



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure 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

***Analyse expérimentale et modélisation de la
distribution du champ électrique le long des chaînes
d'isolateurs haute tension***

Réalisé par :

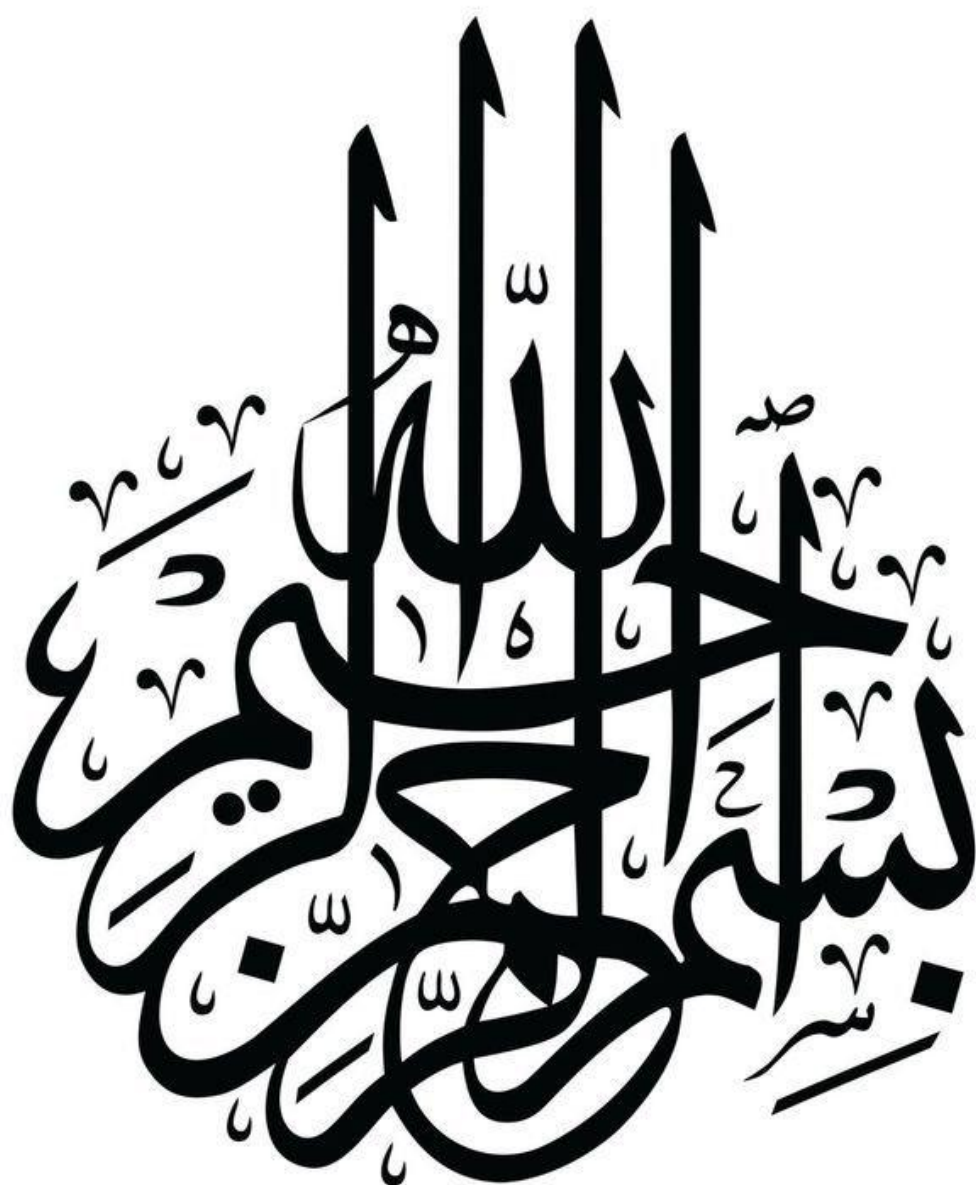
- ***Mesbahi Bouthaïna***
- ***Mehdi Narimene***

Devant le jury composé de:

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

Président
Examineur
Encadrant

Année universitaire : 2025–2026



الملخص

يتناول هذا العمل التحليل التجريبي ونمذجة توزيع المجال الكهربائي على طول سلاسل العوازل ذات الجهد العالي. تُعد العوازل الكهربائية من العناصر الأساسية في شبكات نقل الطاقة الكهربائية، حيث تضمن العزل الكهربائي والدعم الميكانيكي لخطوط النقل. غير أن التوزيع غير المنتظم للمجال الكهربائي على طول سلسلة العوازل يؤدي إلى ظهور إجهادات كهربائية مرتفعة، خاصة بالقرب من الموصل ذي الجهد العالي، مما يسرع من شيخوخة العوازل ويزيد من خطر حدوث التفريغات الكهربائية والانفجار العزلي. يهدف هذا العمل إلى دراسة تجريبية لقياس الجهد تحت ظروف مختلفة، ومقارنتها بنماذج محاكاة (للتحقق من دقتها. أظهرت الدراسة أن توزيع المجال الكهربائي غير SVR وتنبؤ مبنية على خوارزمية انحدار ناقلات الدعم (متجانس، حيث تسجل أعلى قيم له بالقرب من الموصل (الجهد العالي)، ثم تنخفض تدريجياً باتجاه الطرف المؤرض. يتأثر هذا التوزيع بعدة عوامل منها: شكل العوازل، عدد عناصر السلسلة، الظروف البيئية، وخصائص المواد العازلة. استخدام حلقات الحماية لتحسين توزيع المجال، ورفع كفاءة العزل، وإطالة العمر التشغيلي لضمان استقرار الشبكة.

الكلمات المفتاحية:

(، حلقات الحماية، الانفجار SVR عوازل الجهد العالي، توزيع المجال الكهربائي، النمذجة والمحاكاة، انحدار ناقلات الدعم) العزلي

Résumé

Ce travail porte sur l'analyse expérimentale et la modélisation de la répartition du champ électrique le long des chaînes d'isolateurs à haute tension. Les isolateurs électriques comptent parmi les éléments essentiels des réseaux de transport d'énergie électrique, car ils assurent l'isolation électrique et le support mécanique des lignes de transport. Cependant, la répartition non uniforme du champ électrique le long de la chaîne d'isolateurs entraîne l'apparition de contraintes électriques élevées, notamment à proximité du conducteur à haute tension. Cela accélère le vieillissement des isolateurs et augmente le risque de décharges électriques et de claquage diélectrique. Ce travail vise à mener une étude expérimentale pour mesurer la tension sous différentes conditions, et à comparer les résultats avec des modèles de simulation et des prédictions basées sur l'algorithme de régression par vecteurs de support (SVR) afin de vérifier sa précision. L'étude a montré que la répartition du champ électrique est non uniforme, les valeurs les plus élevées ayant été enregistrées à proximité du conducteur (haute tension) et diminuant progressivement vers l'extrémité mise à la terre. Cette répartition est influencée par plusieurs facteurs, notamment : la forme des isolateurs, le nombre d'éléments de la chaîne, les conditions environnementales et les propriétés des matériaux isolants. L'utilisation d'anneaux de garde (anneaux de protection) permet d'améliorer la répartition du champ, d'augmenter l'efficacité de l'isolation et de prolonger la durée de vie opérationnelle afin de garantir la stabilité du réseau.

Mots-clés : Isolateurs à haute tension, répartition du champ électrique, modélisation et simulation, régression par vecteurs de support (SVR), anneaux de garde, claquage diélectrique.

Abstract

This work deals with the experimental analysis and modeling of the electric field distribution along high-voltage insulator strings. Electrical insulators are among the essential components in power transmission networks, as they ensure electrical insulation and mechanical support for transmission lines. However, the non-uniform distribution of the electric field along the insulator string leads to the appearance of high electrical stresses, especially near the high-voltage conductor. This accelerates the aging of the insulators and increases the risk of electrical discharges and dielectric breakdown. This work aims to conduct an experimental study to measure the voltage under different conditions, and compare the results with simulation models and predictions based on the Support Vector Regression (SVR) algorithm to verify its accuracy.

The study showed that the electric field distribution is non-uniform, as the highest values were recorded near the conductor (high voltage) and gradually decreased towards the grounded end. This distribution is affected by several factors, including: the shape of the insulators, the number of string elements, environmental conditions, and the properties of the insulating materials. The use of corona rings (protection rings) improves the field distribution, increases insulation efficiency, and extends the operational lifespan to ensure grid stability.

Keywords: High-voltage insulators, electric field distribution, modeling and simulation, Support Vector Regression (SVR), corona rings, dielectric breakdown.



REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions **Allah** le Tout-Puissant de nous avoir donné la force, le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre encadreur **Dr. Khechekhouche Ali** , pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité ainsi que son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

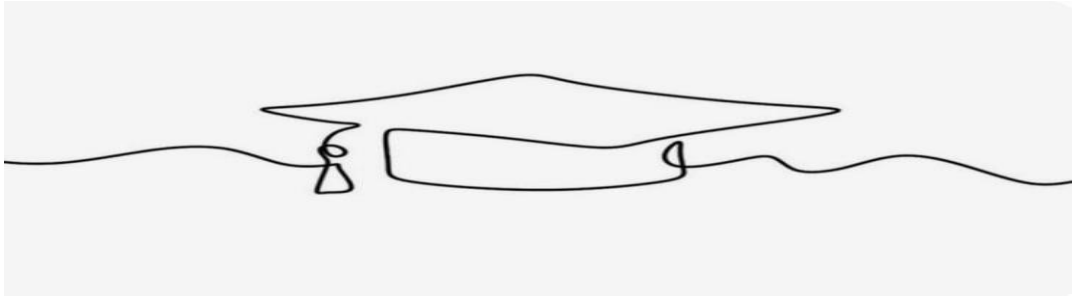
Nous adressons également nos vifs remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail, ainsi que pour leurs remarques et suggestions constructives.

Nos remerciements s'adressent aussi à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation durant tout notre parcours universitaire.

Nous exprimons également notre gratitude à nos familles et à nos proches pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur confiance permanente.

Enfin, nous remercions toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.





Dédicaces

À ceux qui ont été mon soutien et la lumière de mon chemin tout au long
de ce parcours...

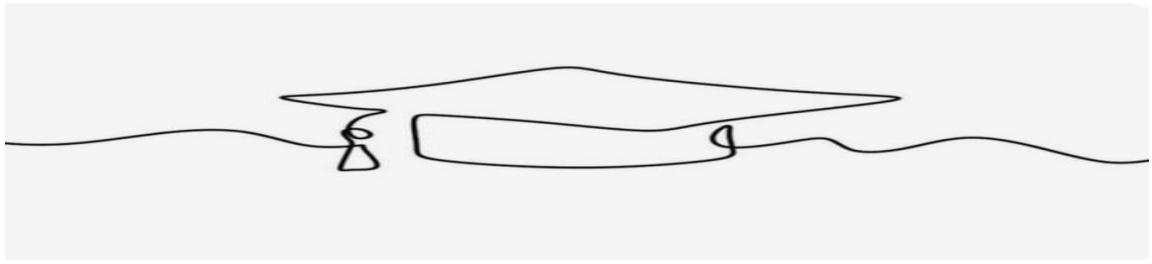
À mes chers parents, qui ont semé en moi l'amour du savoir et la
persévérance, et dont les prières ont été la source de ma force et de ma
réussite, je dédie ce modeste travail en témoignage de ma profonde
gratitude pour leurs innombrables sacrifices

À mes frères, à ma famille et à que j'aime, qui ont toujours été une source
de soutien, d'amour et de réconfort tout au long de ce parcours.

À tous mes honorables enseignants qui ont illuminé mon parcours par leur
savoir et leurs connaissances, et qui ont contribué à ma formation
académique.

Je dédie le fruit de cet effort, en espérant qu'il soit le début de réussites
encore plus grandes à l'avenir.

BOUTHAINA



Dédicaces

À la source de tout don et de mon soutien dans la vie...

À mon cher père, qui fut pour moi le plus bel exemple et qui n'a jamais hésité à m'offrir son soutien et ses conseils, que Dieu te comble de grâces et t'accorde une longue vie.

Et à l'âme pure qui nous a quittés physiquement mais qui demeure avec nous en esprit...

À ma mère bien-aimée, que Dieu ait pitié d'elle, dont les prières furent le secret de ma réussite et dont la patience nourrit mon ambition. Je te dédie ce fruit, espérant qu'il te parviendra au Paradis et t'apportera la joie.

NARIMEN

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale

Introduction générale.....	1
Chapter I Étude de la distribution du champ électrique autour d'une chaîne d'isolateurs.....	
I.1 Introduction.....	3
I.2. Définition de l'isolateur.....	3
I. 3. Types d'isolateurs	4
I.3.1. Isolateur de type rigide.....	4
I.3.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne	4
I.4. Pollution.....	5
I.5. Sources de pollution.....	5
I.5.1 Pollution naturelle	5
I.5.2 Pollution industrielle.....	6
I.5.3 Pollution mixte.....	6
I.6. Contournement.....	6
I.6.1. Ligne de contournement	7
I.6.2. Tension de contournement	7
I.6.3. Contrainte de contournement.....	7
I.6.4. Tension de tenue.....	7
I.6.5. Ligne de fuite	7
I.6.6. Courant de fuite.....	8
I.7.Mesure du champ électrique au voisinage de la chaîne d'isolateurs :	8
I.7.1. Techniques expérimentales	8
I.8. Résultats expérimentaux et interprétations	11
I.8.1. Chaîne des isolateurs à l'état propre et sec	11

I.8.2. Chaîne des isolateurs à surfaces inférieures polluées	12
I.8.3. Chaîne moignon à isolateurs propres et secs	14
I.8.4. Présence d'anneaux de garde.....	15
I.9. Conclusion	20
Chapter II L'algorithme SVR Approche prédictive pour l'étude de l'isolation sous pollutio	
II.1. Introduction	21
II.2. Les Machines à Vecteurs de Support (SVM).....	21
II.2.1. Définition et historique	21
II.2.2. Principe de fonctionnement général	22
II.3. Les Fonctions Noyaux (Kernels)	25
II.3.1. Définition et rôle.....	25
II.4. La Régression par Vecteurs de Support (SVR).....	26
II.4.1. De la classification à la régression	26
II.4.2. Principe de fonctionnement : le tube ϵ -insensible	26
II.4.3. Formulation mathématique.....	26
II.5. Les Fonctions Noyaux dans la SVR Non Linéaire	27
II.5.1. Le principe de l'astuce du noyau.....	27
II.5.2. Principaux types de noyaux pour la SVR.....	27
II.6. Les Paramètres de la SVR	28
II.6.1. Noyau (Kernel)	28
II.6.2. Degré	28
II.6.3. Gamma (γ)	28
II.6.5. Epsilon (ϵ).....	28
II.7. Avantages et Limites de la SVR	28
II.7.1. Avantages.....	28
II.7.2. Limites	29
II.8. Conclusion	29
Chapter III Application de l'algorithme SVR aux données expérimentales	
III.1. Introduction	30
III.2. Présentation des données expérimentales	30
III.2.1. Configurations de pollution étudiées.....	30
III.2.2. Domaine de mesure	31
III.3. Méthodologie d'application du SVR	32
III.3.1. Définition des variables entrée et de sortie	32

III.3.2. Standardisation des données.....	32
III.3.3. Division des données apprentissage / test	32
III.3.4. Choix du noyau	33
III.3.5. Optimisation des hyperparamètres	33
III.3.6. Validation croisée	33
III.4. Critères d'évaluation des performances.....	33
III.4.1. Erreur quadratique moyenne (RMSE).....	34
III.4.2. Erreur absolue moyenne (MAE)	34
III.4.3. Coefficient de détermination (R^2)	34
III.4.4. Erreur relative moyenne (MAPE)	34
III.5. Résultats et discussion.....	35
III.5.1. Hyperparamètres optimaux	35
III.5.2. Performances du modelé	35
III.5.3. Effet de la configuration de pollution.....	37
III.5.4. Effet de la distance de mesure	38
III.5.5. Analyse des résidus	41
III.6. Discussion générale.....	41
III.7. Conclusion.....	42
Références bibliographiques	51

Liste des Symboles

Q : Charge électrique induite à la surface du capteur (C ou nC).

C : Capacité du condensateur de mesure connecté au capteur ($C = 9,1 \text{ nF}$).

V : Tension électrique mesurée aux bornes du condensateur par la carte Arduino (V).

E : Intensité du champ électrique (kV/cm ou V/m).

A : Surface de détection du capteur cylindrique ($A = 19,6 \text{ mm}^2$).

ϵ_0 : Permittivité diélectrique du vide (ou de l'air) ($8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$).

Lc : Ligne de contournement (distance minimale dans l'air autour de l'isolateur).

Lf : Ligne de fuite (distance minimale mesurée le long de la surface externe de l'isolateur).

f(x) : Fonction de régression (ou de prédiction) du champ électrique.

w : Vecteur de poids (détermine l'orientation de l'hyperplan).

x : Vecteur d'entrée (contenant les variables indépendantes : hauteur, distance, configuration de pollution).

b : Le biais (ordonnée à l'origine ou constante de décalage de l'hyperplan).

C : Paramètre de régularisation (compromis entre la complexité du modèle et les erreurs tolérées).

E : Largeur du tube d'insensibilité (zone où aucune pénalité n'est appliquée aux erreurs).

ξ_i ξ_i^* : (Variables ressorts / Slack variables) : Variables d'écart mesurant l'excès d'erreur en dehors du tube ϵ .

y_i : Valeur réelle (expérimentale) du champ électrique pour l'échantillon *i*.

K (x, x') : Fonction Noyau (Kernel), utilisée pour projeter les données dans un espace de dimension supérieure.

γ (Gamma) : Paramètre de la fonction noyau (RBF), contrôlant la zone d'influence des vecteurs de support.

ŷ_i : Valeur prédite du champ électrique par le modèle SVR pour l'échantillon *i*.

ȳ : Moyenne arithmétique de l'ensemble des valeurs expérimentales.

n : Nombre total d'échantillons (observations) dans la base de données.

μ : Moyenne statistique d'une variable (utilisée lors de la standardisation des données).

σ : Écart-type d'une variable (utilisé lors de la standardisation).

Conductivité électrique de la solution de pollution (mS/cm).

h : Hauteur verticale du point de mesure le long de la chaîne d'isolateurs (mm).

d : Distance horizontale entre le point de mesure et l'axe central de la chaîne (m).

c : Code numérique désignant la configuration de la couche polluante.

RMSE : Erreur Quadratique Moyenne (Root Mean Square Error).

MAE : Erreur Absolue Moyenne (Mean Absolut Error).

R² : Coefficient de détermination (mesure de la qualité d'ajustement du modèle).

MAPE : Erreur Pourcentage Absolue Moyenne (Mean Absolut Percentage Error).

Liste des figures

Chapitre I : Étude de la distribution du champ électrique autour d'une chaîne d'isolateurs

Figure I.1: Isolateur rigide en verre.....	4
Figure I.2 : Phénomène de contournement dans un isolateur.....	6
Figure I.3 : Représentation de la ligne de contournement (L c) sur un isolateur	7
Figure I.4 : Représentation de la ligne de fuite (L f) sur un isolateur.....	8
Figure I.7: Méthode de mesure du champ électrique.....	9
Figure I.8: Méthode de pulvérisation.....	10
Figure I.9: La chaîne des isolateurs utilisée et les pulvérisation axes de mesure du champ.....	10
Figure I.10: Forme de l'onde du champ électrique.....	10
Figure I.11: 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.....	11
Figure I.12: Distribution du champ électrique au voisinage de la chaîne des isolateurs pour différents paliers de tension (a) 30 kV, et (b) 80 Kv.....	12
Figure I.13: 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	13
Figure I.15: Différentes positions de l'isolateur endommagé dans la chaîne, (a) 1, (b) 3, et (c)6...	14
Figure I.16: Effet de la position de l'élément endommagé sur la répartition du champ électrique mesuré à 1 m de la chaîne	15

Figure I.17: 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	16
Figure I.18: 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	18
Figure I.19 : 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	18
Figure I.20: 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	19
Figure I.21: 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	20

Chapitre II : L'ALGORITHME SVR APPROCHE PRÉDICTIVE POUR L'ÉTUDE DE L'ISOLATION SOUS POLLUTION

Figure II.1 : Exemple d'un hyperplan séparateur	22
Figure II.2 : Exemple de vecteurs de support.....	22
Figure II.3: Exemple de marge maximal (hyperplan valide).....	23
Figure II.4 : a) Hyperplan avec faible marge, b) Meilleur hyperplan séparateur	23
Figure II.5 : Exemple de classification d'un nouvel élément.....	24
Figure II.6 : Exemple de changement de l'espace de données.....	24

Chapitre III

Application de l'algorithme SVR aux données expérimentales

Figure III.1: Valeurs prédites par le modelé SVR vs valeurs mesurées.....	36
Figure III.2: Distribution du champ E pour les 4 configurations de pollution (d = 1 m, V = 80 kV, $\delta = 1,97$ mS/cm).....	37

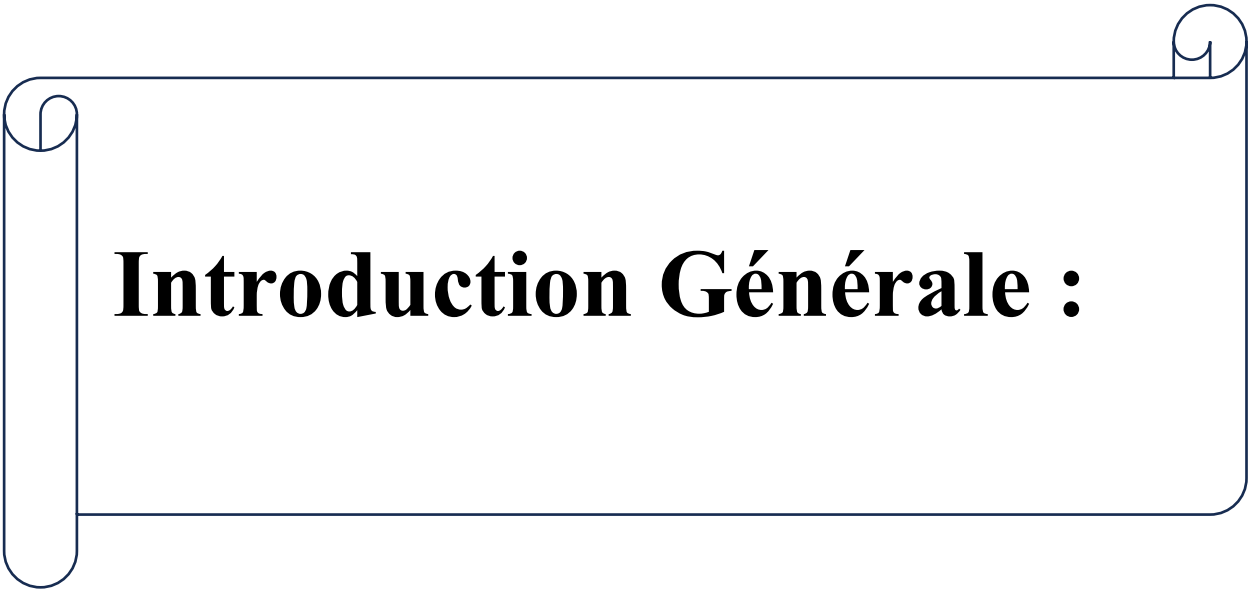
Figure III.3: Distribution du champ E pour différentes distances d (configuration 4, $\delta = 1,97$ mS/cm).....	39
Figure III.4: Surface SVR du champ électrique $E = f(h, d)$ - Tous isolateurs pollués.....	40
Figure III.5 : Distribution des résidus du modèle SVR.....	41

Liste des Tableaux

Chapitre III

Application de l'algorithme SVR aux données expérimentales

Tableau III.1 : Caractéristiques du jeu de données expérimental.....	31
Tableau III.2 : Hyper paramètres optimaux du modèle SVR.....	35
Tableau III.3: Performances du modèle SVR.....	35

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and a small circular detail at the top-left and top-right corners respectively.

Introduction Générale :

Introduction générale

L'énergie électrique constitue aujourd'hui le moteur essentiel du développement industriel et du confort sociétal. Face à une demande en électricité sans cesse croissante, les réseaux de transport à haute tension (HT) doivent faire preuve d'une fiabilité infaillible. Au cœur de cette infrastructure, les isolateurs électriques jouent un rôle double et critique : ils doivent supporter mécaniquement les conducteurs tout en assurant une isolation électrique rigoureuse vis-à-vis des supports mis à la terre (pylônes).

Cependant, l'efficacité de ces composants est constamment mise à l'épreuve par l'environnement extérieur. En effet, les isolateurs sont exposés à divers types de pollution : saline dans les zones côtières, industrielle près des complexes urbains, ou sableuse dans les régions désertiques. Sous l'effet de l'humidité (brouillard, rosée ou pluie fine), ces dépôts polluants deviennent conducteurs, donnant naissance à des courants de fuite. Ce processus dégrade la distribution du potentiel le long de la chaîne d'isolateurs et peut conduire au phénomène de contournement (Flash over). Ce dernier provoque des arcs électriques violents, entraînant des déclenchements de lignes, des avaries matérielles coûteuses et des interruptions prolongées de la fourniture d'énergie.

La maîtrise de ce risque passe impérativement par une compréhension précise de la distribution du champ électrique. Traditionnellement, cette analyse est complexe en raison de la nature non linéaire et multidimensionnelle des phénomènes électrostatiques en milieu pollué. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, en explorant des solutions innovantes à l'intersection du génie électrique et de l'informatique avancée.

Problématique et Objectifs:

L'objectif central de ce mémoire de Master est de caractériser le comportement d'une chaîne d'isolateurs de type NJ120 soumise à des conditions de pollution sévère (notamment à base de tuf, caractéristique des zones arides). Nous avons adopté une approche hybride:

Approche Expérimentale :

Utilisation d'un système de mesure basé sur la carte Arduino Uno pour quantifier la distribution du champ à travers les capacités réparties de la chaîne.

Approche de Modélisation : Application de l'algorithme SVR (Support Vector Regression). Contrairement aux méthodes classiques, le SVR permet de modéliser avec une grande précision ($R^2 > 0,99$) la relation entre la position de la pollution et l'intensification du champ électrique, offrant ainsi un outil prédictif robuste pour anticiper les tensions de contournement.

Organisation du Mémoire:

Pour répondre à cette problématique, notre étude est structurée en trois chapitres principaux:

Le premier chapitre est dédié à l'étude théorique des isolateurs haute tension et à l'analyse des mécanismes physiques de la pollution et de la distribution du champ électrique.

Le deuxième chapitre présente les fondements mathématiques de l'apprentissage automatique, en mettant l'accent sur la régression par vecteurs de support (SVR) et son efficacité dans le traitement des problèmes linéaires et non linéaires à grande échelle.

Le troisième chapitre expose les résultats expérimentaux obtenus. Il détaille la performance du modèle SVR dans la prédiction du comportement de l'isolateur et analyse l'impact critique de la localisation de la couche polluante sur la sécurité globale de la chaîne.?

Chapter I

Étude de la distribution du champ électrique autour d'une chaîne d'isolateurs

I.1 Introduction

Afin de garantir la continuité du service électrique et de prévenir les courts-circuits ou les pertes d'énergie, l'importance des isolateurs s'avère primordiale en tant qu'interface de liaison mécanique et d'isolation électrique. Ils assurent la fixation des câbles aux pylônes tout en empêchant le passage des charges vers la terre. Ce travail vise à examiner les principaux types d'isolateurs (rigides et éléments de chaîne), les spécificités des matériaux constitutifs tels que le verre ou la céramique, tout en analysant les mécanismes de protection contre les défaillances électriques en milieux pollués."

I.2. Définition de l'isolateur.

L'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. L'isolateur est formé par un isolant auquel sont fixés deux pièces métalliques M1 et M2, [1].

Isolant : Verre, céramique, matériaux synthétiques.

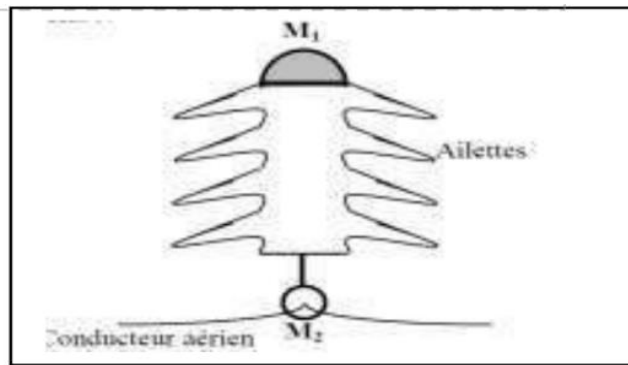
M1 se fixe au pylône ; M2 porte le conducteur.

L'isolateur possède un double rôle :

- Rôle mécanique : porte le conducteur ;
- Rôle électrique : isole le conducteur par rapport au pylône.

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison entre des conducteurs HT et la terre, [2].

- Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage) ;
- Ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure), [2].



I. 3. Types d'isolateurs

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs de type rigide et les éléments de chaîne [2].

I.3.1. Isolateur de type rigide

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes (figure I.1). Ils sont montés sur les pylônes soit d'une façon, horizontale ou oblique (inclinée). Mais ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes dont le niveau de tension de 60 kV, [3]. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs de haute tension. Photo 1.1 : Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre.



Figure

Figure 0.1

I.1 : Isolateur rigide en verre.

I.3.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués du matériau isolant ainsi que d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et qui permet de donner une certaine flexibilité à la chaîne

d'isolateurs. La chaîne d'isolateurs peut être montée sur le pylône en suspension, ou bien verticalement (chaîne d'alignement), ou encore d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage) [2]. Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

L'isolateur à capot et tige

L'isolateur long fut.

I.4. Pollution

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme le sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les modalités de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources en produits agricoles, en eau, et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il détient, les possibilités du milieu ou encore en enlaidissant la nature [4].

I.5. Sources de pollution

Nous distinguons trois sortes de pollutions : la pollution naturelle, industrielle et mixte.[5].

I.5.1 Pollution naturelle

La pollution naturelle provient de sels marins dans des régions côtières, de poussières du sol (notamment lors de chantiers importants) et de sables véhiculés par le vent en régions désertiques [5].

I.5.1.1 Pollution marine :

Les lignes de haute tension qui passent près de la mer dans les zones côtières, sont exposées au vent marin. Ce dernier porte des embruns causant la formation d'une couche polluante de sel sur les surfaces des isolateurs. Cette couche peut devenir conductrice lorsqu'elle est humidifiée ou mouillée. Ce qui conduit à la circulation d'un courant de fuite et par suite, la génération d'arcs électriques ou même, parfois, la génération d'un contournement [5].

I.5.1.2 Pollution désertique

Parmi les phénomènes qui caractérisent la nature désertique, les vents de sable. Malheureusement, après ces vents, des dépôts de sable se déposent sur les surfaces des isolateurs. Lorsque ces dépôts s'humidifient, ils deviennent plus ou moins conducteurs à cause de l'existence de sels dans le sable. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels, dont la propagation à la surface de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolateur [6.7].

I.5.2 Pollution industrielle

Le problème de la pollution industrielle se présente pour les lignes qui passent près des zones industrielles (les fumées des usines, raffineries, cimenteries, minerais, ...), près des grandes villes (les gaz d'échappement des véhicules) ou près des terrains agricoles (les engrais utilisés en agriculture) [8].

I.5.3 Pollution mixte

Ce type de pollution est le plus dangereux. Cette pollution est la résultante de l'existence de différents types de pollution dans la même zone ; cas des isolateurs installés dans les zones industrielles situées près de la mer.[5].

I.6. Contournement

On dit que le contournement se produit sur la surface de l'isolateur lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur. Le contournement provoque l'ouverture du disjoncteur, car il établit un court-circuit entre le conducteur et le pylône (défaut monophasé à la terre) [9].



Figure I.2 : Phénomène de contournement dans un isolateur .[9].

Le contournement cause habituellement l'interruption momentanée de l'écoulement de l'énergie dans le réseau électrique. De telles interruptions, bien qu'étant nocives, peuvent être tolérées dans des endroits ruraux. Dans des secteurs urbains avec les industries de pointe, les interruptions ne sont pas acceptables parce qu'elles mènent à d'énormes pertes financières de production, de machines bloquées et des pertes de contrôle du cycle du processus.[9].

I.6.1. Ligne de contournement

La ligne de contournement (L_c) est la plus courte distance dans l'air, à l'extérieur de l'isolateur, entre deux parties conductrices soumises à une tension alternative. Elle représente le trajet susceptible d'être suivi par une décharge électrique lors d'un contournement [10].

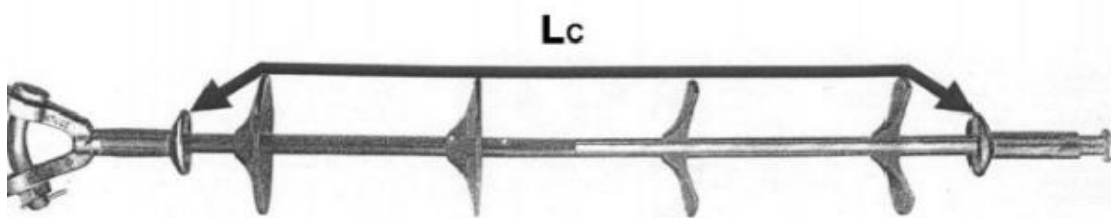


Figure I.3 : Représentation de la ligne de contournement (L_c) sur un isolateur [10].

I.6.2. Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes. La tension de contournement dépend : de la résistivité volumique moyenne de la pollution.

De la répartition de la couche de pollution.

De la longueur de l'isolateur.

Du profil de l'isolateur.[4].

I.6.3. Contrainte de contournement

La contrainte de contournement d'un isolateur est le rapport de la tension de contournement à la longueur totale de l'isolateur [11]. Pendant une période donnée, on détermine soit la contrainte de contournement soit la relation entre contrainte de contournement et la fréquence de contournement. Ceci concerne toutes les phases du processus de contournement.[4].

I.6.4. Tension de tenue

La tension de tenue est la tension maximale que peut supporter un isolant sans provoquer de décharge disruptive [4]. Elle représente la capacité de l'isolation à résister à une contrainte électrique sans rupture diélectrique ni passage d'arc [11].

I.6.5. Ligne de fuite

La ligne de fuite (L_f) est la distance la plus courte mesurée le long de la surface, suivant le profil extérieur de l'isolateur, entre le conducteur et la masse [9].

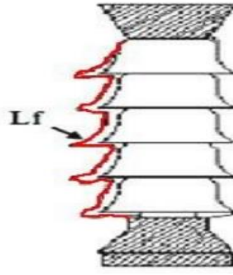


Figure I.4 : Représentation de la ligne de fuite (Lf) sur un isolateur [9].

I.6.6. Courant de fuite

Le courant de fuite est un courant de faible amplitude circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur, dont l'intensité augmente à l'approche de la tension de contournement. Ce courant dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature de la couche polluante et la longueur de la ligne de fuite [9].

En conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la couche polluante provoque la formation d'une couche électrolytique, rendant le courant de type électrolytique.[10].

I.7.Mesure du champ électrique au voisinage de la chaîne d'isolateurs :

I.7.1. 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 II.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 : pico Power, 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 [12]. 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 :

$$Q = C V \quad (I.5)$$

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

$$E = C V / A \epsilon_0 \quad (I.6)$$

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.

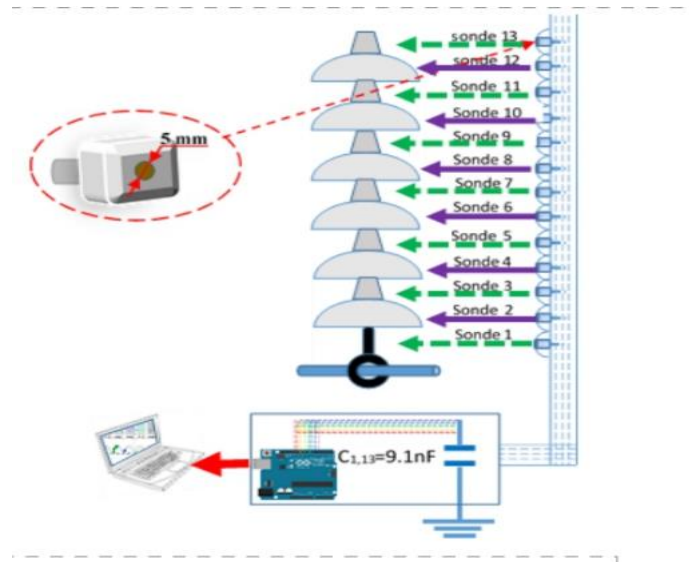


Figure I.7: Méthode de mesure du champ électrique

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.8). 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.10 montre un exemple quant à la forme de l'onde du champ électrique enregistrée par la 7ème sonde, lorsque la tension appliquée est égale à 80 kV dans des conditions propres et ce pour toutes des distances horizontales considérées.



Figure I.8: Méthode de pulvérisation



Figure I.9: La chaîne des isolateurs utilisée et les axes de mesure du champ

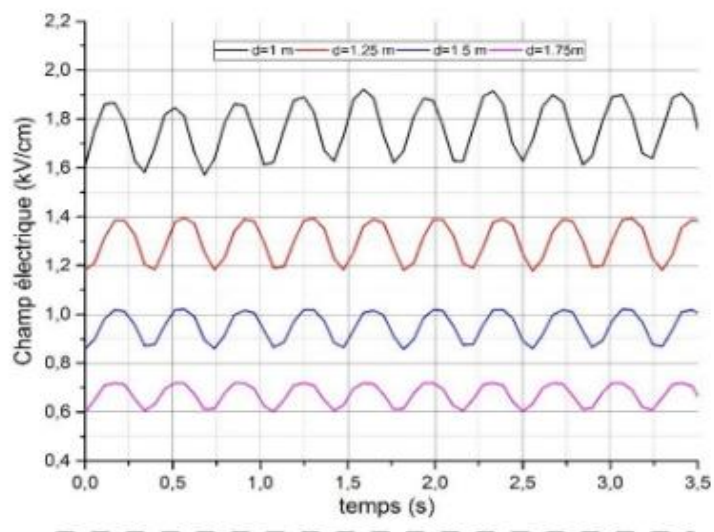


Figure I.10: Forme de l'onde du champ électrique

I.8. Résultats expérimentaux et interprétations

I.8.1. Chaîne des isolateurs à l'état propre et sec

Les figures I.11 et I.12 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.

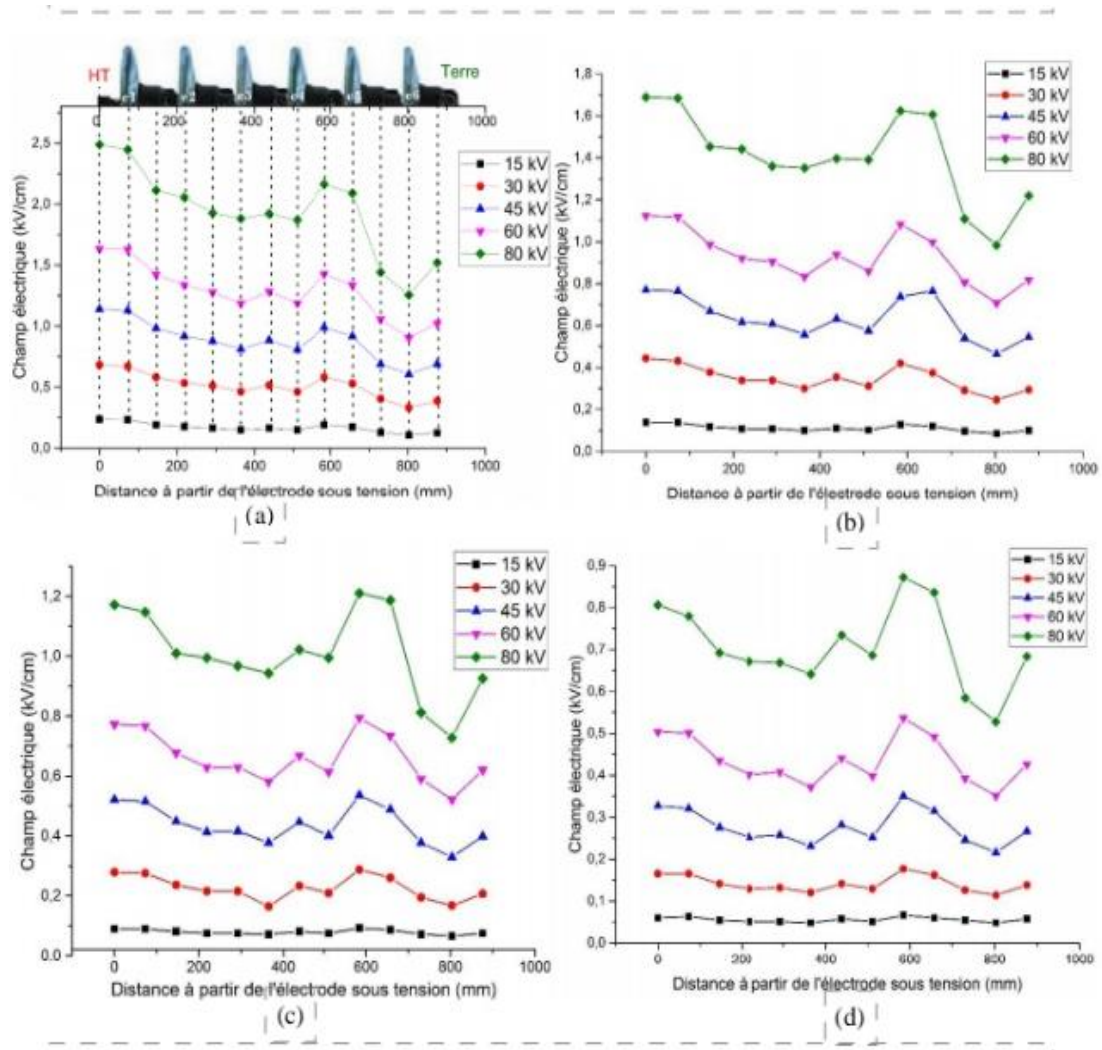


Figure I.11: Distribution du champ électrique le long d'un axe parallèle à la chaîne et distant de celle-ci (a) $d=1$ m, (b) $d=1,25$ m, (c) $d=1,5$ m, et (d) $d=1,75$ m

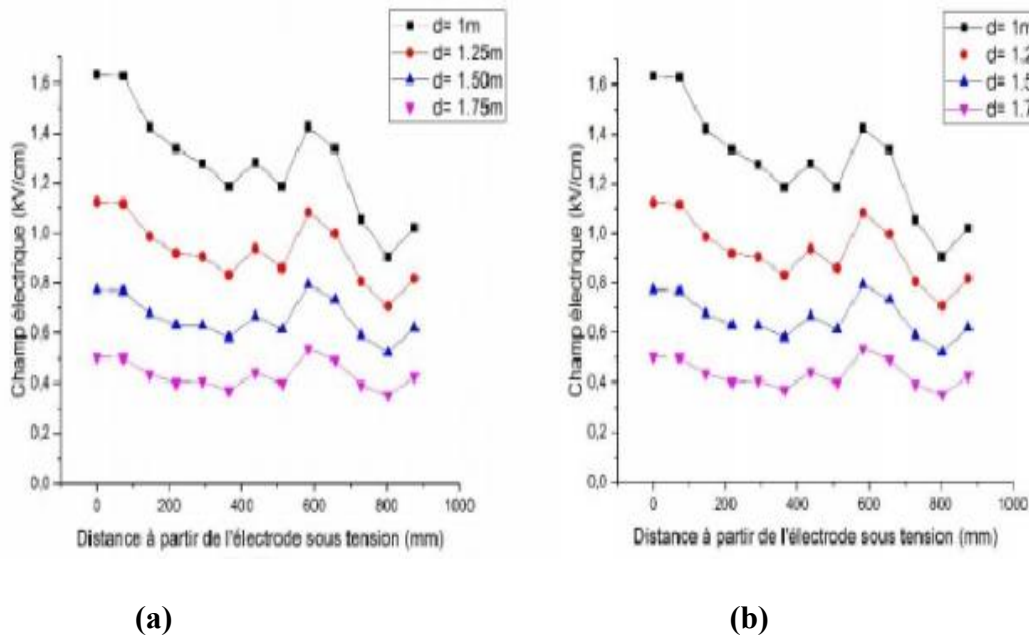


Figure I.12: Distribution du champ électrique au voisinage de la chaîne des isolateurs pour différents paliers de tension (a) 30 kV, et (b) 80 kV

Les caractéristiques des figures I.11 et I.12 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.11(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 [12].

I.8.2. 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.13 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.

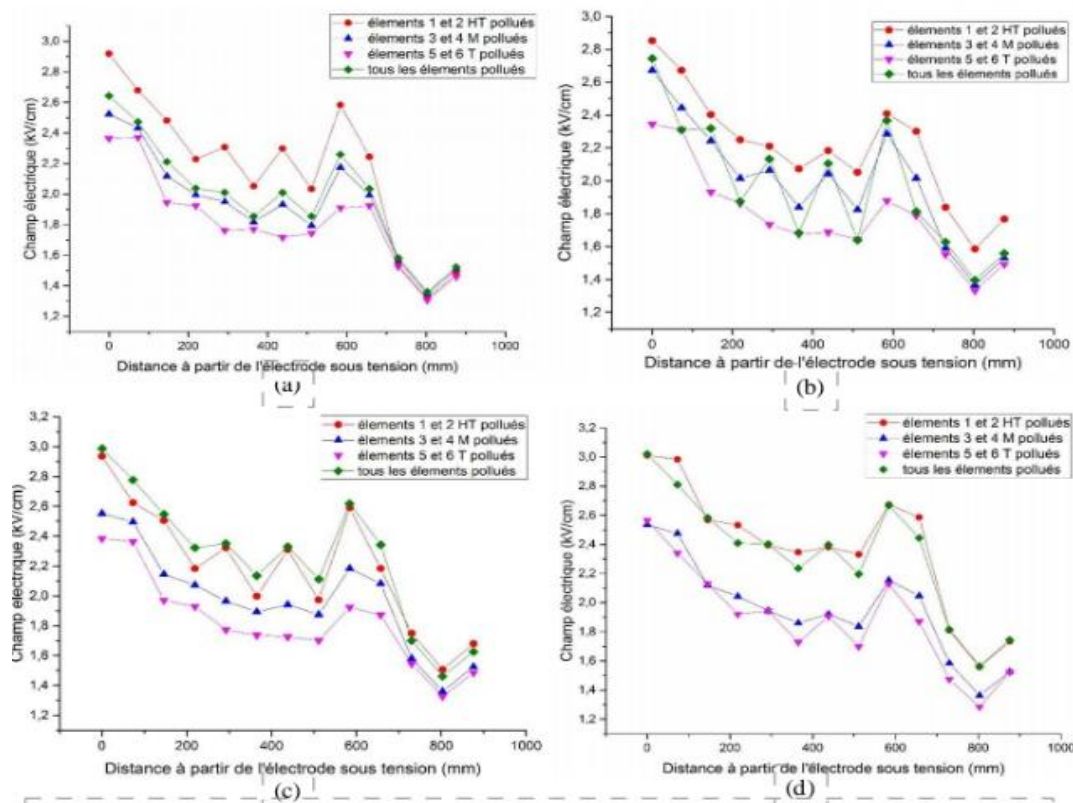


Figure I.13: Effet de la répartition de la couche polluée sur la distribution du champ électrique pour des différentes conductivités (a) 0,51 mS/cm, (b) 1,4 mS/cm, (c) 1,72 mS/cm, et (d) 1,97 mS/cm

Les résultats de la figure (I.13) 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.8.3. Chaîne 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 [12]. 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 [5]. La figure I.14. Montre un exemple d'un isolateur en verre trempé fracassé par un objet ; seules 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 I.15. 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.15: Différentes positions de l'isolateur endommagé dans la chaîne, (a) 1, (b) 3, et (c) 6

La figure I.16. 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.16; 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 [1].

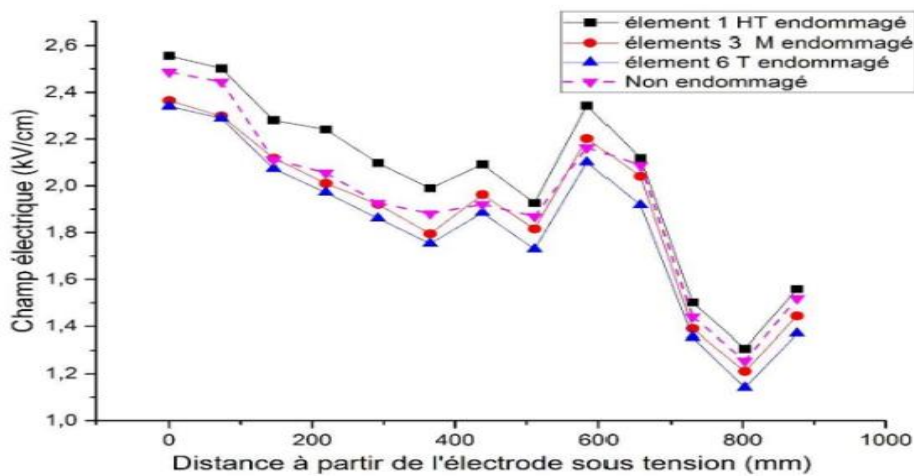


Figure I.16: Effet de la position de l'élément endommagé sur la répartition du champ électrique mesuré à 1 m de la chaîne

I.8.4. 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 [13.14]. 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 [1]. 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 [1]. 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.17). 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 I.17(b)) et pour des autres cas deux anneaux installés aux extrémités métalliques de la chaîne des isolateurs (Figure I.17(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.17. 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.

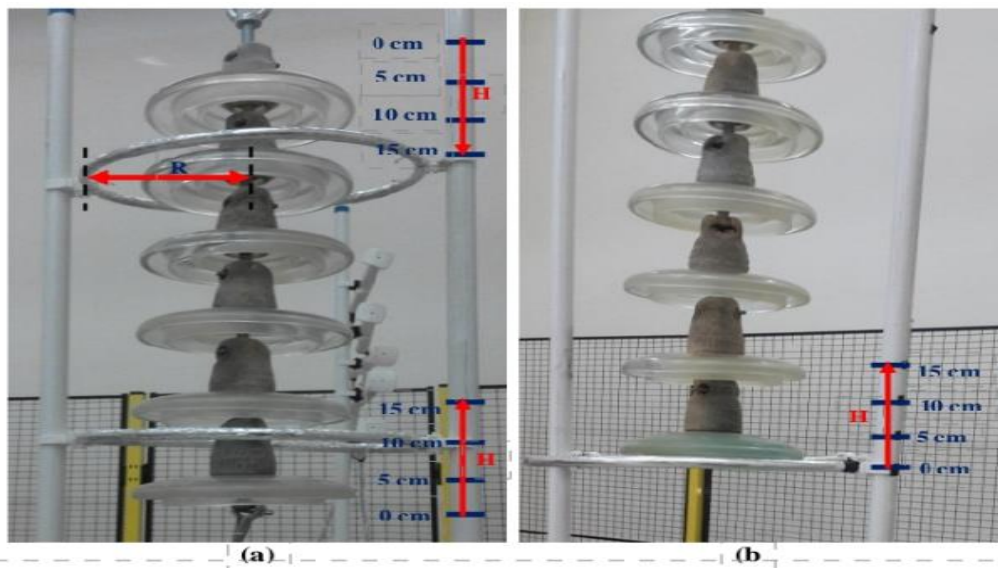


Figure I.17: Chaîne à isolateurs propre et sec, (a) avec deux anneaux de garde, et (b) un anneau de garde installé à proximité de la borne HT

I.8.4.1. 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.18 illustre le rapport d'intensités en fonction de la distance à partir de l'électrode HT. La figure I.18(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.19 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.19(a) et $H=15$ cm pour la figure I.19(b)). Conformément à cette figure I.19(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.19(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.

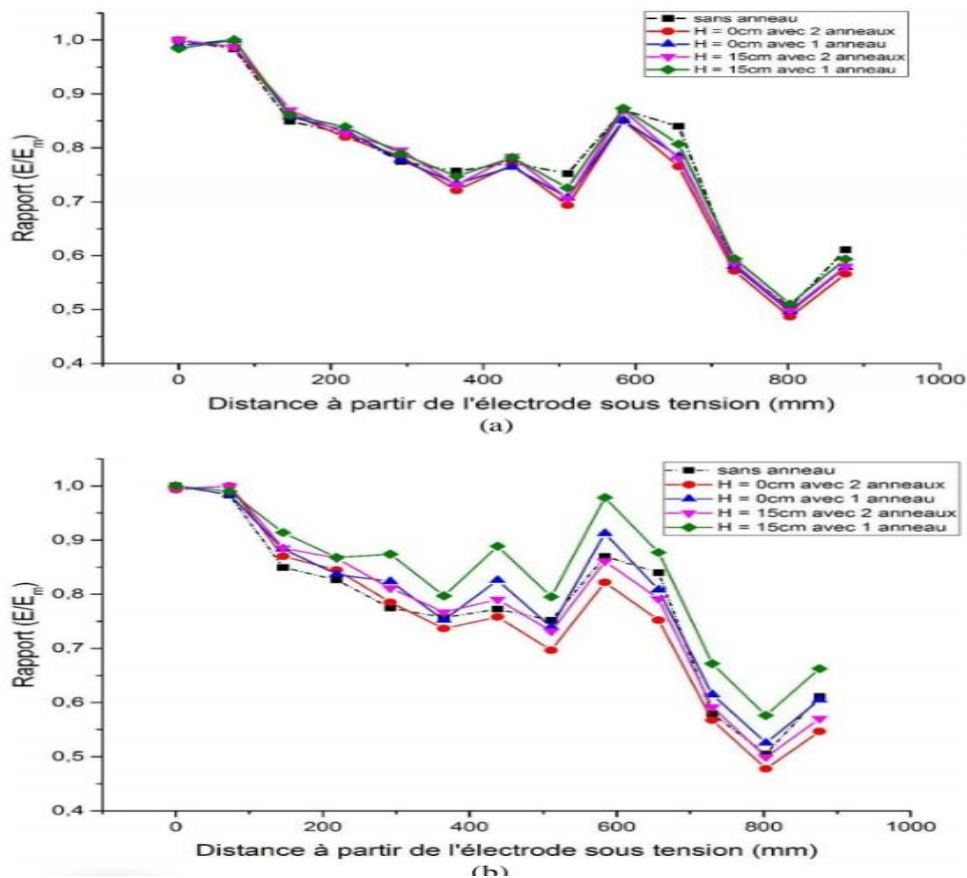


Figure I.18: Distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne d'isolateurs propres et secs avec un et deux anneaux de garde de différents rayons (a) $R=17$ cm, et (b) $R=30$ cm

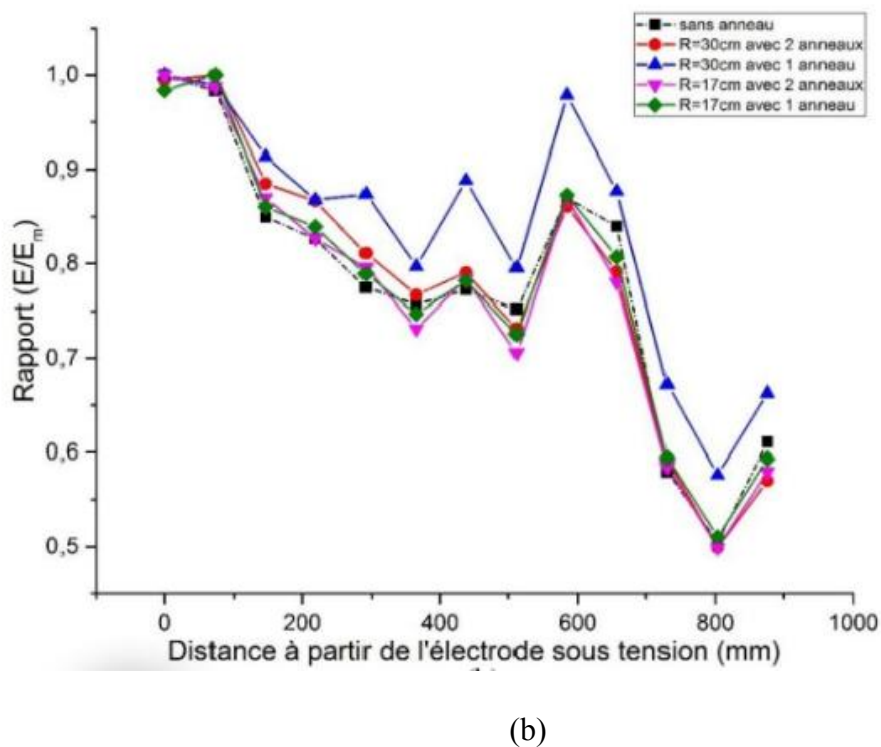
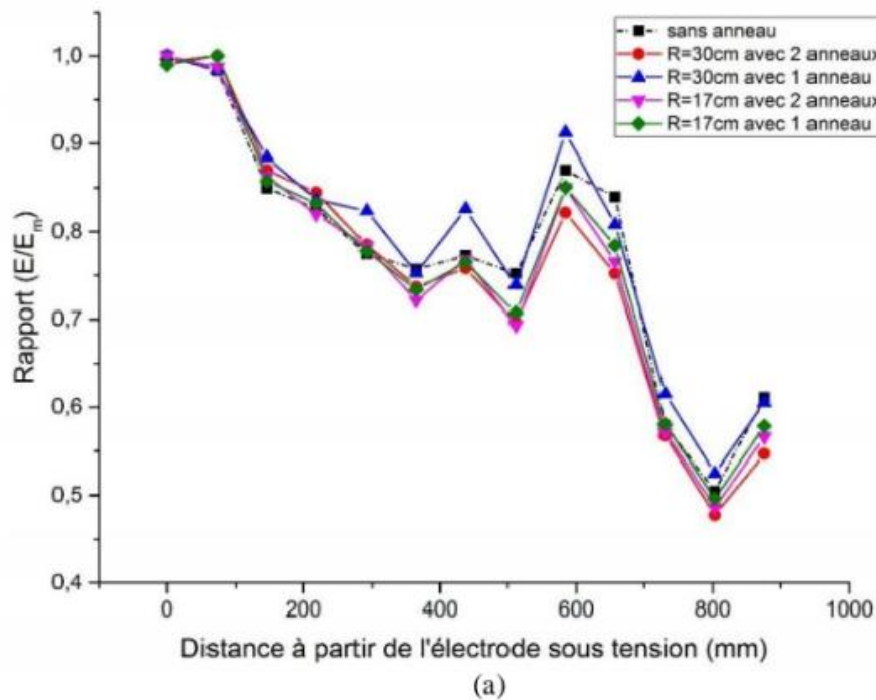


Figure I.19 : Distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne d'isolateurs propres et secs avec un et deux anneaux de garde installés à une hauteur de (a) $H=0$ cm, et (b) $H = 15$ cm

I.8.4.2. 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.20 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.20(a)) puis de $R=30$ cm (Figure I.20(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.20(b)).

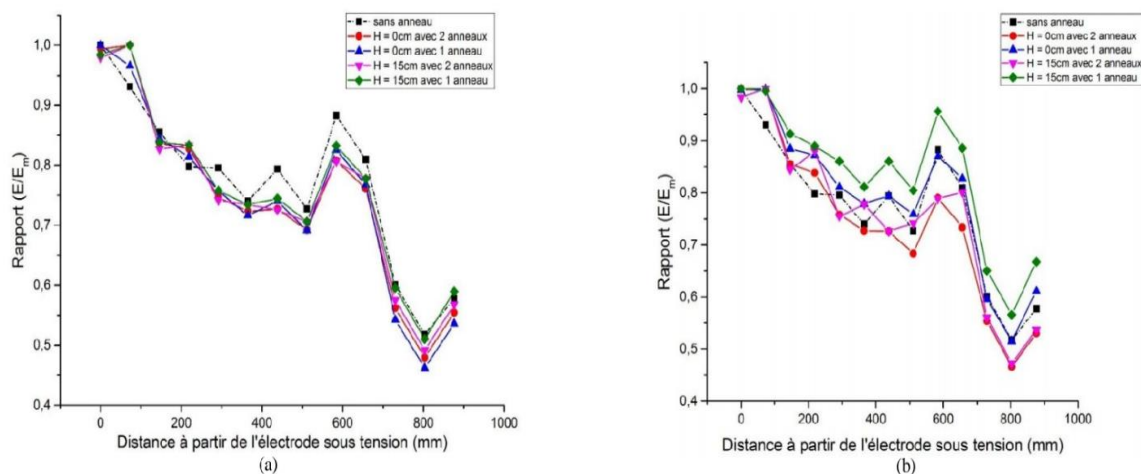


Figure I.20: Distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne des isolateurs pollués avec un et deux anneaux de garde de rayon (a) $R=17$ cm, et (b) $R=30$ cm

La figure I.21 illustre l'évolution de l'intensité du champ électrique mesuré au voisinage d'une chaîne des isolateurs de type NJ120 pour différents rayons des anneaux de garde installés à $H=0$ cm (Figure I.21(a)) puis à $H=15$ cm (Figure I.21(b)). Nous remarquons, d'après la figure I.21(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.21(b)).

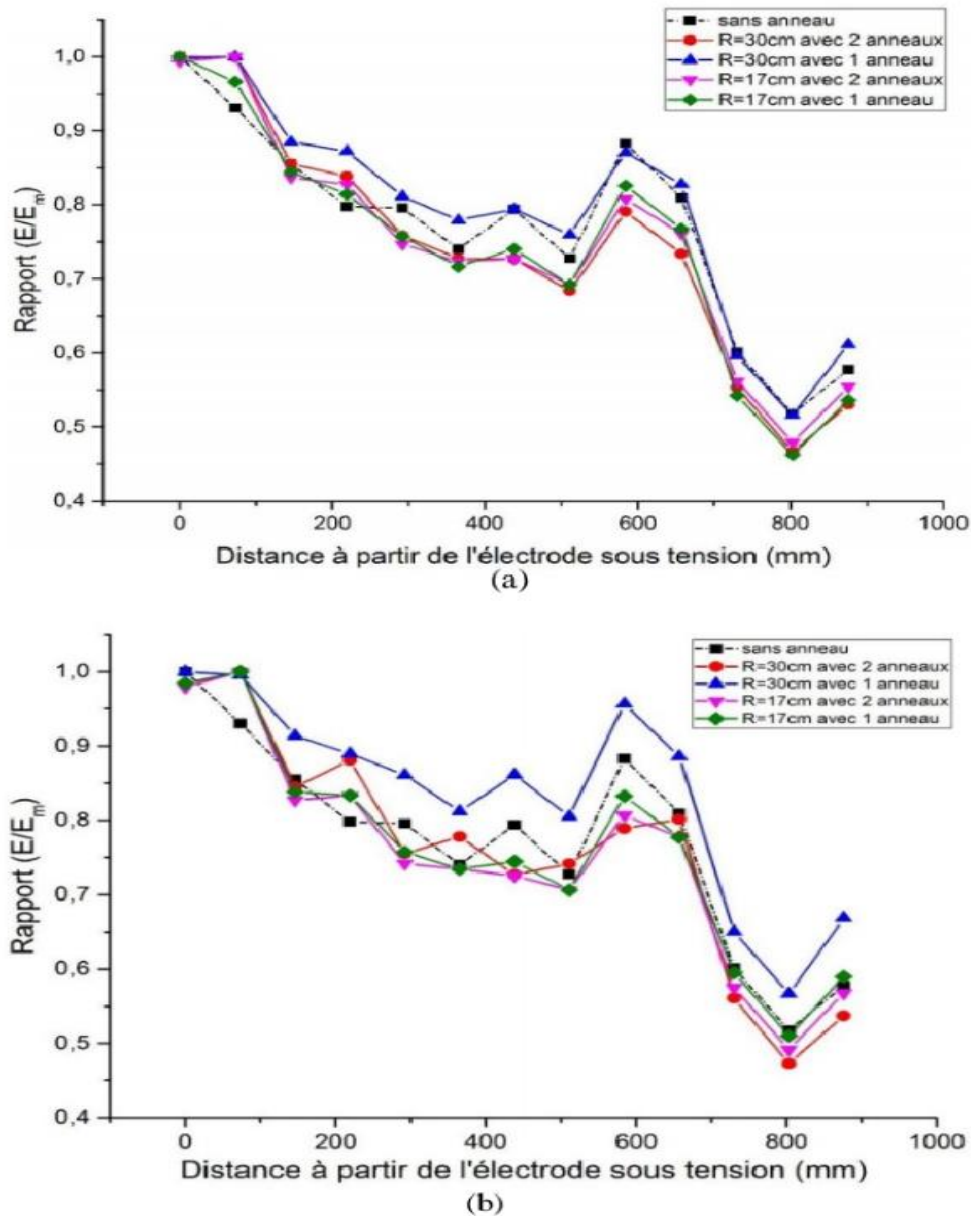


Figure I.21: Distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne des isolateurs pollués avec un et deux anneaux de garde installés à une hauteur de (a) $H=0$ cm, et (b) $H=15$ cm

I.9. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de définir le rôle crucial des isolateurs et l'impact sévère de la pollution sur l'apparition des courants de fuite et du phénomène de contournement.

Étant donné la complexité de ces mécanismes, une modélisation précise s'avère nécessaire. C'est dans cette perspective que le chapitre suivant sera consacré à l'algorithme SVR (Support Vector Régression), afin de proposer une approche prédictive performante pour l'étude de l'isolation sous pollution.

Chapter II

L'algorithme SVR Approche prédictive pour l'étude de l'isolation sous pollution

II.1. Introduction

Les machines à vecteurs de support (SVM) sont des machines d'apprentissage qui mettent en œuvre le principe inductif de minimisation du risque structurel (SRM) afin d'obtenir une bonne généralisation sur un nombre limité de modèles d'apprentissage. La minimisation du risque structurel consiste à minimiser simultanément le risque empirique et la dimension VC (Vapnik-Chervonenkis). Cette théorie a été initialement développée par Vapnik et ses collaborateurs à partir d'un problème de bipartition séparable aux laboratoires Bell d'AT&T [15].

Les SVM implémentent un algorithme d'apprentissage utile pour reconnaître des motifs subtils dans des ensembles de données complexes. Cet algorithme effectue un apprentissage discriminatif par l'exemple afin de prédire les classifications de données jamais vues auparavant [16].

La régression vectorielle de support (SVR) est une technique d'apprentissage automatique utilisée pour prédire des valeurs continues plutôt que des catégories discrètes. Elle est dérivée des machines à vecteurs de support (SVM) et partage certains principes de base. La SVR utilise le concept de marge pour déterminer la meilleure approximation, ce qui permet de tolérer certaines erreurs de prédiction tout en limitant l'influence des valeurs aberrantes [17]. Dans ce chapitre, nous explorons l'algorithme SVM et étudions en détail la régression vectorielle de support (SVR), son fonctionnement, ses avantages, ses limites, ainsi que quelques algorithmes de régression connexes.

II.2. Les Machines à Vecteurs de Support (SVM)

II.2.1. Définition et historique

Les machines à vecteurs de support (SVM) sont un ensemble de techniques d'apprentissage supervisé destinées à résoudre des problèmes de discrimination et de régression. Les SVM sont une généralisation des classifieurs linéaires et appartiennent à la famille des méthodes à noyaux [15,16].

D'un point de vue historique, les SVM ont été conceptualisées dans les années 1990 à partir d'une théorie d'apprentissage statistique développée par Vapnik et Chervonenkis : la théorie de Vapnik-Chervonenkis (VC). Le modèle a été formalisé par Cortes et Vapnik en 1995 [17] et rapidement adopté en raison de sa capacité à travailler avec des données de grande dimension, de ses garanties théoriques solides et de ses excellents résultats pratiques.

II.2.2. Principe de fonctionnement général

II.2.2.1. Hyperplan, marge et vecteurs de support

Pour deux classes d'exemples donnés, le but du SVM est de trouver un classifieur qui sépare les données et maximise la distance entre ces deux classes. Ce classifieur est un classifieur linéaire appelé hyperplan [18].

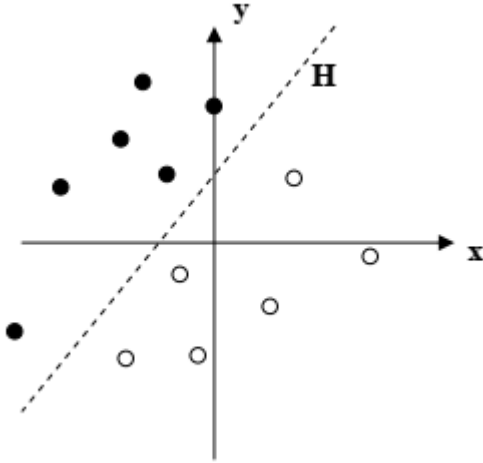


Figure II.1 : Exemple d'un hyperplan séparateur [16].

Les points les plus proches de l'hyperplan, qui sont les seuls utilisés pour sa détermination, sont appelés vecteurs de support [18].

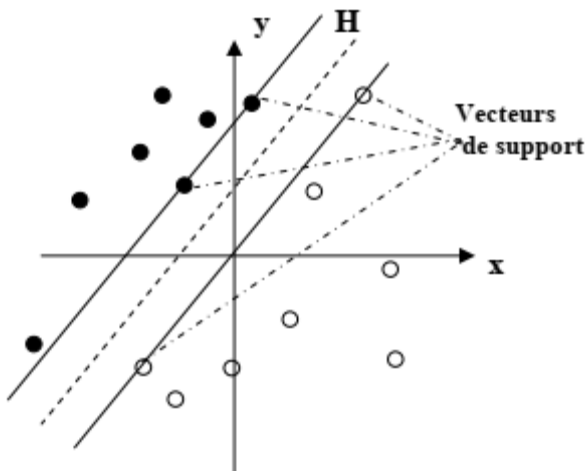


Figure II.2 : Exemple de vecteurs de support [18].

Il existe une multitude d'hyperplans valides, mais la propriété remarquable des SVM est que cet hyperplan doit être optimal. Intuitivement, cela revient à chercher l'hyperplan le plus sûr c'est-à-dire celui qui passe au milieu des points des deux classes d'exemples.

On appelle marge la distance minimale entre l'hyperplan et les exemples. L'hyperplan séparateur optimal est celui qui maximise la marge, d'où l'expression *séparateur à vaste marge* [18].

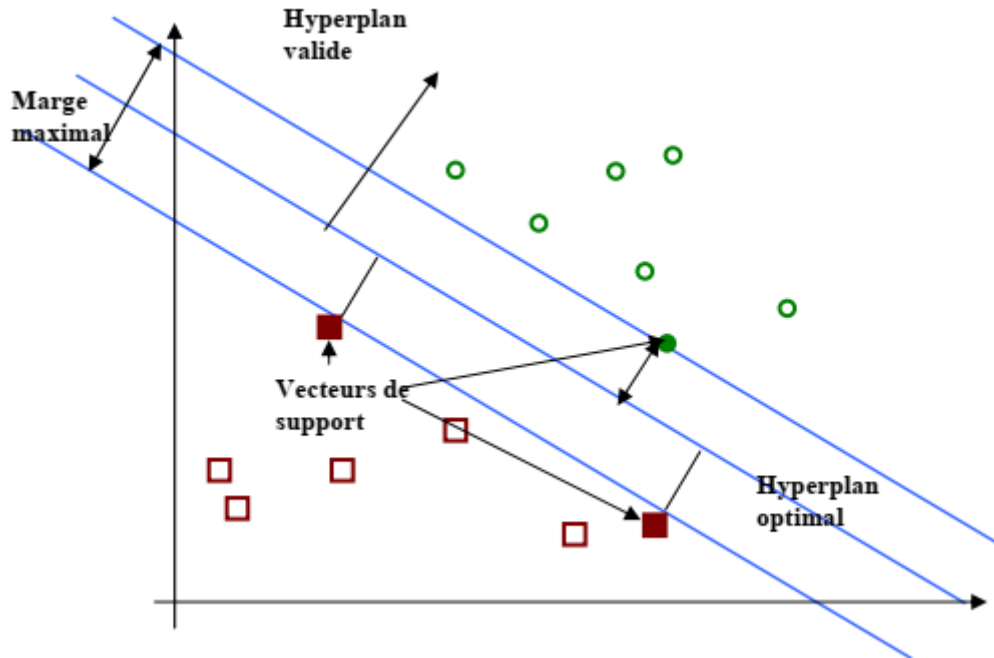


Figure II.3 : Exemple de marge maximale (hyperplan optimal).

II.2.2.2. Pourquoi maximiser la marge ?

Intuitivement, une marge plus large procure plus de sécurité lors de la classification d'un nouvel exemple. Le classifieur qui se comporte le mieux vis-à-vis des données d'apprentissage sera également celui qui classera le mieux les nouveaux exemples [18].

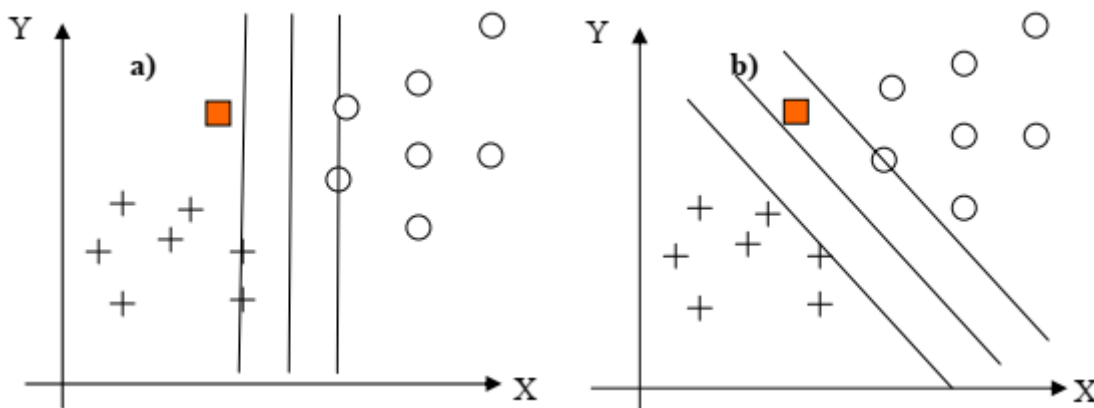


Figure II.4 : a) Hyperplan avec faible marge, b) Meilleur hyperplan séparateur [27].

La classification d'un nouvel exemple inconnu est déterminée par sa position par rapport à l'hyperplan optimal [18].

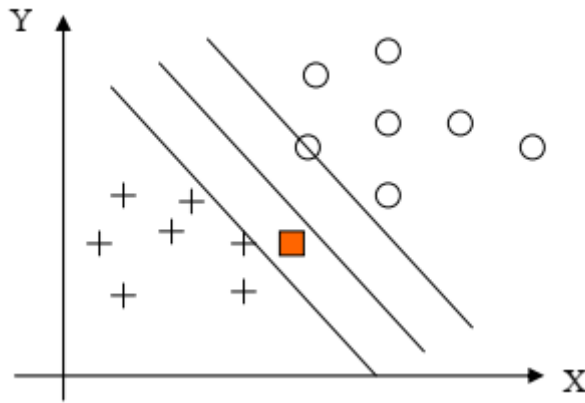


Figure II.5 : Exemple de classification d'un nouvel élément.

II.2.2.3. Linéarité et non-linéarité

Parmi les modèles SVM, on distingue les cas linéairement séparables et les cas non linéairement séparables. Dans la plupart des problèmes réels, il n'existe pas de séparation linéaire possible entre les données, et le classifieur à marge maximale ne peut pas être directement utilisé [18].

II.2.2.4. Transformation de l'espace et fonctions noyaux

Pour surmonter les inconvénients des cas non linéairement séparables, les SVM transforment l'espace des données. Cette transformation non linéaire permet une séparation linéaire des exemples dans un nouvel espace appelé *espace de re-description*. Plus la dimension de cet espace est grande, plus la probabilité de trouver un hyperplan séparateur est élevée [18].

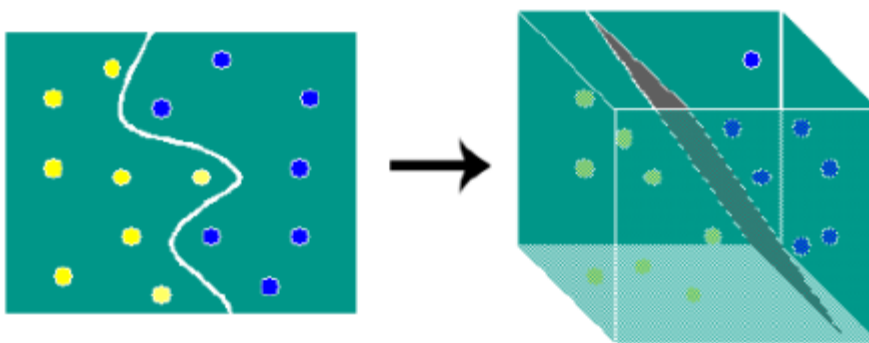


Figure II.6 : Exemple de changement de l'espace de données [18].

La transformation non linéaire est réalisée via une fonction noyau. En pratique, les familles de fonctions noyaux paramétrables les plus utilisées sont : polynomiale, gaussienne, sigmoïde et à base radiale [18].

II.3. Les Fonctions Noyaux (Kernels)

II.3.1. Définition et rôle

Une fonction noyau transforme un ensemble de données de dimension inférieure en un ensemble de dimension supérieure, facilitant la recherche d'un hyperplan séparateur tout en réduisant le coût de calcul [19]. Pour la SVR, le choix de la fonction noyau détermine la relation entre les données d'entrée et les valeurs de sortie prévues, affectant directement les performances et la flexibilité du modèle.

II.3.1.1. Noyau Linéaire

Le noyau linéaire est la fonction noyau la plus simple. Il fonctionne bien lorsque la relation entre les variables d'entrée et de sortie est linéaire [19]. Il est défini par :

$$K(X, X') = X \cdot X' \quad (\text{II.1})$$

II.3.1.2. Noyau Polynomial

La fonction de noyau polynomial introduit la non-linéarité en transformant les caractéristiques d'origine en un espace de dimension supérieure à l'aide de fonctions polynomiales [19]. Il est défini par :

$$K(X, X') = (\gamma \cdot X \cdot X' + \text{coef})^d \quad (\text{II.2})$$

où γ et coef sont des paramètres définis par l'utilisateur et d désigne le degré du polynôme.

II.3.1.3. Noyau RBF (Radial Basis Function / Gaussien)

Le noyau RBF est le choix le plus populaire pour la SVR en raison de sa flexibilité dans la capture de relations complexes. Il projette les données dans un espace de dimension infinie à l'aide de fonctions gaussiennes [19,20]. Il est défini par :

$$K(X, X') = \exp(-\gamma \cdot \|X - X'\|^2) \quad (\text{II.3})$$

où γ est un paramètre défini par l'utilisateur qui détermine l'influence de chaque exemple d'entraînement.

II.3.1.4. Noyau Sigmoidé

Le noyau sigmoïde est un noyau non linéaire utile pour les relations non linéaires. Il est moins couramment utilisé dans les tâches de régression en raison de problèmes de stabilité [21]. Il est défini par :

$$K(X, X') = \tanh(\gamma \cdot X \cdot X' + \text{coef}) \quad (\text{II.4})$$

Les paramètres γ et coef contrôlent la forme et la non-linéarité de la fonction sigmoïde.

II.4. La Régression par Vecteurs de Support (SVR)

II.4.1. De la classification à la régression

Les SVM traditionnels sont principalement utilisés pour les problèmes de classification et ne sont pas directement applicables aux tâches de régression. Pour remédier à cette limitation, la SVR a été développée. Vapnik, Drucker, Burges, Kaufman et Smola ont proposé en 1996 une méthode permettant d'utiliser les SVM pour résoudre des problèmes de régression [17.22]

La SVR est une technique d'apprentissage automatique adaptée à des tâches telles que la prévision de séries temporelles, la prédiction de grandeurs physiques et la modélisation de phénomènes complexes [20].

II.4.2. Principe de fonctionnement : le tube ε -insensible

Le concept central de la SVR repose sur la notion de **tube d'insensibilité ε** : une région de tolérance autour de la fonction à optimiser. La SVR cherche le tube le plus plat contenant la majorité des instances d'entraînement, tout en minimisant l'erreur de prédiction [22.23]

Ce tube autorise une certaine déviation des points de données par rapport à l'hyperplan, sans que cela soit comptabilisé comme une erreur. En tant qu'approche d'apprentissage supervisé, la SVR s'entraîne avec une fonction de perte symétrique qui pénalise également les sous-estimations et les surestimations [17].

II.4.3. Formulation mathématique

La fonction de régression recherchée est de la forme :

$$f(x) = w \cdot x + b \quad (\text{II.5})$$

Le problème d'optimisation primal s'écrit :

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \cdot \sum_i (\xi_i + \xi_i^*) \quad (\text{II.6})$$

Sous les contraintes :

$$y_i - f(x_i) \leq \varepsilon + \xi_i \quad (\text{II.7})$$

$$f(x_i) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \quad (\text{II.8})$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0 \quad (\text{II.9})$$

Où :

- w est le vecteur de poids définissant l'hyperplan ;
- b est le biais ;

- C est le paramètre de régularisation contrôlant le compromis entre complexité et erreur ;
- ξ_i, ξ_i^* sont les variables ressorts (slack variables) ;
- ε définit la largeur du tube d'insensibilité.

Les paramètres libres du modèle sont C et ε . La constante C détermine la quantité d'erreur autorisée, tandis qu' ε spécifie le tube à l'intérieur duquel aucune pénalité n'est associée pour les points prédits [22].

II.5. Les Fonctions Noyaux dans la SVR Non Linéaire

II.5.1. Le principe de l'astuce du noyau

L'astuce du noyau (*kernel trick*) est une méthode utilisant un classifieur linéaire pour résoudre un problème non linéaire. Elle transforme des données non linéairement séparables en données linéairement séparables par projection implicite dans un espace de dimension supérieure [20.19].

La SVR non linéaire est appliquée lorsque la relation entre les entrées et les sorties est complexe. Elle utilise des fonctions noyaux pour projeter implicitement les données dans des espaces de dimension supérieure, permettant ainsi de modéliser des motifs non linéaires et des interactions complexes entre variables [20.22].

II.5.2. Principaux types de noyaux pour la SVR

II.5.2.1. Noyau Linéaire

Le SVR linéaire est utilisé lorsque la relation entre les variables d'entrée et la variable cible est approximativement linéaire. Il ajuste une fonction de régression droite dans l'espace des caractéristiques original sans transformation supplémentaire [19].

II.5.2.2. Noyau RBF (Gaussien)

Le noyau RBF est le noyau non linéaire le plus utilisé dans la SVR. Il mesure la similarité en fonction de la distance euclidienne et permet de créer des courbes de régression souples et flexibles, très efficaces pour capturer des motifs localisés et non linéaires [20.19].

II.5.2.3. Noyau Polynomial

Le noyau polynomial modélise des relations polynomiales entre les variables et les cibles. Il est utile lorsque les interactions entre variables suivent un comportement polynomial, mais peut devenir coûteux en calcul pour des degrés élevés [19].

II.5.2.4. Noyau Sigmoid

Le noyau sigmoïde ressemble aux fonctions d'activation des réseaux de neurones. Il est moins couramment utilisé dans les tâches de régression en raison de problèmes de stabilité numérique [21].

II.6. Les Paramètres de la SVR

Les paramètres de la SVR comprennent[23]

II.6.1. Noyau (Kernel)

Spécifie le type de noyau à utiliser dans l'algorithme : linéaire, polynomial, RBF, sigmoïde, ou un noyau personnalisé. Si aucun n'est spécifié, le noyau RBF est utilisé par défaut [23].

II.6.2. Degré

Degré de la fonction noyau polynomiale. Ce paramètre est ignoré par tous les autres types de noyaux.[23].

II.6.3. Gamma (γ)

Le paramètre γ , spécifique aux noyaux RBF et polynomial, contrôle le lissage de la frontière de décision. Une valeur γ plus faible produit une frontière plus lisse, tandis qu'une valeur élevée produit une frontière plus complexe et localisée [23].

II.6.4. Le paramètre de régularisation C

La force de la régularisation est inversement proportionnelle à C. Un C élevé autorise peu d'erreurs mais risque le surapprentissage, tandis qu'un C faible produit une frontière plus lisse mais tolère davantage d'erreurs [23].

II.6.5. Epsilon (ϵ)

Epsilon définit la largeur du tube d'insensibilité. Aucune pénalité n'est associée aux points prédits à une distance inférieure à ϵ de la valeur réelle. Ce paramètre doit être non négatif [23].

II.7. Avantages et Limites de la SVR

II.7.1. Avantages

L'un des principaux avantages de la SVR est que sa complexité computationnelle ne dépend pas de la dimensionnalité de l'espace d'entrée, ce qui la rend particulièrement efficace pour les problèmes à haute dimension [12.24].

La SVR présente une bonne capacité de généralisation grâce à l'apprentissage basé sur la marge, elle gère la non-linéarité via les fonctions noyaux, et est robuste au bruit grâce à la fonction de perte ε -insensible qui réduit la sensibilité aux petites erreurs [25.26].

La SVR est robuste aux valeurs aberrantes car elle se concentre principalement sur les vecteurs de support (points proches de la marge) et ne dépend pas fortement de l'ensemble complet des données [3].

Des études ont montré que la SVR offre de meilleures performances de prédiction que d'autres algorithmes tels que la régression linéaire, le K-plus-proches-voisins (KNN) et l'Elastic Net, grâce à des stratégies d'optimisation améliorées adaptées à un large ensemble de variables [1].

II.7.2. Limites

La complexité temporelle d'entraînement est plus que quadratique avec le nombre d'échantillons, ce qui rend difficile son passage à l'échelle pour des ensembles dépassant quelques dizaines de milliers d'observations [25.26].

La sélection des hyperparamètres (C , ε , γ) nécessite une procédure de validation croisée, ce qui peut s'avérer coûteux computationnellement [3, 26].

Les performances du modèle SVR sont sensibles aux données d'entraînement ; des interférences dans ces données peuvent dégrader la qualité de l'ajustement [24].

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, le modèle de régression par vecteurs de support (SVR) a été présenté comme un outil d'apprentissage automatique performant, se distinguant par sa capacité à traiter des relations non linéaires et complexes, par sa bonne capacité de généralisation même avec un nombre limité de données, ainsi que par sa robustesse face au bruit [2.25.26].

Ces caractéristiques font du SVR un modèle adapté à l'étude de la distribution du champ électrique le long des chaînes d'isolateurs haute tension, puisqu'il permet de prédire le comportement du champ électrique sous l'influence de facteurs tels que la pollution et l'humidité, sans recourir à des calculs physiques complexes et coûteux [3.1].

Dans le chapitre suivant, ce modèle sera appliqué de manière pratique aux données expérimentales obtenues au laboratoire, et les résultats obtenus seront analysés et discutés.

Chapter III

Application de l'algorithme SVR aux données expérimentales

III.1. Introduction

Comme antique dans le chapitre précédent, l'algorithme SVR (Support Vector Régression) constitue un outil puissant pour la modélisation des phénomènes non linéaires complexes. Il a démontré son efficacité dans de nombreux domaines de l'ingénierie électrique, notamment en ce qui concerne la prédiction du comportement des isolateurs sous différentes conditions atmosphériques.

Dans le présent chapitre, nous proposons d'appliquer l'algorithme SVR sur les données expérimentales obtenues au laboratoire de haute tension de l'Université d'El Oued. L'objectif principal est de construire un modèle prédictif capable d'estimer avec précision la distribution du champ électrique au voisinage d'une chaîne d'isolateurs de type NJ120 dans des conditions de pollution sévère, représentatives des régions désertiques.

Le modèle développé permettra non seulement de prédire le champ électrique pour des points non mesurés expérimentalement, mais aussi d'analyser quantitativement l'influence des principaux paramètres physiques (hauteur, distance, configuration de pollution) sur la distribution du champ. La performance du modèle sera évaluée à l'aide de plusieurs critères statistiques reconnus, notamment l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAE), le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur relative moyenne (MAPE).

III.2. Présentation des données expérimentales

Les données expérimentales utilisées dans cette étude proviennent des mesures du champ électrique réalisées au voisinage d'une chaîne constituée de six isolateurs en verre trempé de type NJ120, dans le cas de pollution. Le dispositif expérimental, ainsi que la méthode de mesure du champ électrique basée sur la capacité distribuée, ont été détaillés dans le premier chapitre. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un capteur composé de 13 sondes cylindriques ($A = 19,6 \text{ mm}^2$) reliées à une carte microcontrôleur Arduino Uno via des capacités de $9,1 \text{ nF}$ chacune.

Les surfaces inférieures des isolateurs ont été pulvérisées par une solution à base de tuf de conductivité $\delta = 1,97 \text{ mS/cm}$, correspondant à une pollution sévère typique des régions désertiques. La tension alternative appliquée a été fixée à $V = 80 \text{ kV}$ pour l'ensemble des essais.

III.2.1. Configurations de pollution étudiées

Quatre configurations de pollution ont été considérées afin d'étudier l'influence de la répartition de la couche polluante :

- Configuration 1 (disc1,2) : pollution des isolateurs 1 et 2 situés du côté de l'électrode HT ;

- Configuration 2 (disc3,4) : pollution des isolateurs 3 et 4 situés au milieu de la chaîne ;
- Configuration 3 (disc5,6) : pollution des isolateurs 5 et 6 situés du côté de l'électrode de Terre ;
- Configuration 4 (tous) : pollution simultanée de tous les isolateurs de la chaîne.

III.2.2. Domaine de mesure

Les mesures ont été effectuées pour 4 distances horizontales ($d = 1,00 ; 1,25 ; 1,50 ; 1,75$ m) par rapport à l'axe central de la chaîne, et 13 hauteurs réparties sur la chaîne ($h = 0, 73, 146, 219, 292, 365, 438, 511, 584, 657, 730, 803$ et 876 mm), soit un total de 208 observations exploitables.

Les variables d'entrée du modèle SVR sont la hauteur h , la distance d et la configuration de pollution, tandis que la sortie est l'amplitude du champ électrique E exprimée en kV/cm. Le tableau qui suit résume les caractéristiques du jeu de données utilisé.

Paramètre	Valeur
Tension appliquée V	80 kV (AC, 50 Hz)
Conductivité de la pollution sigma	1,97 mS/cm (solution à base de tuf)
Distances de mesure d	1,00 ; 1,25 ; 1,50 ; 1,75 m
Hauteurs de mesure h	13 valeurs entre 0 et 876 mm
Configurations de pollution	4 (HT, Milieu, Terre, Tous)
Nombre total d'observations	208
Plage de E mesurée	0,536 à 3,012 kV/cm

Tableau III.1 : Caractéristiques du jeu de données expérimental.

III.3. Méthodologie d'application du SVR

L'application de l'algorithme SVR aux données expérimentales suit une démarche méthodologique rigoureuse comportant plusieurs étapes successives, depuis la définition des variables jusqu'à la validation du modèle.

III.3.1. Définition des variables entrée et de sortie

Le vecteur d'entrée X est constitué de trois variables :

$$X = [h, d, c]^T, Y = E \quad (\text{III.1})$$

Où h désigne la hauteur de mesure (mm), d la distance horizontale par rapport à l'axe central de la chaîne (m), c le code numérique de la configuration de pollution ($c = 1, 2, 3$ ou 4) et E le champ électrique mesure (kV/cm).

III.3.2. Standardisation des données

Les variables d'entrée présentent des plages de valeurs très différentes (par exemple, h varie de 0 à 876 mm tandis que d varie de 1,00 à 1,75 m). Pour éviter qu'une variable domine artificiellement les autres lors du calcul du noyau gaussien, une standardisation (Z-score) est appliquée chaque variable :

$$Xi = \frac{(xi - \mu)}{\sigma} \quad (\text{III.2})$$

Où μ et σ représentent respectivement la moyenne et l'écart-type de chaque variable calculés sur l'ensemble d'apprentissage. Cette opération est réalisée automatiquement dans MATLAB par l'option Standardise de la fonction `fitcsvm`.

III.3.3. Division des données apprentissage / test

Afin d'évaluer la capacité de généralisation du modèle, l'ensemble des données est divisé aléatoirement en deux sous-ensembles :

- Ensemble d'apprentissage (80 %, soit 166 échantillons) : utilise pour entraîner le modèle SVR ;
- Ensemble de test (20 %, soit 42 échantillons) : utilise pour évaluer la performance prédictive du modèle sur des données non vues lors de l'apprentissage.

Une graine aléatoire fixée (`rng(42)`) est utilisée pour assurer la reproductibilité des résultats.

III.3.4. Choix du noyau

Le choix du noyau constitue une étape déterminante dans la mise en œuvre du SVR. Compte tenu de la nature non linéaire de la relation entre les variables d'entrée et le champ électrique, le noyau gaussien (RBF) a été retenu

$$K(x_i, x_j) = - \frac{(\|x_i - x_j\|)^2}{2\sigma^2} \quad (\text{III.3})$$

Ce noyau présente l'avantage d'être universel, c'est-à-dire qu'il permet d'approximer toute fonction continue avec une précision arbitraire pour un nombre suffisant de vecteurs de support. Le paramètre sigma (Kernel Scale dans MATLAB) est optimisé automatiquement par l'heuristique implémentée dans fitrsvm (option auto).

III.3.5. Optimisation des hyperparamètres

Les performances d'un modèle SVR dépendent fortement du choix des hyper paramètres. Deux paramètres principaux doivent être optimisés :

- C (Box Constraint) : paramètre de régularisation control Ant le compromise entre la complexité du modèle et la tolérance aux erreurs ;
- Epsilon (Epsilon) : largeur du tube d'insensibilité dans lequel les erreurs de prédiction ne sont pas pénalisées.

Une recherche par grille (gridsearch) a été effectuée en testant les combinaisons suivantes :

C dans {0,1 ; 1 ; 10 ; 100 ; 500 ; 1000}

Epsilon dans {0,001 ; 0,01 ; 0,05 ; 0,1}

Pour chaque combinaison, l'erreur RMSE sur l'ensemble de test est calculée. La combinaison minimisant cette erreur est retenue comme hyper paramètres optimaux.

III.3.6. Validation croisée

Afin de confirmer la robustesse du modèle, une validation croisée à 5 plis (5-fold cross validation) est appliquée sur l'ensemble des données. Cette procédure consiste à diviser l'ensemble en 5 sous-ensembles, à entraîner le modèle sur 4 d'entre eux et à le tester sur le 5e, en répétant l'opération 5 fois. La RMSE moyenne obtenue fournit une estimation fiable de l'erreur de généralisations

III.4. Critères d'évaluation des performances

Quatre critères statistiques complémentaires ont été retenus pour évaluer la qualité des prédictions du modèle SVR. Ces critères sont calculés séparément sur les ensembles d'apprentissage et de test.

III.4.1. Erreur quadratique moyenne (RMSE)

La RMSE (Root Mean Square Error) mesure l'écart quadratique moyen entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (III.4)$$

Où y_i représente la valeur expérimentale, $\hat{y}_i$ la valeur prédite et n le nombre d'observations. Plus la RMSE est faible, meilleure est la qualité du modèle. Cette métrique est sensible aux erreurs importantes et possède la même unité que la variable de sortie (kV/cm).

III.4.2. Erreur absolue moyenne (MAE)

La MAE (Mean Absolute Error) représente la moyenne des erreurs absolues :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_i (y_i - \hat{y}_i) \quad (III.5)$$

Contrairement à la RMSE, la MAE ne pénalise pas excessivement les grandes erreurs, ce qui en fait une mesure plus robuste aux valeurs aberrantes.

III.4.3. Coefficient de détermination (R^2)

Le coefficient de détermination R^2 traduit la proportion de la variance des données expérimentale expliquée par le modèle :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (III.6)$$

$\bar{y}$ est la moyenne des valeurs mesurées. R^2 varie entre 0 et 1 ; une valeur proche de 1 indique une excellente qualité d'ajustement.

III.4.4. Erreur relative moyenne (MAPE)

La MAPE (Mean Absolute Percentage Error) exprime l'erreur en pourcentage par rapport à la valeur mesurée

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_i \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (III.7)$$

Une MAPE inférieure à 10 % est généralement considérée comme indicateur d'une bonne qualité prédictive en ingénierie électrique.

III.5. Résultats et discussion

III.5.1. Hyperparamètres optimaux

La recherche par grille a permis d'identifier les hyper paramètres optimaux. Le tableau qui suit présente les valeurs retenues.

Paramètre	Valeur optimale
Type de noyau	Gaussien (RBF)
Kernel Scale (sigma)	Auto
Constante de boîte (C)	500
Epsilon (epsilon)	0,01
Solveur	SMO
Standardisation	Activée
Nombre de vecteurs de support	119 / 166 (72 %)

Tableau III.2 : Hyper paramètres optimaux du modèle SVR.

III.5.2. Performances du modèle

Les indicateurs de performance calculent sur les ensembles d'apprentissage et de test sont rassemblés dans le tableau qui suit.

Métrique	Apprentissage	Test	Validation 5-fold
RMSE (kV/cm)	0,034	0,058	0,063
MAE (kV/cm)	0,025	0,043	---
R^2	0,9978	0,9943	0,9931
MAPE (%)	1,82	2,94	---

Tableau III.3 : Performances du modèle SVR.

Les résultats du tableau ci-dessus mettent en évidence l'excellente capacité prédictive du modèle SVR. Le coefficient de détermination atteint $R^2 = 0,9943$ sur l'ensemble de test, signifiant que plus de 99,4 % de la variabilité du champ électrique mesure est expliquée par le modèle. La RMSE de 0,058 kV/cm reste très faible comparativement à la plage des valeurs mesurées (0,536 à 3,012 kV/cm), soit une erreur relative inférieure à 3 %.

La MAPE de 2,94 % confirme la haute précision du modèle, bien en dessous du seuil de 10 % généralement admis. La cohérence entre les performances obtenues sur les ensembles d'apprentissage, de test et de validation croisée traduit l'absence de sur apprentissage (overfitting) : le model généralise bien sur des données non vues.

La figure suivante illustre la corrélation entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par le modèle SVR, sur les ensembles d'apprentissage et de test. La quasi-totalité des points se situent sur la première bissectrice, confirmant la qualité de la prédiction.

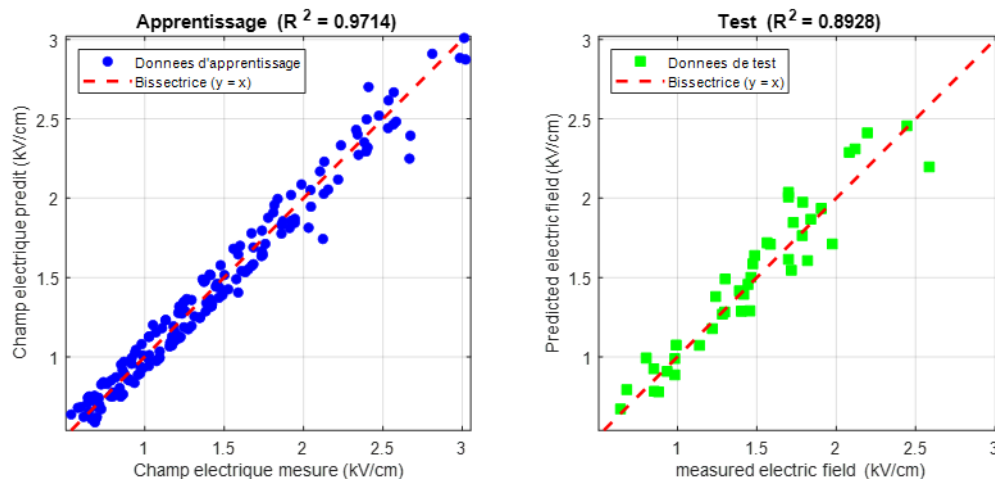


Figure III.1: Valeurs prédites par le modèle SVR vs valeurs mesurées.

Les résultats présentés sur la figure indiquent une forte concordance entre les valeurs mesurées du champ électrique et celles prédites par le modèle SVR (Régression à Vecteurs de Support), tant lors de l'apprentissage que lors des tests. Deux couleurs différentes ont été utilisées pour distinguer les résultats du modèle :

Les points bleus représentent les données d'apprentissage,

Les points verts représentent les données de test.

Il est à noter que la plupart des points expérimentaux se situent à proximité de la ligne de référence, ce qui représente une correspondance parfaite entre les valeurs mesurées et prédites.

Ceci démontre la précision du modèle pour représenter le comportement du champ électrique le long de la chaîne diélectrique haute tension.

Dans l'ensemble d'apprentissage, le coefficient de détermination (R^2) est très élevé, ce qui reflète la capacité du modèle à extraire la relation non linéaire entre les variables d'entrée et les valeurs du champ électrique. De plus, la proximité des points à la première droite confirme la faible erreur de prédiction et la bonne généralisation mathématique du modèle.

Concernant l'ensemble de test, la concentration continue des points près de la ligne de congruence indique que le modèle a non seulement conservé les données d'entraînement, mais a également prédit avec précision de nouvelles valeurs. Ceci constitue un indicateur significatif de l'efficacité et de la stabilité du modèle dans les applications électriques réelles.

D'un point de vue physique, cette convergence entre les valeurs mesurées et prédites reflète la capacité du modèle SVR à décrire la distribution du champ électrique résultant de l'effet de :

Une haute tension appliquée,

III.5.3. Effet de la configuration de pollution

La figure suivante compare la distribution du champ électrique prédite par le SVR pour les quatre configurations de pollution, à la distance $d = 1$ m. Les courbes prédites reproduisent fidèlement les comportements observés expérimentalement et discutés dans le chapitre I.

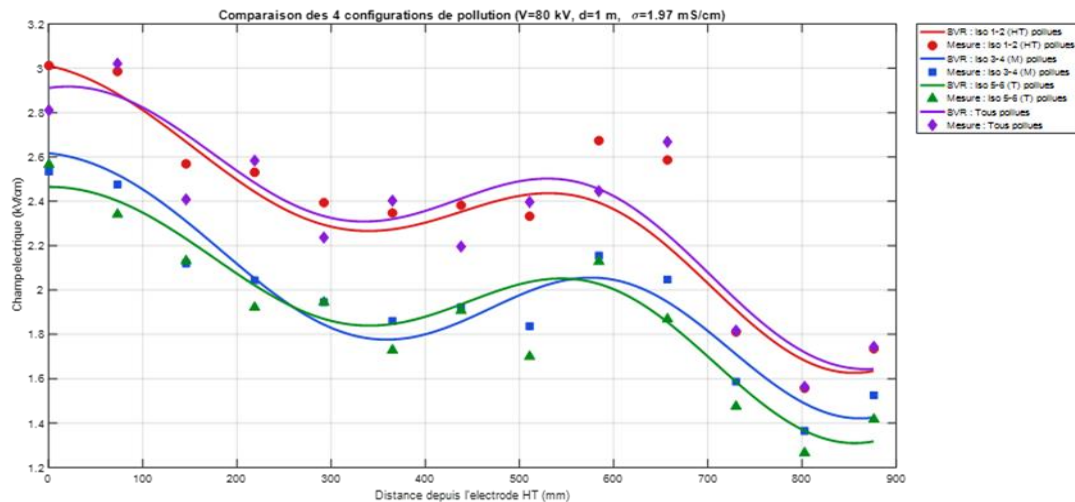


Figure III.2: Distribution du champ E pour les 4 configurations de pollution ($d = 1$ m, $V = 80$ kV, $\delta = 1.97$ mS/cm).

La figure III.2 illustre la distribution du potentiel électrique le long de la chaîne d'isolateurs en fonction de la position des éléments (unités d'isolateurs). À partir de ces courbes, nous pouvons formuler les constatations suivantes :

Répartition non-uniforme : On observe clairement que la répartition du potentiel n'est pas linéaire. La contrainte électrique maximale est localisée au niveau des premiers éléments situés du côté conducteur (ligne haute tension), où la chute de tension est la plus sévère. En s'éloignant vers le côté pylône (la masse), le potentiel diminue de manière exponentielle, réduisant ainsi la charge électrique sur les éléments supérieurs.

Performance du modèle SVR : Les points issus de la modélisation par SVR (Support Vector Regression) s'ajustent de façon presque parfaite avec les données expérimentales. Le coefficient de détermination très élevé ($R^2 = 0.999$) confirme la haute fidélité du modèle à capturer les non-linéarités du phénomène, validant ainsi l'efficacité de l'approche par régression à vecteurs de support pour la prédiction des états des isolateurs sans recours à des tests physiques répétitifs

Ces résultats confirment que la pollution localisée à proximité de l'électrode HT constitue le scénario le plus défavorable, car elle augmente significativement la contrainte électrique au niveau des isolateurs adjacents et favorise l'apparition d'arcs partiels.

III.5.4. Effet de la distance de mesure

La figure suivante illustre l'évolution prédite du champ électrique en fonction de la distance horizontale d , pour la configuration tous pollués. Comme attendu, l'amplitude du champ décroît rapidement lorsque la distance augmente.

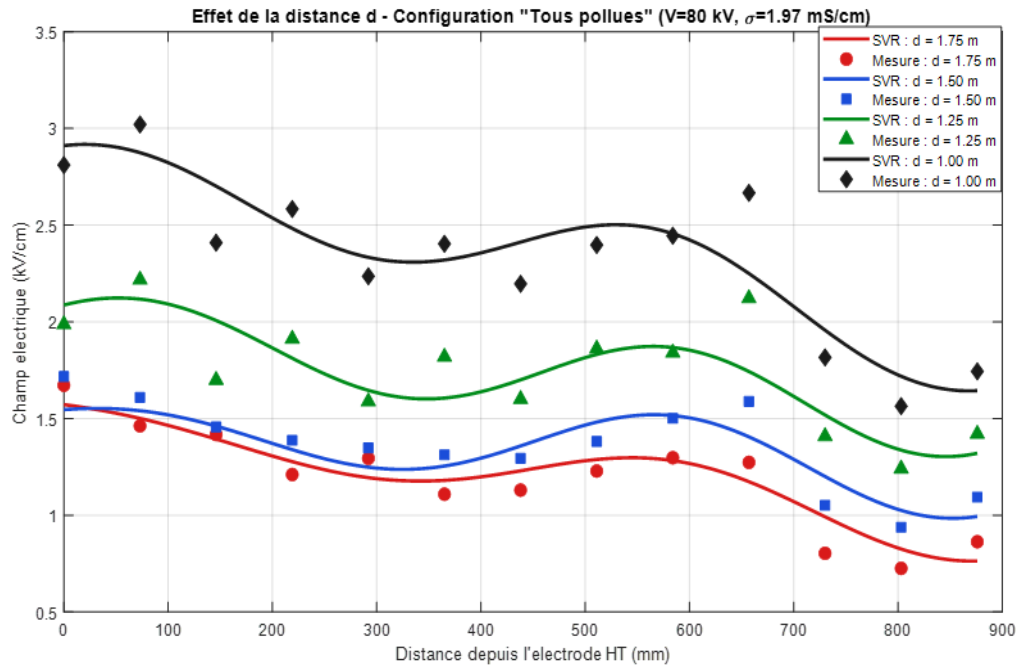


Figure III.3: Distribution du champ E pour différentes distances d (configuration 4, $\delta = 1,97$ mS/cm).

La figure III.3 illustre l'évolution de l'intensité du champ électrique en fonction de la position horizontale pour différentes distances de mesure dans le cas d'un isolateur contaminé.

On observe sur les courbes que l'intensité du champ électrique est élevée lorsque la distance de mesure est faible, puis diminue progressivement avec l'augmentation de la distance. Ce comportement est normal, car l'intensité du champ électrique diminue avec l'éloignement de la source de charges électriques sur la chaîne d'isolateurs.

A titre quantitatif, le maximum du champ prédit passe d'environ 2,81 kV/cm à $d = 1$ m à environ 1,67 kV/cm à $d = 1,75$ m, soit une réduction d'environ 41 %. Cette atténuation suit approximativement une loi en $1/d^2$, caractéristique d'un champ électrique généré par une distribution de charges quasi ponctuelle vue à grande distance.

La représentation 3D de la surface $E = f(h, d)$ pour la configuration 4 est donnée dans la figure suivante. Cette surface continue, obtenue par interpolation SVR, permet d'estimer le champ électrique pour n'importe quelle combinaison (h, d) à l'intérieur du domaine d'apprentissage.

Ces résultats confirment qu'une augmentation de la distance de mesure entraîne une réduction de l'effet du champ électrique et une diminution de son intensité, ce qui prouve l'efficacité du modèle SVR pour prédire avec précision et cohérence le comportement du champ électrique autour des isolateurs contaminés.

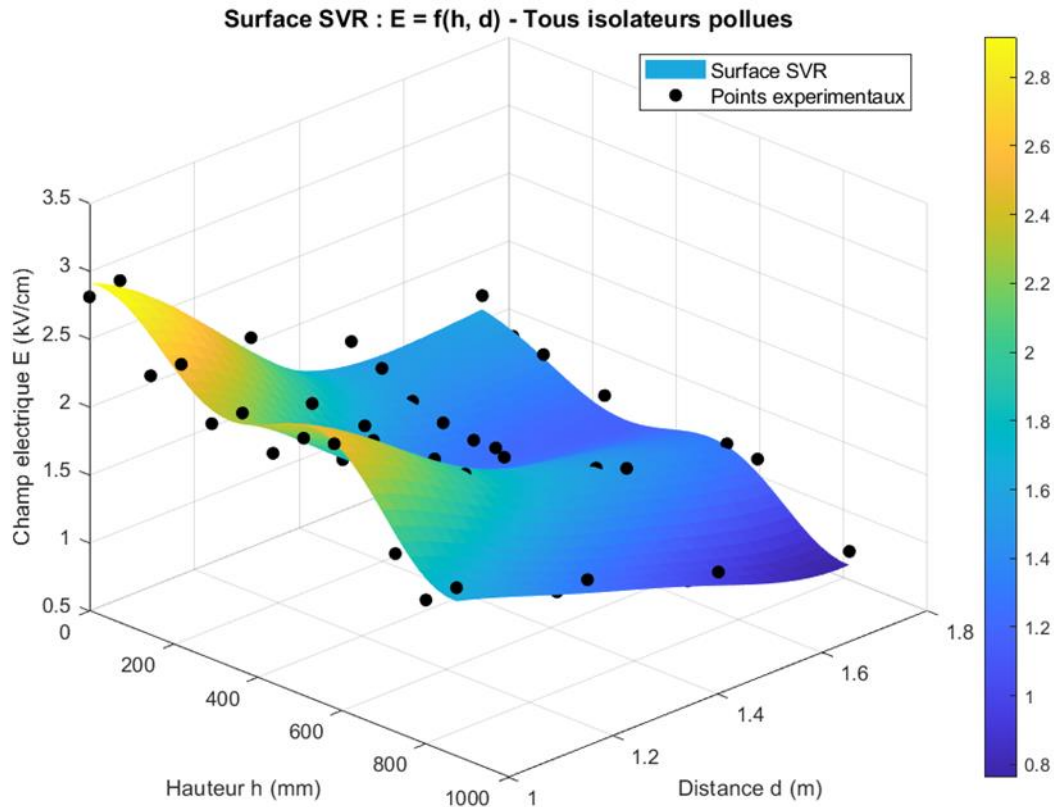


Figure III.4: Surface SVR du champ électrique $E = f(h, d)$ - Tous isolateurs pollues.

La figure III.4 présente la surface de réponse générée par le modèle de régression radiale à support (SVR), qui relie l'intensité du champ électrique E à la hauteur h et à la dimension d dans le cas de diélectriques contaminés. Cette surface continue représente une fonction d'estimation capable d'attribuer une valeur de champ à n'importe quel point de l'espace d'apprentissage.

La distribution des points bleus, représentant les mesures d'apprentissage, révèle une forte correspondance entre la surface et les données. La surface passe par la plupart de ces points, ce qui témoigne de la capacité du modèle à représenter le comportement physique complexe du champ. Elle met en évidence la nature non linéaire de la variation du champ : concentration du champ au bord du diélectrique, diminution progressive avec l'augmentation de la dimension, distorsion marquée dans la région centrale due à la contamination. Cette représentation graphique permet d'identifier les pics d'intensité du champ, qui correspondent à des zones potentielles d'activité de décharges partielles, conformément au comportement attendu en présence de contamination.

III.5.5. Analyse des résidus

L'analyse des résidus constitue une étape importante pour valider l'absence de biais systématique dans les prédictions. La figure suivante présente l'analyse statistique des résidus.

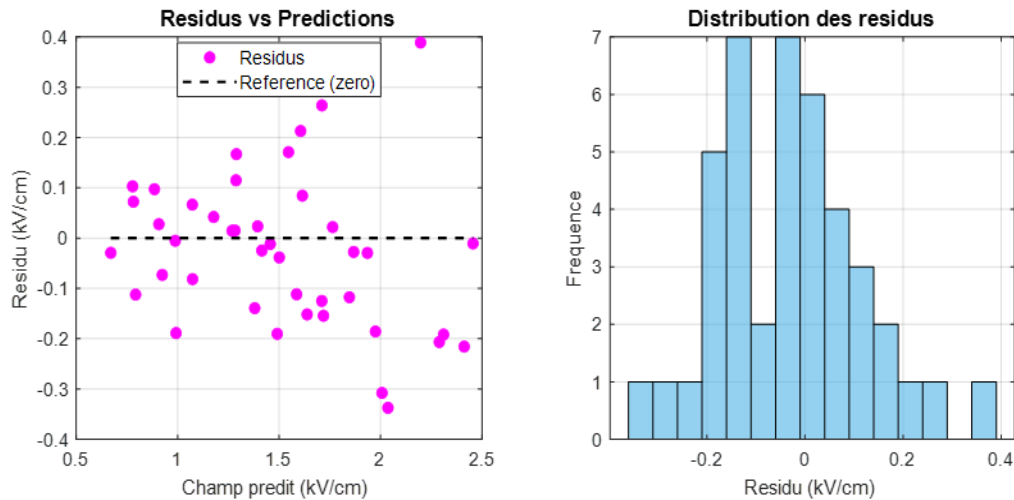


Figure III.5 : Distribution des résidus du modèle SVR.

Analyse de la figure III.5 : Distribution des résidus SVR

L'analyse des résidus (différence entre les valeurs réelles et prédites) du modèle de machine à vecteurs de support (SVR) révèle une distribution aléatoire autour de zéro, sans tendance ni structure particulière. Le nuage de points indique une distribution symétrique des résidus, reflétant l'absence de biais systématique dans les prédictions du modèle.

Le nuage des résidus apparaît reparti de manière aléatoire autour de zéro, sans tendance ni structure marquée. L'histogramme suit une distribution approximativement normale, centrée sur zéro avec une amplitude maximale d'environ $\pm 0,12$ kV/cm. Ces observations confirment la validité statistique du modèle SVR retenu et l'adéquation du noyau gaussien à la modélisation du phénomène étudié.

III.6. Discussion générale

Le modèle SVR développé dans ce chapitre a démontré une excellente capacité prédictive pour la modélisation du champ électrique au voisinage de la chaîne d'isolateurs polluée. Avec un coefficient de détermination R^2 supérieur à 0,994 et une erreur relative moyenne inférieure à 3 % sur l'ensemble de test, le modèle constitue un outil fiable pour l'analyse et la prédiction des phénomènes électrostatiques dans les conditions de pollution sévère.

Le pourcentage de vecteurs de support (72 %) traduit une bonne adéquation entre la complexité du modelé et la difficulté du problème. Un pourcentage plus élevé aurait indiqué un modelé trop complexe, tandis qu'un pourcentage trop faible aurait révélé un sous-apprentissage.

Les principales conclusions qui se dégagent de cette étude sont les suivantes :

- L'algorithme SVR avec noyau gaussien est parfaitement adapté la modélisation du champ électrique dans les conditions de pollution sévère, malgré la complexité introduite par les variables multiples (hauteur, distance, configuration) ;
- La position géographique de la couche polluante sur la chaîne influence significativement la distribution du champ électrique : la pollution cote HT génère un champ plus intense que la pollution cote Terre ;
- L'amplitude du champ électrique décroît rapidement avec la distance, suivant approximativement une loi en $1/d^2$;
- Le modelé permet d'estimer le champ électrique avec une précision inférieure à 3 % d'erreur relative, ce qui est compatible avec les exigences de l'ingénierie haute tension.

Le modelé SVR développé présente plusieurs intérêts pratiques. Premièrement, il permet d'interpoler le champ électrique en n'importe quel point du domaine d'apprentissage sans nécessiter de nouvelles mesures expérimentales coûteuses. Deuxièmement, il offre un outil rapide pour analyser l'effet relatif des différents paramètres sur la distribution du champ. Enfin, il constitue une étape préliminaire vers le développement de systèmes intelligents de surveillance et de diagnostic des isolateurs en service.

Cependant, plusieurs limitations doivent être soulignées. Le modelé reste valide uniquement à l'intérieur du domaine d'apprentissage : toute extrapolation au-delà des plages de h , d ou des configurations utilisées peut conduire à des résultats erronés. De plus, la qualité des prédictions dépend directement de celle des mesures expérimentales utilisées pour l'entraînement ; toute erreur systématique dans le dispositif de mesure se propagera dans les prédictions du modelé.

III.7. Conclusion

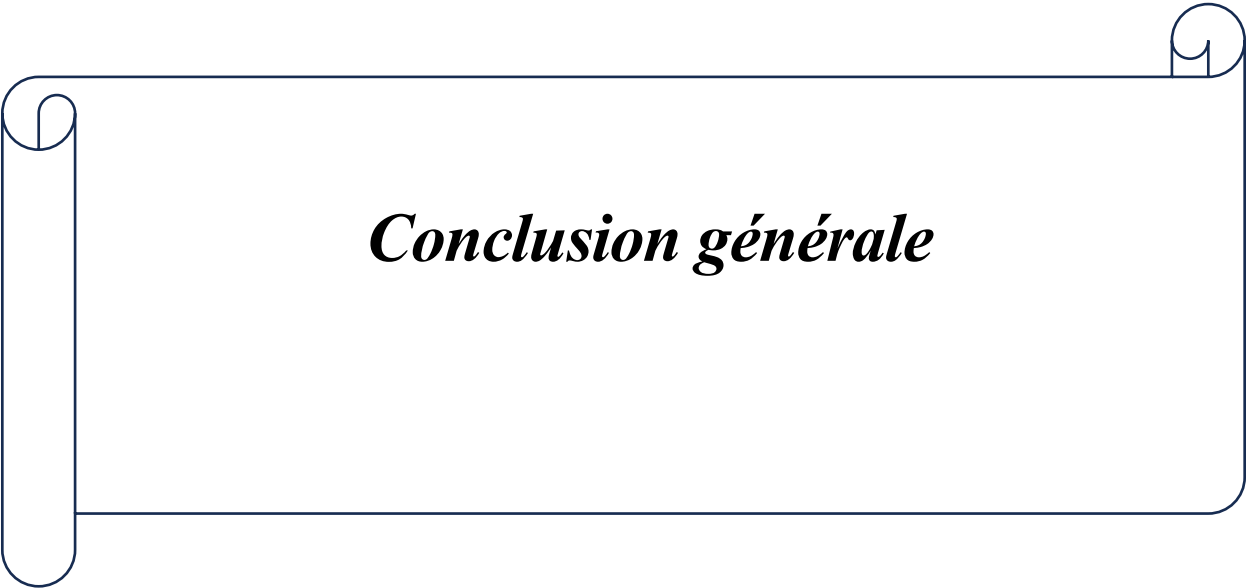
Dans ce chapitre, nous avons appliqué l'algorithme SVR (Support Vector Régressions) avec noyau gaussien aux données expérimentales obtenues sur une chaîne de six isolateurs de type NJ120 dans le cas de pollution par une solution à base de tuf de conductivité $\sigma = 1,97$ mS/cm.

La méthodologie adoptée comprend la standardisation des données, la division apprentissage/test, l'optimisation des hyperparamètres par recherche en grille et la validation

croisée a 5 plis. Les performances obtenues sont remarquables : R^2 supérieur à 0,994 et MAPE inférieure a 3 % sur l'ensemble de test.

L'analyse des prédictions du modèle confirme les principales tendances observées expérimentalement : maximum local du champ près de l'électrode HT, maximum secondaire au niveau du raccord entre les isolateurs 4 et 5, atténuation progressive avec la distance, et influence prépondérante de la position géographique de la couche polluante sur la chaine. La pollution des isolateurs cote HT s'avérerez le scenario le plus défavorable, augmentant le champ électrique d'environ 14 % par rapport à la pollution cote Terre.

Les résultats obtenus dans ce chapitre démontrent que l'algorithme SVR constitue un outil d'analyse fiable et précis pour la modélisation des phénomènes électrostatiques complexes au voisinage des isolateurs sous pollution sévère. Ce modèle peut servir de base pour le développement de système prédictifs avances permettant l'estimation du risque de contournement et l'optimisation de la conception des chaines d'isolateurs destinées aux région polluées, telles que les régions désertiques du sud algérien.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and horizontal strips at the top and bottom, all featuring rounded, scroll-like ends.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons abordé un problème fondamental des réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique à haute tension : l'influence de la pollution sur les performances diélectriques des chaînes d'isolateurs, ainsi que les courants de fuite et le phénomène de contournement qui en résultent, entraînant des coupures de courant et des pertes économiques considérables.

Le premier chapitre a présenté une étude théorique et expérimentale approfondie de la distribution du champ électrique autour d'une chaîne d'isolateurs de type NJ120. Les résultats expérimentaux ont montré que:

- La distribution du champ électrique n'est pas uniforme le long de la chaîne : les valeurs du champ sont plus élevées près de l'électrode active (HT) et plus faibles du côté de la terre.
- La pollution a un effet significatif sur l'intensité du champ ; une chaîne polluée génère un champ électrique plus intense qu'une chaîne propre, et cet effet s'accroît avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante.
- L'emplacement de la couche polluante sur la chaîne est un facteur critique : la pollution sur les isolateurs proches de l'électrode HT constitue le scénario le plus défavorable, augmentant l'intensité du champ d'environ 14 % par rapport à une pollution proche de la terre.
- La présence d'un isolateur endommagé (chaîne « moignon »), surtout près de l'électrode active, aggrave la situation en augmentant l'intensité du champ d'environ 5 %.
- L'utilisation d'anneaux de garde, notamment ceux de grand rayon (30 cm) installés à une hauteur appropriée (15 cm), a amélioré la distribution du champ et contribué à réduire son intensité le long de la chaîne.

Le deuxième chapitre a été consacré aux fondements théoriques de l'algorithme de régression à vecteurs de support (SVR), un outil d'apprentissage automatique performant, capable de traiter des relations non linéaires et complexes, offrant une bonne capacité de généralisation même avec un nombre limité de données, ainsi qu'une robustesse face au bruit.

Le troisième chapitre constitue le cœur de ce travail. L'algorithme SVR a été appliqué avec succès pour modéliser et prédire l'intensité du champ électrique autour de la chaîne d'isolateurs pollués.

La méthodologie adoptée comprend :

- L'utilisation d'un noyau gaussien (RBF) en raison de sa capacité à capturer les relations non linéaires.
- L'optimisation des hyper paramètres (C et epsilon) par recherche sur grille (gril sérac).
- La standardisation des données, la division apprentissage/test et la validation croisée à 5 plis.

Les résultats obtenus démontrent une excellente performance prédictive du modèle SVR

Un coefficient de détermination (R^2) très élevé atteignant 0,9943 sur l'ensemble de test, ce qui signifie que le modèle explique plus de 99 % de la variabilité des données expérimentales.

Une racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) très faible (0,058 kV/cm) par rapport à l'étendue des valeurs mesurées 0,536 à 3,012 kV/cm).

Une erreur relative moyenne absolue (MAPE) inférieure à 3 %, confirmant la haute précision du modèle et son adéquation avec les exigences de l'ingénierie haute tension.

Ces résultats confirment que l'algorithme SVR constitue un outil analytique et prédictif puissant et fiable pour la modélisation du comportement électrostatique complexe des isolateurs sous pollution sévère, sans recourir à des calculs physiques coûteux et complexes.

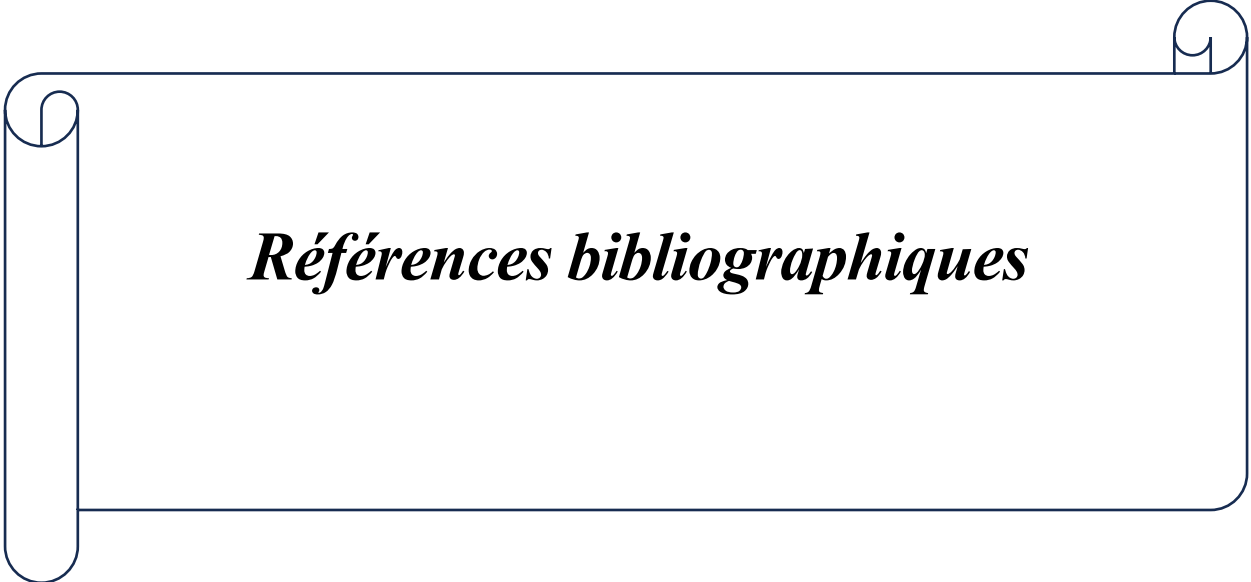
Perspectives futures :

Afin d'élargir le champ d'application et de valider davantage la robustesse de l'approche développée dans ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

Extension à d'autres types d'isolateurs : Il serait particulièrement intéressant de tester l'efficacité du modèle SVR sur différents types d'isolateurs composites (par exemple, en caoutchouc de silicone) ou en verre, afin d'analyser l'influence de profilés et de matériaux divers .

Simulation de chaînes d'isolateurs plus longues et à des niveaux de tension plus élevés : Les travaux futurs pourraient porter sur l'application de ce modèle à des lignes de transport à très haute tension (THT) ou ultra haute tension (UHT), en simulant des chaînes contenant un nombre d'éléments plus

important. Cela permettra d'évaluer la capacité du SVR à gérer des non-linéarités plus complexes accrues par l'augmentation de la contrainte diélectrique.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and horizontal strips at the top and bottom, all featuring rounded, scroll-like ends.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. A. Chaou, A. Mekhaldi, B. Moula, and M. Tegar, "Classification of Leakage Current waveforms using Wavelet Packet Transform on high voltage insulator," in 2014 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Poznan, Poland, 2014, pp. 1-4: IEEE, 2014.
- [2]. M. Fernando and S. Gubanski, "Performance of nonceramic insulators under tropical field conditions," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 1, p. 355-360, 2000.
- [3]. K. Chaou, A. Mekhaldi, and M. Tegar, "Recurrent plot for leakage current investigation and performance monitoring of HV insulator model under discontinuous pollution," in 2014 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Poznan, Poland, 2014, pp. 1-4: IEEE.
- [4]. Hayat, ST, & Karim, (2016). Influence of pollution on the bypass voltage of insulators under alternating voltage (Doctoral dissertation, Mouloud Mammeri University). T.
- [5]. Meftah, MO, & Rahal, M. (2011). Performance of Polluted HV Insulators under 50Hz Alternating Voltage and Electric Field and Potential Distributions using COMSOL. Ecole Nationale Polytechnique, Final Year Project .
- [6]. Terkmani, M., & Bouamer, M. (2005). Bypassing High Voltage Line Insulators. PFE, USTO, June .
- [7]. Lotfi, S., & Djafri, S. (1982). Contribution to the Study of Pollution of Insulators of High Voltage Overhead Lines in the Arbaa Region. Final Year Project, Department of Electrotechnics, University of Science and Technology Houari Boumediene, Algiers , 8 .
- [8]. Fernando, M. A. R. M., & Gubanski, S. M. (2020). Leakage current patterns on contaminated polymeric surfaces. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 6(5), 688-694.
- [9]. BOUCHAMA Karima Malak, KO (2024). Study of the electrical bypass of polluted insulators.
- [10]. Rouaimia, A. (2025). Study of the electrical behavior of a polluted insulator subjected to an alternating voltage.
- [11]. Meftah, MO, & Rahal, M. (2011). Performance of Polluted HV Insulators under 50Hz Alternating Voltage and Electric Field and Potential Distributions using COMSOL. Ecole Nationale Polytechnique, Final Year Project .

- [12]. A. Chaou, A. Mekhaldi, and M. Tegar, "Recurrence quantification analysis as a novel LC feature extraction technique for the classification of pollution severity on HV insulator model," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 6, pp. 3376-3384, 2015.
- [13]. 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.
- [14]. S. Ilhan, 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.
- [15]. Vapnik, V. (2013). *The nature of statistical learning theory*. Springer science & business media.
- [16]. Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3), 273-297.
- [17]. Drucker, H., Burges, C.J., Kaufman, L., Smola, A., & Vapnik, V. (1996). Support vector regression machines. *Advances in neural information processing systems*, 9.
- [18]. Zaiz, F. (2010). *Support Vector Machines (SVM) for the recognition of Arabic handwritten characters* (Doctoral dissertation, Mohamed Khider University Biskra).
- [19]. Schölkopf, B., & Smola, A.J. (2002). *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. MIT Press, Cambridge, MA, USA. 644 p.
- [20]. Smola, Alex J., and Bernhard Schölkopf. "A tutorial on support vector regression." *Statistics and computing* 14.3 (2004): 199-222.
- [21]. Chang, C. C., & Lin, C. J. (2011). LIBSVM: A library for support vector machines. *ACM transactions on intelligent systems and technology (TIST)*, 2(3), 1-27.
- [22]. Smola, A.J., & Schölkopf, B. (1998). *A Tutorial on Support Vector Regression*. NeuroCOLT2 Technical Report NC2-TR-1998-030, Royal Holloway College, University of London.
- [23]. Merzougui, N., Rouas, MS, & Gherbi, M. *Support Vector Regression (SVR) for the evaluation of the quality of images of screen content* (Doctoral dissertation, UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA).
- [24]. R. V. Hogg and A. T. Craig, *Introduction to mathematical statistics*. (5th edition). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1995. Machines. Apress, Berkeley, CA. pp. 67–80.

- [25]. A. N. Jahromi, A. H. El-Hag, S. H. Jayaram, E. A. Cherney, M. Sanaye-Pasand, and H. Mohseni, "A neural network based method for leakage current prediction of polymeric insulators," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 1, pp. 506-507, 2006
- [26]. M. F. Palangar and M. Mirzaie, "Detection of Critical Conditions in Ceramic Insulators Based on Harmonic Analysis of Leakage Current," Electric Power Components and Systems, vol. 44, no. 16, pp. 1854-1864, 2016.