré	33
III.3.3 Justification du choix du CCF dans notre étude	33
III.4 Stratégie de modélisation appliquée à la chaîne polluée	33
III.4.1 Choix des facteurs et des scénarios de pollution	33
III.4.2 Construction de la matrice d'expériences	35
III.4.3 Modèle ajusté pour chaque scénario	36
III.5 Résultats et discussion	36
III.5.1 Coefficients estimés et significativité	36
III.5.2 Indicateurs globaux d'ajustement	38
III.5.3 Analyse des surfaces de réponse	39
III.5.4 Validation externe sur des points indépendants	41
III.6 Discussion comparative des quatre scénarios	43
III.7 Conclusion	44
Conclusion générale	45
Perspectives	

Liste des Figures

Figure I.1.Méthode de mesure du champ électrique	5
Figure I.2.Méthode de pulvérisation , Figure I.3. La chaîne des isolateurs utilisée et les pulvérisation axes de mesure du champ	6
Figure I.4.Forme de l'onde du champ électrique	6
Figure I.5.Distribution du champ électrique le long d'un axe parallèle à la chaîne et distant de celle-ci (a) d=1 m, (b) d=1,25 m, (c) d=1,5 m, et (d) d=1,75 m.....	7
Figure I.6.Distribution du champ électrique au voisinage de la chaîne des isolateurs pour différents paliers de tension (a) 30 kV, et (b) 80 kV	7
Figure I.7.Effet de la répartition de la couche polluée sur la distribution du champ électrique pour des différentes conductivités (a) 0,51 mS/cm, (b) 1,4 mS/cm, (c) 1,72 mS/cm, et (d) 1,97 mS/cm	9
Figure I.8.Isolateurs à capot et tige de type NJ120 (a) élément sain, et (b) élément endommagé	10
Figure I.9.Différentes positions de l'isolateur endommagé dans la chaîne, (a) 1, (b) 3, et (c) 6 ..	10
Figure I.10.Effet de la position de l'élément endommagé sur la répartition du champ électrique mesuré à 1 m de la chaîne	11
Figure I.11.Chaîne à isolateurs propre et sec, (a) avec deux anneaux de garde, et (b) un anneau de garde installé à proximité de la borne HT	12
Figure I.12.Distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne d'isolateurs propres et secs avec un et deux anneaux de garde de différents rayons (a) R=17 cm, et (b) R=30 cm.....	14
Figure I.13 .Distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne d'isolateurs propres et secs avec un et deux anneaux de garde installés à une hauteur de (a) H=0 cm, et (b) H = 15 cm	15
Figure I.14. Distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne des isolateurs pollués avec un et deux anneaux de garde de rayon (a) R=17 cm, et (b) R=30 cm	16
Figure I.15. Distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne des isolateurs pollués avec un et deux anneaux de garde installés à une hauteur de (a) H=0 cm, et (b) H=15 cm	17
Figure II.1. Comparaison entre approche empirique et plans d'expériences	20
Figure II.2. Structure du plan Central Composite Design (CCD).....	21
Figure II.3. Recherche des conditions optimales à partir du modèle CCD	22
Figure II.4. Différence entre modèle linéaire et modèle quadratique	23
Figure II.5.Transformation des variables réelles en variables codées.....	24
Figure II.6. Exemple de surface de réponse modélisée par CCD	28
Figure II.7. Ajustement du modèle par régression multiple	29
Figure III.1. Représentation géométrique du plan composite centré à faces (CCF) à deux facteurs.	35
Figure III.2.Comparaison graphique des coefficients des quatre modèles ajustés.....	37
Figure III.3. Valeurs prédites en fonction des valeurs mesurées aux points du plan.....	39
Figure III.4. Surfaces de réponse des quatre modèles ajustés.	40
Figure III.5. Diagnostic des résidus pour les quatre scénarios.....	41
Figure III.6. Comparaison entre champ mesuré et champ prédit pour les 21 points de validation par interpolation.	43

Liste des Tableaux

Table II-1: Exemple de matrice de conception (CCD).....	25
Table III-1. Description des quatre scénarios de pollution étudiés..	34
Table III-2. Niveaux codés et réels des deux facteurs quantitatifs.....	34
Table III-3. Matrice du plan CCF et champ électrique mesuré (kV/cm) pour les quatre scénarios.	35
Table III-4. Coefficients estimés et significativité statistique pour les quatre scénarios.	36
Table III-5. Indicateurs globaux d'ajustement des quatre modèles CCD.	38
Table III-6. Validation des modèles sur 21 points d'interpolation et 8 points d'extrapolation.	42

Introduction générale

Introduction générale

Le secteur de l'énergie électrique connaît aujourd'hui une évolution rapide et continue, en raison de l'augmentation constante de la demande énergétique et de l'expansion des réseaux de transport à haute et très haute tension. Dans ce contexte, la fiabilité et la stabilité des systèmes électriques représentent un enjeu majeur pour les ingénieurs et les chercheurs dans le domaine des réseaux électriques.

Les isolateurs électriques jouent un rôle essentiel dans ces réseaux, puisqu'ils assurent à la fois l'isolation électrique entre les conducteurs sous tension et les structures mises à la terre, ainsi que le support mécanique des lignes de transport d'énergie. Leur bon fonctionnement conditionne directement la continuité du service électrique et la sécurité des installations [1].

Cependant, en service, les isolateurs sont soumis à des conditions environnementales variables telles que l'humidité, la poussière, la pollution industrielle et saline. Ces facteurs entraînent l'accumulation de dépôts polluants sur leur surface, modifiant ainsi leurs propriétés diélectriques et perturbant la répartition du champ électrique autour d'eux [2].

Cette perturbation peut engendrer l'apparition de courants de fuite ainsi que des zones de forte contrainte électrique. Dans les cas les plus critiques, ces phénomènes peuvent évoluer vers des décharges partielles puis vers un claquage complet appelé flashover, compromettant ainsi la stabilité du réseau électrique [3].

Le problème devient encore plus critique dans le cas d'une pollution non uniforme, où les dépôts contaminants ne sont pas répartis de manière homogène sur la surface de l'isolateur. Cette situation crée des déséquilibres importants dans le champ électrique et augmente le risque de points critiques à forte intensité électrique [4].

Dans ce contexte, l'étude de la distribution du champ électrique autour des isolateurs pollués est indispensable pour comprendre leur comportement et améliorer leur performance. Toutefois, les méthodes expérimentales classiques présentent des limitations importantes, notamment en termes de coût, de temps et de nombre de configurations étudiées [5].

Ainsi, il devient nécessaire de recourir à des approches mathématiques et statistiques permettant de modéliser ces phénomènes complexes avec un nombre réduit d'expériences. Parmi ces méthodes, la méthodologie des plans d'expériences (Design of Experiments – DoE) et plus particulièrement la méthodologie des surfaces de réponse (Response Surface Methodology

– RSM) constituent des outils puissants pour l'analyse et la modélisation des systèmes physiques complexes [6].

Dans ce cadre, le plan composite centré (Central Composite Design – CCD) est largement utilisé, car il permet de construire des modèles quadratiques capables de représenter les effets linéaires, quadratiques et les interactions entre variables avec une bonne précision [7].

Problématique

La problématique principale de cette étude peut être formulée comme suit :

Comment modéliser et prédire la distribution du champ électrique autour d'une chaîne d'isolateurs pollués en utilisant un nombre limité d'expériences, tout en analysant l'influence de la position de la pollution et des distances géométriques ?

Chapter 1

Influence de la pollution sur le champ électrique des isolateurs

I.1 Introduction

Dans les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique, les isolateurs jouent un rôle essentiel en assurant à la fois l'isolation électrique entre les conducteurs sous tension et les structures mises à la terre, ainsi que le support mécanique des lignes [8]. Leur performance est donc déterminante pour la fiabilité et la continuité du service électrique.

Un isolateur est un dispositif conçu pour empêcher le passage du courant électrique entre deux parties conductrices soumises à des potentiels différents. Toutefois, sous certaines conditions, notamment en présence de pollution, d'humidité ou de contraintes électriques élevées, des phénomènes de dégradation peuvent apparaître, conduisant à un amorçage ou à un contournement électrique (flashover), c'est-à-dire une décharge électrique à la surface de l'isolateur, appelé également phénomène de rupture diélectrique [9].

Le champ électrique constitue un paramètre fondamental dans l'étude du comportement des isolateurs. Il représente la distribution des forces électriques dans l'espace autour de la chaîne d'isolateurs, et son intensité dépend de plusieurs facteurs tels que la géométrie des isolateurs, la tension appliquée, les conditions environnementales et la présence d'éléments perturbateurs comme les anneaux de garde ou les défauts structuraux [10]. Une distribution non uniforme du champ électrique peut engendrer des zones de forte intensité, favorisant l'apparition de décharges partielles, de l'effet couronne, et éventuellement du contournement électrique [11].

Dans ce contexte, la problématique principale de ce chapitre consiste à comprendre comment les différents paramètres influencent la répartition du champ électrique au voisinage d'une chaîne d'isolateurs, et à identifier les configurations les plus critiques pouvant conduire à une dégradation des performances diélectriques.

Ainsi, dans ce chapitre, nous nous intéressons à la répartition du champ électrique à proximité d'une chaîne contenant six isolateurs de type NJ120. La mesure du champ électrique a été effectuée en présence et en absence des anneaux de garde, lorsque les isolateurs sont propres et secs, ainsi que lorsque leurs surfaces inférieures sont polluées à l'aide d'une solution à base de tuf, avec différentes conductivités.

Le champ électrique a également été mesuré le long d'une chaîne moignon afin d'étudier l'effet de la présence d'un élément endommagé, dont la position a été variée à partir de la borne active. Par ailleurs, des modèles de régression ont été élaborés afin d'établir des corrélations entre le champ électrique et les différents paramètres d'influence. Chaque modèle proposé est accompagné d'une analyse statistique permettant d'évaluer son niveau de signification .

I.2 Techniques expérimentales

Les essais ont été effectués au même laboratoire de haute tension de l'Université d'El Oued dont l'équipement de la station d'essai à fréquence industrielle (50 Hz) a été déjà présenté dans le chapitre précédent. Nous avons réalisé un nouveau capteur permettant la détermination du champ électrique conformément à la méthode de la capacité distribuée comme montré sur la figure I.1. Ce capteur est constitué de 13 sondes similaires reliées à une carte microcontrôleur de type Arduino Uno. La sonde est une électrode cylindrique ayant une surface de détection de $A=19.6 \text{ mm}^2$. Chaque sonde est reliée à une capacité de 9.1 nF , qui à son tour est connectée à la terre. Les principales caractéristiques de la carte Arduino Uno sont les suivantes, marque : picoPower, 8 bits, 32K, référence : ATmega328P, fréquence maximale de 20 MHz et alimentation de 5 volts [12]. Elle peut être alimentée par le port USB et/ou des sources d'alimentation en courant continu. Les mesures sont enregistrées dans un microordinateur via la carte microcontrôleur Arduino Uno munie d'un logiciel open source [13]. La carte Arduino Uno est utilisée pour mesurer les différences de potentiels entre les capacités. Dans ces conditions, la charge située à la surface de la sonde $A(=19.6 \text{ mm}^2)$ peut être déterminée à partir de la tension mesurable V à travers la capacité C en utilisant l'équation suivante:

$$Q = C V \quad (\text{I.1})$$

Sur cette base, l'intensité du champ électrique peut être déterminée comme suivant :

$$\mathbf{E} = \frac{CV}{A\epsilon_0} \quad (\text{I.2})$$

A travers le logiciel open source de la carte Arduino Uno, cette dernière a été programmée pour délivrer directement l'intensité du champ électrique évidemment après avoir introduit les équations précédentes dans cette carte.

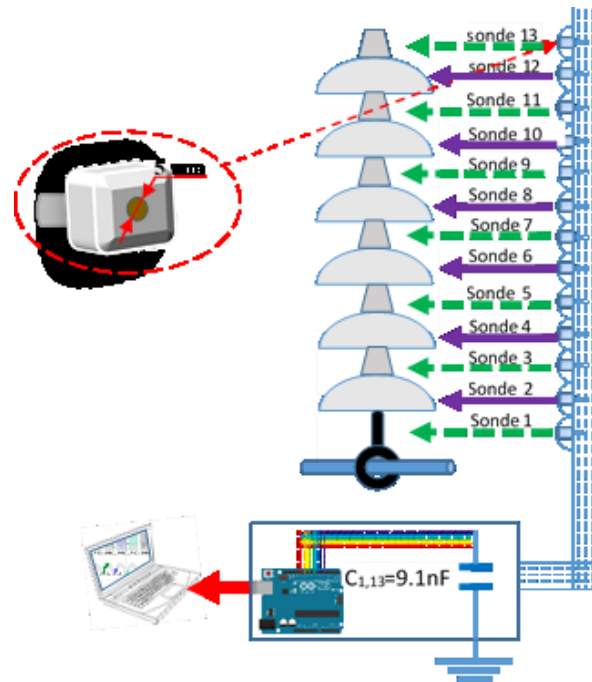


Figure I.1. Méthode de mesure du champ électrique

Le champ électrique est mesuré à proximité d'une chaîne d'isolateurs constituée de six isolateurs de type NJ120. La mesure a été d'abord faite à l'état propre et sec. Pour ce faire, les isolateurs ont été lavés en utilisant une eau distillée, puis essuyés avec du papier et séchés à l'air chaud. La mesure a été refaite cette fois-ci en présence de la pollution en pulvérisant les surfaces inférieures des isolateurs par une solution à base du tuf. 5 pulvérisations pour chaque côté ont été appliquées. 4 cotés distants de 30 cm de l'axe central de la chaîne des isolateurs ont été choisis. (Figure I.2). Différentes valeurs de conductivité de la pollution ont été utilisées à savoir 0,5, 1,4, 1,72 et 1,97 mS/cm. L'impact des chaînes moignons (avec un élément brisé), la position de l'élément brisé et des éléments pollués ainsi que la présence des anneaux de garde sur la distribution du champ électrique a été également examiné. L'extrémité active de la chaîne est considérée comme le point de référence de mesure. Les mesures ont été effectuées en 13 hauteurs à savoir $h = 0, 73, 146, 219, 292, 365, 438, 511, 584, 657, 730, 803$ et 876 mm. Pour chaque hauteur, 4 distances sur l'axe horizontal ($d=1, 1,25, 1,5$ et $1,75$ m) ont été choisies. Les valeurs choisies de la tension alternative appliquée sont les suivants : 15, 30, 45, 60 et 80 kV.

La figure I.4 montre un exemple quant à la forme de l'onde du champ électrique enregistrée par la 7^{ème} sonde, lorsque la tension appliquée est égale à 80 kV dans des conditions propres et ce pour toutes des distances horizontales considérées.



Figure I.2. Méthode de pulvérisation , Figure I.3. La chaîne des isolateurs utilisée et les pulvérisation axes de mesure du champ

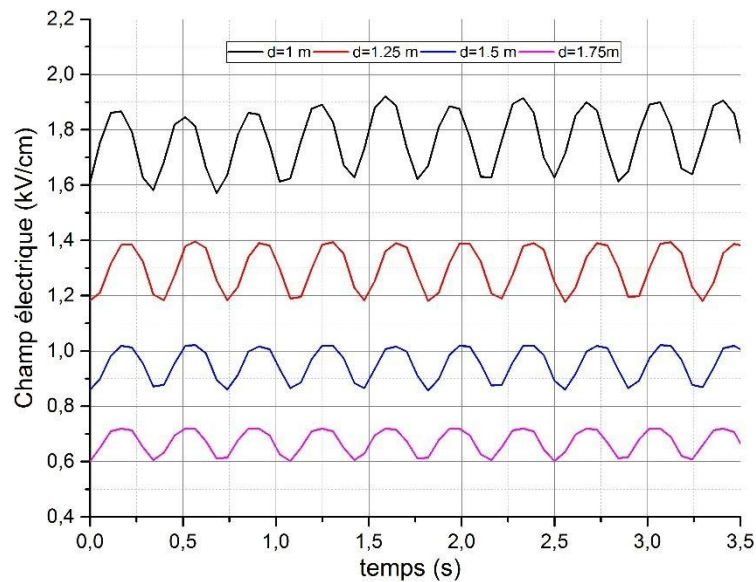


Figure I.4. Forme de l'onde du champ électrique

I.3 Résultats expérimentaux et interprétations

I.3.1 Chaîne des isolateurs à l'état propre et sec

Les figures I.5 et I.6 illustrent la variation de l'amplitude du champ électrique au voisinage de la chaîne dont les isolateurs sont propres et ce pour différentes tensions appliquées et distances par rapport à l'axe central de cette chaîne.

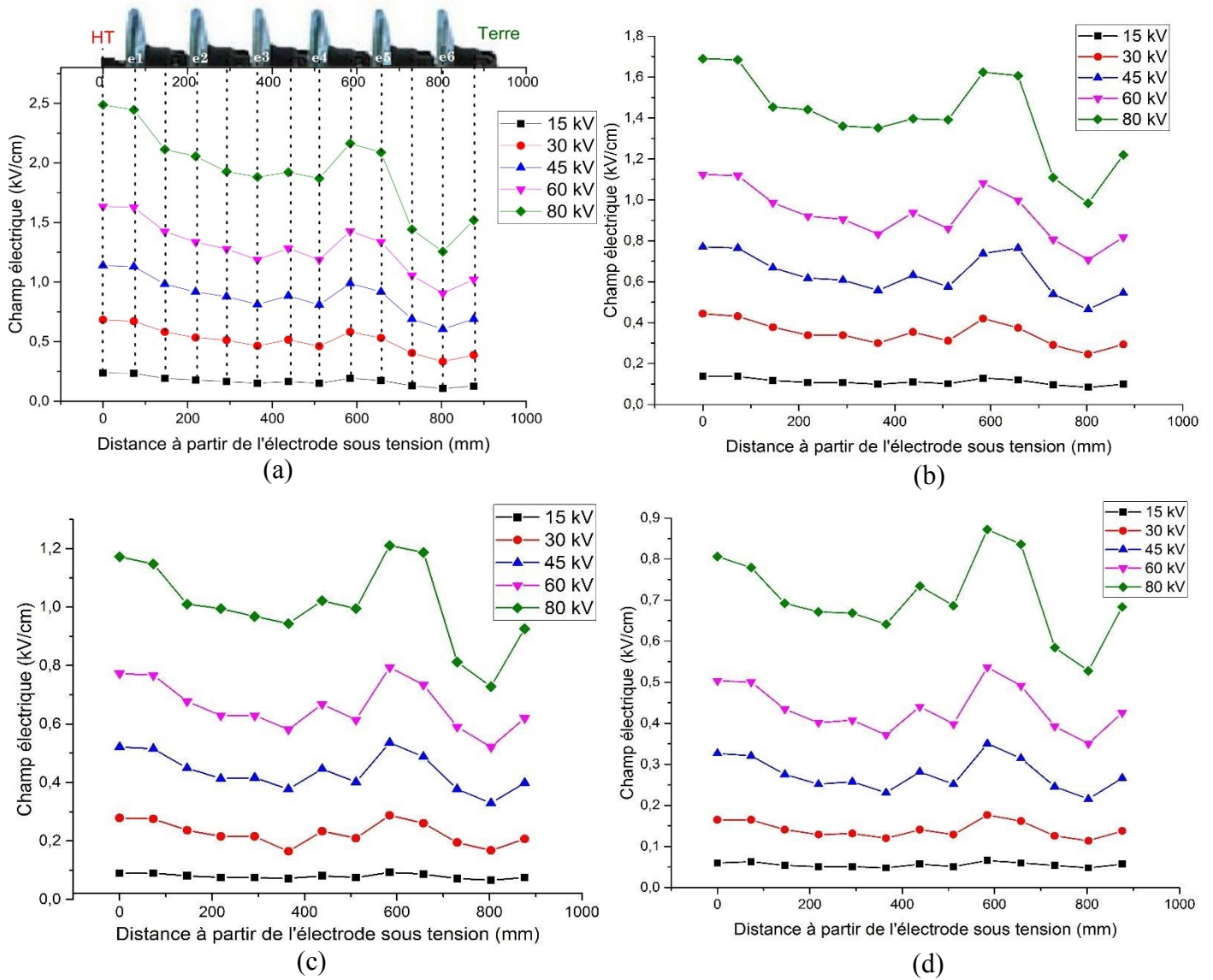


Figure I.5. Distribution du champ électrique le long d'un axe parallèle à la chaîne et distant de celle-ci
(a) $d=1\text{ m}$, (b) $d=1,25\text{ m}$, (c) $d=1,5\text{ m}$, et (d) $d=1,75\text{ m}$

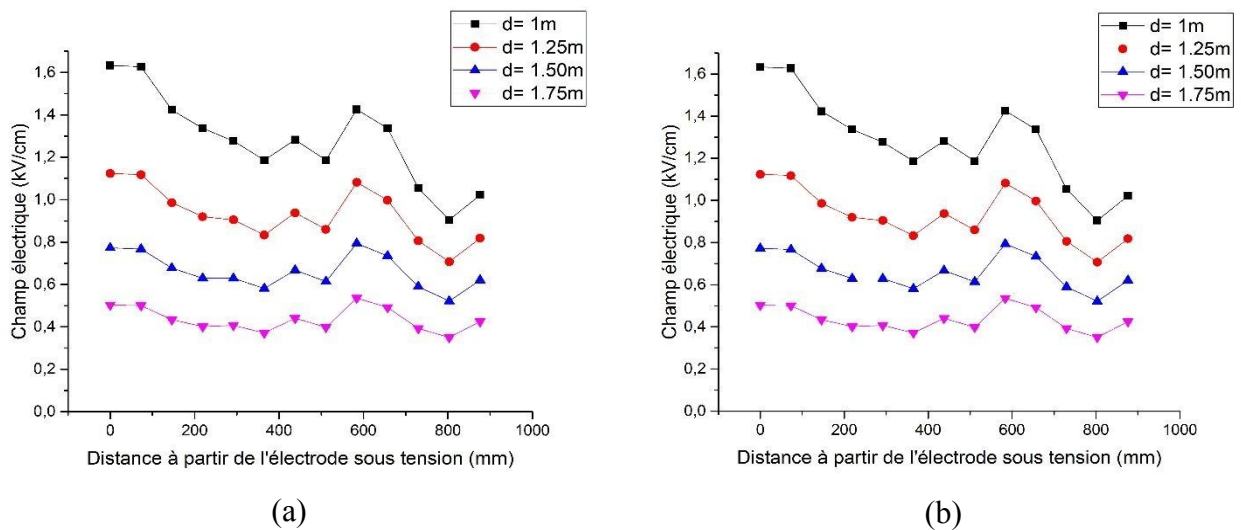


Figure I.6. Distribution du champ électrique au voisinage de la chaîne des isolateurs pour différents paliers de tension (a) 30 kV, et (b) 80 kV

Les caractéristiques des figures I.5 et I.6 obtenues pour toutes tensions appliquées présentent des allures similaires quant aux distributions du champ électrique obtenues différentes distances par rapport à l'axe central de la chaîne des isolateurs. De telles allures sont fluctuantes du moment qu'elles possèdent des hauts et des bas. Pour les distances ne dépassant pas 1,25 m par rapport à l'axe central de la chaîne, l'amplitude du champ est la plus intense à la même hauteur que celle de l'électrode de haute tension (correspondant à 0 mètre). Par ailleurs, et à partir de 1,50 m, l'amplitude du champ est maximale à la même hauteur que celle du raccord métallique entre les isolateurs 4 et 5 (correspondant à une hauteur 584 mm). L'amplitude minimale est obtenue à la même hauteur que celle de l'isolateur 6. A titre d'exemple, pour une tension appliquée de 80 kV et une distance de 1 m par rapport à l'axe de la chaîne (Figure I.5(a)), l'amplitude maximale du champ électrique vaut 2,48 kV/cm, alors que celle minimale est de 1,25 kV/cm; soit une réduction de 50 %. Il est à noter que les zones caractérisées par un champ électrique intense pourront être le siège de l'apparition de l'effet de couronne et/ou des décharges électriques. De mêmes constations ont été faites par d'autres chercheurs [14, 15].

I.3.2 Chaîne des isolateurs à surfaces inférieures polluées

Nous nous sommes limités, dans cette section, d'analyser la répartition du champ électrique sur l'axe parallèle le plus proche se situant à 1 m de l'axe central de la chaîne lorsque seulement les surfaces inférieures des isolateurs sont polluées par une solution à base de tuf. Dans le but d'étudier l'effet de la répartition de la pollution, plusieurs configurations ont été considérées: (1) surfaces inférieures des isolateurs 1 et 2 (du côté HT) polluées (le reste étant propre), (2) surfaces inférieures des isolateurs 3 et 4 polluées, (3) surfaces inférieures des isolateurs 5 et 6 (du côté de l'électrode de Terre) polluées; et enfin (4) surfaces inférieures de tous isolateurs polluées.

La figure I.7 représente la distribution du champ le long de l'axe parallèle pour des différentes conductivités volumiques de la pollution à savoir 0,5, 1,4, 1,72 et 1,97 mS/cm. La tension appliquée pour tous les essais est fixée à 80 kV.

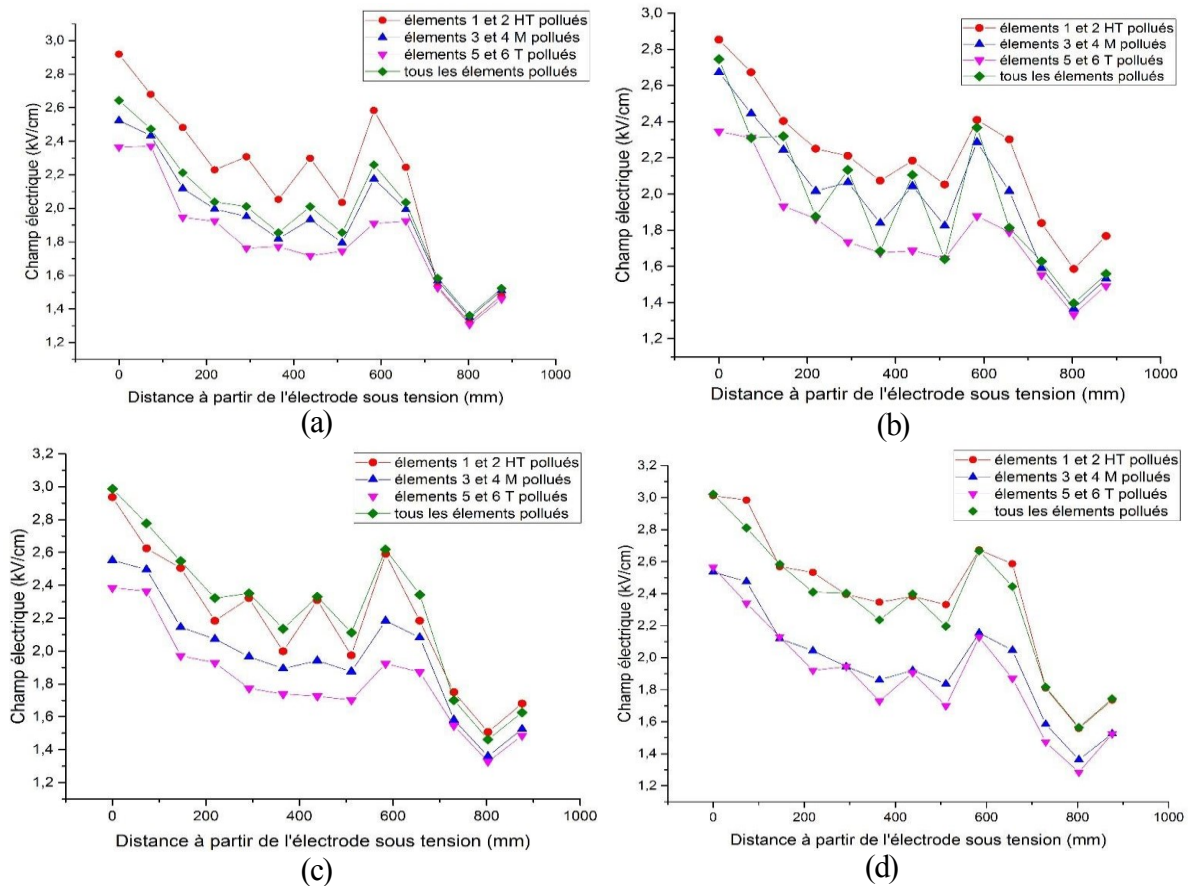


Figure I.7. Effet de la répartition de la couche polluée sur la distribution du champ électrique pour des différentes conductivités (a) 0,51 mS/cm, (b) 1,4 mS/cm, (c) 1,72 mS/cm, et (d) 1,97 mS/cm

Les résultats de la figure (I.7) montrent que pour une configuration donnée, le champ électrique est maximal à la même hauteur que celle de l'électrode active. L'amplitude du champ électrique diminue depuis sa valeur maximale pour les distances comprises entre 0 et 511 mm (qui correspond au 4ème isolateur), puis augmente entre 511 et 584 (correspondant au raccord métallique entre les isolateurs 4 et 5), puis diminue entre 584 et 803 mm (qui correspond au 6ème isolateur) puis augmente du nouveau pour le reste de la distance.

Par ailleurs et pour une distance de mesure donnée, le champ est le plus important lors de l'application de la pollution sur des parties inférieures des isolateurs 1 et 2 installés à proximité de la borne active. Cependant, le champ est le moins élevé a été obtenue lors de la pollution des parties inférieures des isolateurs 5 et 6 installés voisinage de la terre.

I.3.3 Chaîne endommagée moignon à isolateurs propres et secs

La distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne des isolateurs est évidemment liée à la géométrie des isolateurs et les propriétés électriques des matériaux utilisés. L'endommagement d'un isolateur de la chaîne peut affecter la répartition de la tension locale. Il a été reporté dans la littérature que la rigidité diélectrique d'une chaîne moignon diminue [16-18].

Les chaînes les plus exposées à ce genre d'incident sont celles constituées d'isolateurs en verre trempé. Ces derniers, qui ne se fissurent pas comme les isolateurs en porcelaine, se détruisent en morceaux [19]. La figure I.8 montre un exemple d'un isolateur en verre trempé fracassé par un objet; seule les parties métalliques du capot et la tige qui restent.

Dans cette partie, nous présentons la distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne à 6 isolateurs propres et secs de type NJ120 contenant un seul élément endommagé. Les éléments choisis sont le premier (à proximité de la borne active), le troisième (au milieu) et finalement le sixième (du côté de la borne de terre) comme montré sur la figure II.9. Le champ électrique est mesuré sur un axe parallèle situé à 1 m de celui de la chaîne et sous une tension appliquée de 80 kV.

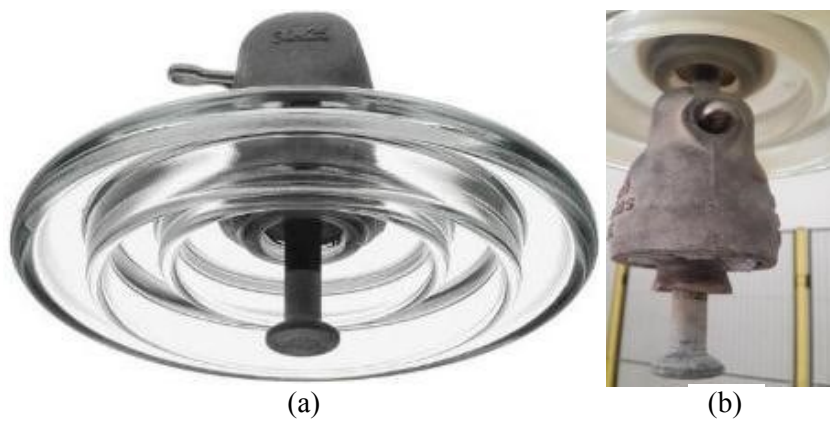


Figure I.8. Isolateurs à capot et tige de type NJ120 (a) élément sain, et (b) élément endommagé

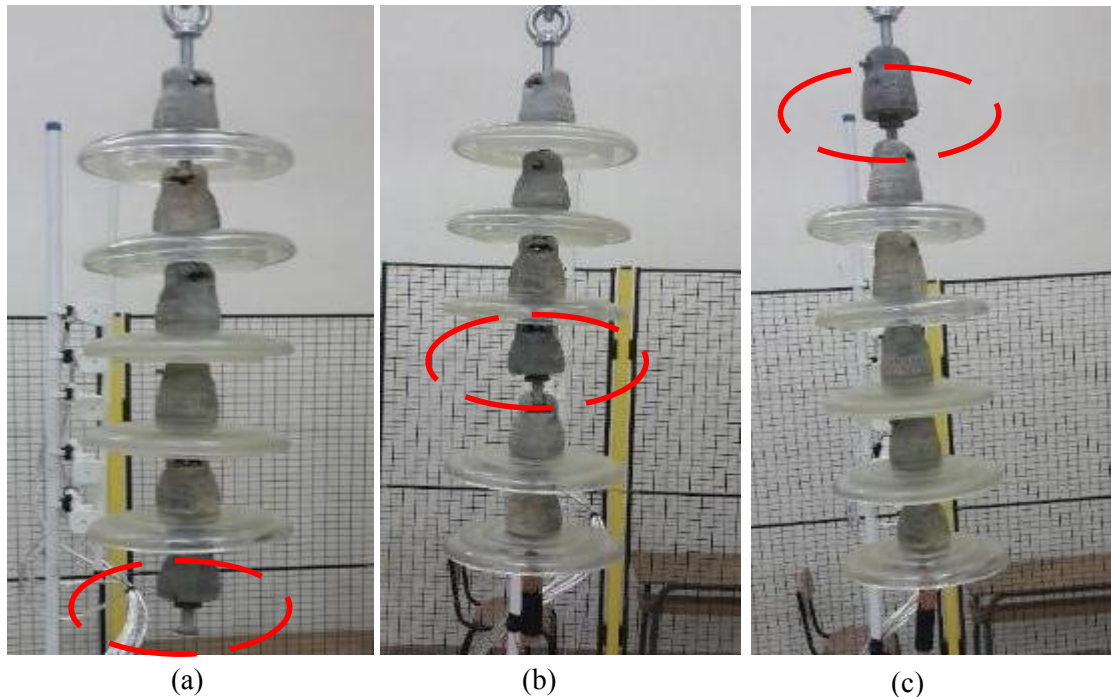


Figure I.9. Différentes positions de l'isolateur endommagé dans la chaîne, (a) 1, (b) 3, et (c) 6

La figure I.10 illustre la distribution du champ électrique à 1 m de l'axe central de la chaîne des isolateurs propres et secs et ce pour différentes positions de l'isolateur endommagé. La courbe en pointillé; prise comme référence; représente l'intensité du champ électrique mesurée pour une chaîne. D'après la figure I.10; le cas le plus défavorable est obtenu lorsque l'élément endommagé est situé à proximité de la borne active (position 1). Dans ces conditions, une augmentation de 5% de l'intensité moyenne du champ électrique a été enregistrée et ce par rapport à celle obtenue dans le cas d'une chaîne saine. Une même constatation a été déjà faite par d'autres chercheurs dans le domaine [20].

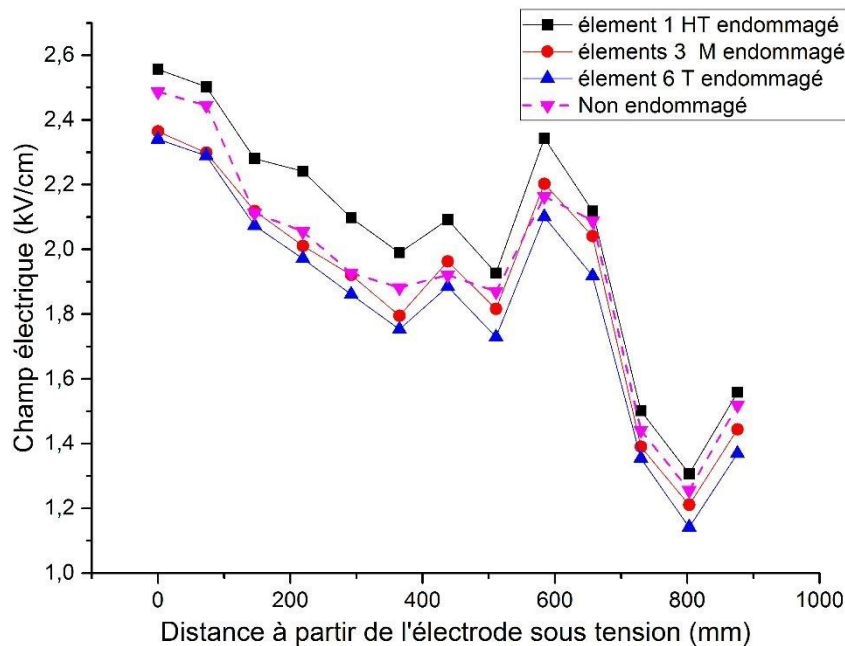


Figure I.10. Effet de la position de l'élément endommagé sur la répartition du champ électrique mesuré à 1 m de la chaîne

I.3.4 Présence d'anneaux de garde

Les anneaux de garde sont utilisés pour améliorer la distribution du champ électrique le long de la chaîne des isolateurs ainsi que de réduire non seulement le champ électrique le long de la chaîne et mais également l'effet couronne [21-23]. Dans l'absence de normes quant à l'installation des anneaux de garde, l'utilisation de ceux-ci aux deux extrémités ou à une proximité de la borne active de la chaîne est une pratique courante pour des tensions au-dessus de 230 kV [14, 24, 25]. L'initiation des activités électriques à la surface des isolateurs sous différentes conditions atmosphériques sont toutes dues à la modification partielle voire totale des distributions du potentiel et du champ électriques. En effet, que ce soit la présence d'une couche de pollution, des gouttes d'eau, des bandes sèches ou encore un amalgame de toutes ces conditions, une redistribution du potentiel le long de la chaîne d'isolateur s'effectue. La non-

uniformité de la redistribution du potentiel qui en découle est à l'origine des activités électriques nuisibles qu'il convient d'amoindrir afin de protéger les isolateurs contre tout dommage éventuel [26, 27]. Cela peut être réalisé en utilisant une solution qui consiste en l'ajout d'anneaux de garde sur les chaînes d'isolateurs existants pouvant mieux uniformiser la distribution du potentiel sous des conditions climatiques critiques.

Dans le présent travail, nous avons étudié l'impact des anneaux de garde sur la distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne des isolateurs contenant six éléments de type NJ120 (Figure I.11). Les anneaux de garde utilisés se présentent sous la forme d'un anneau fermé en aluminium. Pour cela, nous avons fixé dans des cas un anneau de garde du côté de l'électrode HT (Figure II.11(b)) et pour des autres cas deux anneaux installés aux extrémités métalliques de la chaîne des isolateurs (Figure I.11(a)) et sont donc soumis au même potentiel que ces dernières. Différents rayons ($R=17, 20, 25$ et 30 cm) et hauteurs ($H=0, 5, 10$ et 15 cm) de fixation de l'anneau de garde par rapport à la borne active ou par rapport aux deux bornes (dans le cas de deux anneaux) ont été adoptés, comme le montre la figure I.11. Le champ électrique a été mesuré pour une tension appliquée de 80 kV à une distance de 1 m de l'axe central de la chaîne. Deux configurations de la pollution ont été choisies: (i) isolateurs propres et secs, et (ii) parties inférieures des isolateurs contaminées par une solution à base de tuf ayant une conductivité de $1,97$ mS/cm.

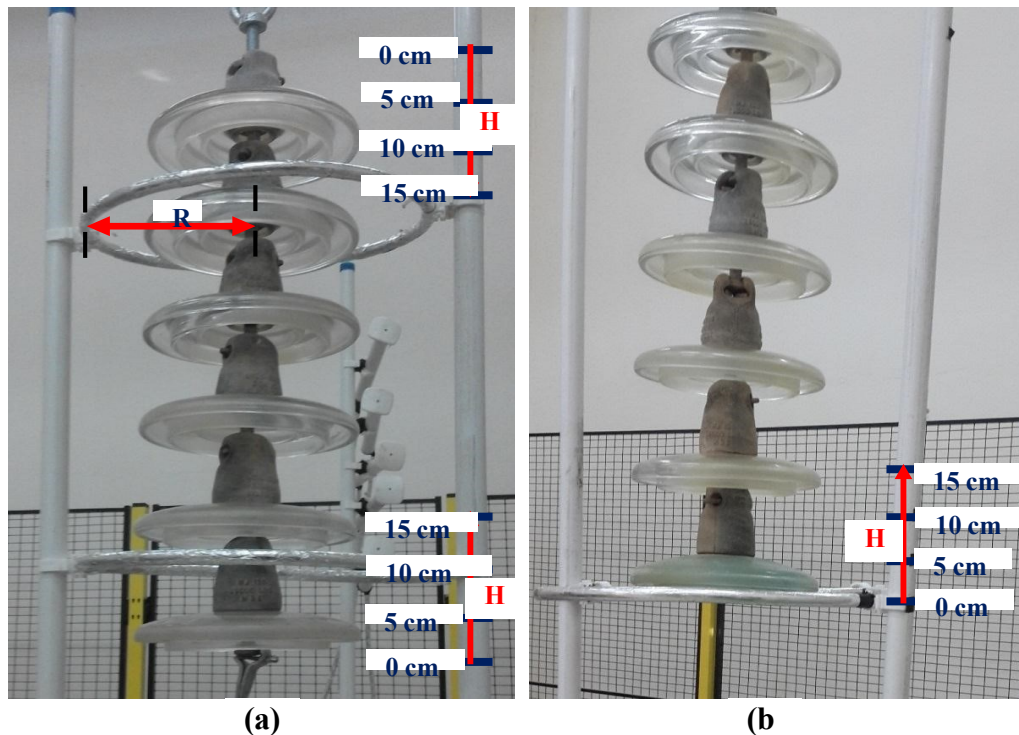


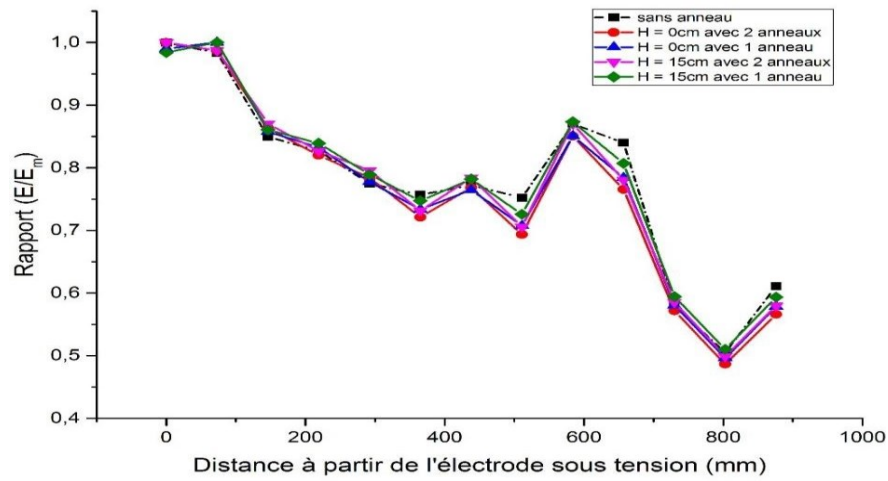
Figure I.11. Chaîne à isolateurs propre et sec, (a) avec deux anneaux de garde, et (b) un anneau de garde installé à proximité de la borne HT

I.3.4.1 Chaîne à isolateurs propres et secs

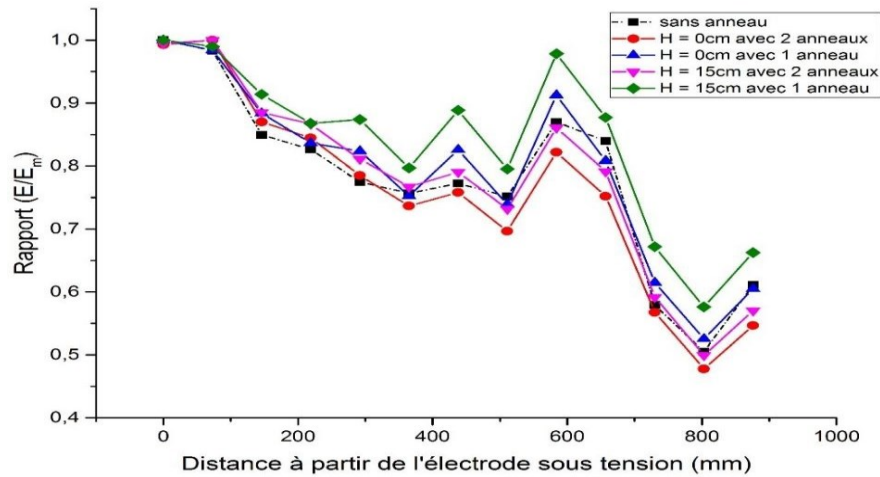
Nous nous sommes limités de présenter les résultats quant à la distribution du champ électrique à 1 m de la chaîne des isolateurs pour les petits et les grands rayons ($R=17$ et 30 cm) de l'anneau de garde et hauteurs d'installation ($H=0$ et 15 cm). Il a été observé que l'intensité du champ mesurée à 1 m de la chaîne augmente avec l'introduction d'un ou deux anneaux de garde ainsi qu'avec l'augmentation de leur rayon. Nous définissons, pour chaque configuration, le rapport d'intensités comme étant la marge de chaque valeur mesurée E sur celle maximale E_m .

La figure I.12 illustre le rapport d'intensités en fonction de la distance à partir de l'électrode HT. La figure I.12(a) montre que, peu importe leur hauteur, les anneaux de garde avec le plus petit rayon ($R=17$ cm) n'ont pas d'effet remarquable sur la répartition du champ électrique. Cependant, l'installation notamment de deux anneaux de garde avec le plus grand rayon ($R=30$ cm) affecte en général la répartition du champ électrique; le rayon de l'anneau a donc une influence sur la distribution du champ électrique au voisinage de la chaîne. Un cas particulier a été obtenu lors de l'utilisation d'un seul anneau localisé à une hauteur 15 cm où le taux de diminution du champ électrique mesuré est moins important comparativement aux autres cas étudiés. En effet, le champ électrique reste important dans ce cas de figure notamment le long de 75% de l'axe de mesure. Par ailleurs, le champ électrique est très intense à la même hauteur que celle des raccords métalliques entre les isolateurs 2-3, 3-4 et 4-5 où les intensités du champ électrique prennent de 87 à 97% de la valeur maximale.

La figure I.13 illustre la variation du rapport d'intensités en fonction de la distance à partir de l'électrode HT, pour les deux rayons des anneaux de garde et hauteurs d'installation ($H=0$ cm pour la figure I.13(a) et $H=15$ cm pour la figure I.13(b)). Conformément à cette figure I.13(a), et l'exception du cas où un seul anneau ayant un rayon de 30 cm, la réduction du champ électrique est plus importante en présence d'anneaux qu'à leur absence. D'après la figure I.13(b), nous constatons que pour $H=15$ cm, le rapport du champ électrique est presque similaire au cas sans anneau. L'exception demeure toujours vraie pour cas où un seul anneau de rayon de 30 cm est installé; ce cas est caractérisé par la diminution du champ électrique la moins remarquable comparativement aux autres cas.

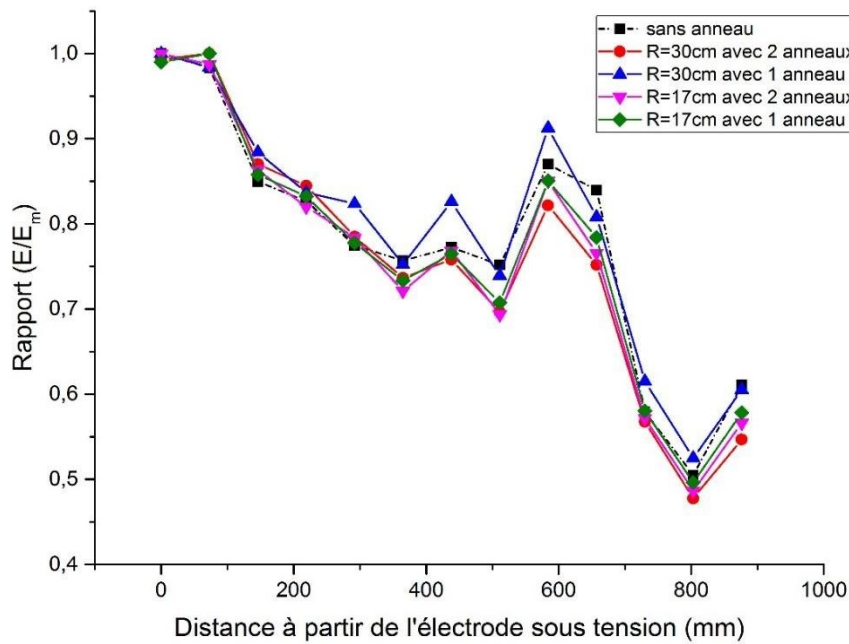


(a)



(b)

Figure I.12. Distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne d'isolateurs propres et secs avec un et deux anneaux de garde de différents rayons (a) $R=17$ cm, et (b) $R=30$ cm



(a)

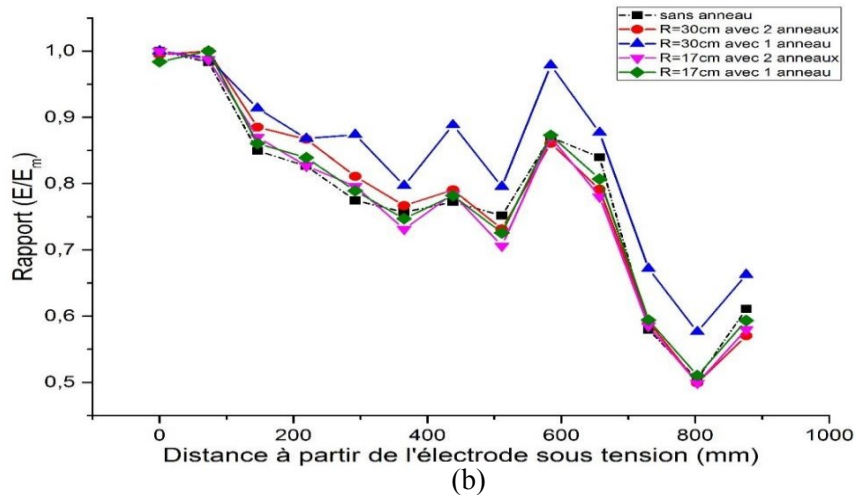
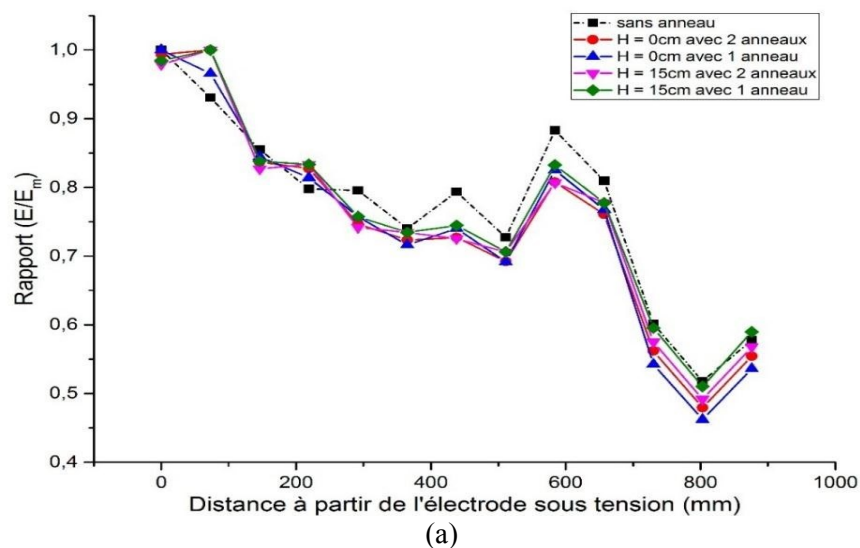


Figure I.13. Distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne d'isolateurs propres et secs avec un et deux anneaux de garde installés à une hauteur de (a) $H=0$ cm, et (b) $H = 15$ cm

I.3.4.2 Chaîne des isolateurs à surfaces inférieures polluées

Nous avons refait les mêmes mesures du champ électrique à un 1 m de la chaîne à 6 isolateurs de type NJ120 en pulvérisant cette fois-ci leurs surfaces inférieures par une solution à base de tuf ayant une conductivité de 1,97 mS/cm, et ce en présence et en absence d'anneaux de garde. La chaîne des isolateurs a été soumise à une tension alternative de 80 kV.

La figure I.16 montre la variation du champ électrique pour différentes hauteurs ($H=0$ et 15 cm) et pour un rayon de l'anneau de garde de $R=17$ cm (Figure I.14(a)) puis de $R=30$ cm (Figure I.14(b)). Il ressort que la réduction de l'intensité du champ électrique est légèrement plus importante en présence d'anneaux de garde qu'à leur absence. De même que précédemment, lors de l'installation d'un seul anneau à $H = 15$ cm, les rapports E/E_m obtenus pour un rayon de $R = 30$ cm sont supérieurs à ceux trouvés pour les autres configurations (Figure I.14(b)).



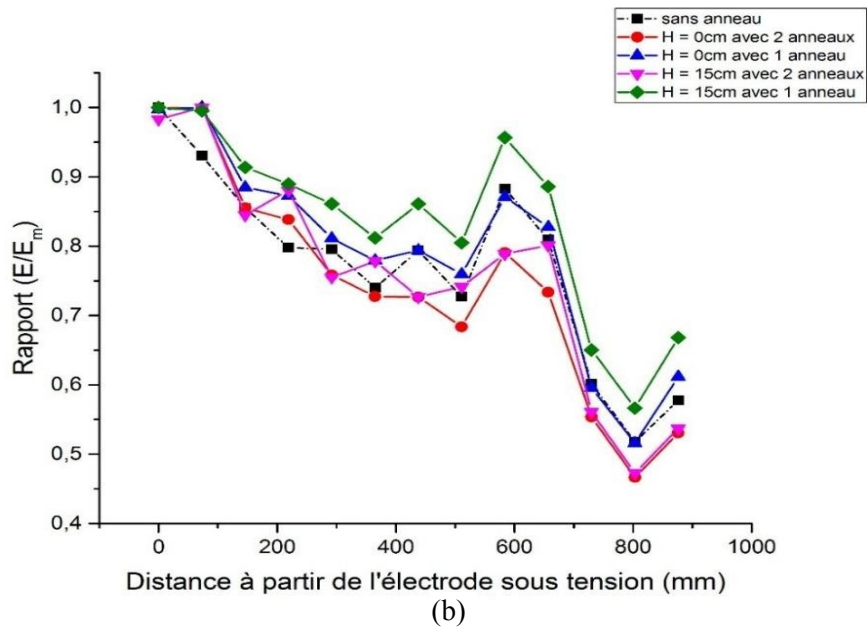


Figure I.14. Distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne des isolateurs pollués avec un et deux anneaux de garde de rayon (a) $R=17$ cm, et (b) $R=30$ cm

La figure I.15 illustre l'évolution de l'intensité du champ électrique mesuré au voisinage d'une chaîne des isolateurs de type NJ120 pour différents rayon des anneaux de garde installés à $H=0$ cm (Figure I.15(a)) puis à $H=15$ cm (Figure I.15(b)). Nous remarquons, d'après la figure I.15(a), que lors de l'utilisation d'un seul anneau de garde avec un rayon $R=30$ cm, le rapport (E/E_m) reste le plus important relativement à ceux obtenus dans les autres cas. Par ailleurs, la plus faible réduction a été enregistrée lors de l'installation d'un seul anneau de garde avec un rayon $R=30$ cm à une hauteur de $H=15$ cm (Figure I.15(b)).

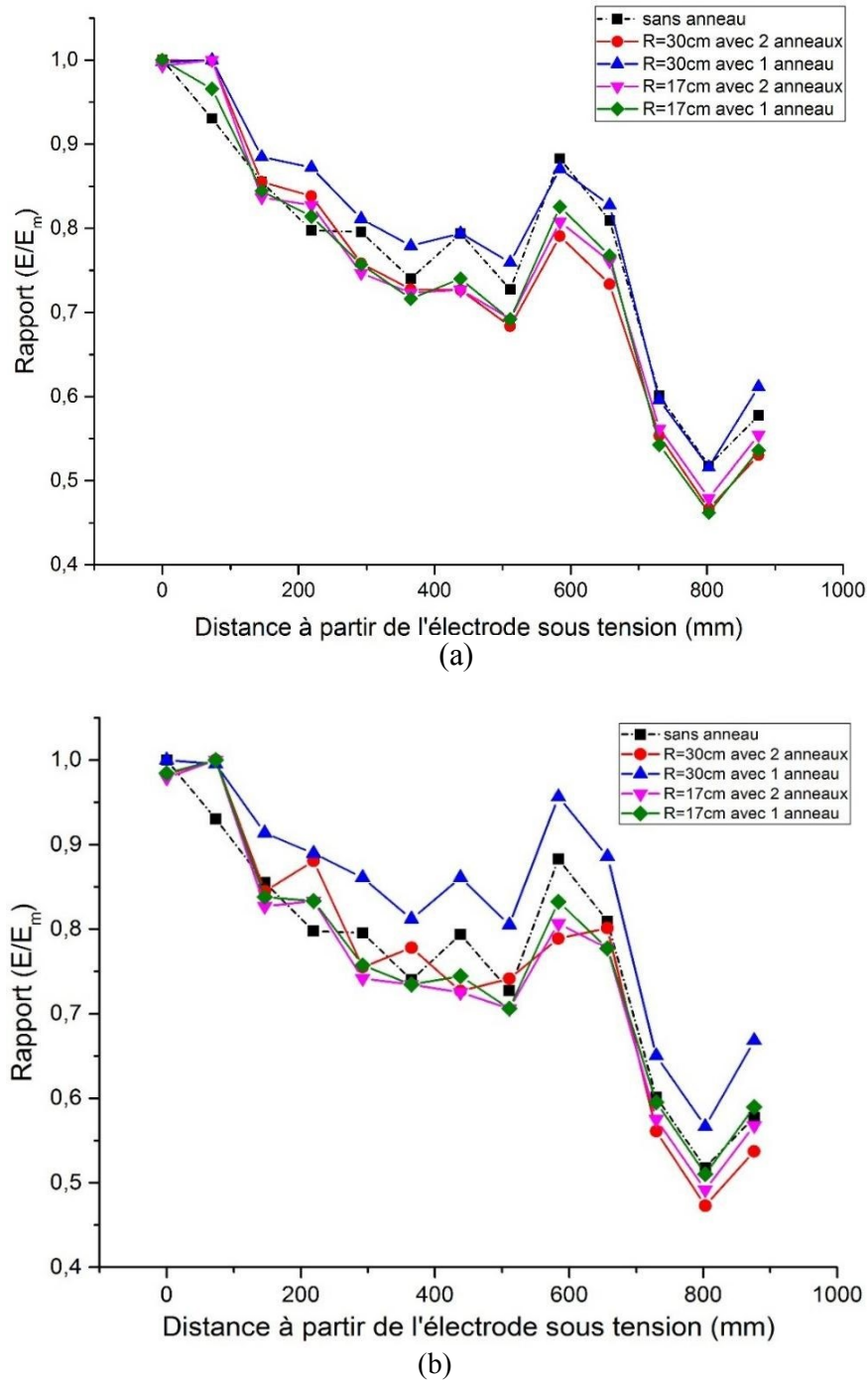


Figure I.15. Distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne des isolateurs pollués avec un et deux anneaux de garde installés à une hauteur de (a) $H=0$ cm, et (b) $H=15$ cm

I.4 Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre ont permis de mettre en évidence la répartition du champ électrique au voisinage d'une chaîne d'isolateurs de type NJ120, en tenant compte de différents paramètres d'influence.

L'analyse expérimentale a montré que la distribution du champ électrique présente un caractère fortement non uniforme. Les zones de forte intensité sont principalement localisées au voisinage

de l'électrode active ainsi qu'au niveau des raccords métalliques entre les isolateurs, tandis que les valeurs minimales sont observées à proximité de la borne de terre.

Il a également été constaté que la position de mesure influence significativement l'intensité du champ électrique. En effet, pour des distances horizontales faibles, le champ est maximal à la hauteur de l'électrode active, alors qu'au-delà d'une certaine distance, les zones de forte intensité se déplacent vers les raccords intermédiaires de la chaîne.

Par ailleurs, l'étude a confirmé que la pollution constitue un facteur déterminant dans l'évolution du champ électrique. L'augmentation du niveau de pollution, ainsi que sa localisation sur les surfaces inférieures des isolateurs, notamment à proximité de la borne active, entraînent une augmentation significative de l'intensité du champ électrique. Cette situation favorise l'apparition de phénomènes indésirables tels que les décharges partielles et le contournement électrique (flashover).

L'influence des défauts a également été mise en évidence. Dans le cas d'une chaîne moignon, la configuration la plus défavorable correspond à la présence d'un élément endommagé situé à proximité de la borne active, ce qui accentue la concentration du champ électrique.

En outre, les résultats ont montré que l'introduction d'anneaux de garde permet de modifier la distribution du champ électrique. Bien que leur présence puisse augmenter localement l'intensité du champ à certaines distances, elle contribue globalement à améliorer sa répartition le long de la chaîne d'isolateurs.

Enfin, les modèles de régression développés ont présenté de bonnes performances, avec des coefficients de détermination élevés, traduisant leur capacité à représenter de manière fiable les relations entre les différents paramètres étudiés.

Chapter II

Modélisation et approche

théorique du Central

Composite Design

II.1 Introduction aux plans d'expériences

Dans de nombreux domaines scientifiques et techniques, notamment en ingénierie électrique, l'étude d'un phénomène repose souvent sur l'expérimentation. Traditionnellement, ces expériences peuvent être menées de manière empirique, c'est-à-dire par essais successifs sans structure méthodologique claire. Cependant, cette approche présente plusieurs limites importantes : elle est généralement coûteuse en temps et en ressources, peu reproductible, et ne permet pas toujours de tirer des conclusions fiables ou généralisables [28,30].

Face à ces contraintes, les plans d'expériences (Design of Experiments, DoE) constituent une alternative rigoureuse et structurée. Leur objectif principal est d'organiser les essais de manière optimale afin d'extraire un maximum d'informations avec un nombre minimal d'expériences [28,29]. Contrairement aux essais empiriques, les plans d'expériences reposent sur des principes statistiques qui permettent de :

- identifier les facteurs influents,
- quantifier leurs effets,
- analyser les interactions entre variables,
- et construire des modèles prédictifs fiables [29,30].

L'utilisation d'une méthode structurée présente plusieurs avantages majeurs. D'une part, elle permet une réduction significative du nombre d'essais, ce qui est particulièrement important dans les systèmes complexes ou coûteux, comme les dispositifs à haute tension [28, 29]. D'autre part, elle améliore la qualité des résultats en garantissant une meilleure précision et une interprétation statistiquement valide. Enfin, elle offre une vision globale du système étudié, contrairement aux approches empiriques qui se limitent souvent à des observations locales. [28].

Ainsi, le recours aux plans d'expériences s'impose comme une démarche scientifique essentielle pour optimiser les processus, comprendre les phénomènes physiques et développer des modèles robustes, notamment dans des applications avancées telles que la modélisation du champ électrique ou l'optimisation par des méthodes comme la méthode du Central Composite Design (CCD) ou la régression multiple. [29], [31].

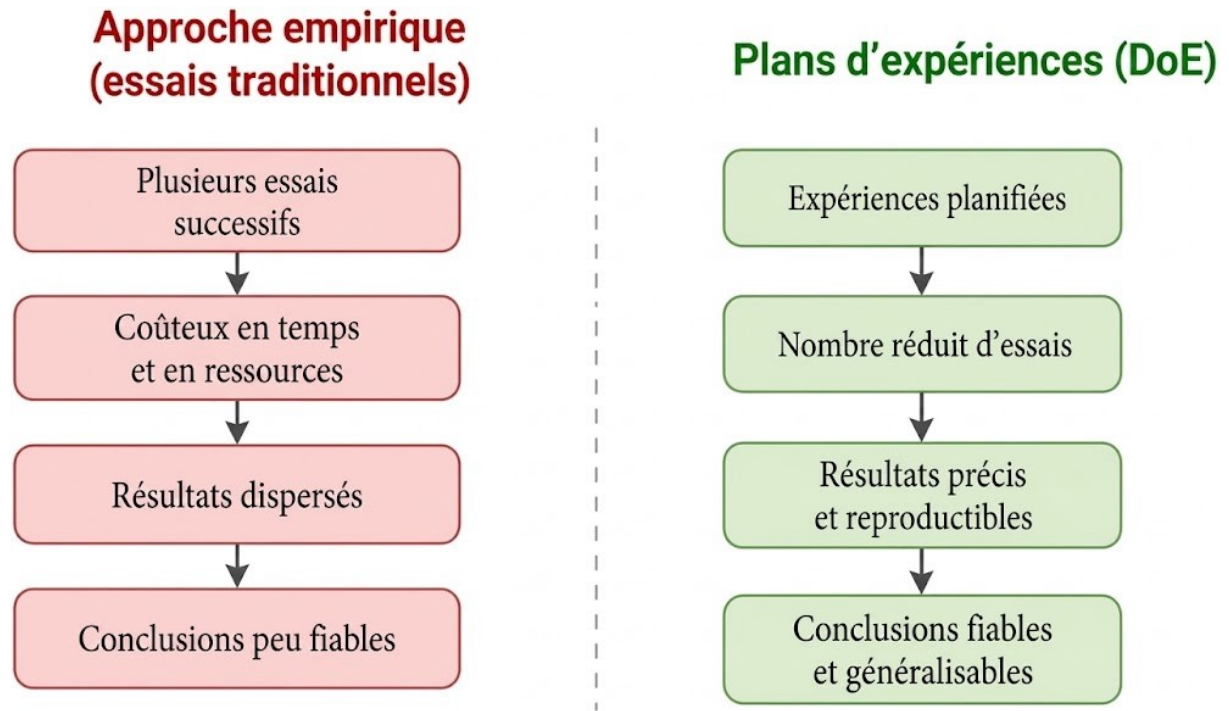


Figure II.1. Comparaison entre approche empirique et plans d'expériences

Parmi ces méthodes, le Central Composite Design (CCD) occupe une place importante.

II.2 Définition du Central Composite Design (CCD)

Le Central Composite Design (CCD), ou plan composite centré, est une méthode avancée des plans d'expériences utilisée principalement dans le cadre de la méthodologie des surfaces de réponse (RSM). Il permet de modéliser et d'optimiser un phénomène en tenant compte non seulement des effets linéaires des facteurs, mais aussi des effets quadratiques et des interactions entre variables [29,31].

Le CCD est particulièrement adapté lorsque la relation entre les variables d'entrée (facteurs) et la réponse étudiée est non linéaire, ce qui est souvent le cas dans les systèmes physiques complexes, comme les phénomènes liés au champ électrique en haute tension [29].

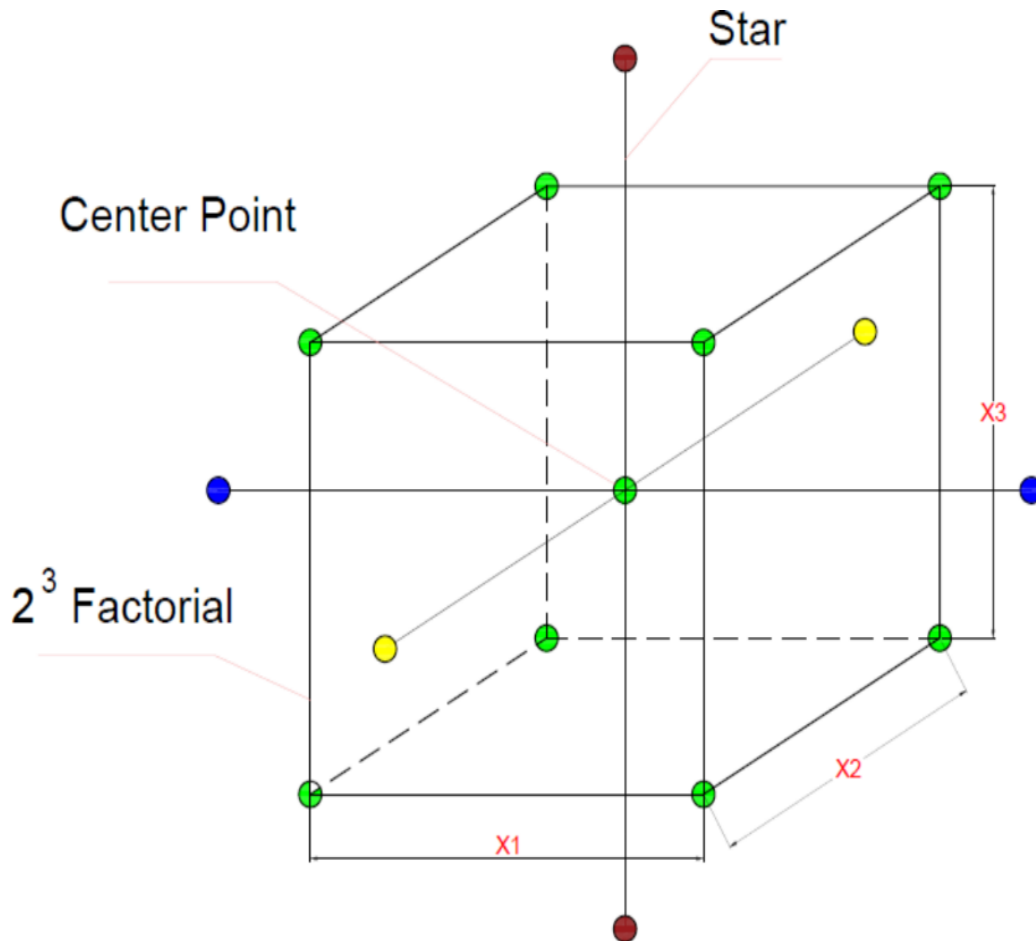


Figure II.2. Structure du plan Central Composite Design (CCD)

II.2.1 Principe du CCD

Le plan composite centré repose sur la combinaison de trois types de points expérimentaux [29,31].:

- Les points factoriels : issus d'un plan factoriel complet ou fractionnaire (niveaux ± 1), permettant d'estimer les effets principaux et les interactions.
- Les points axiaux (ou étoile) : situés à une distance $\pm \alpha$ du centre, ils servent à estimer les effets quadratiques.
- Le point central : répété plusieurs fois, il permet d'évaluer la reproductibilité de l'expérience et d'estimer l'erreur expérimentale[32].

L'ensemble de ces points permet d'ajuster un modèle mathématique de type polynôme du second ordre[29].

Le modèle CCD permet également de rechercher les conditions optimales du système, comme illustré dans la figure II.3 [31].

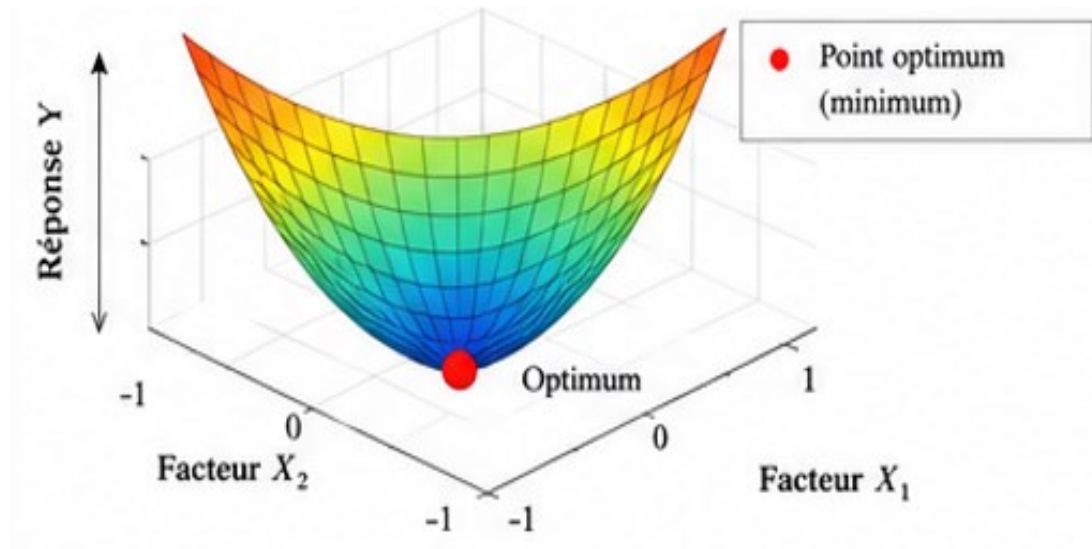


Figure II.3. Recherche des conditions optimales à partir du modèle CCD

II.2.2 Objectifs du CCD

Le CCD vise principalement à :

- approximer la surface de réponse du système étudié,
- localiser les conditions optimales de fonctionnement,
- analyser les interactions entre les variables,
- améliorer la précision de la modélisation par rapport aux plans linéaires simples[29,31].

II.2.3 Avantages du CCD

L'utilisation du CCD présente plusieurs avantages majeurs :

- Modélisation des phénomènes non linéaires : grâce à l'intégration des termes quadratiques, le CCD permet de représenter fidèlement des comportements complexes.
- Efficacité expérimentale : il offre un bon compromis entre précision du modèle et nombre d'expériences à réaliser .
- Flexibilité : il peut être adapté selon le nombre de facteurs et les contraintes expérimentales.
- Estimation de l'erreur expérimentale : via la répétition du point central, ce qui renforce la validité statistique des résultats.
- Optimisation des procédés : il permet d'identifier les conditions optimales avec un minimum d'essais .

II.2.4 Intérêt dans les applications en ingénierie

Dans le contexte de l'ingénierie électrique, et en particulier pour l'étude des phénomènes en haute tension, le CCD est très utile pour :

- Analyser l'influence de plusieurs paramètres (géométrie, tension, pollution, etc.),
- Modéliser des distributions complexes comme le champ électrique,
- Fournir des données fiables pour des méthodes d'apprentissage comme la Support Vector Regression (SVR) [33].

II.3 Structure mathématique du Central Composite Design (CCD)

Le Central Composite Design (CCD) repose sur une formulation mathématique permettant de modéliser la relation entre les variables d'entrée (facteurs) et la réponse du système à l'aide d'un modèle polynomial du second ordre. Cette structure est essentielle pour capturer les effets linéaires, quadratiques ainsi que les interactions entre les facteurs[29,31].

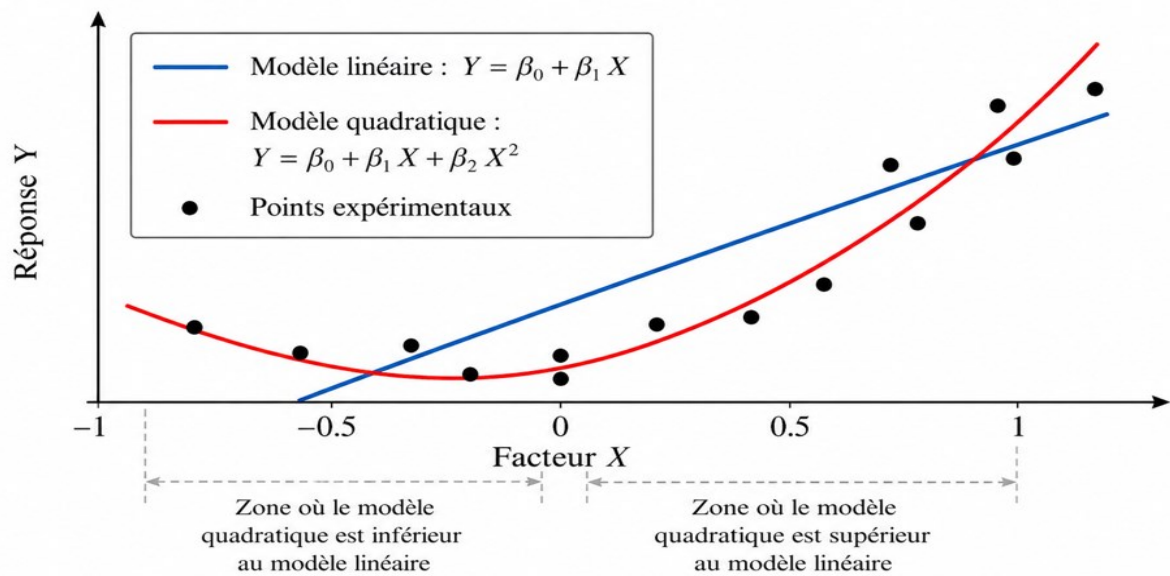


Figure II.4. Différence entre modèle linéaire et modèle quadratique

II.3.1 Modèle mathématique général

Le modèle utilisé dans le CCD est donné par [29,32]:

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

où :

- Y : variable réponse,
- X_i : variables codées (facteurs),
- β_0 : constante (terme indépendant),
- β_i : coefficients des effets linéaires,
- β_{ii} : coefficients des effets quadratiques,
- β_{ij} : coefficients des interactions entre facteurs,
- k : nombre de facteurs.

Ce modèle permet d'approximer localement la surface de réponse autour d'un point central [31].

II.3.2 Codage des variables

Afin de simplifier les calculs et d'uniformiser les échelles, les variables réelles (Z_i) sont transformées en variables codées (X_i) [30].:

$$X_i = \frac{Z_i - Z_{0,i}}{\Delta Z_i} \quad (\text{II.3})$$

où :

- $Z_{0,i}$: valeur au centre du domaine expérimental,
- ΔZ_i : pas de variation.

Le codage permet de travailler dans un domaine normalisé généralement compris entre $([-1, +1])$, avec des points axiaux [30].

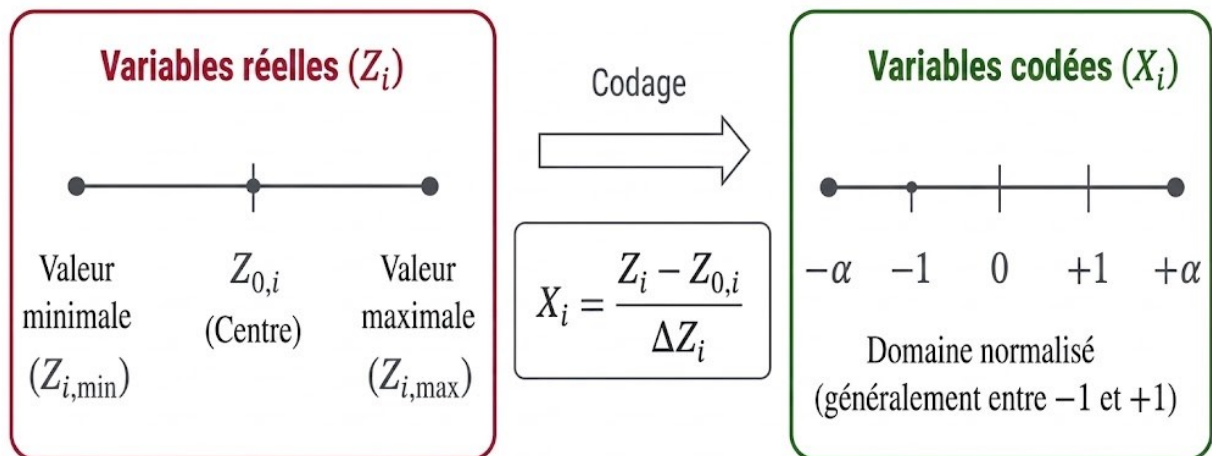


Figure II.5. Transformation des variables réelles en variables codées

II.3.3 Organisation matricielle du modèle

Le modèle peut être écrit sous forme matricielle :

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (\text{II.4})$$

où :

- Y : vecteur des réponses expérimentales,
- X : matrice de conception (design matrix),
- β : vecteur des coefficients à estimer,
- ε : vecteur des erreurs.

L'estimation des coefficients se fait généralement par la méthode des moindres carrés [5].

Un exemple de matrice de conception est présenté dans (Tableau II.1)

Essai	X1	X2	X1 ²	X2 ²	X1X2
1	-1	-1	1	1	1
2	+1	-1	1	1	-1
3	-1	+1	1	1	-1
4	+1	+1	1	1	1
5	0	0	0	0	0
6	+ α	0	α^2	0	0
7	- α	0	α^2	0	0
8	0	+ α	0	α^2	0
9	0	- α	0	α^2	0

Table II-1: Exemple de matrice de conception (CCD)

II.3.4 Nombre de termes du modèle

Pour un système comportant (k) facteurs, le nombre total de coefficients à estimer est [29]:

$$N_{termes} = 1 + 2k + \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (\text{II.5})$$

II.4 Condition de validité du modèle

Le modèle CCD suppose que :

- la relation entre les variables est localement approximable par un polynôme du second ordre,

- les erreurs sont indépendantes, de moyenne nulle et de variance constante,
- les facteurs sont correctement choisis et couvrent le domaine d'étude[29], [32].

La structure mathématique du CCD fournit un cadre rigoureux pour modéliser des phénomènes complexes. Elle permet de transformer un problème expérimental en un problème d'estimation de paramètres, facilitant ainsi l'analyse, la prédiction et l'optimisation du système étudié [28, 29].

II.5 Démarche de construction du Central Composite Design (CCD)

La construction d'un CCD repose sur une démarche structurée permettant de générer un ensemble d'expériences optimisé et représentatif du phénomène étudié [29,31]. Elle débute par la définition du problème expérimental, qui consiste à identifier la réponse à analyser ainsi que les facteurs influents, tout en précisant les objectifs de l'étude, qu'il s'agisse de modélisation, d'optimisation ou d'analyse des interactions. Ensuite, il est nécessaire de fixer le domaine expérimental en déterminant, pour chaque facteur, les valeurs minimale et maximale, ainsi que le point central. Les variables sont alors codées afin de travailler dans un espace normalisé, généralement compris entre -1 et $+1$ [30].

Le choix du type de CCD (circonscrit, inscrit ou centré sur les faces) constitue une étape importante, car il dépend des contraintes expérimentales, notamment des limites physiques ou de sécurité. Une fois ce choix effectué, on détermine la distance axiale α , qui définit la position des points axiaux et permet, dans certains cas, d'assurer la propriété de rotatabilité du plan [31].

Le plan est ensuite construit en combinant trois types de points : les points factoriels issus d'un plan factoriel complet, les points axiaux placés sur les axes des facteurs, et les points centraux répétés afin d'estimer l'erreur expérimentale [28].

L'ensemble de ces points permet de constituer une matrice expérimentale dans laquelle chaque ligne correspond à une expérience à réaliser. Après la réalisation des essais et la collecte des données, les résultats sont utilisés pour ajuster un modèle polynomial du second ordre, généralement par la méthode des moindres carrés [32].

Enfin, le modèle est validé à l'aide d'outils statistiques appropriés, puis exploité pour analyser le comportement du système et déterminer les conditions optimales de fonctionnement [29]. Ainsi, la démarche de construction du CCD permet d'assurer une exploration efficace et rigoureuse de l'espace expérimental tout en minimisant le nombre d'essais nécessaires. Ces modèles peuvent être exploités dans des méthodes d'apprentissage [33].

II.5.1 Analyse par régression multiple

L'analyse par régression multiple constitue une étape essentielle dans l'exploitation des résultats obtenus à partir d'un plan CCD, car elle permet d'estimer les coefficients du modèle polynomial du second ordre décrivant la relation entre les facteurs et la réponse. Après la réalisation des expériences et la collecte des données, on dispose d'un ensemble de valeurs de la réponse associées à différentes combinaisons des variables codées. L'objectif est alors d'ajuster un modèle mathématique en déterminant les coefficients qui minimisent l'écart entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par le modèle [32].

Cette estimation repose généralement sur la méthode des moindres carrés, qui consiste à minimiser la somme des carrés des erreurs entre les observations et les prédictions. Le modèle peut être exprimé sous forme matricielle, où le vecteur des réponses est relié à la matrice de conception (contenant les termes linéaires, quadratiques et d'interaction) et au vecteur des coefficients inconnus. La solution analytique de ce problème permet d'obtenir une estimation des coefficients en résolvant un système d'équations issu de l'optimisation [32].

Concrètement, chaque coefficient du modèle (effet linéaire, interaction ou terme quadratique) est calculé de manière à représenter au mieux l'influence du facteur correspondant sur la réponse. Une fois ces coefficients estimés, il devient possible de prédire la réponse pour n'importe quelle combinaison des facteurs à l'intérieur du domaine étudié. Par ailleurs, une analyse statistique complémentaire, telle que l'analyse de la variance (ANOVA), permet d'évaluer la significativité des coefficients et d'identifier les facteurs réellement influents [29].

Ainsi, la régression multiple transforme les données expérimentales en un modèle mathématique exploitable, offrant à la fois une capacité de prédiction et une meilleure compréhension des interactions entre les variables, ce qui est particulièrement utile pour l'optimisation des systèmes complexes.

II.6 Exploitation du modèle

Une fois le modèle polynomial obtenu par régression multiple, son exploitation constitue une étape clé pour tirer pleinement profit du plan CCD[29,31]. Ce modèle mathématique permet de représenter de manière approchée la relation entre les facteurs étudiés et la réponse, et peut être utilisé à des fins de prédiction, d'analyse et d'optimisation.

Tout d'abord, le modèle peut être utilisé pour prédire la réponse pour n'importe quelle combinaison de variables à l'intérieur du domaine expérimental. En remplaçant les valeurs des facteurs dans l'équation du modèle, on obtient une estimation rapide et fiable de la réponse sans avoir à réaliser de nouvelles expériences. Cette capacité est particulièrement utile pour réduire les coûts expérimentaux et explorer virtuellement différentes configurations[29].

Ensuite, le modèle permet d'analyser l'influence des facteurs. Les coefficients estimés renseignent sur l'effet de chaque variable, qu'il soit linéaire, quadratique ou lié à une interaction. Cela permet d'identifier les paramètres les plus influents et de mieux comprendre le comportement du système étudié.

Par ailleurs, le modèle peut être exploité pour visualiser la surface de réponse, à travers des courbes ou des surfaces tridimensionnelles[31]. Ces représentations facilitent l'interprétation des résultats et mettent en évidence les zones de maximum ou de minimum de la réponse.

L'une des applications les plus importantes est la recherche des conditions optimales. En analysant le modèle, il est possible de déterminer les valeurs des facteurs qui maximisent ou minimisent la réponse selon l'objectif fixé [31]. Cette optimisation peut être réalisée analytiquement ou à l'aide d'outils numériques.

Enfin, le modèle peut être intégré dans des approches plus avancées, telles que les méthodes d'apprentissage automatique comme la SVR, afin d'améliorer la précision des prédictions ou de traiter des phénomènes plus complexes [33]. Ainsi, l'exploitation du modèle permet de transformer les résultats expérimentaux en un outil puissant d'aide à la décision, facilitant la compréhension, la prédiction et l'optimisation des systèmes étudiés.

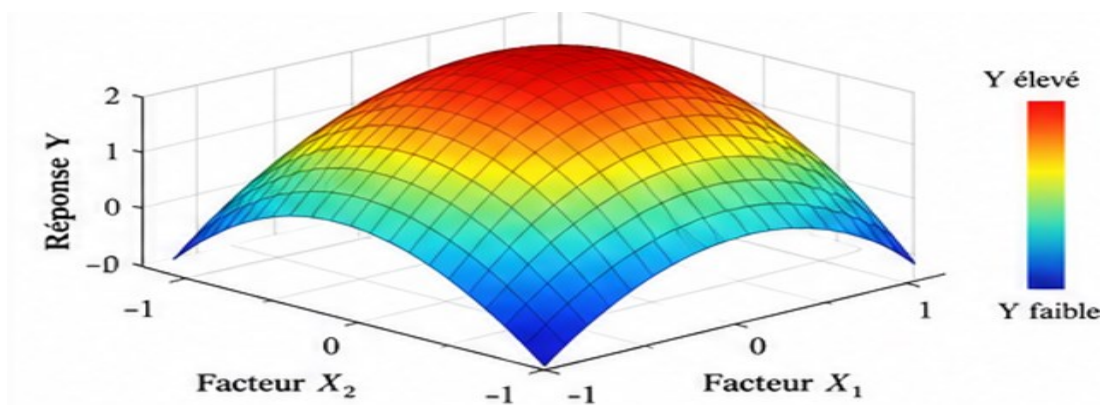


Figure II.6. Exemple de surface de réponse modélisée par CCD

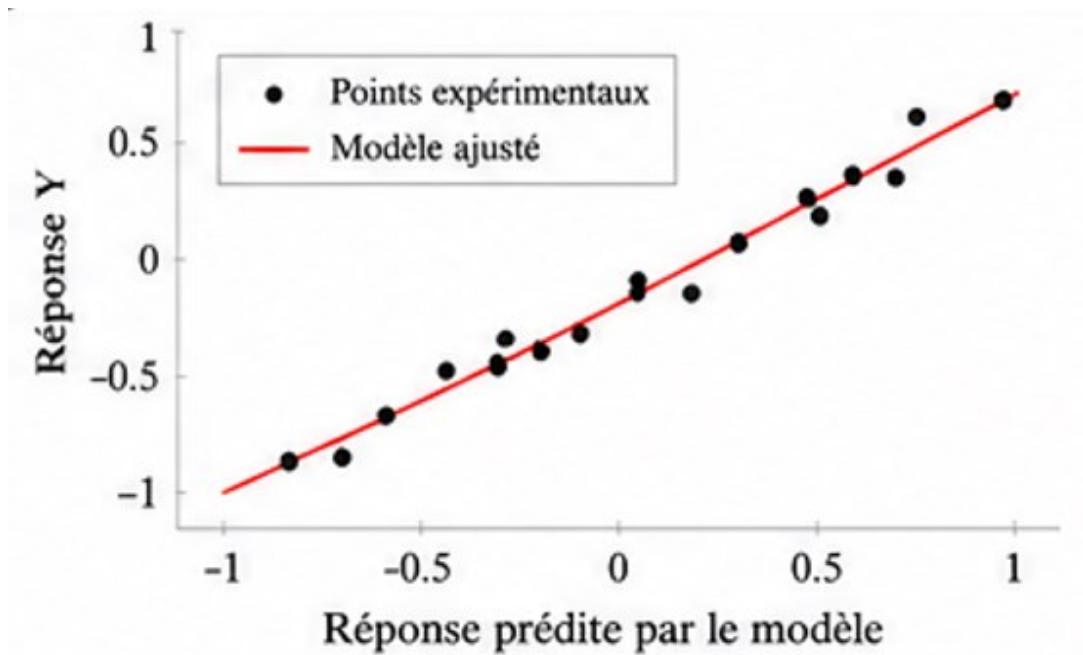


Figure II.7. Ajustement du modèle par régression multiple

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les fondements des plans d'expériences en mettant en évidence l'intérêt d'une approche structurée par rapport aux essais empiriques, souvent coûteux et peu efficaces[28, 29]. L'accent a été particulièrement mis sur le Central Composite Design (CCD), une méthode performante permettant de modéliser des phénomènes complexes grâce à un nombre réduit d'expériences tout en garantissant une bonne précision statistique[29,31].

Après avoir défini le principe du CCD et ses différents types, nous avons détaillé sa structure mathématique basée sur un modèle polynomial du second ordre, ainsi que la démarche de construction du plan expérimental. L'analyse par régression multiple a ensuite permis de montrer comment estimer les coefficients du modèle à partir des données expérimentales, tandis que l'exploitation du modèle a mis en évidence son utilité pour la prédiction, l'analyse des facteurs et l'optimisation des systèmes[32].

Ainsi, le CCD apparaît comme un outil puissant et indispensable pour l'étude et la modélisation des systèmes complexes, notamment en ingénierie électrique. Il permet non seulement de mieux comprendre les interactions entre variables, mais aussi de fournir une base solide pour des approches avancées telles que les méthodes d'apprentissage automatique[33]. Ce chapitre constitue donc un cadre méthodologique essentiel pour la suite du travail, où ces concepts pourront être appliqués à des cas concrets.

Chapter III

Modélisation du champ électrique par le plan composite centré (CCD)

III.1 Introduction

Les chapitres précédents nous ont permis de présenter le contexte général de la haute tension, les phénomènes de pollution affectant les isolateurs, ainsi que le dispositif expérimental mis en œuvre au laboratoire de haute tension de l'Université d'El Oued pour la mesure du champ électrique autour d'une chaîne d'isolateurs en verre de type NJ120. La caractérisation expérimentale réalisée fournit une base de données riche, mais elle reste coûteuse en temps et en ressources lorsqu'il s'agit d'explorer un grand nombre de configurations géométriques ou environnementales. Pour pallier cette limitation, il est judicieux de recourir à des techniques de modélisation par surface de réponse, qui permettent de bâtir un modèle mathématique compact à partir d'un nombre réduit d'expériences soigneusement choisies.

Dans ce chapitre, nous appliquons la méthodologie des plans d'expériences, et plus particulièrement le plan composite centré (Central Composite Design, CCD), à la modélisation du champ électrique E autour de la chaîne d'isolateurs NJ120 sous quatre scénarios distincts de pollution non uniforme. La tension appliquée et la conductivité de la solution polluante étant maintenues constantes ($V = 80 \text{ kV}$; $\sigma = 1,97 \text{ mS/cm}$), les deux facteurs quantitatifs retenus sont la distance horizontale D_h entre la sonde et la chaîne et la distance verticale D_v mesurée le long de l'axe de la chaîne. Le scénario de pollution est traité comme une variable qualitative à quatre niveaux, ce qui conduit à construire quatre modèles CCD indépendants un par configuration de pollution. Cette approche permet à la fois d'exploiter pleinement la nature des données expérimentales disponibles et de comparer rigoureusement les comportements obtenus selon la position des disques pollués.

Le présent chapitre est organisé comme suit. La section III.2 rappelle les principes généraux des plans d'expériences et de la méthodologie des surfaces de réponse. La section III.3 présente le plan composite centré, ses variantes et les critères de choix associés. La section III.4 expose la stratégie de modélisation retenue, à savoir l'application de quatre plans CCD à faces centrées (CCF) à deux facteurs. La section III.5 développe l'analyse statistique des modèles obtenus : estimation des coefficients, tests de significativité, indicateurs globaux d'ajustement, surfaces de réponse, diagnostic des résidus et validation par confrontation à des points de mesure indépendants. La section III.6 propose une discussion comparative des quatre scénarios de pollution. Enfin, la section III.7 conclut le chapitre.

III.2 Méthodologie des surfaces de réponse

III.2.1 Principe général

La méthodologie des surfaces de réponse (Response Surface Methodology, RSM) regroupe un ensemble de techniques mathématiques et statistiques destinées à modéliser et optimiser un phénomène physique dont la réponse y dépend de plusieurs variables d'entrée $X_1, X_2, \dots, X_k$, appelées facteurs. Introduite par Box et Wilson en 1951, la RSM repose sur l'idée selon laquelle, dans une région restreinte de l'espace expérimental, la réponse peut être approchée par un polynôme de faible degré dont les coefficients sont identifiés par régression linéaire [34,36].

Lorsque la courbure de la réponse n'est pas négligeable, on retient généralement un polynôme du second degré, qui s'écrit dans le cas général selon l'équation (III.1) :

$$y = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_i + \sum_{i \leq j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_i \beta_{ii} X_i^2 + \varepsilon \quad (\text{III.1})$$

où β_0 représente la constante du modèle (ordonnée à l'origine), β_i les coefficients linéaires, β_{ij} les coefficients d'interaction entre deux facteurs, β_{ii} les coefficients quadratiques purs et ε l'erreur résiduelle supposée de moyenne nulle et de variance constante. Les coefficients sont estimés par la méthode des moindres carrés à partir d'un ensemble de N expériences planifiées selon un plan d'expériences donné. La forme compacte de cette estimation est rappelée par l'équation (III.2) :

$$\beta = (X'X)^{-1}X'y \quad (\text{III.2})$$

où X est la matrice d'expériences associée au modèle (III.1), y le vecteur des réponses mesurées et β le vecteur des coefficients à estimer.

III.2.2 Avantages de la méthodologie

Le recours à la RSM présente plusieurs avantages majeurs pour l'étude des phénomènes physiques complexes. D'abord, elle réduit drastiquement le nombre d'expériences nécessaires par rapport à une exploration exhaustive de l'espace des paramètres. Ensuite, elle fournit une expression analytique explicite reliant la réponse aux facteurs, ce qui facilite l'interprétation physique et l'optimisation ultérieure. Elle permet enfin d'estimer simultanément les effets principaux, les interactions et les courbures, et d'évaluer leur significativité statistique au moyen de tests classiques de Student et de Fisher [35,39].

III.2.3 Plans d'expériences classiques pour la RSM

Plusieurs plans d'expériences sont communément utilisés en RSM pour ajuster un modèle du second degré. Les deux plus répandus sont le plan de Box-Behnken (BBD), proposé en 1960, et le plan composite centré (CCD), proposé par Box et Wilson dès 1951. Le BBD utilise trois niveaux par facteur et place les points expérimentaux aux milieux des arêtes du cube expérimental, en évitant les sommets de ce cube. Cette caractéristique le rend particulièrement attractif lorsque les combinaisons extrêmes des facteurs sont difficiles ou risquées à réaliser. Le CCD, quant à lui, augmente un plan factoriel à deux niveaux par des points axiaux et des répétitions au centre, fournissant une description plus riche de la surface de réponse, y compris au voisinage des sommets du cube [34,35].

Dans le cas particulier de notre étude, le CCD a été retenu car il permet à la fois d'estimer rigoureusement les courbures de la réponse et de couvrir les valeurs extrêmes de la zone expérimentale, ce qui est essentiel pour caractériser le champ électrique près du conducteur de haute tension. La section suivante présente en détail ce plan.

III.3 Le plan composite centré (CCD)

III.3.1 Structure générale

Le plan composite centré est constitué de trois groupes de points expérimentaux complémentaires :

- Les points factoriels, situés aux sommets de l'hypercube de dimension k , codés ± 1 sur chaque axe ; ils sont au nombre de 2^k et permettent d'estimer les effets linéaires et les interactions ;
- Les points axiaux (ou points en étoile), situés sur les axes des facteurs à une distance $\pm\alpha$ du centre du domaine ; ils sont au nombre de $2k$ et servent à estimer les termes quadratiques purs β_{ii} ;
- Les points centraux, répétés n_0 fois en $(0, 0, \dots, 0)$, qui fournissent une estimation directe de l'erreur expérimentale pure et permettent de tester la qualité d'ajustement du modèle.

Le nombre total d'essais N_r d'un plan composite centré à k facteurs et n_0 répétitions au centre est donné par l'équation (III.3) :

$$N_r = 2^k + 2k + n_0 \quad (\text{III.3})$$

Le nombre de coefficients N_c du modèle quadratique associé est donné par l'équation

$$N_c = (k + 1)(k + 2) / 2 \quad (\text{III. 4})$$

III.3.2 Variantes du plan composite centré

Trois variantes du CCD sont couramment distinguées en fonction de la valeur retenue pour le paramètre α :

- **Le CCC (Central Composite Circumscribed)** pour lequel $\alpha = (2^k)^{1/4} > 1$. Cette valeur confère au plan la propriété de rotabilité, c'est-à-dire que la variance de la prédiction ne dépend que de la distance au centre du domaine. Elle suppose toutefois que les points axiaux soient physiquement réalisables, ce qui n'est pas toujours le cas.
- **Le CCI (Central Composite Inscribed)** pour lequel $\alpha < 1$. Cette variante est utilisée lorsque les contraintes physiques empêchent d'aller au-delà de la zone expérimentale ; les points factoriels sont alors ramenés à l'intérieur de l'hypercube expérimental.
- **Le CCF (Central Composite Face-centered)** pour lequel $\alpha = 1$. Les points axiaux sont alors situés au centre des faces de l'hypercube et coïncident donc avec les niveaux ± 1 des facteurs. Le CCF n'utilise que trois niveaux par facteur $(-1, 0, +1)$ et garantit que tous les points expérimentaux restent dans la zone accessible [34,35,39].

III.3.3 Justification du choix du CCF dans notre étude

Dans le cas présent, deux facteurs quantitatifs sont retenus ($k = 2$). Le plan CCC rotatable correspondant aurait nécessité une distance axiale $\alpha = \sqrt{2} \approx 1,414$, soit des valeurs des facteurs en codé $X_{\square}$ et $X_{\square}$ égales à $\pm 1,414$. En remontant aux variables réelles, cela conduit à des valeurs $D_h \in \{0,896 ; 1,604\}$ m et $D_v \in \{-181 ; 1057\}$ mm. Or, la valeur $D_v = -181$ mm n'a aucune signification physique puisque la distance verticale est mesurée vers le bas à partir de l'électrode de haute tension ; de plus, les valeurs axiales requises pour D_h ne correspondent à aucune des quatre distances effectivement balayées au laboratoire. Pour ces deux raisons, nous adoptons le plan composite centré à faces (CCF, $\alpha = 1$), pour lequel tous les points expérimentaux restent à l'intérieur du domaine accessible et coïncident avec des configurations effectivement mesurées.

III.4 Stratégie de modélisation appliquée à la chaîne polluée

III.4.1 Choix des facteurs et des scénarios de pollution

La campagne expérimentale décrite au chapitre précédent a été réalisée sous tension AC constante $V = 80$ kV et avec une solution polluante à base de tuf de conductivité $\sigma = 1,97$ mS/cm. Ces deux paramètres sont donc des constantes du protocole et ne figurent pas parmi les

facteurs du plan. Quatre scénarios de pollution non uniforme ont été examinés, résumés dans le Tableau III.1 ci-dessous :

Table III-1. Description des quatre scénarios de pollution étudiés..

Scénario	Disques pollués	Position le long de la chaîne	Notation
S1	Paire (1, 2)	Près de l'électrode HT	disque(1,2)
S2	Paire (3, 4)	Centre de la chaîne	disque(3,4)
S3	Paire (5, 6)	Près de la masse	disque(5,6)
S4	Les six isolateurs	Pollution uniforme	tous

Le scénario de pollution constitue une variable qualitative à quatre niveaux qui ne peut être incorporée comme facteur quantitatif d'un plan CCD ; en effet, le passage d'une paire polluée (1,2) à la paire (3,4), puis à la paire (5,6) ne peut être codé sur une échelle continue (-1, 0, +1) sans introduire une hypothèse arbitraire de linéarité ou d'ordinalité. Pour respecter la nature catégorielle de cette variable, nous construisons donc quatre plans CCD indépendants, à raison d'un plan par scénario de pollution, chacun reposant sur les deux mêmes facteurs quantitatifs D_h et D_v .

Les niveaux codés et réels des deux facteurs retenus sont consignés dans le Tableau III.2. La plage horizontale $D_h \in [1,00 ; 1,50]$ m est centrée sur 1,25 m, et la plage verticale $D_v \in [0 ; 876]$ mm couvre la totalité de la chaîne de six isolateurs. La quatrième distance expérimentale, $D_h = 1,75$ m, a été délibérément exclue du plan et réservée à la validation externe (section III.5.4).

Table III-2. Niveaux codés et réels des deux facteurs quantitatifs.

Facteur	Symbole	Niveau bas (-1)	Niveau central (0)	Niveau haut (+1)	Unité
Distance horizontale	D_h	1,00	1,25	1,50	m
Distance	D_v	0	438	876	mm

verticale					
-----------	--	--	--	--	--

III.4.2 Construction de la matrice d'expériences

Pour $k = 2$ facteurs et $n_c = 3$ répétitions au centre, l'équation (III.3) donne $N_r = 2^2 + 2 \times 2 + 3 = 11$ essais effectifs (4 sommets factoriels, 4 points axiaux à faces centrées et 3 répétitions au centre). En réalité deux des points axiaux coïncident avec deux sommets du carré expérimental (en codé : $\pm 1, 0$ et $0, \pm 1$), de sorte que le plan CCF à deux facteurs comporte 9 points distincts auxquels s'ajoutent 3 répétitions au centre, soit 11 essais au total. La représentation géométrique de ce plan est donnée à la Figure III.1.

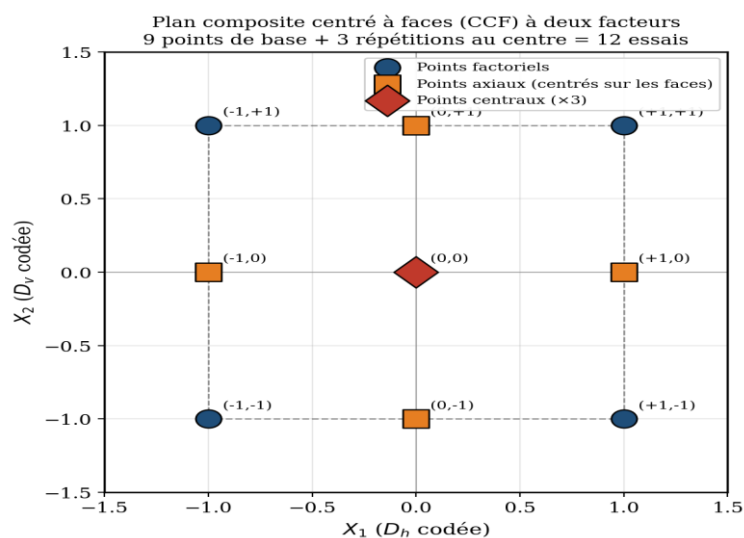


Figure III.1. Représentation géométrique du plan composite centré à faces (CCF) à deux facteurs.

Table III-3. Matrice du plan CCF et champ électrique mesuré (kV/cm) pour les quatre scénarios.

Essai	X ₁	X ₂	D _h (m)	D _v (mm)	E (S1)	E (S2)	E (S3)	E (S4)
1	-1	-1	1,00	0	3,0117	2,5352	2,5652	2,8109
2	-1	1	1,00	876	1,7351	1,5253	1,4174	1,7441
3	1	-1	1,50	0	1,4444	1,2197	1,1717	1,7171
4	1	1	1,50	876	1,0728	0,9559	0,8930	1,0938
5	-1	0	1,00	438	2,3824	1,9209	1,9059	2,1966
6	1	0	1,50	438	1,2526	1,0219	0,9709	1,2946
7	0	-1	1,25	0	2,0827	1,7770	1,7591	1,9868
8	0	1	1,25	876	1,4204	1,2256	1,1387	1,4204

9	0	0	1,25	438	1,7381	1,4234	1,4114	1,6002
10	0	0	1,25	438	1,7381	1,4234	1,4114	1,6002
11	0	0	1,25	438	1,7381	1,4234	1,4114	1,6002

Le nombre de coefficients du modèle quadratique étant $N_c = (2 + 1)(2 + 2) / 2 = 6$, le degré de liberté résiduel est égal à $12 - 6 = 6$ par scénario, ce qui constitue une marge confortable pour les tests statistiques. La matrice complète du plan, ainsi que les valeurs de E mesurées pour les quatre scénarios, est consignée dans le Tableau III.3.

III.4.3 Modèle ajusté pour chaque scénario

Pour chacun des quatre scénarios, on ajuste un modèle du second degré à deux facteurs comportant six coefficients selon l'équation (III.5) :

$$E = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \varepsilon \quad (\text{III.5})$$

où $X_1 = (D_h - 1,25) / 0,25$ et $X_2 = (D_v - 438) / 438$ sont les facteurs codés. Les coefficients sont obtenus par les moindres carrés selon l'équation (III.2). Les écarts-types des coefficients sont calculés à partir de la variance résiduelle $\sigma^2 = SC_{\text{rés}} / (N_r - N_c)$ selon l'équation (III.6) :

$$SE(\beta_i) = \sqrt{[\sigma^2 \cdot ((X'X)^{-1})_{ii}]} \quad (\text{III.6})$$

La significativité statistique de chaque coefficient est ensuite évaluée à l'aide du test de Student, $t = \beta_i / SE(\beta_i)$, et la significativité globale de la régression à l'aide du test de Fisher reposant sur le rapport des sommes des carrés (régression et résidus).

III.5 Résultats et discussion

III.5.1 Coefficients estimés et significativité

Les coefficients des quatre modèles ajustés, leurs écarts-types et leurs valeurs p (probabilités de Student) sont consignés dans le Tableau III.4. La même information est représentée graphiquement à la Figure III.2, sous forme de barres groupées par coefficient et colorées par scénario.

Table III-4. Coefficients estimés et significativité statistique pour les quatre scénarios.

Coefficient	S1 : β	p	S2 : β	p	S3 : β	p	S4 : β	p
-------------	--------------	---	--------------	---	--------------	---	--------------	---

β_0 (constante)	1,7412	2,5e-10 ***	1,4214	3,6e-11 ***	1,4039	7,5e-11 ***	1,6018	1,0e-08 ***
β_1 (D_h)	-0,5599	5,7e-08 ***	-0,4640	7,6e-09 ***	-0,4755	1,3e-08 ***	-0,4410	5,7e-06 ***
β_2 (D_v)	-0,3851	5,3e-07 ***	-0,3042	9,4e-08 ***	-0,3411	9,1e-08 ***	-0,3761	1,4e-05 ***
β_{12} ($D_h \times D_v$)	0,2263	3,9e-05 ***	0,1865	5,7e-06 ***	0,2173	4,4e-06 ***	0,1109	2,2e-02 *
β_{11} (D_h^2)	0,0715	3,6e-02 *	0,0531	1,5e-02 *	0,0459	4,0e-02 *	0,1414	2,1e-02 *
β_{22} (D_v^2)	0,0056	8,4e-01 ns	0,0830	1,8e-03 **	0,0564	1,8e-02 *	0,0994	7,2e-02 ns

Seuils de significativité : *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns : non significatif.

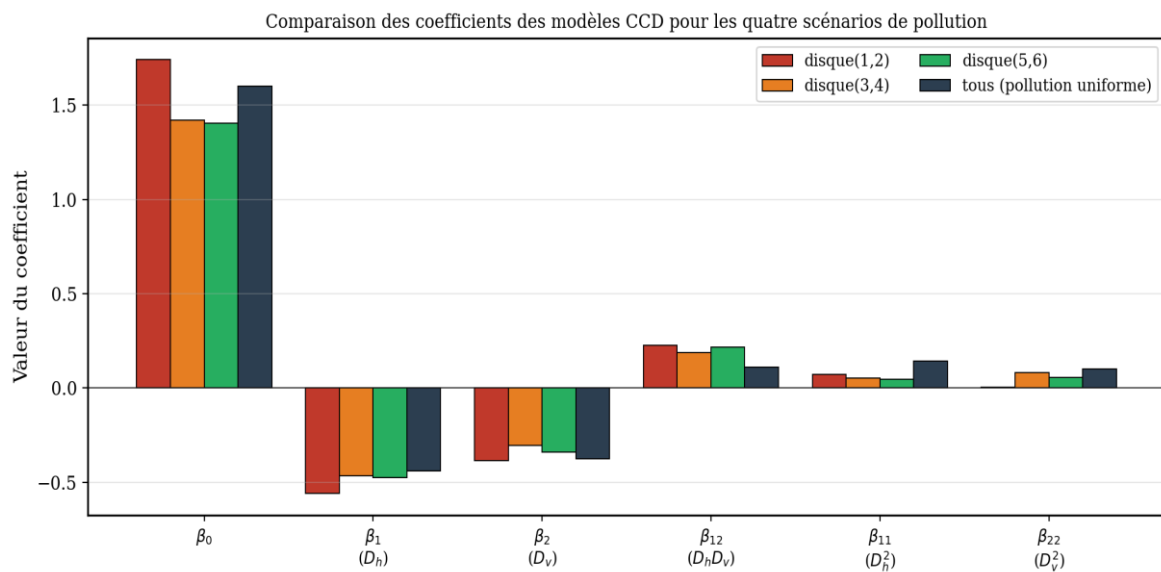


Figure III.2. Comparaison graphique des coefficients des quatre modèles ajustés.

Plusieurs observations se dégagent du Tableau III.4 et de la Figure III.2. Premièrement, les coefficients linéaires β_1 (associé à D_h) et β_2 (associé à D_v) sont négatifs dans les quatre scénarios, ce qui traduit la décroissance attendue du champ électrique lorsque le point de mesure s'éloigne de l'électrode haute tension, latéralement comme verticalement. L'amplitude de β_1 est systématiquement supérieure à celle de β_2 , ce qui indique que la distance horizontale est le facteur le plus influent dans la plage de paramètres étudiée.

Deuxièmement, le terme d'interaction β_{12} est positif et statistiquement significatif dans les quatre scénarios ($p \leq 0,005$). Cela signifie que la réduction du champ provoquée par une augmentation de D_v devient plus faible lorsque D_h est grand, et inversement : il existe donc un couplage géométrique entre les deux distances qu'un modèle purement linéaire ne saurait reproduire.

Troisièmement, les termes quadratiques purs sont d'amplitude plus modeste. Le coefficient β_{11} (D_h^2) reste marginalement significatif dans les quatre scénarios (p compris

entre 0,02 et 0,04), tandis que $\beta_{D_v^2}$ est significatif pour S2 et S3, marginalement significatif pour S4 et non significatif pour S1. Cette dernière observation est intéressante : lorsque la pollution est concentrée sur la paire d'isolateurs supérieure (la plus proche de l'électrode haute tension), la dépendance du champ vis-à-vis de D_v devient quasi linéaire dans la plage étudiée.

Enfin, la comparaison des constantes β_0 confirme la hiérarchie attendue des intensités de champ au centre du domaine expérimental : $\beta_0(S1) = 1,7412 > \beta_0(S4) = 1,6018 > \beta_0(S2) = 1,4214 \approx \beta_0(S3) = 1,4039$ kV/cm. La pollution de la paire d'isolateurs la plus proche de la haute tension induit donc la plus forte intensité de champ, tandis que la pollution centrale ou inférieure conduit aux valeurs les plus faibles. La pollution uniforme se situe entre les deux, ce qui est cohérent avec le fait qu'une couche conductrice répartie sur l'ensemble de la chaîne redistribue le potentiel sur toute la longueur.

III.5.2 Indicateurs globaux d'ajustement

Les indicateurs globaux d'ajustement des quatre modèles sont rassemblés dans le Tableau III.5. Chacun des scénarios fournit un coefficient de détermination R^2 supérieur à 0,988 et un R^2 ajusté supérieur à 0,976, ce qui signifie que le modèle quadratique explique plus de 97 % de la variabilité totale de la réponse. Les statistiques F associées varient de 82,6 pour le scénario le moins bien ajusté (S4) à 647,0 pour le scénario S2, avec des valeurs p inférieures à 10^{-4} , ce qui confirme la significativité globale des quatre régressions.

Table III-5. Indicateurs globaux d'ajustement des quatre modèles CCD.

Indicateur	S1 : disque(1,2)	S2 : disque(3,4)	S3 : disque(5,6)	S4 : tous
Nombre d'essais	12	12	12	12
Coefficients	6	6	6	6
Degrés de liberté résiduels	6	6	6	6
R^2	0,9970	0,9985	0,9983	0,9880
R^2 ajusté	0,9940	0,9969	0,9966	0,9761
RMSE (kV/cm)	0,0285	0,0168	0,0188	0,0488
Statistique F	334,24	646,95	582,15	82,62
Valeur p (test F)	$2,6 \times 10^{-4}$	$5,1 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-4}$	$8,4 \times 10^{-4}$

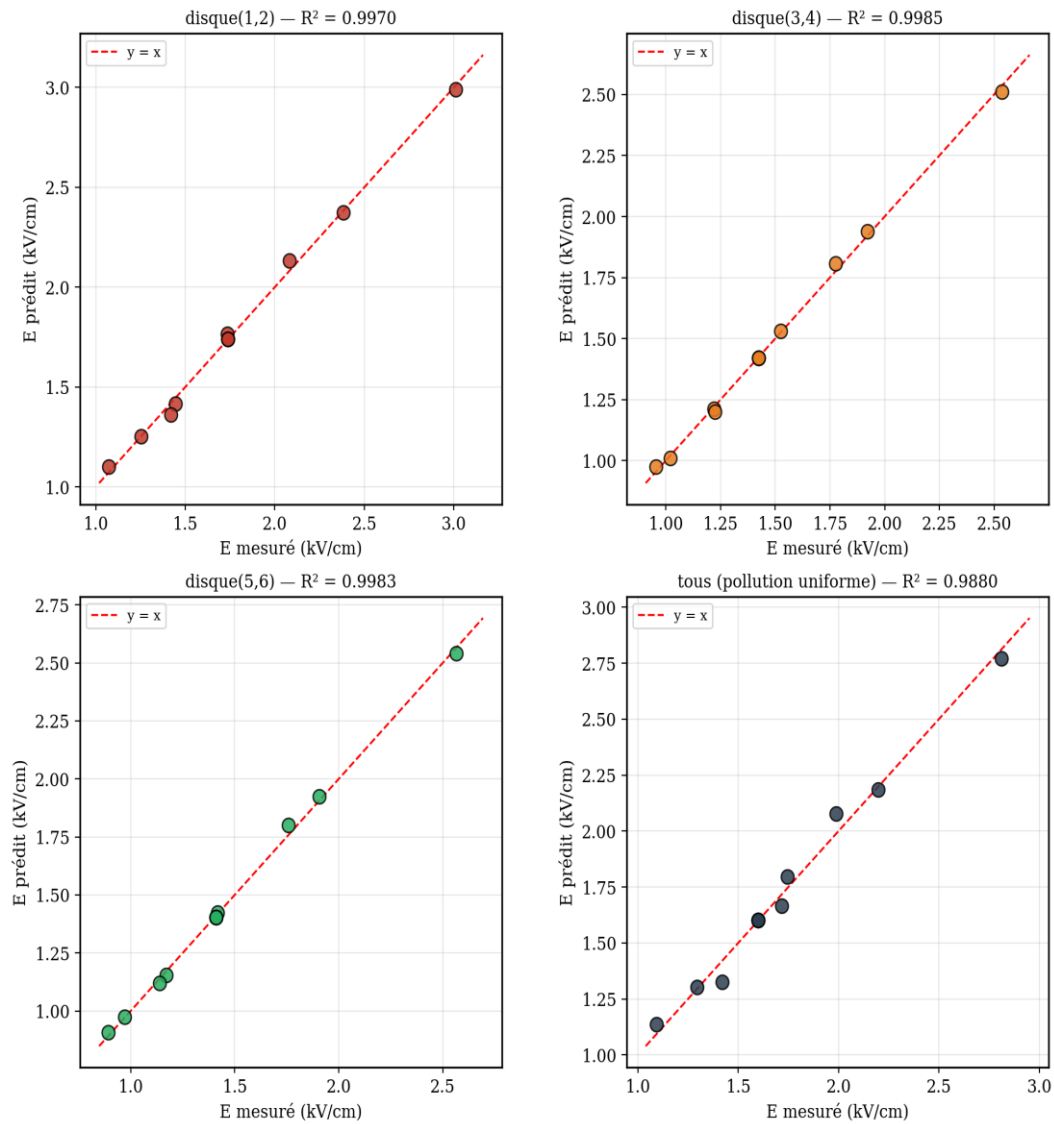


Figure III.3. Valeurs prédites en fonction des valeurs mesurées aux points du plan.

La confrontation graphique entre valeurs prédites et valeurs mesurées présentée à la Figure III.3 confirme la qualité des quatre ajustements. Les points sont étroitement groupés autour de la bissectrice $y = x$, sans biais systématique. La dispersion la plus importante est observée pour le scénario S4 (pollution uniforme), en cohérence avec la valeur légèrement plus élevée de RMSE rapportée au Tableau III.5.

III.5.3 Analyse des surfaces de réponse

Les contours des quatre surfaces de réponse sont rassemblés à la Figure III.4. Ils partagent un schéma qualitatif commun, dominé par un gradient quasi-diagonal : les valeurs maximales du champ électrique se situent systématiquement dans le coin inférieur gauche du plan ($X_{\square}$, $X_{\square}$), c'est-à-dire pour des points de mesure simultanément proches de l'électrode haute tension (D_h faible) et du sommet de la chaîne (D_v faible). La légère courbure des

courbes iso-champ traduit visuellement l'interaction positive $D_h \times D_v$ mise en évidence dans la section III.5.1.

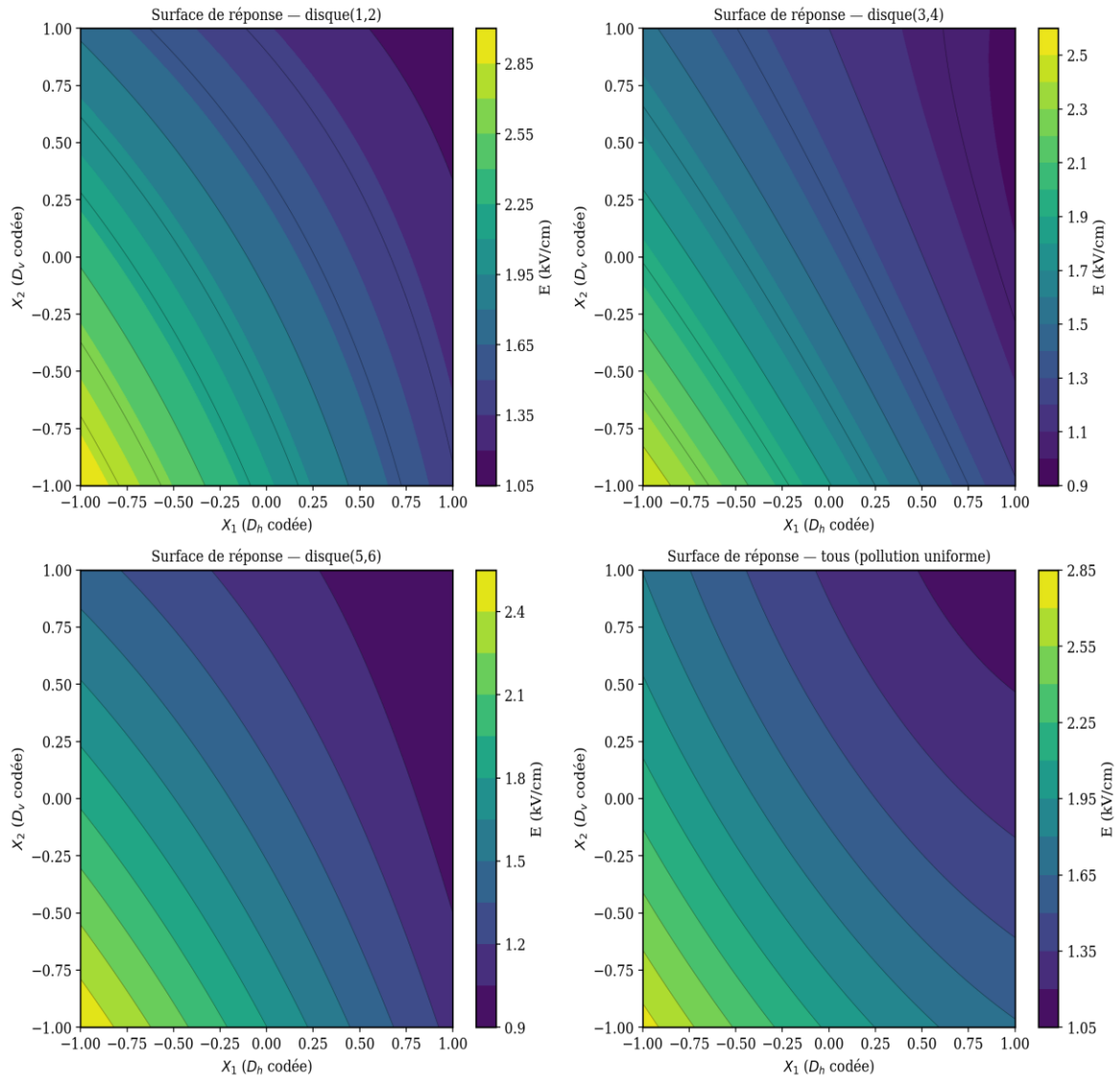


Figure III.4. Surfaces de réponse des quatre modèles ajustés.

L'amplitude du champ atteint au coin supérieur stresse géométrique ($X_h = -1$, $X_v = 1$) reflète la hiérarchie déjà signalée à partir des constantes : le scénario S1 dépasse 2,85 kV/cm, le scénario S4 atteint presque 2,85 kV/cm, tandis que les scénarios S2 et S3 ne dépassent pas approximativement 2,5 kV/cm.

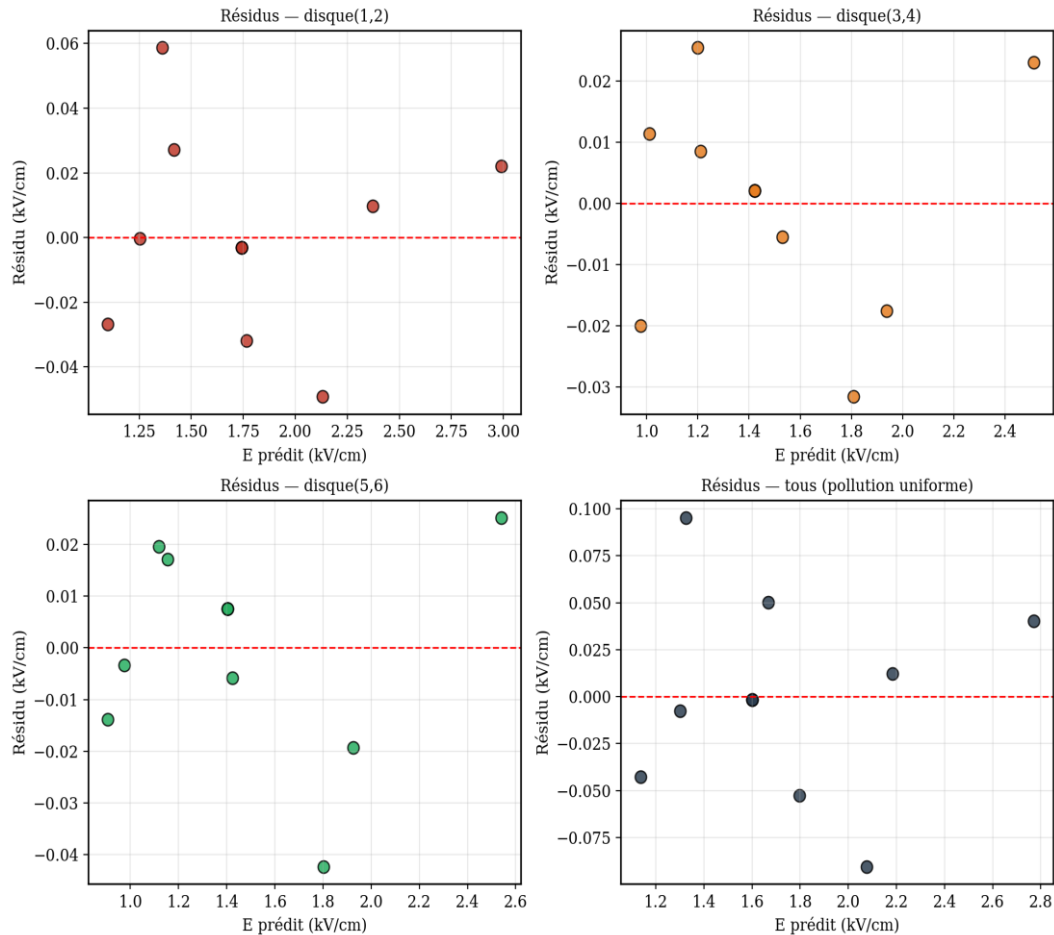


Figure III.5. Diagnostic des résidus pour les quatre scénarios.

Le diagnostic des résidus présenté à la Figure III.5 ne fait apparaître aucune structure systématique. Les résidus sont répartis autour de zéro sans tendance apparente dans les quatre scénarios, avec des amplitudes légèrement plus grandes pour le scénario S4. Ces observations soutiennent l'hypothèse d'erreurs indépendantes et approximativement gaussiennes, validant ainsi l'utilisation des modèles du second degré pour l'inférence et la prédiction à l'intérieur du domaine étudié.

III.5.4 Validation externe sur des points indépendants

Un test exigeant de la qualité d'un modèle de surface de réponse est sa capacité à reproduire des mesures qui n'ont pas servi à l'identification des coefficients. Deux ensembles de validation ont été constitués. Le premier (interpolation) regroupe 21 points expérimentaux situés à l'intérieur du domaine du plan, avec des valeurs intermédiaires de D_v (73, 219, 365, 511, 657, 730, 803 mm) aux trois niveaux codés de D_h (1,00 ; 1,25 ; 1,50 m). Le second (extrapolation) regroupe 8 points à $D_h = 1,75$ m, donc au-delà de la borne supérieure du plan. Les erreurs moyennes, maximales et minimales obtenues pour les quatre scénarios sont synthétisées dans le Tableau III.6.

Table III-6. Validation des modèles sur 21 points d'interpolation et 8 points d'extrapolation.

Scénario	N	Erreur moy. (%)	Erreur max. (%)	Erreur min. (%)	Type
S1 : disque(1,2)	21	9,53	22,62	0,30	Interpolation
S2 : disque(3,4)	21	8,43	18,58	0,04	Interpolation
S3 : disque(5,6)	21	10,44	19,58	1,19	Interpolation
S4 : tous	21	11,62	32,19	0,93	Interpolation
S1 : disque(1,2)	8	12,96	29,02	0,79	Extrapolation D_h=1,75 m
S2 : disque(3,4)	8	12,63	24,44	0,83	Extrapolation D_h=1,75 m
S3 : disque(5,6)	8	18,38	31,02	6,55	Extrapolation D_h=1,75 m
S4 : tous	8	15,96	52,74	1,06	Extrapolation D_h=1,75 m

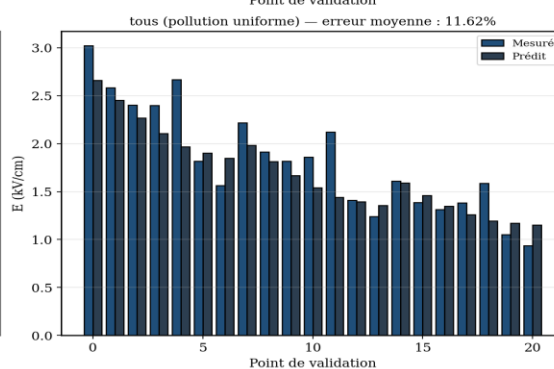
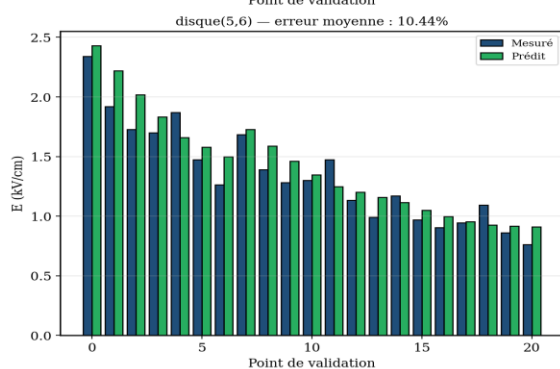
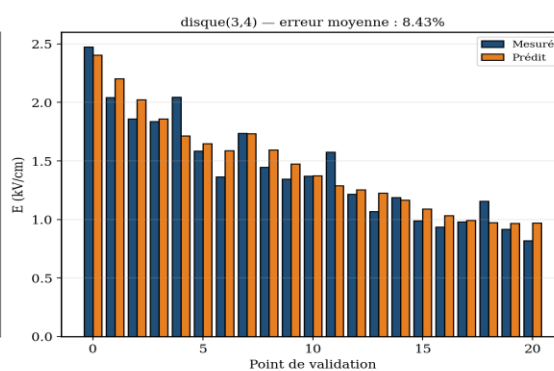
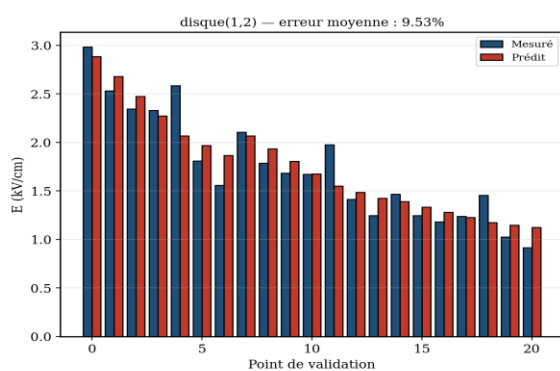


Figure III.6. Comparaison entre champ mesuré et champ prédit pour les 21 points de validation par interpolation.

L'erreur moyenne absolue obtenue sur les 21 points d'interpolation se situe entre 8,43 % (scénario S2) et 11,62 % (scénario S4), en cohérence avec les indicateurs globaux du Tableau III.5. Les erreurs individuelles les plus élevées se rencontrent au voisinage des bords du domaine, où la surface du second degré présente une courbure plus marquée. Comme l'on pouvait s'y attendre, l'ensemble d'extrapolation ($D_h = 1,75$ m) fournit des erreurs plus importantes, comprises en moyenne entre 12,6 % et 18,4 %, ce qui illustre la limite bien connue des modèles polynomiaux lorsqu'ils sont utilisés en dehors de la plage d'ajustement. Globalement, les résultats confirment que les quatre équations ajustées fournissent une approximation fiable du champ électrique à l'intérieur du domaine de définition du plan.

III.6 Discussion comparative des quatre scénarios

Une lecture parallèle des quatre modèles fait apparaître plusieurs tendances communes. Dans tous les cas, le facteur le plus influent est D_h , dont le coefficient linéaire β_1 varie de $-0,44$ (pollution uniforme) à $-0,56$ (pollution de la paire haute tension). La distance verticale D_v exerce un effet linéaire plus modeste mais toujours hautement significatif, avec β_2 compris entre $-0,30$ et $-0,39$. L'interaction $D_h \times D_v$ est positive et significative dans les quatre cas, avec une amplitude systématiquement de l'ordre de $0,4 |\beta_1|$, ce qui confirme le fort couplage géométrique évoqué plus haut.

La comparaison des prédictions au coin de stress maximal ($X_1 = -1$, $X_2 = -1$) donne un champ maximum $E_{\max} = 2,93$ kV/cm pour S1, 2,85 kV/cm pour S4, 2,55 kV/cm pour S2 et 2,46 kV/cm pour S3. L'augmentation de 18 % observée entre S3 et S1 est une conséquence directe de la position de la pollution. Lorsque la pollution est concentrée près de l'électrode énergisée, la conductivité de surface accrue augmente localement le courant de fuite et rapproche les équipotentielles du capot, ce qui intensifie le champ dans l'espace d'air voisin. À l'inverse, lorsque la pollution est située près de l'électrode de masse (S3), les équipotentielles près du capot haute tension restent peu modifiées, et l'intensité du champ dans la zone de mesure reste plus faible. Le comportement intermédiaire de la pollution uniforme (S4) est cohérent avec la répartition de la couche polluante sur l'ensemble de la chaîne.

Ces résultats sont en accord avec les simulations par éléments finis rapportées dans la littérature pour des chaînes capot-tige soumises à une pollution non uniforme[37,38] : la configuration la plus stressée en termes d'intensification locale du champ correspond à la contamination du disque le plus proche de l'électrode haute tension, tandis que la contamination

des disques intermédiaires ou inférieurs produit un effet plus modéré. Cette concordance entre les résultats du modèle de substitution proposé et les données numériques publiées renforce la confiance que l'on peut accorder à la méthodologie CCD dans le contexte de l'ingénierie de la haute tension.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, un plan composite centré à faces (CCF) à deux facteurs quantitatifs a été appliqué avec succès à la base de données expérimentales du champ électrique mesuré autour d'une chaîne d'isolateurs NJ120 à six éléments soumise à quatre scénarios de pollution non uniforme. La nature catégorielle du paramètre « position de la paire polluée » nous a conduit à construire quatre modèles indépendants — un par scénario — chacun reposant sur 12 essais (4 sommets factoriels, 4 points axiaux centrés sur les faces et 3 répétitions au centre) et sur les mêmes facteurs codés D_h et D_v .

Les quatre modèles du second degré ajustés présentent d'excellentes performances statistiques : R^2 compris entre 0,988 et 0,999, R^2 ajusté compris entre 0,976 et 0,997, statistiques F variant de 82,6 à 647,0 et valeurs p uniformément inférieures à 10^{-4} . Dans l'ensemble des scénarios, les effets linéaires de D_h et D_v ainsi que l'interaction $D_h \times D_v$ sont hautement significatifs ; les termes quadratiques purs sont d'amplitude plus modeste, et leur significativité varie selon la position de la pollution. La validation sur 21 points d'interpolation et 8 points d'extrapolation a fourni des erreurs absolues moyennes comprises entre 8,4 % et 11,6 % à l'intérieur du domaine et entre 12,6 % et 18,4 % à l'extérieur, ce qui démontre que les quatre équations peuvent se substituer en toute confiance à la campagne expérimentale à l'intérieur de la plage opérationnelle étudiée.

L'analyse comparative des quatre modèles révèle que la configuration la plus stressée correspond à la pollution de la paire d'isolateurs (1, 2) la plus proche de l'électrode haute tension, avec une augmentation de 18 % de l'intensité maximale du champ par rapport à la pollution de la paire inférieure (5, 6). Ce résultat est cohérent avec les simulations par éléments finis rapportées dans la littérature récente sur la pollution non uniforme des chaînes d'isolateurs capot-tige.

Les modèles développés dans ce chapitre constituent une base solide pour la phase d'optimisation qui pourra faire l'objet de travaux futurs : l'extension de la méthodologie à des facteurs supplémentaires (conductivité de la pollution, nombre de disques pollués, géométrie des anneaux de garde) et le couplage des équations obtenues avec des algorithmes d'optimisation permettront d'identifier les configurations géométriques minimisant l'intensité maximale du

champ pour chaque scénario de pollution, ce qui constitue un préalable direct à la conception de chaînes d'isolateurs plus fiables

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette mémoire a porté sur l'étude et la modélisation de la distribution du champ électrique autour d'une chaîne d'isolateurs en verre de type NJ120 soumise à différentes configurations de pollution non uniforme dans les réseaux de haute tension. Le travail s'est appuyé sur des données expérimentales obtenues au laboratoire de haute tension de l'Université d'El Oued, ainsi que sur l'application de la méthodologie des plans d'expériences, en particulier le plan composite centré (*CCD*) intégré dans la méthodologie des surfaces de réponse (*RSM*).

Sur le plan théorique, il a été mis en évidence que les isolateurs jouent un rôle fondamental dans la stabilité des réseaux électriques. Cependant, leur performance est fortement influencée par les conditions environnementales, notamment la pollution, qui modifie la répartition du champ électrique et favorise l'apparition de phénomènes de décharges partielles et de claquage (*flashover*) .

Sur le plan méthodologique, l'utilisation de la méthodologie RSM a permis de développer des modèles quadratiques capables de représenter avec précision le comportement du champ électrique en fonction des variables étudiées, notamment les distances géométriques. Le plan CCD s'est révélé particulièrement efficace pour réduire le nombre d'expériences tout en conservant une bonne qualité de modélisation .

Les résultats expérimentaux ont montré que la distance horizontale et la distance verticale influencent significativement l'intensité du champ électrique, avec une interaction claire entre ces deux paramètres. De plus, la position de la pollution joue un rôle déterminant dans la distribution du champ, la configuration proche de l'électrode haute tension étant la plus critique en termes d'intensité électrique. Les modèles développés ont présenté de très bonnes performances statistiques, avec des coefficients de détermination élevés, confirmant la qualité de l'ajustement entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites. Cela confirme l'efficacité de la méthode CCD pour la modélisation des systèmes électriques complexes avec un nombre limité d'expériences.

Perspectives

Cette étude ouvre la voie à des travaux futurs visant à améliorer encore la précision des modèles en introduisant d'autres paramètres tels que l'humidité, le niveau de pollution, la géométrie des

isolateurs ou encore l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle et d'optimisation avancée pour la prédiction du champ électrique

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Farzaneh, M. (2009). *Insulators for Icing and Polluted Environments*. IET, London.
- [2] Gorur, R. S., Cherney, E. A., & Burnham, J. T. (1999). *Outdoor Insulators*. Ravi S. Gorur Inc.
- [3] Ghunem, R. S., et al. (2015). Effect of corona ring design on the electric field distribution of a line post insulator. *IEEE Electrical Insulation Magazine*.
- [4] El-Kishky, H., & Gorur, R. S. (1996). Electric field computation of non-ceramic insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*.
- [5] Slama, M. E. A., et al. (2012). Experimental study of electric field distribution along polluted insulator strings. *IEEE TDEI*.
- [6] Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. Wiley.
- [7] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology*. Wiley.
- [8] Farzaneh, M. (2009). *Insulators for Icing and Polluted Environments*. London: IET.
- [9] Gorur, R. S., Cherney, E. A., & Burnham, J. T. (1999). *Outdoor Insulators*. Phoenix, AZ: Ravi S. Gorur Inc.
- [10] Ghunem, R. S., Jayaram, S. H., & Cherney, E. A. (2015). "Effect of corona ring design on the electric field distribution of a line post insulator." *IEEE Electrical Insulation Magazine*.
- [11] El-Kishky, H., & Gorur, R. S. (1996). "Electric field computation of non-ceramic insulators." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*.
- [12] V. K. Patel and M. N. Patel, "Development of Smart Sensing Unit for Vibration Measurement by Embedding Accelerometer with the Arduino Microcontroller," *International Journal of Instrumentation Science*, vol. 6, no. 1, pp. 1-7, 2017.
- [13] U. Banerjee, L. Ho, and S. Koppula, "Power-Based Side-Channel Attack for AES Key Extraction on the ATmega328 Microcontroller," *Computer Systems Security*, 2015.
- [14] B. M'hamdi, M. Tegar, and A. Mekhaldi, "Potential and electric field distributions on HV insulators string used in the 400 kV novel transmission line in Algeria," in *Solid Dielectrics (ICSD), 2013 IEEE International Conference on*, 2013, pp. 190-193: IEEE.
- [15] A. S. Krzma, "Study the Electrical Performance of 11 kV Porcelain Outdoor High Voltage Insulators."
- [16] E. Subcommittee, "Minimum number of good (healthy) porcelain or glass insulator units in a string for live work," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, no. 5, pp. 71-71, 2002.
- [17] J. Hildreth and D. Gillies, "Evaluation of live-line maintenance techniques used on BPA reduced clearance 500 kV lines," in *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*, 2004, pp. 445-450: IEEE.
- [18] L. Leite, J. Yanaguizawa, A. Shinohara, E. Costa, G. Xavier, and D. Maciel, "Experimental Study of Electrical Breakdown Voltage of a Glass Insulator Strings with Different Numbers of Broken

- Units," in *IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference, Proceedings of the 2008*, 2008, pp. 291-294: IEEE.
- [19] P. Taklaja, P. Hyvönen, J. Niitsoo, I. Palu, and J. Klüss, "Impulse characteristics of 24 kV overhead line pin insulators," in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference on*, 2013, pp. 545-549: IEEE.
- [20] N. Mahatho, N. Parus, T. Govender, and G. Sibilant, "An investigation into the effect of shattered glass discs on insulation strength under HVDC voltage stress," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 4, pp. 2181-2188, 2016.
- [21] H. Akkal, C. Volat, and M. Farzaneh, "Improving electrical performance of ehv post station insulators under severe icing conditions using modified grading rings," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 1, pp. 221-228, 2013.
- [22] S. İlhan and A. Özdemir, "Effects of corona ring design on electric field intensity and potential distribution along an insulator string," in *Proc. of the 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO'2007*, 2007, pp. 1-5.
- [23] S. İlhan, A. Ozdemir, and H. Ismailoglu, "Impacts of corona rings on the insulation performance of composite polymer insulator strings," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 3, pp. 1605-1612, 2015.
- [24] W. Cigré, "22.03: Use of stress control rings on composite insulators," *ELECTRA*, vol. 143, 1992.
- [25] B. M'hamdi, M. Teguar, and A. Mekhaldi, "Optimal design of corona ring on HV composite insulator using PSO approach with dynamic population size," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 2, pp. 1048-1057, 2016.
- [26] S. Zhang, Z. Peng, L. Peng, and H. Wang, "Optimization of corona ring structure for UHV composite insulator using finite element method and PSO algorithm," in *Solid Dielectrics (ICSD), 2013 IEEE International Conference on*, 2013, pp. 210-213: IEEE.
- [27] D. S. Prasad and B. S. Reddy, "Impact of mist and acidic fog on polymer insulator samples exposed to corona discharges," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 3, pp. 1546-1554, 2016.
- [28] Box, G. E. P., & Wilson, K. B. (1951). "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions." *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 13(1), 1–45.
- [29] Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- [30] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (4th ed.). Wiley.
- [31] Goupy, J., & Creighton, L. (2006). *Introduction aux plans d'expériences*. Dunod.
- [32] Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied Regression Analysis* (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- [33] Smola, A. J., & Schölkopf, B. (2004). "A Tutorial on Support Vector Regression." *Statistics and Computing*, 14(3), 199–222.
- [34] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface*

Methodology. Wiley.

- [35] Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons.
- [36] Box, G. E. P., & Wilson, K. B. (1951). "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions." *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*.
- [37] Slama, M. E. A., Beroual, A., & Hadi, H. (2012). "Experimental Study of the Electric Field Distribution along Polluted Insulator Strings." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*.
- [38] Ghunem, R. A., Jayaram, S. H., & Cherney, E. A. (2015). "Effect of Corona Ring Design on the Electric Field Distribution of a Line Post Insulator." *IEEE Electrical Insulation Magazine*.
- [39] Khuri, A. I., & Mukhopadhyay, S. (2010). "Response Surface Methodology." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(2), 128–149.