

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseau Electrique

Thème

**Mesure du Champ électrique autour D'une
chaine des Isolateurs De Haute Tension**

Réalisé par :

- ❖ Ghemam Amara EL_Hadi
- ❖ Behir Zakaria

Encadré par :

Guia Talal

Soutenu en Mai 2017

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mon très cher père et très chère mère

A mes frères et mes sœurs surtout AYMEN

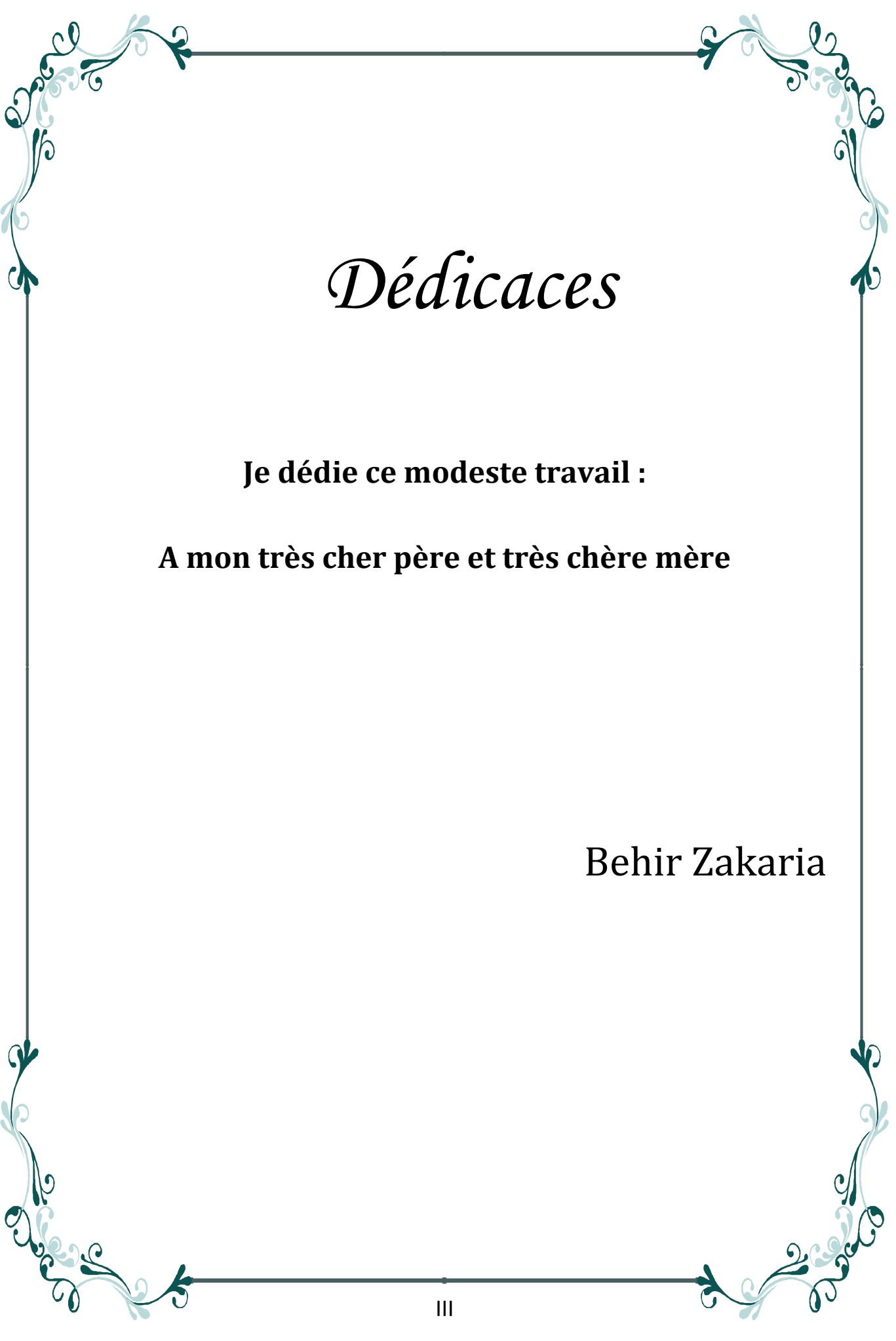
A ma grande famille que je chéris de plus en plus

A tous mes amis surtout mon binôme BILAL

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime

A vous.

Ghemam Ammara EL Hadi

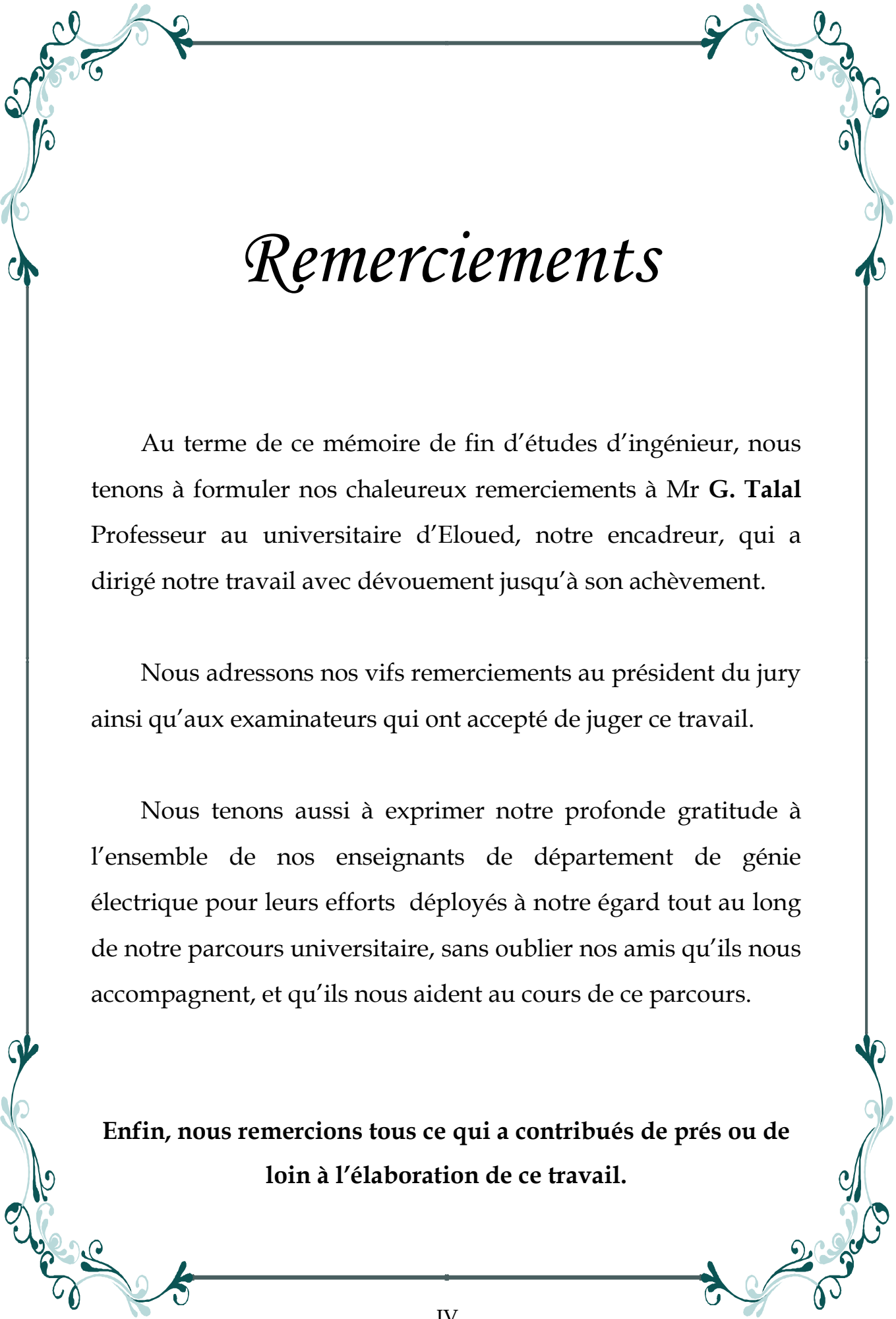


Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mon très cher père et très chère mère

Behir Zakaria



Remerciements

Au terme de ce mémoire de fin d'études d'ingénieur, nous tenons à formuler nos chaleureux remerciements à Mr **G. Talal** Professeur au universitaire d'Eloued, notre encadreur, qui a dirigé notre travail avec dévouement jusqu'à son achèvement.

Nous adressons nos vifs remerciements au président du jury ainsi qu'aux examinateurs qui ont accepté de juger ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble de nos enseignants de département de génie électrique pour leurs efforts déployés à notre égard tout au long de notre parcours universitaire, sans oublier nos amis qu'ils nous accompagnent, et qu'ils nous aident au cours de ce parcours.

Enfin, nous remercions tous ce qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
------------------------------------	-----------

❖ Chapitre I: Pollution Des Isolateur De Haute Tension

I .1 INTRODUCTION	04
--------------------------------	-----------

I .2 ISOLATEURS DE HAUTE TENSION	04
---	-----------

I.3 FONCTIONNEMENT ET CONSTITUTION D'UN ISOLATEUR	05
--	-----------

I.4 TYPES D'ISOLATEURS.....	06
------------------------------------	-----------

I.4.1 Isolateurs rigides	06
--------------------------------	----

I.4.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne	06
--	----

I.4.2.1 Isolateur à long fût.....	07
-----------------------------------	----

I.4.2.2 Isolateurs capot et tige	08
--	----

I.5 MATERIAUX ISOLANTS UTILISES POUR LA FABRICATION DES ISOLATEURS.....	10
--	-----------

I.5.1 Céramique	10
-----------------------	----

I.5.2 Verres	11
--------------------	----

I.5.2.1 Le verre trempé	11
-------------------------------	----

I.5.2.2 Le verre recuit	11
-------------------------------	----

I.5.2.3 Matériaux synthétiques (composites)	11
---	----

I.5.2 CHOIX DES ISOLATEURS.....	12
--	-----------

I.6 POLLUTION DES ISOLATEURS DE HAUTE TENSION.....	12
---	-----------

I.6.1 Quelques Définitions.....	13
---------------------------------	----

I.6.1.1 Contournement	13
-----------------------------	----

I.6.1.2 Contrainte de contournement	13
---	----

I.6.1.3 Tension de contournement.....	13
---------------------------------------	----

I.6.1.4 Tension de tenue (Tension d'essai).....	13
---	----

I.6.1.5 Courant de fuite.....	13
-------------------------------	----

I.6.1.6 Courant de fuite critique	14
---	----

I.6.1.7 Conductance superficielle.....	14
I.7 FORMATION ET REPARTITION DE LA COUCHE DE POLLUTION.....	14
I.8 SOURCES DE POLLUTION	14
I.8.1 Pollution naturelle	14
I.8.1.1 Pollution marine.....	14
I.8.1.2 Pollution désertique	15
I.8.1.3 Autre type de Pollution naturelle.....	15
I.8.2 Pollution industrielle.....	15
I.8.3 Pollution mixte	15
I.9 CONSEQUENCES DE LA POLLUTION.....	15
I.9.1 Arc non localisé	16
I.9.2 Arc permanant (fixe)	16
I.9.3 Contournement des isolateurs.....	16
I.10 METHODES D’ESSAIS SOUS POLLUTION.....	18
I.10.1 Essais sous pollution naturelle.....	18
I.10.2 Essais sous pollution artificielle.....	18
I.10.2.1 Méthodes des couches solides.....	18
I.10.2.2 Méthodes du brouillard salin.....	19
I.10.2.3 Méthodes de la chambre de poussière.....	19
I.10.3 Critiques de ces méthodes d’essai.....	19
I.11 TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION.....	20
I.11.1 Allongement de la ligne de fuite.....	20
I.11.2 Isolateurs plats.....	20
I.11.3 Graissage périodique.....	20
I.11.4 Revêtement silicone.....	20
I.11.5 Les isolateurs composites.....	21
I.11.6 Nettoyages des isolateurs.....	21
I.12 CONCLUSION	21

❖ Chapitre II: Les méthodes du calcul et du mesure du champ électrique

II.1 INTRODUCTION.....	24
II.2 EQUATIONS DE MAXWELL.....	24
II.2.1 Mise en équations.....	24
II. 2.2 Conditions aux limites.....	26
II. 2.3 Conditions aux frontières.....	27
II.3 MODELE MATHEMATIQUE.....	27
II.4 METHODES DE DETERMINATION DU CHAMP ET DU POTENTIEL ELECTRIQUES.....	29
II.4.1 METHODE DES ELEMENTS FINIS (MEF).....	31
II.4.1.1 Etapes de la Méthode des Eléments Finis.....	32
II.4.1.2 Avantages de la M.E.F.....	33
II.4.1.3 Inconvénients de la M.E.F.....	33
II.4.2 METHODE DES ELEMENTS FINIS DE FRONTIERE (M.E.F.F).....	34
II.5 CONCLUSION.....	35
II.6 MESURE DU CHAMP ELECTRIQUE.....	36
II.6.1 méthode directe d'un voltmètre électrostatique	36

II.6.2 méthode indirecte de Wilson	37
II. 6.3 méthode indirecte du voltmètre rotatif (moulin a champ électrique).....	38
II.6.4 méthode de la sonde de champ a capacité répartie (SCCR)	40
II.7 CONCLUSION.....	40

❖ CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1 INTRODUCTION.....	43
III.2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL :.....	43
III.2.1. Circuit d'essai du laboratoire de Haute tension (Université d'El Oued).....	43
III.2.1.1. Équipement de la station d'essai	43
III.2.1.2. Pupitre de commande	44
III.2.1.3. Appareils de mesure et de protection	44
III.2.1.4. Transformateur d'essai	45
III.2.1.5. Transformateur de réglage	46
III 2.1.6. Diviseur de tension	46
III 2.1.7. chaine des isolateurs	46
III 2.1.8. Circuit d'essai en tension alternatif	47
III 2.1.9. Appareil de mesure le champ électrique (C.C.E.H.T)	48
III 2.1.9. 1. Le circuit électronique du capteur (C.C.E.H.T)	49
III.3 CONFIGURATION DU MODELE EXPERIMENTAL	55
III.4. EQUATION RELIANT V AU CHAMP E.....	56
III.5. DETERMINATION DE LA CONSTANCE DE LA SONDE KS.....	56
III.6. FORME DES SIGNAUX OBTENUS AVEC PC.....	57

❖ CHAPITRE IV: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1 INTRODUCTION.....	60
IV.2 RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	60
IV.2.1 mesure du champ électrique autour du chaîne d'isolateur propre.....	60
IV.2.1.1 l'effet de la position laterale:.....	61
IV.2.1.2 variation de niveau de tension.....	63
IV.2.2 l'effet de la conductivité du pollution sur le champ E	66
IV.2.3 L'effet d'un disc cassé sur la distribution du champ électrique	68
IV.2.4 Comparaison entre les différent cas influés sur le comportement de la chaîne des isolateurs	70
IV.2.5 l'effet d'un anneau de garde sur distribution du champ E	70
IV.2.5.1 deux anneau	70
IV.2.5.2. un seul anneau	72
IV.2.6 L' avantage de anneau de garde	73
VI.3 CONCLUSION.....	74

❖ CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE.....	76
--------------------------	----

❖ BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE	77
---------------------	----

❖ L'ANNEXE

L'annexe	81
----------------	----

SOMMAIRES DES FIGURES

Figure I.1 : Isolateur rigide	06
Figure I.2 : Isolateur à long fût en porcelaine	07
Figure I.3 : Isolateur à capot et tige	08
Figure I.4 : Différents profils d'isolateurs à capot et tige	09
Figure I.5 : 5 Isolateurs en matériaux synthétiques	12
Figure I.6 : Etapes du contournement d'une couche polluée	17
Figure II. 1. Voltmètre électrostatique	24
Figure II. 2. Méthode de Wilson	25
Figure II. 3. Méthode du voltmètre rotatif.....	26
Figure II. 4. Méthode de la sonde du champ à capacité répartie SCCR	28
Figure III.1: Panneau de contrôle utilisé pour effectuer le test de claquage.....	44
Figure III.2: Transformateur à haute tension utilisé pour l'essai.....	45
Figure III.3: Isolateur capot et tige de profil standard.....	46
Figure III.4 : Le Circuit d'essai pou le mesure du champ électrique	47
Figure III.5 : montage réalisé au laboratoire de haute tension.....	48
Figure III.6 : Appareil du mesure du champ électrique (C.C.E.H.T).	48
Figure III.7: capacité céramique.....	49
Figure III.8: Le résistance.....	49
Figure III.9 : sonde	50
Figure III.10 : le microcontrôleur Arduino	51
Figure III.11 le circuit montage test en real.....	51
Figure III.12 : le circuit montage utilisé pour le mesure champ électrique.....	52
Figure III.13 : Application du L'environnement de développement Arduino.....	52
Figure III.14 : le code source du programme Arduino pour le mesure du champ électrique.....	54
Figure III.15 : : les positions du mesurer champ horizontale.....	55
Figure III.16 : les positions du mesurer champ vertical.....	55

Figure III.17 : circuit d'étalonnage de la sonde du mesure du champ électrique.....	57
Figure III.18 : la forme d'onde en registre par PC.....	58
Figure IV.1: les positions de mesure et les distances du champ électrique.....	61
Figure IV.2: Influence de la position latérale sur le champ électrique.....	62
Figure IV.3: Champ électrique en fonction de chaque points avec 80kv.....	62
Figure IV.4: Champ électrique en fonction de chaque points avec 80k.....	63
Figure IV.5: Influence de la position de distance latérale sur le champ électrique	64
Figure IV.6: distributions du champ E de 1m pour chaque tension.....	64
Figure IV.7: distributions du champ E de 1m pour chaque points	65
Figure IV.8: distributions du champ E de 1m pour chaque points	65
Figure IV.9: variation du champ électrique en fonction de la conductivité pour la position vertical 1.....	67
Figure IV.10: distributions du champ E pour les différentes conductivités de pollution.....	67
Figure IV-11: distributions du champ E en pour chaque position	68
Figure IV-12: distributions du champ E pour la défèrent position latéral	68
Figure IV-13: les configurations réalisées pour une chaine des isolateurs en cas d'un élément brisé	69
Figure IV.14: distributions du champ E en fonction de chaque points avec disc cassé.....	69
Figure IV.15 : distributions du champ E en fonction de chaque points avec disc cassé.....	70
Figure IV.16 : distributions du champ E pour trois essai.....	71
Figure IV.17 : Essai le chaine d'isolateur avec deux anneau de garde.....	71
Figure IV.18 : distributions du champ E avec chaque anneau de garde.....	72
Figure IV.19 : Essai le chaine d'isolateur avec un seul anneau de garde.....	72
Figure IV.20 : Distributions du champ E avec chaque un seul anneau de garde 4.....	73
Figure IV.21 : Distribution du champ E avec trios essai.....	74

INTRODUCTION GENERALE

Les besoins économiques et le bien être des populations font partie aujourd'hui des raisons d'un développement croissant des installations de production de transport et de transformation d'énergie électrique. L'approvisionnement de cette énergie électrique provenant des centrales exige l'installation des lignes aériennes et souterraines permettant l'alimentation des consommateurs. Les lignes aériennes qui sont conçues, réalisées, entretenues sont exploitées conformément aux normes, prescription et directives de sécurité, de même qu'aux règles de l'art, sont exposées à diverses contraintes. Parmi celles-ci la pollution des isolateurs ou la détruite des éléments dans la chaîne des isolateurs.

Les isolateurs sont parmi les composants les plus importants des réseaux aériens de transport et de distribution de l'énergie électrique puisqu'ils assurent à la fois le support mécanique des parties portées à la haute tension et l'isolation électrique de ces dernières avec les parties mises à la terre ou énergisées. Premièrement conçus en verre et en céramique, la fabrication des isolateurs a connu, à travers des années, une évolution notable, et ceci dans le but d'accroître leurs performances quelle que soient les conditions météorologiques et environnementales auxquelles ils sont exposés.

En effet, une perturbation de l'isolation électrique assurée par l'isolateur peut entraîner, dans certaines circonstances, son contournement et donc un risque majeur sur la fiabilité et le fonctionnement du système de transmission de l'énergie électrique par voies aériennes. Plusieurs causes sont à l'origine de contournement électrique comme les surtensions transitoires sur les réseaux électriques (foudres, enclenchement et ouvertures des lignes, les dépôts de pollution atmosphérique ou encore dans les régions froides, les précipitations atmosphériques givrantes).

Les contournements électriques des isolateurs entraînent des répercussions graves sur les réseaux aériens de distribution de l'énergie électrique, car ils sont la cause de coupures électriques de durée plus ou moins longues.

Depuis une cinquantaine d'années, plusieurs travaux ont été menés pour comprendre les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués et se prémunir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène.

Le présent travail porte sur le mesurer du champ électrique autour d'une chaîne d'isolateur de haute tension pour des diverses configurations et contraintes différentes.

Afin de bien mener notre étude, nous avons subdivisé notre travail en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, les pollutions des isolateurs de haute tension

INTRODUCTION GENERALE

Dans le deuxième chapitre nous déterminons les méthodes des calculs et des mesures du champ électrique

Le troisième chapitre présente les techniques expérimentales de prélèvement, de traitement des équipements.

Le dernier chapitre contient l'essentiel des résultats obtenus et leur interprétation .

I.1 INTRODUCTION

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique [1]. Leur rôle est de relier les conducteurs aux supports en assurant leur isolation électrique [2,3].

Dans la plupart des lignes électriques de haute tension les isolateurs sont menacés par le phénomène de pollution.

Cette pollution mène à une diminution de la rigidité diélectrique et donc de la résistivité superficielle des matériaux isolants. Par conséquent, des pertes d'énergie, parfois énormes peuvent avoir lieu et conduisent à la mise hors service de la ligne, avec destruction éventuelle de matériels [4].

La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité des dépôts polluants, c'est à dire du degré de pollution, ainsi que de la répartition de cette couche sur sa surface [5].

Le présent chapitre porte sur l'étude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des isolateurs sous pollution. Ce chapitre comporte deux parties. Dans la première partie, nous présentons l'importance des isolateurs, leur utilité et leurs principaux types, profils et matériaux avec lesquels ils sont fabriqués. La deuxième partie est consacrée à l'étude des phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique. Les principaux paramètres associés ainsi que les méthodes de mesure et les moyens de lutte contre ce phénomène, y sont également présentés.

I.2 ISOLATEURS DE HAUTE TENSION

L'isolateur est un matériau isolant solide, capable de résister à la contrainte électrique. Il est caractérisé par une grande impédance au passage du courant électrique. Son rôle est de séparer deux corps conducteurs, soumis à deux potentiels différents afin d'empêcher les courts-circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution [6,7].

Dans les réseaux de transport d'énergie électrique, l'isolement pylône-conducteur est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de fuite (nombre d'éléments). Cette longueur dépend du niveau de la tension de service [8].

I.3 FONCTIONNEMENT ET CONSTITUTION D'UN ISOLATEUR

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport, et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes. 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) [9].

Les isolateurs utilisés dans les réseaux électriques peuvent être classés selon leurs constitutions en deux groupes :

- Les isolations internes qui sont hermétiquement isolées (isolation des câbles, des transformateurs, gaz comprimés,.....etc.).
- Les isolations externes sont constituées par les distances dans l'air et par les lignes de fuite le long des isolants solides tels que les supports de l'appareillage, les traversées de transformateurs et les chaînes d'isolateurs.

Les matériaux isolants solides les plus utilisés sont essentiellement le verre trempé et la porcelaine. Mais les résines synthétiques commencent aussi à être utilisées.

L'isolateur est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants:

- L'intervalle d'air
- Le matériau diélectrique
- L'interface air matériau diélectrique

I.4 TYPES D'ISOLATEURS

Selon les différentes façons d'utilisation et les conditions de fonctionnement des isolateurs, on distingue plusieurs types d'isolateurs.

I.4.1 Isolateurs rigides

Un isolateur rigide (figure (I.1)) est relié au support par une ferrure fixe. Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides [5]. Ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 35 kV [9].

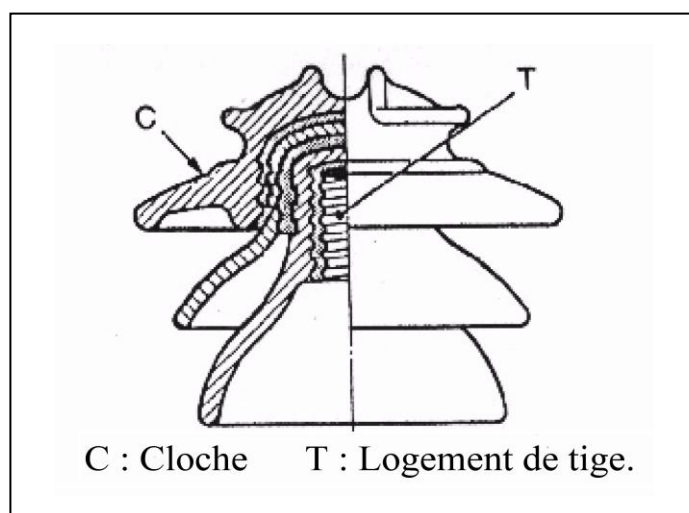


Figure I.1 Isolateur rigide [13].

I.4.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs [9-12].

La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (Chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage).

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

- L'isolateur long fût.
- L'isolateur capot et tige.

I.4.2.1 Isolateur à long fût

Il est constitué d'un bâton cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes. A chaque extrémité, il y a une pièce métallique pour les liaisons [12]. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (figure (I.2.b)), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (figure (I.2.a)) [9, 12].

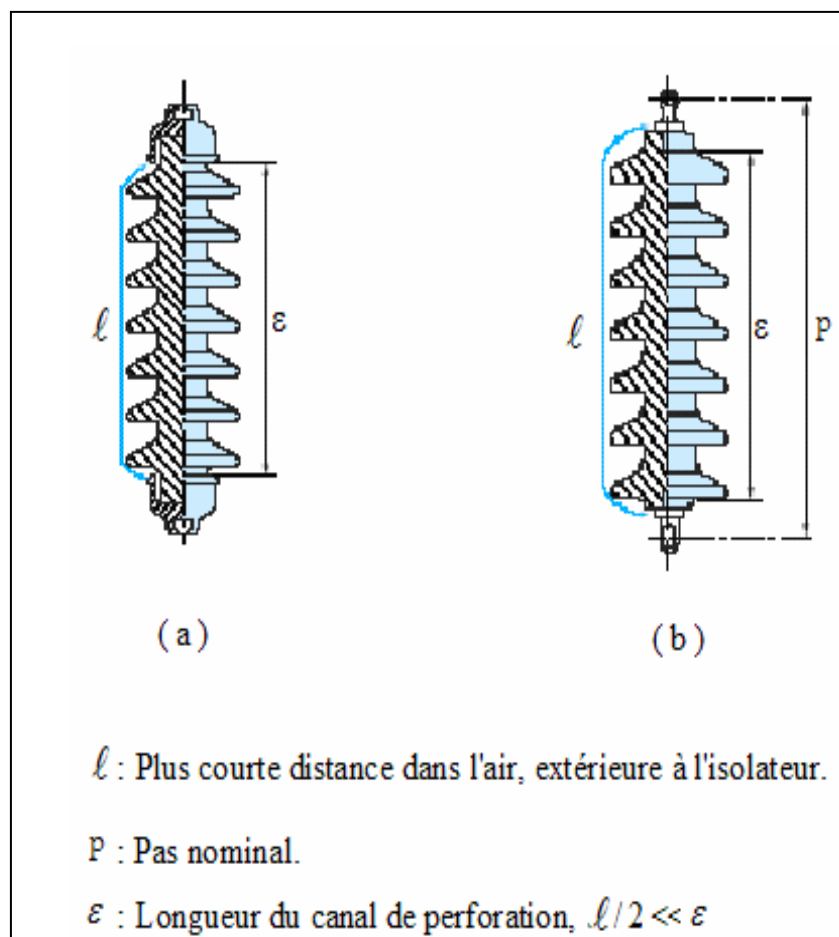


Figure I.2 Isolateur à long fût en porcelaine [3].

I.4.2.2 Isolateurs capot et tige

L'isolateur capot et tige est constitué d'un corps isolant qui porte à l'intérieur une tige en acier, où la tête conique de cette tige est scellée dans le matériau isolant, soit le verre, soit la porcelaine.

L'extrémité supérieure de l'isolateur porte un capot scellé en fonte malléable. Cette dernière est trouée de telle sorte qu'on peut faire entrer l'extrémité inférieure dans ce trou, et le scellement des éléments de chaîne capot et tige se fait de cette façon, où la partie inférieure de l'isolateur pénètre dans le capot de l'élément inférieur, en utilisant du ciment (figure (I.3))

[2, 13].

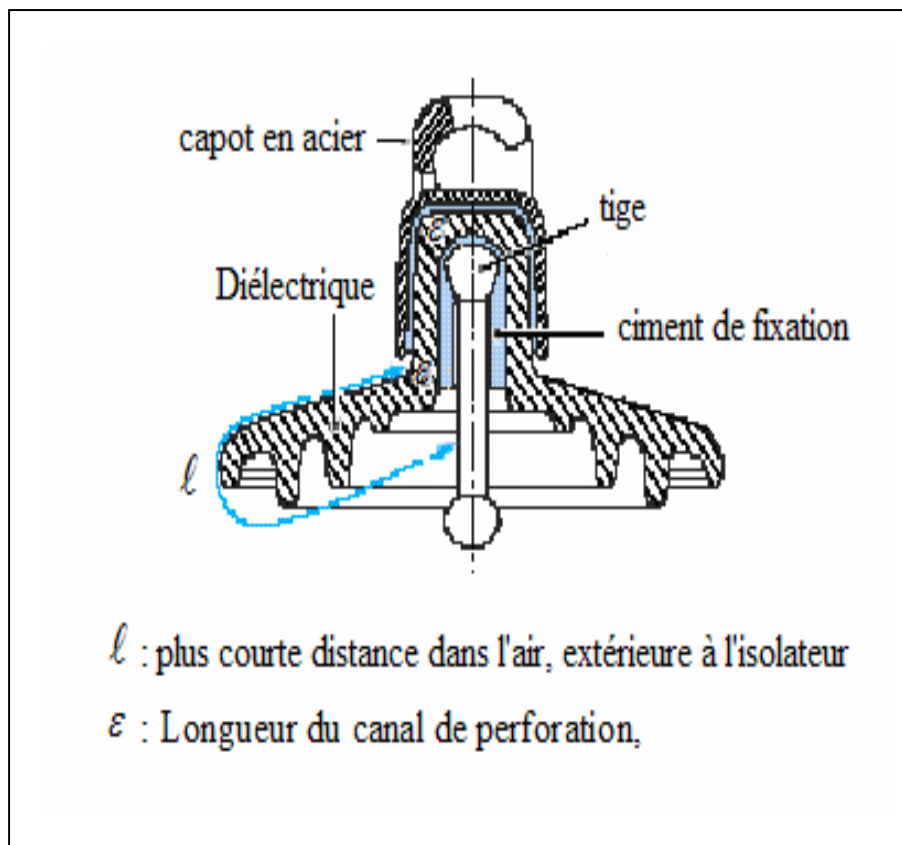


Figure I.3 Isolateur à capot et tige [4].

Différents profils des isolateurs à capot et tige:

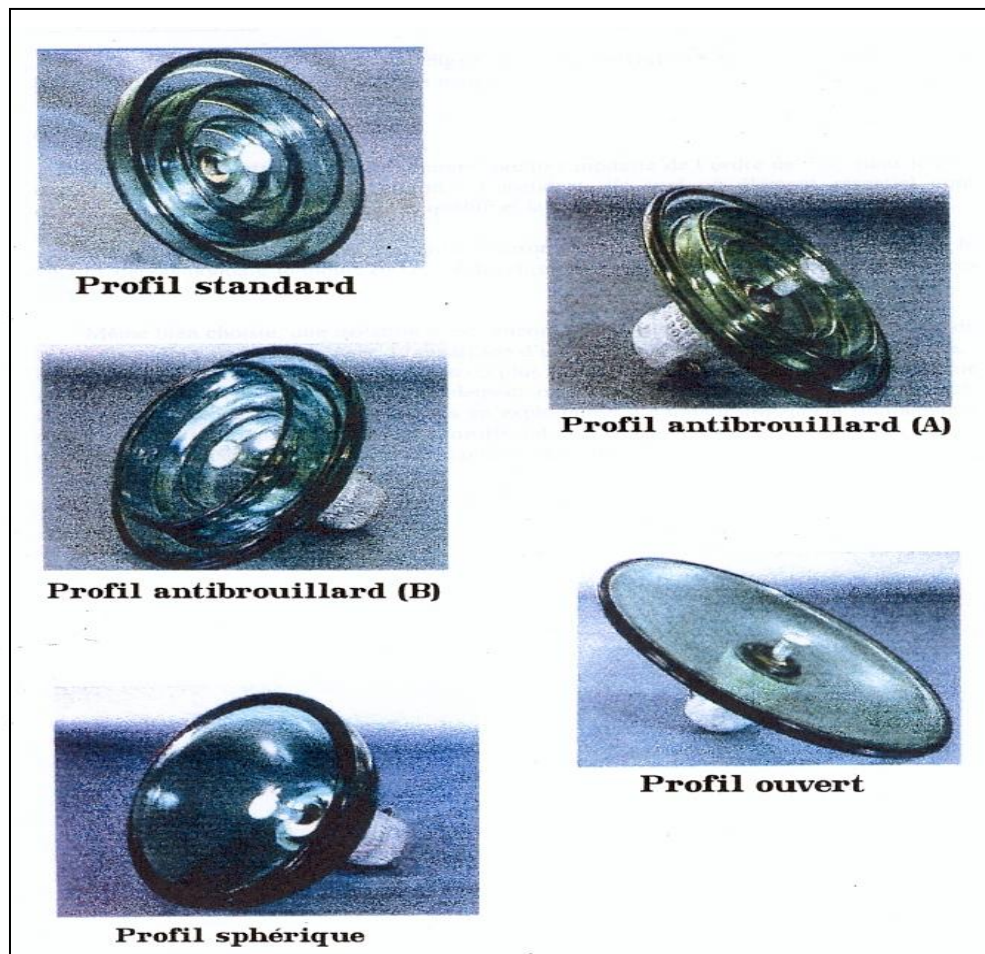


Figure I.4 Différents profils d'isolateurs à capot

La figure (I.4) présente les différents profils des isolateurs à capot et tige qui sont :

a) Profil standard

La faible profondeur, l'espacement entre les anneaux (nervures) et la ligne de fuite moyenne permettent l'utilisation de ce profil dans une zone de pollution modérée [13].

b) Profil antibrouillard (forme A)

Son diamètre est plus grand que celui du profil standard. Il est muni de deux ou trois rainures à grande profondeur. Le profil et les grands espacements des rainures permettent un auto-lavage par action de vent et de la pluie. Cette conception permet également un lavage manuel facile, si c'est nécessaire [9, 13].

c) Profil antibrouillard (forme B)

Dans cette conception, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et de dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface. Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières [2].

d) Profil ouvert (plat)

L'élimination complète des rainures internes réduit l'accumulation des agents polluants sur la surface basse, grâce au courant d'air. Cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques où l'auto-lavage est peu fréquent par la pluie [2].

e) Profil sphérique

Ce type de profil donne une ligne de fuite équivalente au profil standard, mais l'absence d'anneaux facilite le nettoyage manuel [13].

I.5 MATERIAUX ISOLANTS UTILISES POUR LA FABRICATION DES ISOLATEURS

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont : le poids lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages.

Ces dernières années on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères [34, 37].

I.5.1 Céramique

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs installés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence la céramique à grains très fins.

Souvent, on trouve la céramique dans les postes : isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance,...etc. [34, 13].

I.5.2 Verres

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présente le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile [34-37, 14]. Nous trouvons deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit [26].

I.5.2.1 Le verre trempé

Celui ci est obtenu par réchauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 70 °C, puis refroidi par des jets d'air sous pression judicieusement répartis sur toute sa surface; les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation [3]. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C [3, 26].

La couleur verte de l'isolateur en verre provient de l'oxyde de fer présent dans sa composition, si celui-ci est absent le verre est transparent [3].

Outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de déceler les défauts par une simple observation [15].

I.5.2.2 Le verre recuit

Il a surtout été utilisé pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de températures. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension [3, 34, 13].

I.5.2.3 Matériaux synthétiques (composites)

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique (figure (I.5)).

La figure (I.6) représente les isolateurs des matériaux synthétiques.

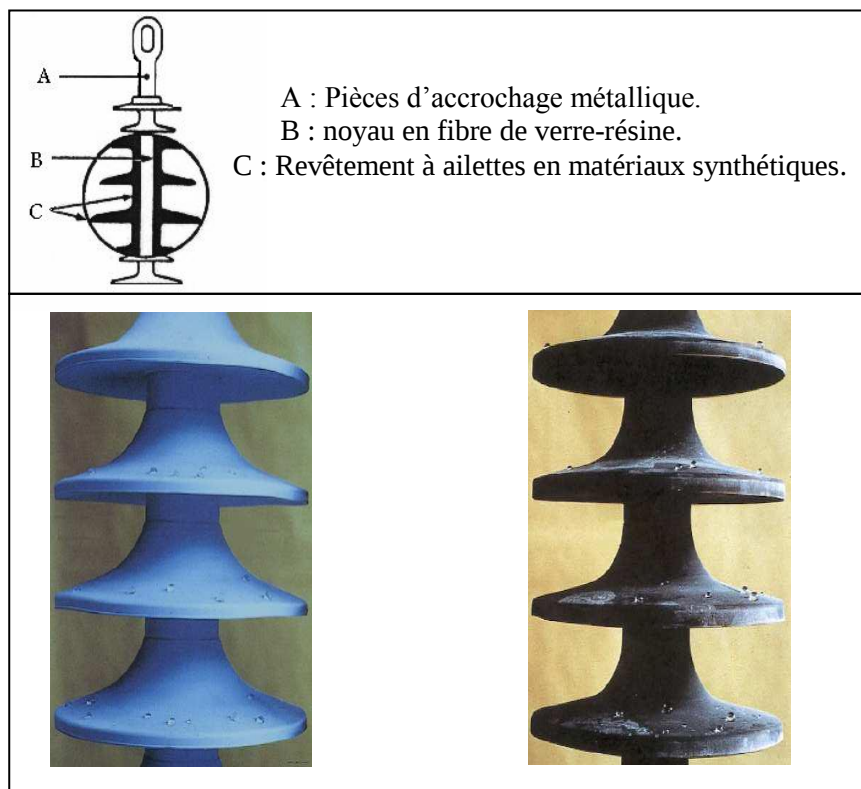


Figure I.5 Isolateurs en matériaux synthétiques [26, 38].

I.5.3 Choix des isolateurs

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité du service.

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage [13].

I.6 POLLUTION DES ISOLATEURS DE HAUTE TENSION

La pollution des isolateurs est un phénomène qui agit négativement sur le comportement des isolateurs de haute tension [34, 35].

La pollution des isolateurs constitue un problème majeur dans la dégradation de l'isolement des ouvrages (postes et lignes) de haute tension [16, 17]. Portés par le vent et déposés sur la surface isolante des chaînes des isolateurs, et en présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs. Ce qui

engendre une diminution conséquente de la tension de tenue des isolateurs. Des arcs électriques prennent naissance à la surface isolante et peuvent éventuellement, se développer en provoquant le contournement total des isolateurs [18].

Notons que cette couche de pollution n'est pas homogène et sa distribution n'est pas uniforme. La non-homogénéité est due à la présence de différents agents polluants dans une même région, et la non-uniformité de la répartition sur les surfaces des isolateurs est due aux profils des isolateurs, le sens et la direction des vents dans cette région, la pluie, la position de la chaîne d'isolateurs par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), la position de l'isolateur dans la chaîne, le degré de pollution du site où se trouve les isolateurs ainsi que la surface inférieure ou supérieure de l'isolateur [34, 37].

I.6.1 Quelques Définitions

I.6.1.1 Contournement

Le contournement est représenté par une décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne cette dernière. Aussi, le terme contournement est employé pour des décharges par amorçage dans l'air [13].

I.6.1.2 Contrainte de contournement

La contrainte de contournement d'isolateur est le rapport de la tension de contournement à la longueur totale de l'isolateur [13].

I.6.1.3 Tension de contournement

C'est le niveau de tension le plus bas au-delà duquel des arcs électriques joignent les deux électrodes [19].

I.6.1.4 Tension de tenue (Tension d'essai)

C'est le niveau de tension le plus important que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive, (contournement dans le cas des isolateurs) [13].

I.6.1.5 Courant de fuite

C'est un courant de faible amplitude circulant à travers la couche polluante humectée le long de la surface isolante. Il est de type électrolytique et peut être un courant résistif pour une isolation totalement polluée ou un courant capacitif dans le cas d'une isolation parfaitement propre [3].

I.6.1.6 Courant de fuite critique

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement total de l'isolateur [28,30].

I.6.1.7 Conductance superficielle

La conductance superficielle est le rapport du courant de fuite circulant à la surface de l'isolateur sur la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface isolante [13].

I.7 FORMATION ET REPARTITION DE LA COUCHE DE POLLUTION

L'ensemble des composants du réseau est soumis aux effets de la pollution, [20] suite à l'écoulement d'un air transportant des poussières diverses, et à l'obstacle formé par les isolateurs, [21,22] une couche de pollution se forme à la surface des isolateurs. La répartition non-uniforme et non-homogène de cette couche dépend du profil de l'isolateur, de la position de la chaîne par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), du niveau de tension ainsi que du degré de pollution du site où est situé l'isolateur [23].

En général, la couche de pollution se concentre sur les éléments de la chaîne d'isolateurs situés du côté du conducteur de haute tension et dans les parties les mieux protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage (vent et forte pluie) [8,22].

I.8 SOURCES DE POLLUTION

Les divers types de pollution atmosphérique les plus fréquemment observés peuvent être regroupés selon leurs origines et classés comme suit:

I.8.1 Pollution naturelle

La pollution naturelle provient :

- Des sels marins dans les régions côtières.
- Des poussières du sol (notamment lors des chantiers importants).
- Des sables véhiculés par le vent en régions désertiques [23, 24].

Ces dépôts, et selon leur nature, se présentent comme suit :

I.8.1.1 Pollution marine

Les lignes de haute tension qui passent près de la mer dans les zones côtières sont exposées au vent qui vient de la mer et qui porte des embruns causant la formation d'une couche polluante de sel sur les surfaces des isolateurs [25].

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 la génération d'un contournement [3, 34].

I.8.1.2 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 seront humidifiés, les couches de sable deviennent plus ou moins conductrices à cause de l'existence de sels dans le sable [34, 36].

I.8.1.3 Autre type de Pollution naturelle

La pluie est un phénomène naturel. Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne d'isolateur. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut conduire au contournement; c'est le contournement sous pluie [26].

I.8.2 Pollution industrielle

Dans des zones à forte concentration industrielle, au voisinage des usines de pétrochimie, de cimenteries, ...etc, les isolateurs se recouvrent peu à peu de poussières résultant des fumées dégagées par ces dernières, et qui sont faiblement conductrices, mais hygroscopique, à la Présence d'une humidité intense. Le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs.

De plus, dans les régions agricoles, les agents polluants peuvent être insecticide, engrais, grains de pollens,....etc.

Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quand il s'agit des facteurs tels: fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport [14].

I.8.3 Pollution mixte

Ce type de pollution est le plus dangereux [26, 27], car elle résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions pré-citées [23, 26].

I.9 CONSEQUENCES DE LA POLLUTION

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs provoquent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. Suivant les conditions atmosphériques (pluie fine,

brouillard,...), la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur[3, 14, 28]:

I.9.1 Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorce à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courant de fuite entraînant une petite perte d'énergie, généralement supportable par le réseau de distribution (l'installation) [2].

I.9.2 Arc permanent (fixe)

L'arc électrique se fixe à la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en s'y réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation de support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant [25, 26].

I.9.3 Contournement des isolateurs

Le contournement d'une surface polluée et humidifiée est le résultat d'une évolution qui comprend quatre phases principales, schématisées à la figure (I.6). Pour simplifier la présentation, considérons le cas d'une plaque plane rectangulaire avec deux électrodes:

- dans une première phase, le courant de fuite s'écoule à travers l'électrolyte qui recouvre l'isolant. Il provoque un échauffement de l'électrolyte qui a pour effet d'accroître la conductivité du milieu et par suite le courant (phase1).
- L'échauffement croissant par effet joule créé par le courant de fuite, provoque un assèchement de la couche polluante. La zone sèche formée a tendance à s'étendre latéralement jusqu'à l'interruption complète du courant (phase 2).
- La tension appliquée se trouve pratiquement totalement reportée aux bornes de la zone sèche et des arcs locaux sont susceptibles d'apparaître. Au voisinage de la tête d'un arc local la construction des lignes de courant conduit à un élargissement de la zone sèche (phase 3).
- A partir de ce stade, l'évolution de la décharge peut se faire de différentes façons : l'arc local peut s'éteindre (phase 4), ou bien il peut se déplacer latéralement pour retrouver une position plus stable correspondant à une

plus faible longueur d'arc (phase 5), ou encore, il peut s'allonger jusqu'à atteindre l'électrode et provoquer ainsi le contournement. Dans ce cas, l'allongement de l'arc se fait à la surface de l'électrolyte sans formation de zone sèche (phase 6).

Bien entendu, en pratique le phénomène s'initie et évolue en fonction de la forme des isolateurs, de l'hétérogénéité des dépôts et de l'humidification de telle ou telle autre partie de l'isolateur. Il est aussi fréquent que plusieurs arcs naissent simultanément le long d'une chaîne ou d'une colonne isolante. Enfin, nous avons implicitement admis que la tension appliquée à l'isolateur était constante. La tension alternative présente, à cet égard, une différence importante du fait de son annulation périodique. Les arcs locaux s'éteignent à chaque passage par zéro et se réamorcent d'une façon aléatoire aux maxima de tension [28].

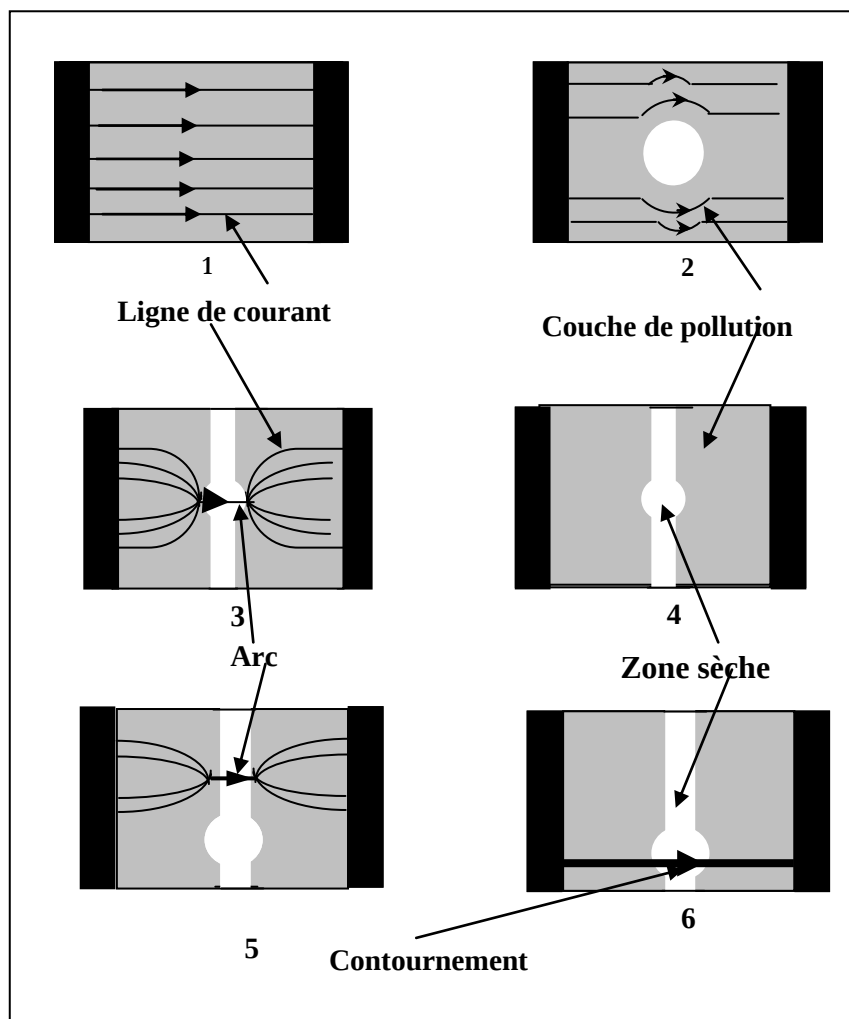


Figure I. 6. Etapes du contournement d'une couche polluée [11].

I.10 METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION

Avant de mettre en service un isolateur quelconque, il faut le soumettre à certains essais prescrits par la CEI [24].

Les isolateurs destinés à être utilisés dans les régions très polluées sont soumis aux essais sous pollution. Ces essais peuvent être classés en deux groupes :

- Essais sous pollution naturelle sur site (in situ).
- Essais sous pollution artificielle au laboratoire.

I.10.1 Essais sous pollution naturelle

Ces essais consistent à installer dans différents sites pollués, des stations dans lesquelles on observe et analyse le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs ou colonnes isolantes, de longueurs et de profils différents [29]. Ils ont l'avantage de tenir compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toute leur complexité dans un site donné [14, 28].

L'inconvénient majeur est qu'ils nécessitent plusieurs années pour pouvoir étudier valablement les performances des isolateurs [24]. Pour cela, plusieurs méthodes de laboratoire ont été proposées en vue de simuler convenablement les conditions naturelles d'exploitation [1].

I.10.2 Essais sous pollution artificielle

Vu leur rapidité et leur coût relativement bas, de nos jours, sont largement utilisés par les chercheurs. Ils consistent à reproduire en laboratoire les conditions de la pollution naturelle [25].

Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Méthodes de la couche solide.
- Méthode du brouillard salin.
- Méthode de la chambre de poussière.

I.10.2.1 Méthodes des couches solides

Dans ces méthodes, la surface isolante est recouverte par pulvérisation d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte.

La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium.

Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en mg/cm^2 . Par ailleurs, si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante [19].

Dans certains cas, les chercheurs ont utilisé une couche semi-conductrice qui garde après séchage une conductivité constante [31].

I.10.2.2 Méthodes du brouillard salin

Dans cette méthode, l'isolateur soumis à la tension d'essai, est placé dans un brouillard salin dont le taux de salinité définit la sévérité de pollution. Ce taux peut être caractérisé soit, par

le poids de sel contenu dans un litre d'eau en g/l , soit par la mesure de la résistivité ou de la densité de la solution saline. Selon la classification des sites pollués, les valeurs de salinité appliquée sont choisies selon une progression allant de 2.5 à 160 g/l .

La méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine. Elle est également valable pour représenter de nombreux dépôts de pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince [32].

I.10.2.3 Méthodes de la chambre de poussière

Afin de représenter le niveau de pollution et la distribution de polluants de la même manière que dans les conditions naturelles, dans une chambre d'essai, on génère un débit d'air lent transportant du sel et des matériaux inertes avec une distribution uniforme que possible, l'objet d'essai étant positionné au milieu de la chambre. Un vaporisateur va mouiller le dépôt de pollution généré précédemment [32, 33].

I.10.3 Critiques de ces méthodes d'essai

Parmi les méthodes que nous avons décrites, la méthode du brouillard salin est d'une grande facilité de mise en œuvre et permet d'obtenir une bonne reproductibilité des essais elle est donc la plus utilisée.

De plus, sa validité a été vérifiée dans un certain nombre de régions côtières et zones industrielles.

D'autre part, la méthode de la chambre de poussière offre un atout considérable pour les essais au laboratoire en tension continue. Cependant son utilisation est limitée vu les complexités qu'elle présente en terme de faisabilité.

Notons que ces méthodes sont moins représentatives pour simuler la pollution désertique [14].

I.11 TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées [27].

Les différentes techniques utilisées pour la lutte contre la pollution sont :

I.11.1 Allongement de la ligne de fuite

Elle permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution.

Deux méthodes sont employées :

- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste [28].
- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [34].

I.11.2 Isolateurs plats

Les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto nettoyant très bien sous l'effet du vent [18].

I.11.3 Graissage périodique

Cette méthode est utilisée seulement pour les isolateurs de poste. Par mesure économique, on utilise des graisses à base de silicone grâce à leurs propriétés hydrophobes. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité des graisses.

I.11.4 Revêtement silicone

Il consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Il protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre, sa longévité est nettement supérieure à celle du graissage [11, 35].

I.11.5 Les isolateurs composites

Ils ont en plus l'avantage d'être légers et d'avoir une grande résistance mécanique que leur confère le noyau. Ils ont aussi de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères [13].

Ils sont constitués d'un noyau en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère.

Cependant, ces isolateurs présentent le désavantage de vieillir sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électrique et mécanique) [28].

I.11.6 Nettoyages des isolateurs

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde. Néanmoins, ce choix pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues. Pour éviter ces interruptions, on effectue un lavage sous tension des isolateurs à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas et afin d'éliminer tout risque de contournement, le lavage est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau, le processus et les distances de sécurité à respecter [27].

I.12 CONCLUSION

Dans ce chapitre introductif, une synthèse bibliographique des différents aspects des phénomènes de pollutions est présentée.

Les principales conclusions que l'on tire de cette synthèse sont :

- Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité du service.
- Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto – nettoyage.
- La pollution reste un facteur déterminant pour le dimensionnement des isolateurs dans les ouvrages de haute tension.

➤ La méthode d'essai sous pollution artificielle est largement utilisée. Elle consiste à reproduire au laboratoire les conditions de la pollution naturelle, ainsi qu'elle possède l'avantage d'être rapide.

➤ Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveaux types d'isolateurs, revêtements hydrophobes...), permettent de disposer aujourd'hui de solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le réseau.

II.1 INTRODUCTION

Le calcul du champ et du potentiel électriques en tout point d'un système de haute tension, est une tâche compliquée, non pas à cause de la complexité des équations aux dérivées partielles qui le décrivent, mais plutôt, en raison de la géométrie complexe du système physique, des conditions aux limites, des formes irrégulières des diélectriques, et dans certains cas, de la présence d'une couche conductrice [46 - 49].

Pour remédier à ce problème, les scientifiques ont développé des méthodes de calcul qui peuvent être classées en deux catégories: les méthodes analogiques et les méthodes numériques. Les méthodes analogiques ne sont plus employées, car elles sont peu commodes et inadéquates pour les problèmes à trois dimensions [55]. Par contre, vu les progrès de l'informatique, les méthodes numériques sont de plus en plus utilisées pour la détermination de façon précise la distribution du champ et du potentiel électriques. Les méthodes numériques sont essentiellement de type différences finies, éléments finis, charges équivalentes et éléments finis de frontières. Ces méthodes sont basées sur la résolution de l'équation aux dérivées partielles de Laplace en imposant les conditions aux frontières adaptées à chaque problème [49 - 51].

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux équations de base de l'électromagnétisme appliquées aux diélectriques. Celles-ci débouchent sur l'équation aux dérivées partielles classiques connues sous le nom de l'équation de Laplace. Nous évoquons, par la suite, les méthodes numériques les plus utilisées dans les techniques de la haute tension, en citant leurs avantages et leurs inconvénients.

II.2 EQUATIONS DE MAXWELL

II.2.1 Mise en équations

La réalisation la plus remarquable de James Clerk Maxwell était d'unifier en un seul ensemble d'équations l'électricité, le magnétisme et l'induction. Les équations de Maxwell sont formées par quatre équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques caractérisés par le champ magnétique $\vec{H}$ et l'induction magnétique $\vec{B}$ aux phénomènes électriques caractérisés par le champ électrique $\vec{E}$ et le

déplacement électrique $\vec{D}$. Les équations qui gouvernent la répartition du potentiel, dans un milieu donné dérivent des équations de Maxwell. Ces équations sont [49]:

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (II.1)$$

$$div \vec{D} = \rho_v \quad (II.2)$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (II.3)$$

$$div \vec{B} = 0 \quad (II.4)$$

ρ_v est la densité volumique de charges et $\vec{J}$ le vecteur densité de courant.

Aux quatre équations de Maxwell précédentes, s'ajoutent les relations constitutives qui lient $\vec{D}$ à $\vec{E}$, $\vec{J}$ à $\vec{E}$ et $\vec{B}$ à $\vec{H}$:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (II.5)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (II.6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (II.7)$$

où ε , μ , et σ représentent respectivement la permittivité électrique, la susceptibilité magnétique, et la conductivité électrique du milieu. Dans le cas d'application d'une différence de potentiel alternative et en tenant des relations constitutives, on peut écrire les équations (II. 1) et (II.3) comme suit :

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \quad (II.8)$$

$$div(\mu \vec{H}) = \rho_v \quad (II.9)$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega \vec{E} \quad (II.10)$$

ω étant la pulsation de la source et j l'unité imaginaire.

Dans les équipements HT considérés, le champ magnétique est faible ; le second membre de l'équation (II.8) peut être négligé, ce qui donne :

$$\overrightarrow{rot E} = 0 \quad (II.11)$$

Les équations (II.9) et (II. 11) gouvernant les grandeurs électriques peuvent être découplées de celles qui gèrent les grandeurs magnétiques [58]. L'équation (II.9) n'est rien d'autre que la forme locale du théorème de Gauss qui traduit la conservation de la charge, tandis que l'équation (II. 11) permet de considérer que le champ $\vec{E}$ dérive d'un potentiel ϕ avec :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}\phi \quad (II.12)$$

En remplaçant le champ dans l'équation (II.9) par son expression de la relation (II. 12), on obtient l'équation:

$$div(-\varepsilon\overrightarrow{grad}\phi) = \rho_V \quad (II.13)$$

L'expression (II.13) est appelée équation de Poisson. Elle décrit la distribution du potentiel dans un milieu de permittivité absolue ε et une densité de charge volumique ρ_V . Cependant, dans la plupart des équipements de haute tension, les charges d'espace ne sont pas présentes et donc la densité volumique de charge ρ_V est nulle. Dans ces conditions, on aura l'équation dite de Laplace :

$$div(\overrightarrow{grad}\phi) = 0 \quad (II.14)$$

Il est de même, pour les milieux conducteurs tels que les électrodes, l'équation (II.14) régie la répartition du potentiel.

II. 2.2 Conditions aux limites avec condition frontières

Les équations de Maxwell permettent de déterminer la manière dont les composantes du champ électromagnétique se conservent (ou non) à l'interface de deux milieux présentant des propriétés diélectriques différentes. Il est alors d'usage de décomposer le champ électromagnétique en deux composantes particulières : l'une tangente, et l'autre normale à la surface de séparation. Dans le cas où plusieurs milieux coexistent, ce qui est généralement le cas dans les problèmes HT, on aura à résoudre des équations dans des régions de propriétés physiques différentes (isolant solide, air) présentant une ou plusieurs interfaces communes. En plus des interfaces isolant-isolant, on a aussi des interfaces conducteur-isolant.

Ce procédé a permis de dégager des résultats importants à propos des conditions aux limites à la surface de séparation des deux milieux. Ces résultats concernent les composantes tangentielles et normales, à la surface de séparation du champ électromagnétique [52]. Les conditions d'interface à l'interface entre les différents milieux sont:

$$D_{n1} - D_{n2} = \rho_V \quad (\text{II.15})$$

$$E_{n1} - E_{n2} = 0 \quad (\text{II.16})$$

Ces relations expriment la discontinuité de la composante normale de l'induction électrique $\vec{D}$ et la conservation de la composante tangentielle du champ électrique $\vec{E}$ à la surface de séparation des deux milieux.

En absence de charges à la surface de séparation des deux milieux, la condition relative à la composante normale de l'induction électrique devient:

$$D_{n1} - D_{n2} = 0 \quad (\text{II.17})$$

II. 2.3 Conditions aux frontières

Les principaux types de condition de frontière existent en éléments finis : Dirichlet et Neumann. La condition de type Dirichlet correspond à spécifier les valeurs que la solution doit vérifier sur les frontières du domaine, ici le potentiel électrique. Cette condition est la plus simple des conditions limites. La condition de type Neumann, qui se veut l'imposition des valeurs des dérivées (gradient) que la solution doit vérifier sur les frontières du domaine, correspond ici au champ électrique [53].

II.3 MODELE MATHEMATIQUE

La distribution du champ électrique peut être obtenue par approximations des équations de Maxwell. Ces approximations prennent différentes formes selon les propriétés matérielles de l'équipement [47 - 49].

Le potentiel en un point joue un rôle important dans l'obtention de toute information concernant le champ électrique en ce point. L'intensité du champ électrique peut être déduite de la relation champ-potentiel suivante [47 - 49]:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V \quad (II.18)$$

La densité de flux électrique peut être trouvée en utilisant l'intensité du champ électrique par la relation.

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (II.19)$$

Le flux D à travers une surface fermée est relié à la quantité de charges intérieures par la relation de Gauss:

$$div \vec{D} = \rho \quad (II.20)$$

L'objectif est d'évaluer le potentiel qui bien sûr peut être trouvé en termes de configuration de charge. Toutefois, ce n'est pas un travail simple vu la répartition exacte des charges en un point n'est pas facilement disponibles [47 - 49].

En combinant des équations (II.15) et (II.17) et en introduisant la permittivité ε (relation constitutive $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$), on obtient l'équation:

$$div \varepsilon \overrightarrow{grad}V = -\rho \quad (II.21)$$

Cette expression est dite équation de Poisson. Cependant, dans la plupart des équipements de haute tension, les charges d'espace ne sont pas présents ou négligeable ($\rho_v = 0$) et donc l'équation à résoudre pour les milieux diélectriques est [47 - 49]:

$$div \left(\varepsilon (-\overrightarrow{grad}V) \right) = 0 \quad (II.22)$$

L'équation (5) est connue comme l'équation de Laplace. Pour les milieux conducteurs en régime stationnaire, il vient, puisque $div \vec{J} = 0$ et $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

$$div \left(\sigma (-\overrightarrow{grad}V) \right) = 0 \quad (II.23)$$

L'équation de Laplace en coordonnées cartésiennes est :

$$div \overrightarrow{grad}V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (II.24)$$

Le logiciel de calcul détermine le potentiel électrique pour obtenir la distribution de champ en résolvant l'équation aux dérivées partielles suivante [48, 49]

$$-div \varepsilon \overrightarrow{grad} V - div \sigma \overrightarrow{grad} V = 0 \quad (II.25)$$

II.4 METHODES DE DETERMINATION DU CHAMP ET DU POTENTIEL ELECTRIQUES

Pour déterminer la distribution de champ électrique, plusieurs méthodes sont employées à telles que la Méthode des Différences Finies (M.D.F), la Méthode des Eléments Finis (M.F.F), la Méthode des Eléments Finis de Frontière (M.F.F.F), la Méthode des Charges Fictives (M.C.F), etc. Cependant, la complexité dans la détermination du champ électrique réside dans le manque de méthodes d'analyse en raison de la géométrie complexe du système physique, les conditions aux limites et des calculs mathématiques complexes. Les grandes catégories dans lesquelles la détermination du champ électrique sont analytiques, expérimentaux et les méthodes numériques [49, 53, 54].

L'approche analytique donne la répartition exacte de champ électrique en résolvant les modèles mathématiques de géométries physiques simples. Par exemple, le champ électrique autour d'une charge ponctuelle ou d'un conducteur linéique peut être facilement résolu en utilisant des formules de Gauss simples. En raison de difficultés provenant des géométries complexes et des conditions aux limites, l'évaluation de la distribution du champ électrique devient très problématique en utilisant des techniques d'analyse [51 - 53].

Les configurations expérimentales typiques pour la mesure du potentiel ou du champ électrique le long d'un isolateur de haute tension comprennent des sondes électrostatiques, des dipôles sphériques et des capteurs électro-optiques [54].

La sonde électrostatique est une des techniques les plus populaires utilisées dans le laboratoire pour mesurer le champ électrique autour d'une chaîne d'isolateurs. La configuration et les procédures expérimentales impliquées sont simples et rentables. Le système utilise un procédé indirect dans lequel le champ électrique est obtenu à partir de la mesure de la distribution du potentiel [54]. On cite aussi

l'utilisation de dipôles sphériques qui est une approche de longue date pour déterminer la distribution de champ électrique autour d'un isolant [51]. Cette méthode est généralement utilisée pour les isolateurs en verre ou en céramique qui ont des pièces métalliques intermédiaires le long de la chaîne d'isolateurs. Cependant, avec l'exigence de mesure plus précise, des outils utilisant des capteurs optiques sont mis au point donnant des mesures de la distribution de potentiel et de champ à une grande précision [54, 55].

Une alternative intéressante aux mesures expérimentales se trouve dans l'utilisation des méthodes numériques (la M.F.F, la M.F.F.F, ...) dont l'application aux domaines de l'électrotechnique et des hautes tensions n'est plus à démontrer. Ces méthodes ont été utilisées avec succès dans l'étude de la distribution du champ et du potentiel électriques autour des isolateurs propres et recouverts de couche de pollution. Cependant, la détermination de la distribution du champ et du potentiel électriques à l'intérieur et autour des équipements de haute tension est un problème de très grande complexité vue les formes géométriques complexes des équipements et des formes irrégulières des diélectriques [49, 51 - 63].

Les approches numériques ont toujours été une technique utile pour résoudre de nombreux problèmes en haute tension. Ces approches deviennent plus importantes lorsque les mesures pratiques sont difficiles ou impossibles à mettre en oeuvre, très risquées et coûteuses avec l'installation des équipements de laboratoire sophistiqués [56, 57]. Les calculs numériques par le biais des expressions analytiques (équations de Maxwell) [58 - 60] ou des représentations de circuits [61] peuvent être de bonnes alternatives, mais ces derniers sont assez complexes et non applicables pour les divers problèmes pratiques. Pour ces raisons, les techniques numériques de modélisation et de simulation sont les plus préférées pour certains chercheurs [47, 48, 51 - 63, 55].

Les méthodes numériques les plus connues et les plus utilisées en HT et spécialement pour la détermination de la distribution du champ et du potentiel consistent en la Méthode des Différences Finies (M.D.F), la Méthode des Éléments Finis (M.E.F), la Méthode de Simulation de Charges (M.S.C) et la Méthode des Éléments Finis de Frontière (M.E.F.F) [52].

Notant qu'un nombre important de codes de calcul pouvant être utilisés pour effectuer l'analyse du champ électrique sur les systèmes d'isolation en HT, se basent essentiellement sur deux méthodes numériques, à savoir, la Méthode des éléments finis (M.E.F) et la Méthode des Éléments Finis de Frontière (M.E.F.F) [52].

II.4.1 Méthode des Eléments Finis (MEF)

La Méthode des Eléments Finis (M.E.F) est un outil numérique très puissant pour la résolution numérique des équations aux dérivées partielles représentant analytiquement le comportement de certains systèmes physiques sur un domaine spatial fini. Elle a connu son plus fort développement d'abord en mécanique [52, 53].

Elle a été adaptée plus tard à l'électromagnétisme pour la résolution des équations de Maxwell qui régissent les phénomènes électromagnétiques [49, 52, 53].

La M.E.F est une méthode générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique: problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque. En plus, elle s'adapte bien aux milieux hétérogènes [53].

La Méthode des Eléments Finis utilise une approximation par parties de la fonction inconnue, pour résoudre une équation différentielle. Cependant, la complexité des géométries des systèmes considérés, rend cela très difficile, voire impossible, pour trouver une approximation de la solution dans l'ensemble du domaine étudié. Pour contourner cette difficulté, le domaine est subdivisé en sous-domaines (éléments finis), sur lesquels on effectue localement une interpolation pour approcher la fonction inconnue [53]. Le domaine considéré est limité par une frontière où la valeur du potentiel est supposée connue.

La méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles. Le maillage est une étape très importante, puisque le choix de la forme de l'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci, qui soient les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude. Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que les triangles, les rectangles, les quadrilatères arbitraires pour les problèmes à deux

dimensions et les tétraèdres, les hexaèdres, les cubes, les prismes pour les problèmes à trois dimensions [53]. Une fois le maillage effectué, de rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément issus de la subdivision, c'est-à-dire à transformer par interpolation le système d'équations aux dérivées partielles quelconque en un système d'équations algébriques linéaires à l'aide d'un calcul variationnel ou des méthodes de minimisation de l'erreur comme la méthode des résidus pondérés [53, 62]. Le choix des polynômes comme fonction d'interpolation est du au fait qu'ils sont faciles à intégrer et ou à différencier. Le degré du polynôme dépend du nombre de nœuds assignés à chaque élément [62], de la nature et du nombre d'inconnues à chaque nœud, et surtout du degré de dérivabilité des variables apparaissant dans la forme variationnelle associée aux équations aux dérivées partielles du problème avec conditions aux limites [53].

Les équations algébriques permettent de donner une approximation du potentiel sur chaque élément de la subdivision en fonction des valeurs aux nœuds de l'élément :

$$V = \sum_{i=1}^n \lambda_i V_i \quad (\text{II.26})$$

n est le nombre de nœuds d'interpolations; λ_i les fonctions d'interpolation et V_i les valeurs nodales.

Le principe de base consiste à trouver la distribution des valeurs nodales λ_i qui vérifient les équations aux dérivées partielles et qui remplissent les conditions aux limites. Ceci peut être effectué soit par une méthode variationnelle qui minimise une fonction équivalente au problème différentiel posé, ou en utilisant une méthode de projection comme la projection de Galerkin qui traite directement l'équation aux dérivées partielles [53].

II.4.1.1 Etapes de la Méthode des Eléments Finis

La Méthode des Eléments Finis peut être résumée par les étapes suivantes [53]:

- Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage).
- Etablir, pour chaque élément, la matrice de rigidité élémentaire $[ke]$ reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux $\{ue\}$ et les forces $\{fe\}$ appliquées aux noeuds :

$$[ke] \{ue\} = \{fe\} \quad (\text{II.27})$$

- Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds

$$[K] \{U\} = \{F\} \quad (\text{II.28})$$

Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites.

- Résoudre le système $[K] \{U\} = \{F\}$ et obtenir les déplacements $\{U\}$ aux noeuds.
- Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées.

II.4.1.2 Avantages de la M.E.F

La puissance de la Méthode des Eléments Finis réside essentiellement dans les points suivants [53]:

1. La flexibilité est l'un des plus importants avantages de la M.E.F. Les éléments peuvent avoir plusieurs formes variées et peuvent donc s'adapter facilement à n'importe quelles formes géométriques complexes, et aussi tenir compte des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.
2. Les matrices formant le système final d'équations sont symétriques. Ce qui simplifie grandement la résolution de celui-ci.
3. La programmation de la méthode est assez simple surtout lorsqu'il s'agit de tenir compte de l'introduction des conditions aux limites
4. La M.E.F a fait ses preuves dans beaucoup de domaines en ingénierie [62]. De plus, avec son développement important, il existe de très bons logiciels commerciaux qui sont basés sur cette méthode et qui la rendent très accessible. Par conséquent, elle est applicable à beaucoup de problèmes sans que nous connaissions nécessairement la M.E.F en détail [53].

II.4.1.3 Inconvénients de la M.E.F

Outre les avantages, la M.E.F présente aussi certains inconvénients tels que [53]:

1. La méthode ouvre la porte à la résolution de problèmes complexes qui peuvent échapper à la maîtrise de l'utilisateur et elle peut être la source d'erreurs diverse et parfois graves.
2. La modification d'une partie de la géométrie entraîne un nouveau maillage et, donc, une remise à zéro dans les calculs.
3. Un mauvais choix du maillage proposé automatiquement par les logiciels, limite la précision des résultats. L'utilisateur doit donc porter une attention particulière lors de cette étape.
4. Le traitement d'une problématique par la M.E.F implique une connaissance parfaite du domaine géométrique et des conditions aux limites. Ce qui complique la mise en œuvre de ce traitement lorsque ce n'est pas le cas.

II.4.2 METHODE DES ELEMENTS FINIS DE FRONTIERE (M.E.F.F)

L'utilisation des équations intégrales de frontière dans la résolution des problèmes afin de déterminer la distribution de champ électrique, est assez ancienne. Cette méthode s'est avérée très efficace dans la résolution des problèmes de champ magnétique et dans la détermination de la distribution du champ électrique, autour des isolateurs pollués [52, 63]. Contrairement à la M.E.F, la discrétisation de la M.E.F.F est appliquée seulement aux limites de la géométrie du système à étudier, au lieu de l'ensemble de l'espace considéré [52, 64]. Le principe de cette méthode est la reformulation des équations aux dérivées partielles qui décrivent le problème sous forme d'équations intégrales qui ne font intervenir que des inconnues sur la frontière du domaine [52, 63, 64]. Pour cette raison, le temps de calcul et de traitement de la M.E.F.F n'est pas grandement affecté par la taille physique du système [52, 63, 64]. Cependant, la présence de matrices peuplées et équations intégrales pour les problèmes non linéaires ou non homogènes pourrait réduire le calcul des performances [65]. La solution de ces équations est obtenue par la méthode des éléments de frontière qui est basée sur l'application de la technique des éléments finis sur le contour du domaine étudié [65].

L'utilisation de la méthode des éléments de frontière à un certain nombre d'avantages. La discrétisation du milieu infini ne cause plus de problème, puisque tout est ramené sur la frontière du milieu étudié [52, 63, 64]. Par rapport aux autres

méthodes numériques comme la M.E.F, ceci représente un gain considérable en nombre de variables à calculer. En plus, lorsqu'une modification au niveau de la géométrie intervient, il n'est pas nécessaire de reconsidérer tout le maillage comme pour la M.E.F. Il suffit seulement de modifier les paramètres de la portion de la frontière considérée [62, 63, 64]. Cependant, il y a des problèmes qui ne peuvent pas être résolus de manière adéquate par la méthode des éléments de frontière ; les problèmes qui ne sont pas symétriques, par exemple [62,63, 64]. En fait, les problèmes non linéaires ne peuvent pas être mis sous la forme appropriée puisque le domaine qui n'est pas maillé doit être homogène. L'extension de la M.E.F.F aux problèmes non linéaires est difficile. Dans ces conditions, on doit discrétiser la totalité du domaine où se produit le non linéarité matérielle ou géométrique, perdant ainsi l'avantage de la M.E.F.F d'une discrétisation de la frontière uniquement [52, 63, 64].

II.5 CONCLUSION

Le développement des réseaux électriques de haute tension fait apparaître des problèmes liés aux champs électriques élevés qui peuvent interrompre l'approvisionnement en énergie électrique. Par conséquent, une conception de dispositifs et de systèmes capables de supporter des champs électriques élevés est d'une grande importance. Ainsi, la détermination de la distribution du champ et du potentiel électriques de tout système de haute tension, devient nécessaire. Les équations gouvernant la répartition de ces derniers, dans un milieu donné, dérivent des équations de Maxwell.

Etant donné la difficulté des méthodes analytiques dans la détermination directe du champ et du potentiel électriques à l'intérieur et sur les surfaces des isolants possédant des formes irrégulières et complexes, le recours aux méthodes numériques s'avère indispensable. Ces méthodes sont essentiellement de type différences finies, éléments finis, charges équivalentes et éléments finis de frontières. La méthode des éléments finis semble présenter des avantages importants par rapport aux autres méthodes. En effet, elle est un outil numérique très puissant dans la résolution des problèmes à domaine spatial fini. Elle s'adapte facilement aux différentes géométries et tient compte aussi des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.

II.6 MESURE DU CHAMP ELECTRIQUE

Les mesures de champ électrique jouent un rôle très important dans la construction et la résolution des problèmes d'équipements utilisés pour la haute tension.

II.6.1 Méthode directe d'un voltmètre électrostatique

Cette méthode consiste à déterminer le champ E_T à la surface de la terre à partir d'un voltmètre électrostatique qui mesure la différence de potentiel U entre un point de la terre B et un point A située à une altitude connue [66].

Il faut utiliser un ioniseur radioactif, en général on utilise une substance émettrice de particules α (noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$) lourdes et peu pénétrantes, générées par des substances telles que l'uranium. L'égalisateur radioactif est placé sur la sonde du voltmètre pour augmenter localement la conductivité électrique de l'air, afin de délivrer un courant I suffisant.

Ce voltmètre est constitué de deux électrodes planes et parallèles A et B telles que le champ électrique E_h soit homogène entre elles. La pression électrostatique subie par l'électrode de mesure b , placée au centre de l'électrode B, entraîne la déviation de l'aiguille i se déplaçant sur une échelle pouvant être étalonnée directement en kilovolts (Figure .II.1).

Les gammes de mesure de l'appareil se règlent en modifiant la distance d .

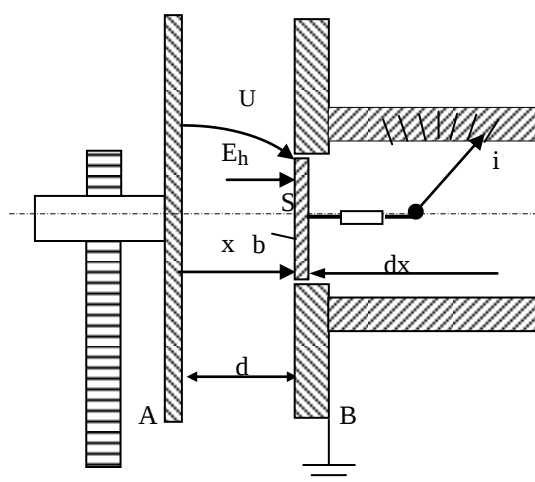


Figure .II.1 Voltmètre électrostatique

II.6.2 Méthode indirecte de Wilson

Cette méthode consiste à déterminer le champ électrique E_{Tm} , à la surface du sol, en mesurant les charges électriques Q à la surface de celui-ci.

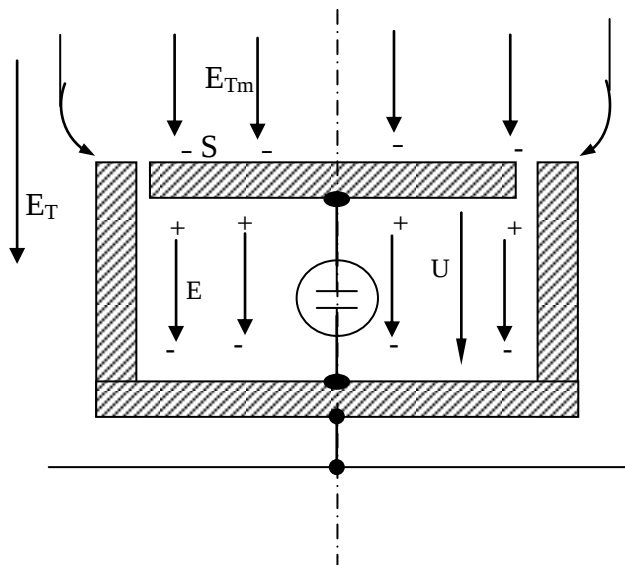


Figure .II.2 Méthode de Wilson

D'après le théorème de Gauss on a :

$$\epsilon_0 ES = CU \quad (II.29)$$

C : la capacité de l'électrode de surface S , contre le boîtier mis à la terre. Alors le champ électrique E_{Tm} est égal à :

$$E_{Tm} = \frac{CU}{\epsilon_0 S} \quad (II.30)$$

Toute sonde placée dans un champ électrique provoque des perturbations à ce dernier.

Pour définir l'acuité maximale d'un champ régnant entre deux électrodes de forme géométrique quelconque, on peut comparer le champ électrique homogène équivalent

$E_T = U/d$ entre ces deux électrodes au champ électrique maximal E_{Tm} . C'est pour cette raison que l'on introduit un facteur de forme η .

$$E_T = \eta E_{Tm}$$

Avec

E_{Tm} : le champ électrique a mesuré.

E_T : le champ électrique à la surface du sol.

II.6.3 Méthode indirecte du voltmètre rotatif (moulin a champ électrique)

La méthode du voltmètre rotatif pour la détermination du champ électrique E_{Tm} à la surface du sol est basée sur la mesure du courant $i(t)$, résultant de la variation de la capacité (dC/dt) entre un rotor tournant à la vitesse n et un stator fixe.

La valeur moyenne du courant mesuré $i(t)$ est :

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} Q(t) \quad (II.31)$$

Comme la vitesse de rotation n (vitesse angulaire en tour par seconde) est liée à la période T par la relation : $n = \frac{1}{T} (s^{-1})$

$$\text{Alors : } Q(t) = \frac{I_m}{n} (C) \quad (II.32)$$

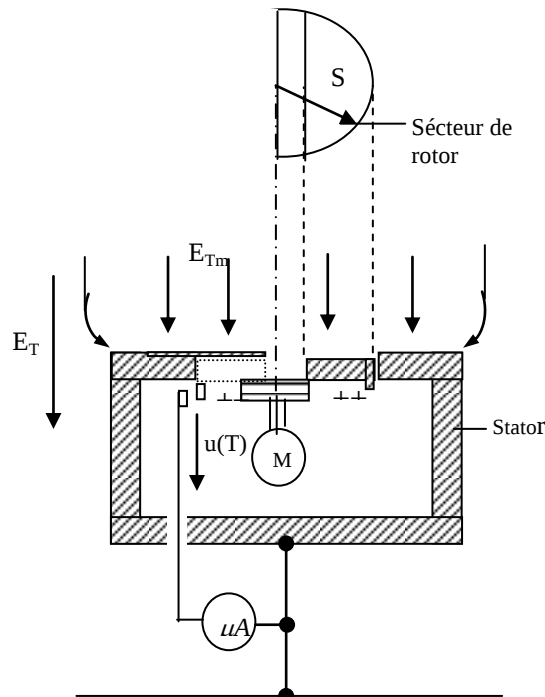


Figure II.3 Méthode du voltmètre rotatif.

La densité de charge à la surface de la partie de la sonde exposée aux lignes de champ est

$$\sigma_s = \epsilon_0 \cdot E_{Tm} \quad \text{avec } E_{Tm} : \text{le champ à mesuré (II.33)}$$

$$\text{Avec } \sigma_s = \frac{Q}{(S/2)} \quad \text{avec } S \text{ section de la sonde}$$

Comme La valeur moyenne du courant mesuré $i(t)$ est :

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} Q(t) \quad (II.34)$$

Et comme T est égale à l'inverse de la vitesse de rotation (n) du rotor :

$$T = \frac{1}{n}$$

On obtient :

$$E_{Tm} = \frac{\sigma_s}{\epsilon_0} = \frac{2 \cdot I_m}{\epsilon_0 \cdot S \cdot n} = \frac{2 \cdot I_m}{\epsilon_0 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot n} \quad V/m \quad (II.35)$$

II.6.4 Méthode de la sonde de champ a capacité repartie (SCCR)[67]

Une méthode de mesure du champ électrique, lors de la décharge couronne négative en géométrie tige plan, est développée au moyen d'une sonde à capacité repartie. Elle est incorporée, dans un même niveau de surface, sur un système d'électrodes tige plan où les effets de bord sont éliminés. La sonde est calibrée et testée, ses fonctions ont été bien vérifiées par le Laboratoire de Haute Tension de l'ENP.

La sonde à capacité repartie à une grande précision, avec une large bande passante, utilisée pour les méthodes de mesure très rapide et sans contact.

Cette méthode consiste à déterminer le champ électrique E_T à la surface du sol, en mesurent la différence de potentiel U entre une tige sous haute tension et la sonde, Pour réaliser la mesure, la disposition de mesure a une résistance et un condensateur montés en filtre passe-bas, comme le montre la figure II.4.

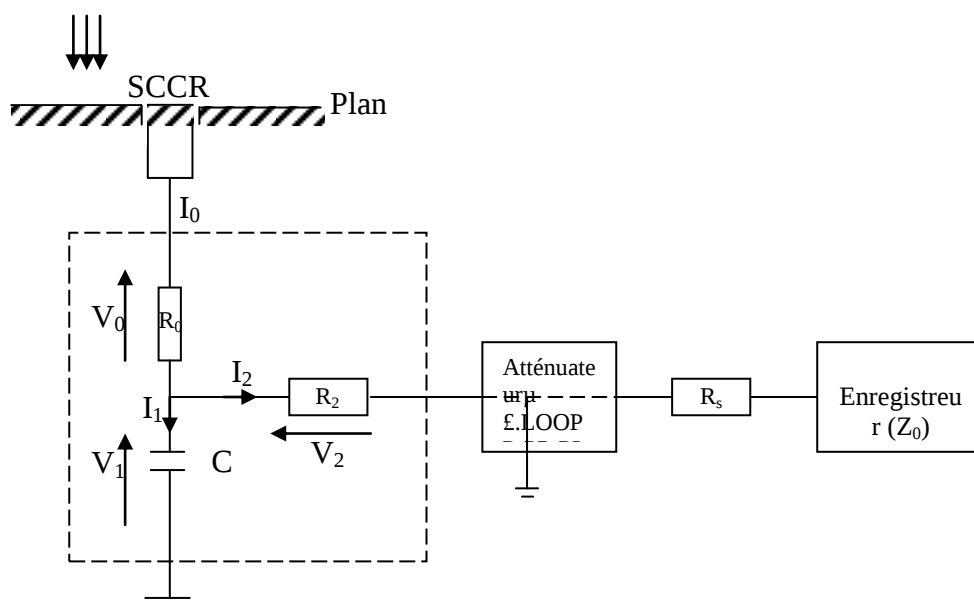


Figure II.4 : Méthode de la sonde du champ à capacité répartie SCCR

L'antenne est constituée de deux résistances R_0 , R_2 et une capacité C . il est nécessaire d'utiliser un diviseur de tension (Atténuateur) pour recueillir le signal de la tension V_1 aux bornes de la capacité C . le signal sera visualisé sur l'oscilloscope (Enregistreur).

II.7 CONCLUSION

Les diverses Méthodes de calcul et de mesure du champ électrique ont permis de donner les valeurs de la densité du champ électrique à la surface du plan en fonction de la distance inter électrodes (h). Ces résultats pourront servir à déterminer d'autres paramètres, tels que la conductivité de l'effet couronne et la densité de la charge d'espace, au voisinage immédiat du plan

On remarque qu'aucun modèle n'est complètement satisfaisant, et cela est dû à la complexité et la tortuosité du canal de la décharge de foudre. De plus, les hypothèses de départ sont souvent limitatives. Ainsi, si on prend l'exemple concernant le sol supposé de conductivité infinie, il apparaît que cette hypothèse simplifie grandement les calculs du champ rayonné. En effet, la prise en compte des irrégularités de la surface de la terre conduit encore à des calculs supplémentaires.

Face à ces problèmes de représentativité des modèles, nous avons choisi la méthode pratique (simulation de phénomène en laboratoire), ce qui nous amène à représenter la méthode de mesure avec la sonde à capacité répartie.

III. INTRODUCTION:

Dans notre travail, nous étudions la distribution de champ électrique sur les chaînes d'isolateurs, Les expériences concernant dans le laboratoire de haute tension de l'université d'el oued.

Les essais de mesure de champ électrique sur les chaînes d'isolateurs en plusieurs cas sont effectués :

- Dans un cas propre.
- Pour des différentes distance du mesure radial.
- avec anneau de garde.
- avec pollution.
- l'effet des disques de verre brisé du chaîne d'isolateur

III.2. Dispositif expérimental :

III.2.1. Circuit d'essai du laboratoire de Haute tension (Université d'El Oued) :

Les essais sont effectués dans le laboratoire de haute tension de l'université d'El Oued.

Notre laboratoire est constitué des trois sources de tensions :

- Une source de tension à fréquence industrielle 50Hz
- Un générateur de tension continu,
- Un générateur de tension impulsionnelle.

III.2.1.1. Équipement de la station d'essai :

La station d'essai de notre laboratoire comprend les organes suivants :

- Un pupitre de commande et des appareils de mesure et de protection,
- Un transformateur d'essai,
- Un transformateur de réglage,
- Des diviseurs de tension,
- La Chaîne d'isolateur ,
- Appareil de mesure du champ électrique ,

III.2.1.2. Pupitre de commande :

Ce pupitre est alimenté sous une tension de 220V. Ce pupitre nous permettons la variation automatique de la tension d'essai. Figure (III.1).



Figure III.1 : Panneau de contrôle utilisé pour effectuer le test de claquage.

III.2.1.3. Appareils de mesure et de protection :

L'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un pupitre de commande situé dans le laboratoire, mais à l'extérieur de la plate-forme d'essai (la cage de Faraday).

Le transformateur de haute tension et son régulateur sont protégés indépendamment par un fusible et un relais thermique de 250A. Ces protections sont liées avec le circuit de la bobine du contacteur principal, ce qui donne une protection suffisante contre les surcharges du transformateur et les courants de court-circuit.

Pour les mesures de tension on a :

DSM : un voltmètre numérique pour mesurer la tension alternative.

DGM : un voltmètre numérique pour mesurer la tension continue.

Un voltmètre et ampèremètre pour mesurer de la tension primaire au niveau du transformateur d'essai.

III.2.1.4. Transformateur d'essai :

Nous avons utilisé un transformateur d'essai conçu et isolé pour la génération de haute tension. Il transfère l'énergie électrique d'un circuit à un autre circuit à travers des conducteurs à couplage inductif et les bobines de transformateurs. Un courant variant dans l'enroulement primaire crée un flux magnétique variable dans le noyau du transformateur et donc un champ magnétique variable à travers l'enroulement secondaire. Ce champ magnétique variable induit une force électromotrice variable (FEM) dans l'enroulement secondaire. Cet effet est appelé induction mutuelle. Dans cet expérience le transformateur haute tension élévateur ayant la puissance nominale de 5 kVA, 220V / 100 kV est utilisé qui est représenté sur la Figure III.2 Lorsque la tension augmente, le courant diminue dans la même proportion.



Figure III.2 : Transformateur à haute tension utilisé pour l'essai.

III.2.1.5. Transformateur de réglage :

Nous permettons la variation de la tension aux bornes du transformateur d'essai.

Son rapport de transformation est de 220V/250V.

III 2.1.6. Diviseur de tension :

Il existe deux diviseurs de tension :

- Un diviseur de tension capacitif pour la mesure de la tension à fréquence industrielle.
- Un diviseur de tension résistif pour la mesure de la tension continue.

III 2.1.7. chaîne des isolateurs :

nous utilisons la chaîne des isolateurs de haute tension type capot et tige de profil standard,



Figure III.3 : Isolateur capot et tige de profil standard.

III 2.1.8. Circuit d'essai en tension alternatif :

Les générateurs de haute tension alternative à fréquence industrielle sont utilisés pour :

- Les essais à haute tension alternative (transformateurs haute tension).
- L'alimentation (transformateurs haute tension) des redresseurs à courant continu, des générateurs à circuit oscillant et des générateurs de choc.

La Figure III.4 représente le circuit d'essai à tension alternatif réalisé au laboratoire de haute tension. Figure III.5 est celle du montage réalisé au laboratoire de haute tension.

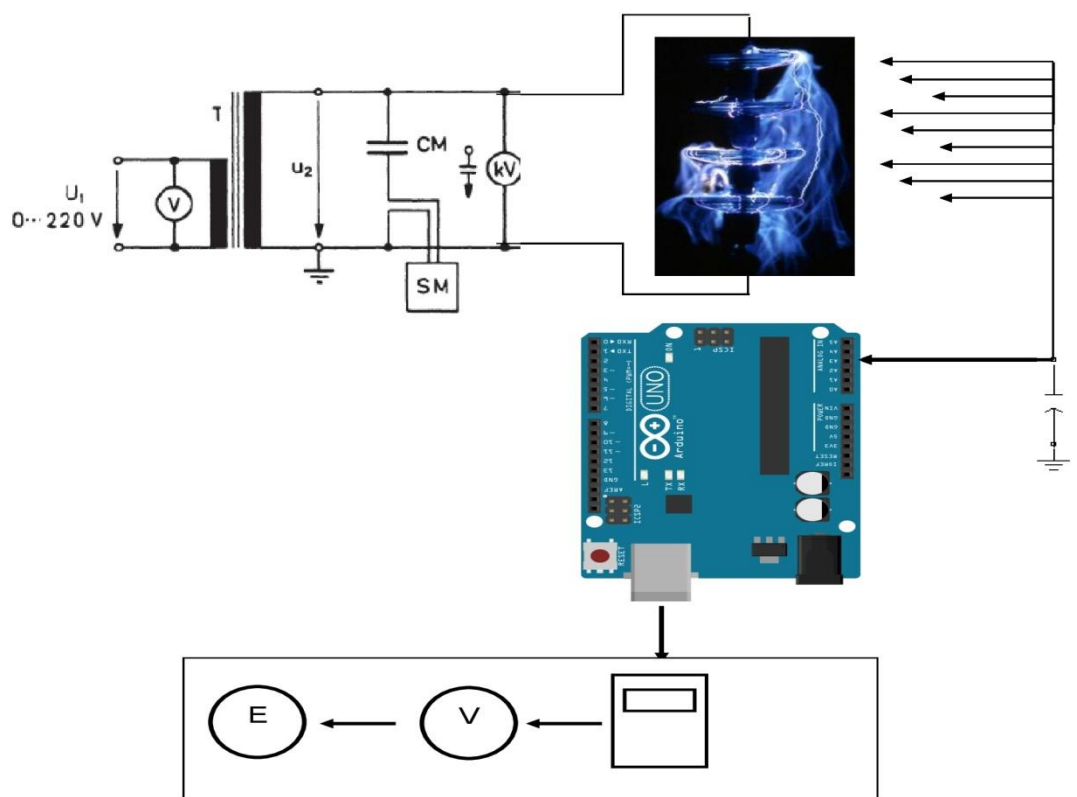


Figure III.4 : Circuit d'essai pour la mesure du champ électrique.



Figure III.5 : montage réalisé au laboratoire de haute tension.

III 2.1.9. Appareil de mesure le champ électrique (C.C.E.H.T) :

Pour notre objectif de mesurer du champ électrique autour d'un chaîne d'isolateur, nous avons réalisé un capteur du champ électrique a haut tension (C.C.E.H.T), Il mesure le champ électrique distribuée sur la chaîne des isolateurs, donc il nous sert a mesuré simultanément en cinq positions, aussi permet d'enregistrer et afficher les résultats dans le PC.

la Figure III.6 présente l'appareil du mesure du champ électrique :



Figure III.6 : Appareil du mesure du champ électrique (C.C.E.H.T)

III 2.1.9. 1. Le circuit électronique du capteur (C.C.E.H.T) :

1- Les composantes du circuit du capteur :

Pour mesurer le champ électrique nous avons installé un circuit électrique composé par :

- microcontrôleur - capacité - résistance – sonde.
- **capacité** : Nous avons utilisé une capacité céramique présentée par la figure III.7 avec une valeur de 9.1 nF .



Figure III.7 : capacité céramique

- **la résistance** :

Nous avons utilisé une résistance avec une valeur de l'ordre de 3.3 M Ω



Figure III.8 : résistance

- **la sonde :**

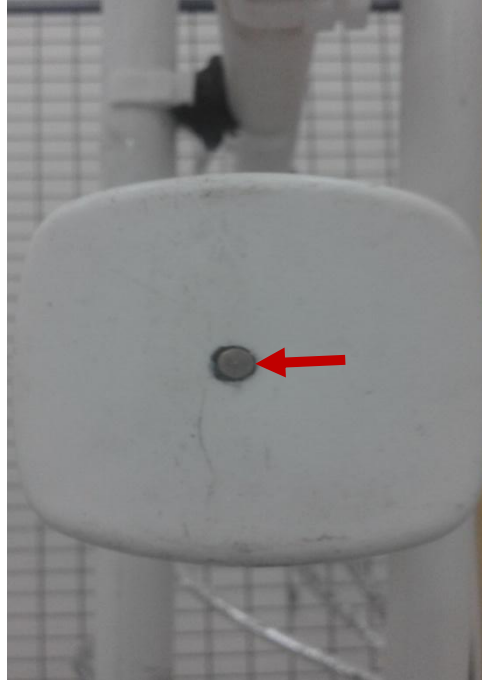


Figure III.9 : sonde

- **le microcontrôleur :**

Nous avons utilisé le microcontrôleur intégré à l'Arduino, cet microcontrôleur est un système qui ressemble à un ordinateur, il a une mémoire, un processeur et un programme d'interface pour le connecter avec le PC. Cette Arduino a des performances robustes, avec faible dimensionnement et consomme peu d'énergie, leur utilisation domine tous les domaines (voiture, porte de garage, robots, ...). La carte Arduino n'est pas le microcontrôleur le plus puissant, mais son architecture a été publiée en open-source et toute sa philosophie imposée au monde [68].

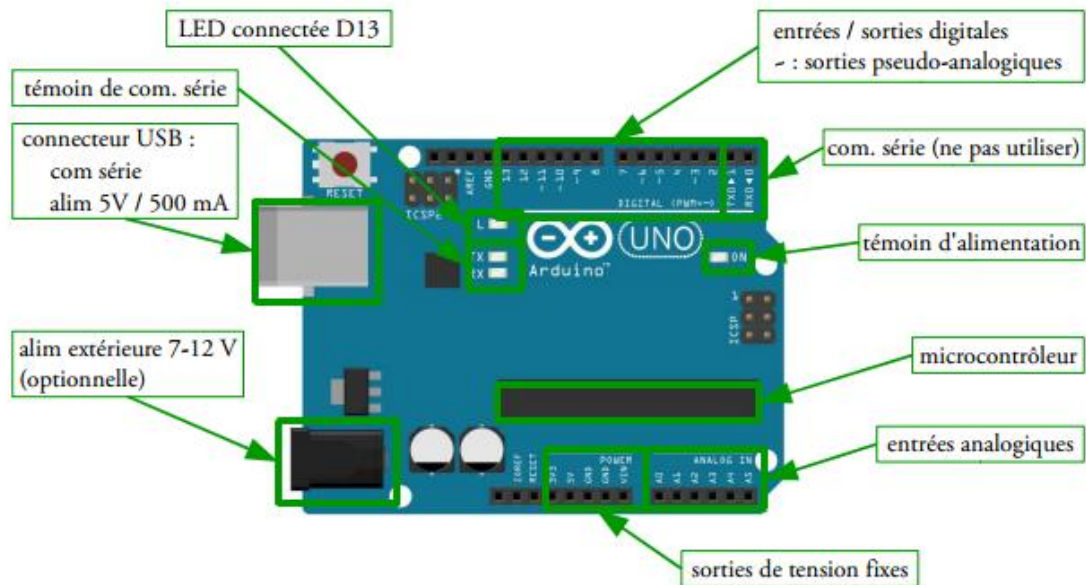


Figure III.10 : le microcontrôleur Arduino

La carte Arduino se relie à un ordinateur par un câble USB. Ce câble permet à la fois l'alimentation de la carte et la communication série avec le PC.

2- Le circuit montage :

Nous avons relié une capacité et résistance en parallèle à travers l'Arduino dans les ports A5 et la terre, aussi la sonde est reliée avec l'Arduino dans les ports A5.

la figure III.11 présente le circuit du test à mesurer le champ électrique,

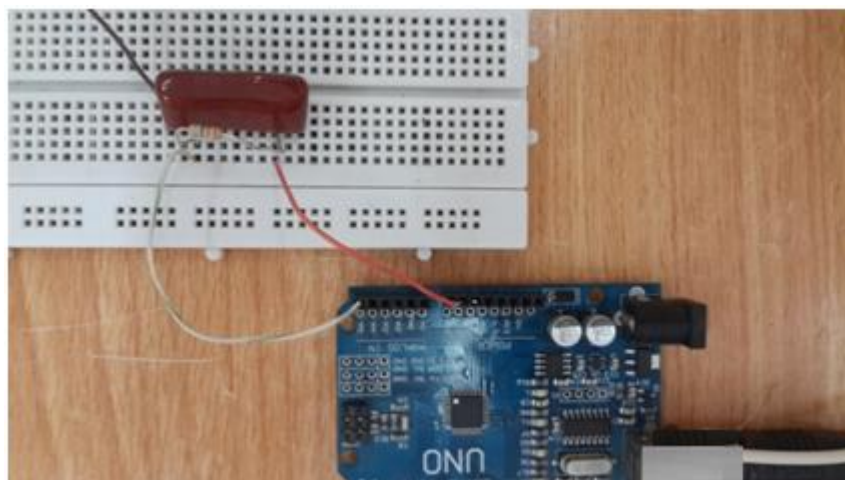


Figure III.11 : le circuit montage test

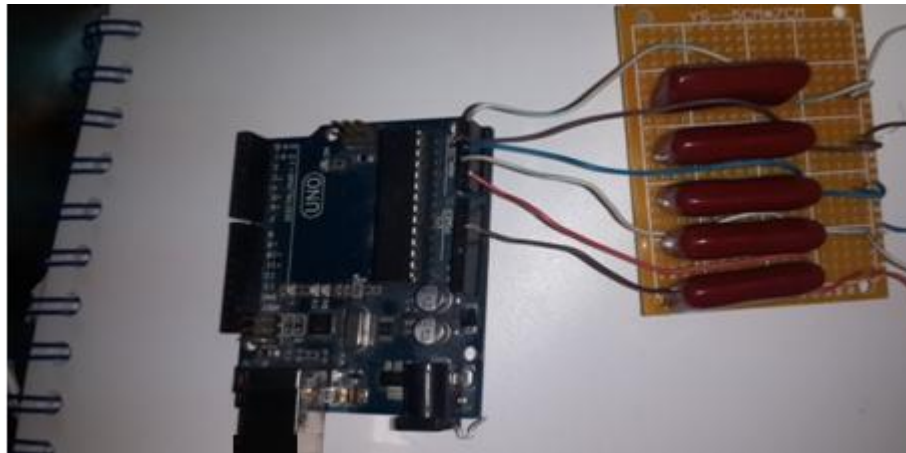


Figure III.12 : le circuit montage utilisé pour le mesure champ électique

- **programmation de la carte Arduino :**

Arduino fournit un environnement de développement avec un éditeur de source, les opérations de compilation et de chargement dans la mémoire du microcontrôleur étant ramenées à des clicks sur des boutons dans l'IHM (très simple).

La communication entre le PC et la carte se fait via le port USB, moyennant de l'installation d'un driver adapté (fourni par arduino) [67].

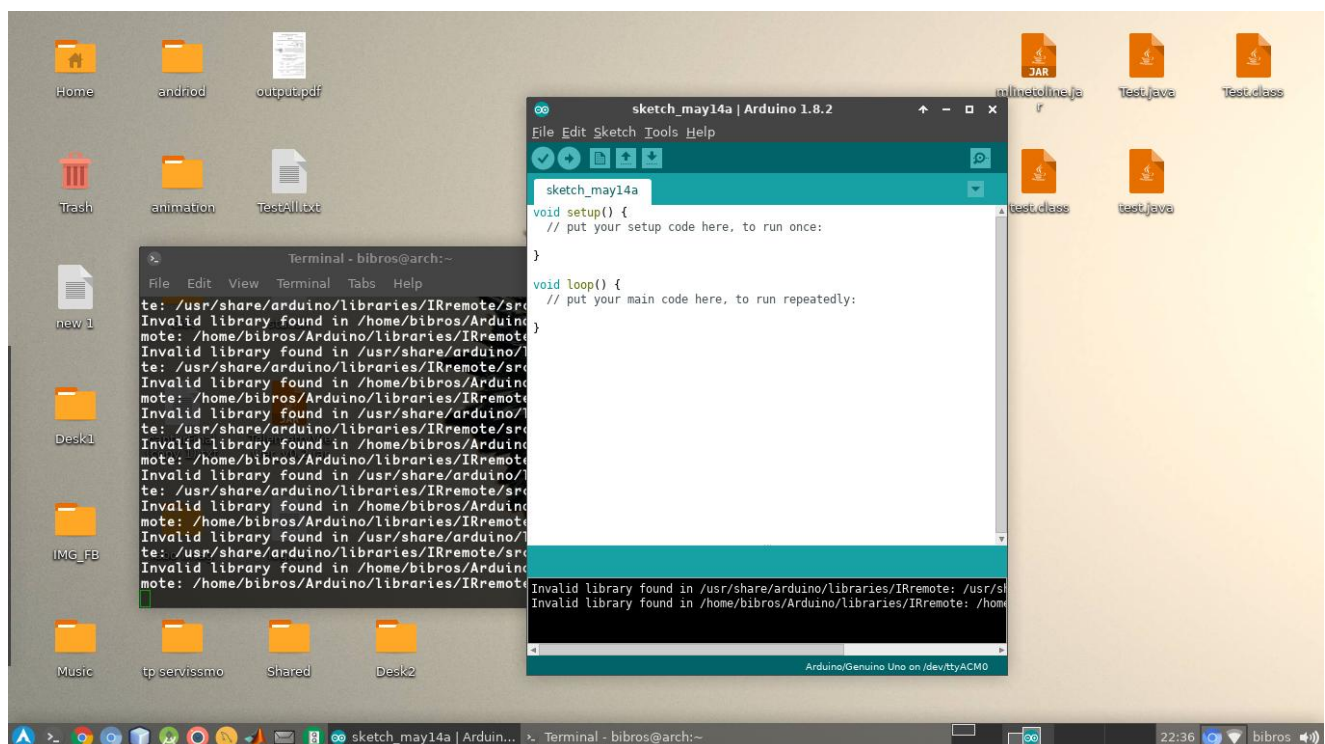
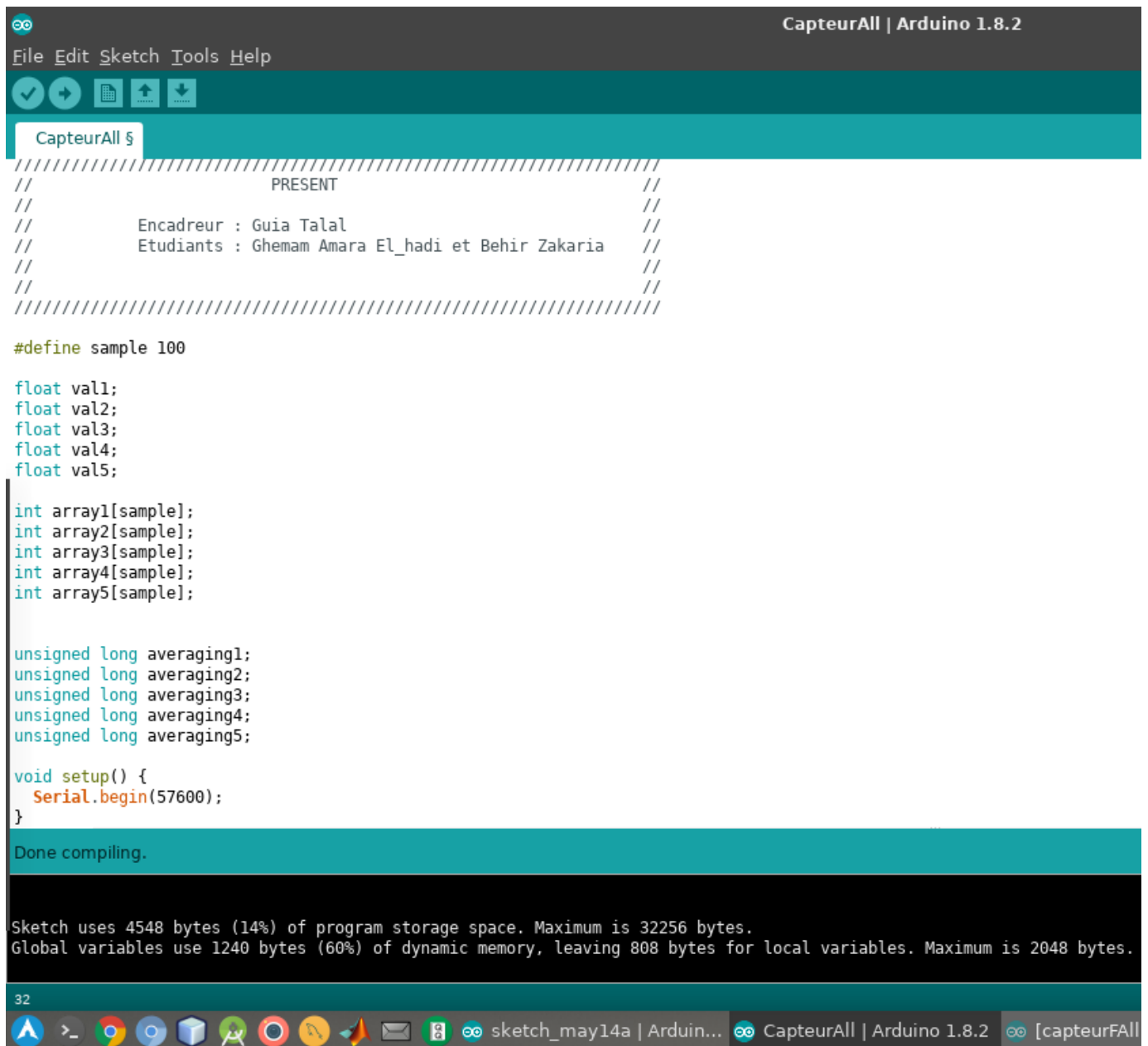


Figure III.13 : Application du L'environnement de développement Arduino

- **La source du programme :**

Nous avons programmé la carte Arduino pour mesurer et calculer le champ électrique, ensuite le résultats sont affiché dans le PC , l' Arduino sera programmé par le code source suivant :



```
CapteurAll | Arduino 1.8.2
File Edit Sketch Tools Help
CapteurAll $
////////////////////////////////////
//                               //
//          PRESENT              //
//                               //
//      Encadreur : Guia Talal   //
//      Etudiants : Ghemam Amara El_hadi et Behir Zakaria //
//                               //
//                               //
////////////////////////////////////

#define sample 100

float val1;
float val2;
float val3;
float val4;
float val5;

int array1[sample];
int array2[sample];
int array3[sample];
int array4[sample];
int array5[sample];

unsigned long averaging1;
unsigned long averaging2;
unsigned long averaging3;
unsigned long averaging4;
unsigned long averaging5;

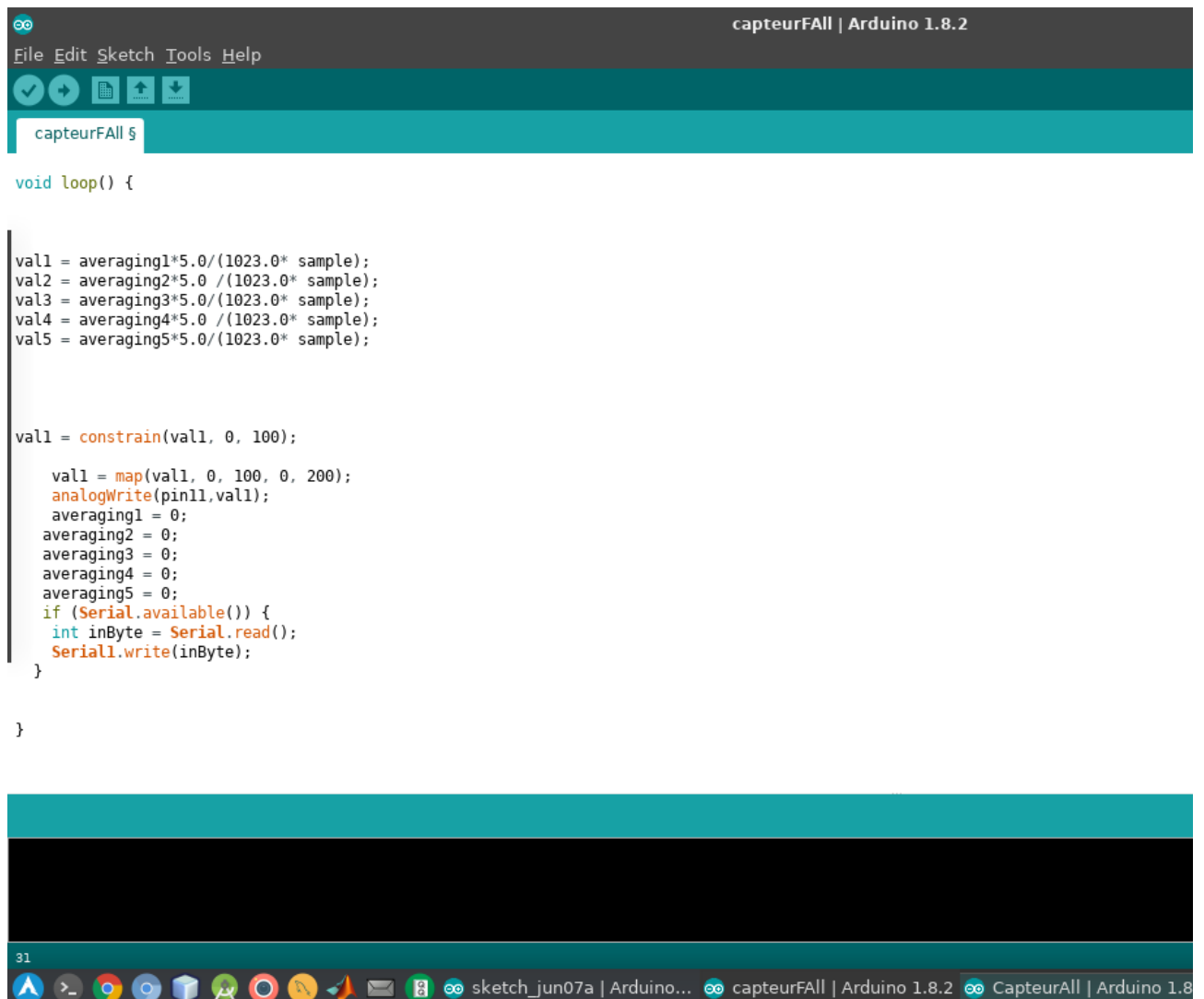
void setup() {
  Serial.begin(57600);
}

Done compiling.

Sketch uses 4548 bytes (14%) of program storage space. Maximum is 32256 bytes.
Global variables use 1240 bytes (60%) of dynamic memory, leaving 808 bytes for local variables. Maximum is 2048 bytes.

32
sketch_may14a | Arduin... CapteurAll | Arduino 1.8.2 [capteurFAll
```

-a-



-b-

Figure III.14 : le code source du programme Arduino pour le mesure du champ electrique.

III.3 CONFIGURATION DU MODELE EXPERIMENTAL :

nous procédons à l'étude des différentes configurations . A cet effet, nous distinguons, deux types de variation du champ électrique, selon la position de la sonde latérale ou horizontale(d).

1^{er} cas : La sonde balayée le rayon horizontale.

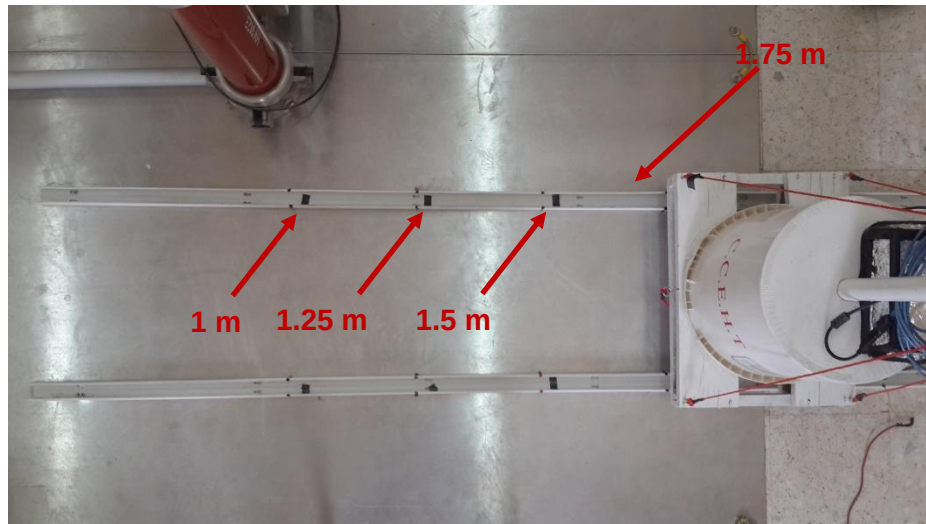


Figure III.15 : les positions du mesurer champ horizontale

2^{er} cas : La sonde balayée le rayon vertical.



Figure III.16 : les positions du mesurer champ vertical

III.4. Equation reliant V au champ E :

$$\Rightarrow E(t) = \frac{C}{\varepsilon_0 S} V(t)$$

Avec

C: capacité

V(t): le tension mesurer entre la capacité [kV/cm]

S: le surface du la sonde [cm²]

ε_0 : la permittivité diélectrique de l'air [F.cm⁻¹]

$$C = 9.1 \text{ nF} , \quad \varepsilon_0 = 8.854 \, 187 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$$

$$E = \frac{9.1 \times 10^{-9}}{8.854 \, 187 \times 10^{-12} \times 10^4 \times 1.96 \times 10^{-4}} \times V(t)$$

III.5. DETERMINATION DE LA CONSTANTE DE LA SONDE K_S :

Pour déterminer la constante de la sonde K_s, nous effectuons d'abord nos essais pour un système plan-plan.

- a) Maintenir une distance plan-plan (h) aussi petite que possible et faire varier la tension sans présence d'arc électrique et lire la valeur sur l'oscilloscope.
- b) Déterminer les champs par la méthode théorique et calculer le rapport entre les valeurs du champ expérimental et théorique.

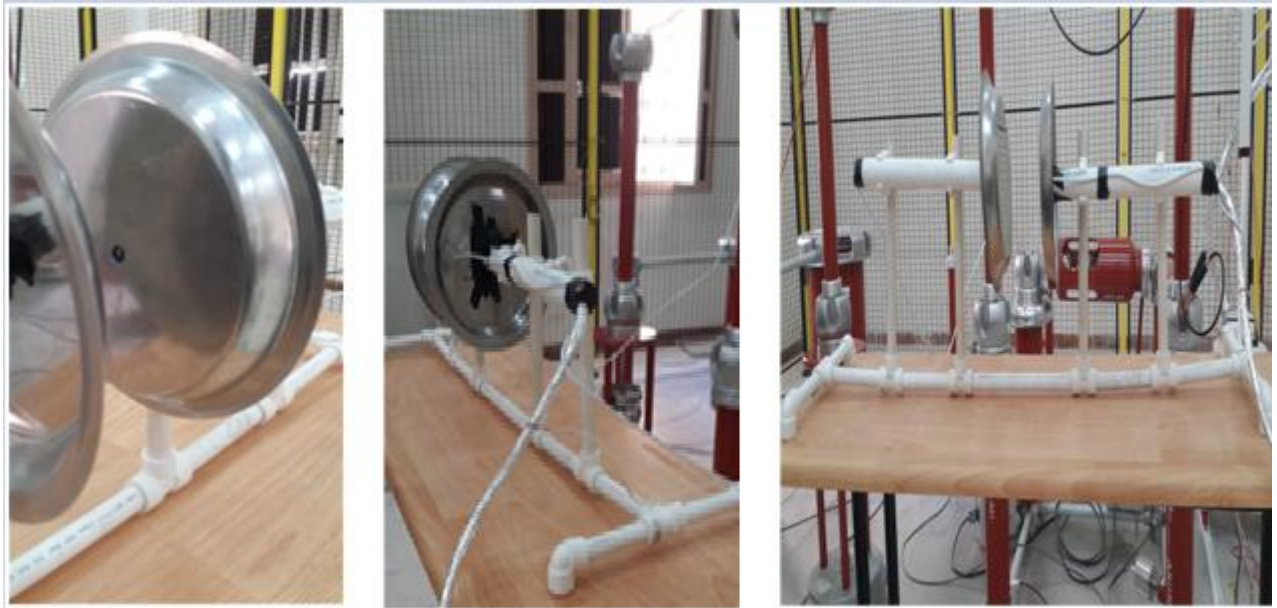


Figure III.17: circuit d'étalonnage de la sonde du mesure du champ électrique

En choisissant $h = 8 \text{ cm}$ nous obtenons :

U (kV)	E (théorique) = U/h (kV)	E (expérimental)	Ks
20.25	2.53125	699.46	0.003619
29.87	3.73375	1227.81	0.003041
35.62	4.4525	1551.88	0.002869
40.75	5.09375	1843.35	0.002763

Les valeurs de K_s sont obtenues en utilisant la relation :

$$K_s = E_{th} / E_{exp}$$

$$\text{d'où : } K_s = \frac{0.003619 + 0.003041 + 0.002869 + 0.002763}{4} = 0.00299$$

$$\Rightarrow K_s = 0.00299$$

La valeur finale du champ électrique mesuré est donnée par la formule suivante :

$$E = E_{exp} \times 0.00299 \times V(t) \text{ [kV/cm]}$$

III.6. FORME DES SIGNAUX OBTENUS AVEC PC :

Nous donnons ici la forme d'onde obtenue sans décharge (figure III.16).

- L'axe des abscisses est l'axe de temps.
- L'axe des ordonnées représente la tension du signal reçu

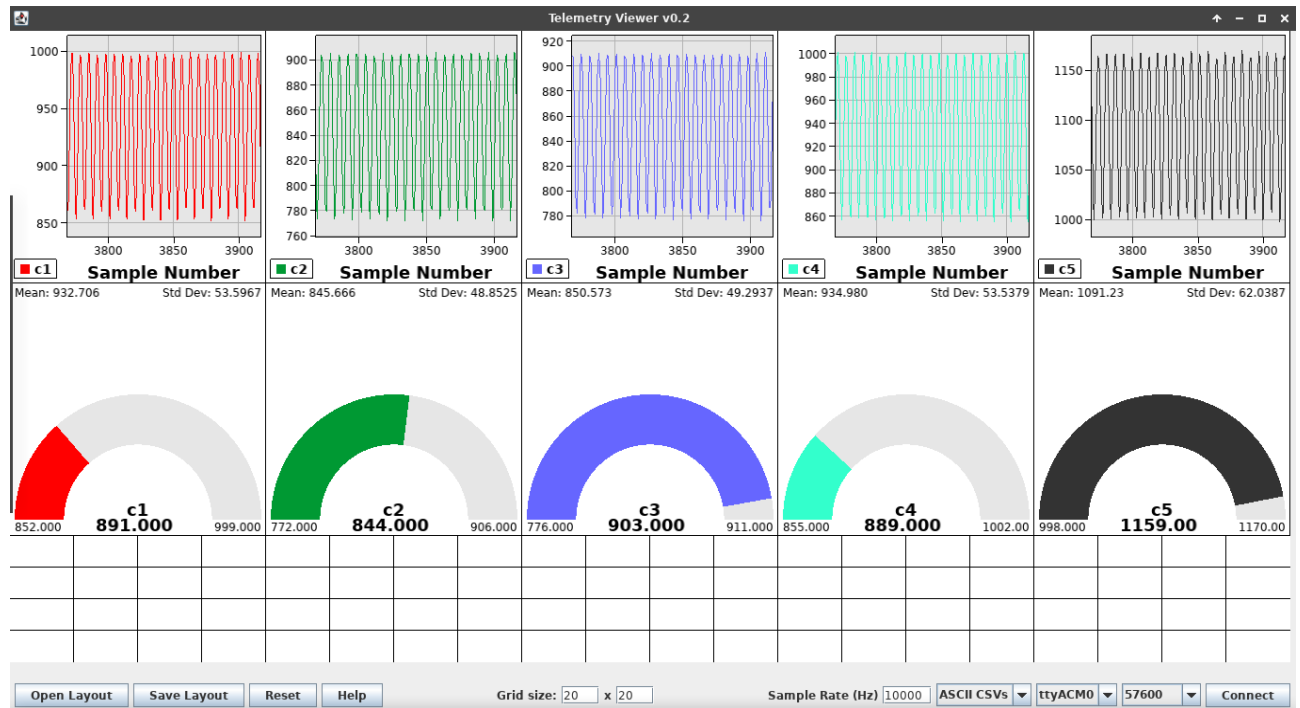


Figure III.18 : la forme d'onde en registre par PC

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce partie nous avons applique différente palier de la tension sur la chaine d'isolateur, elle est composé de six disc. Le mesure de champ électrique autour de la chaine ce ferra sur les treize points au long du chaine, six points dirigés vers le verre et sept points sur le métal, ensuit nous avons effectués plusieurs essai pour les cas suivante :

- chaine propre
- chaine polluée
- chaine en cas d'un disc cassé
- chaine avec anneau de garde

Tous les résultats obtenus sont enregistrée directement sur le PC, ensuit nous prenons les valeurs maximaux.

IV.2 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Nous avons changé la distance par port au centre du chaine d'isolateur (1m et 1,25m,1,50m, 1,75m) et appliquée des différents niveaux de tension (15kV, 30kV, 45kV, 60kV, 80kV) pour les divers cas du surface des isolateurs(propre et pollue).Les conductivités de la pollution utilisée sont 0.5, 1.4,1.76,et 1,97.ms/cm²

Ensuite, nous avons étudié l'effet du disc cassé dans la chaine d'isolateur pour la distribution du champ électrique E.

Enfin, pour montrer l'effet de l'anneau de garde sur la distribution du champ électrique E nous avons changé la position de l'anneau sur le long de le chaine, le première anneau en niveau de haute tension et autre au niveau de la terre, avec le changement de position chaque 5cm. la même chose pour cas un seule anneau.

Dans ce cas nous avons fixé la tension sur 80 kV et la distance sur 1 m

IV.2.1 MESURE DU CHAMP ELECTRIQUE AUTOUR DU CHAINE D'ISOLATEUR PROPRE

Dans ce cas nous avons varié deux paramètres, la distance du mesure et la tension appliquée, pour la distance on a quatre position (figure IV.1) et pour la tension on a cinq niveaux.

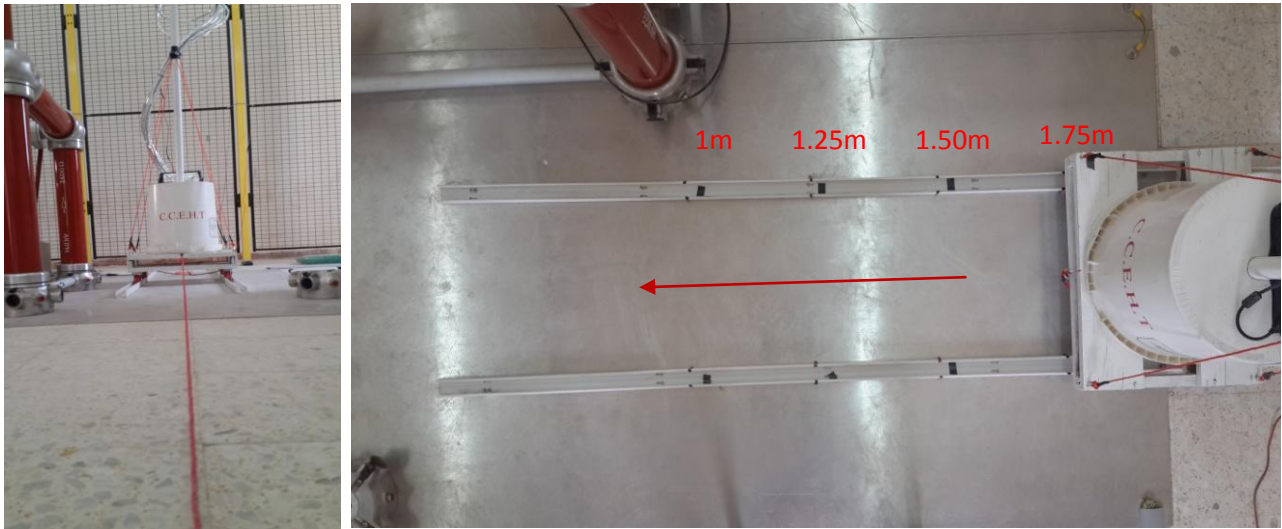


Figure IV.1: les positions de mesure du champ électrique.

Dans chaque distance nous avons appliqué le tension suivantes:(15kv,30kv,45kv,60kv et 80kv).

IV.2.1.1 L'effet de la position latérale:

Les caractéristiques donnant l'intensité du champ électrique en fonction de la position latérale, sont tracées sur la figure IV.2.

Pour les différentes positions latérales des sondes, avec les quatre positions. Nous remarquons que, la distribution du champ électrique autour de la chaîne d'isolateur, si on éloigne de la chaîne, l'intensité du champ électrique diminue, aussi d'une façon linéaire.

Les caractéristiques donnant l'intensité du champ électrique en fonction de chaque points dans la chaîne d'isolateur avec la variation de la distance, sont tracé sur le figure IV.3 et IV.4

Les figures IV.3 et IV.4 montrent que, Pour les différentes positions des points le long de la chaîne d'isolateur, le champ électrique se change pour chaque point. On observe une augmentation important en chaque fois quand on s'approche au conducteur sous haute tension l'intensité du champ électrique.

- $V=80\text{kV}$

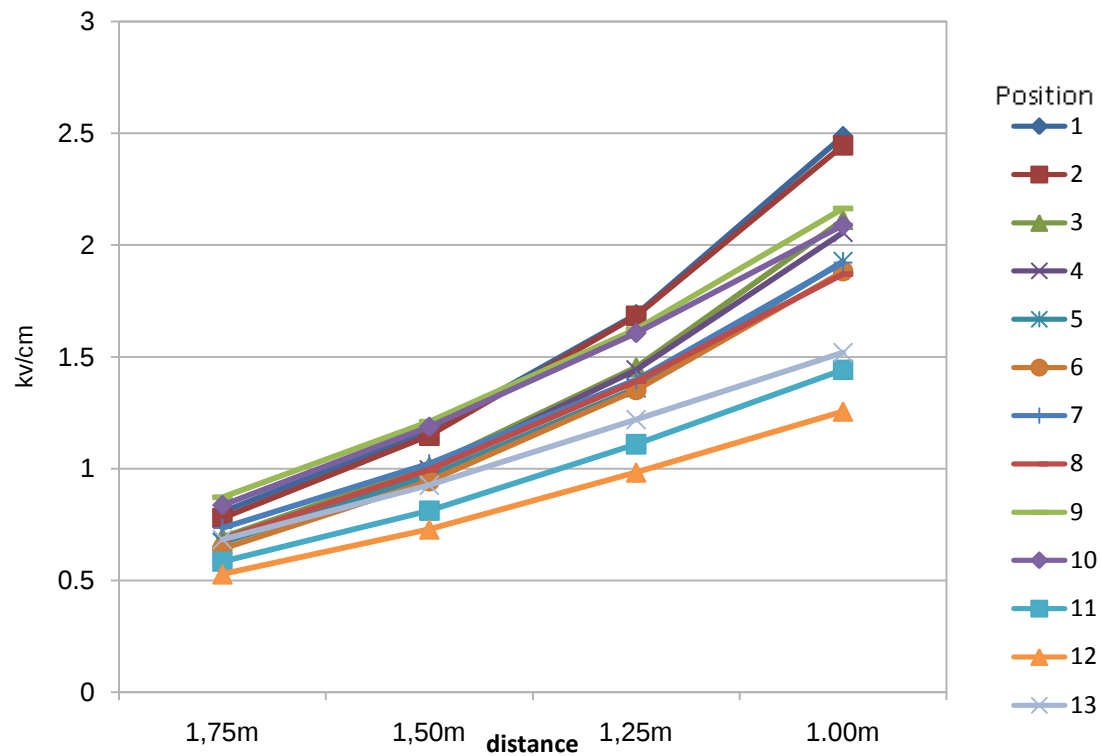


Figure IV.2: Champ électrique en fonction de positions de mesure avec $V=80\text{ kV}$

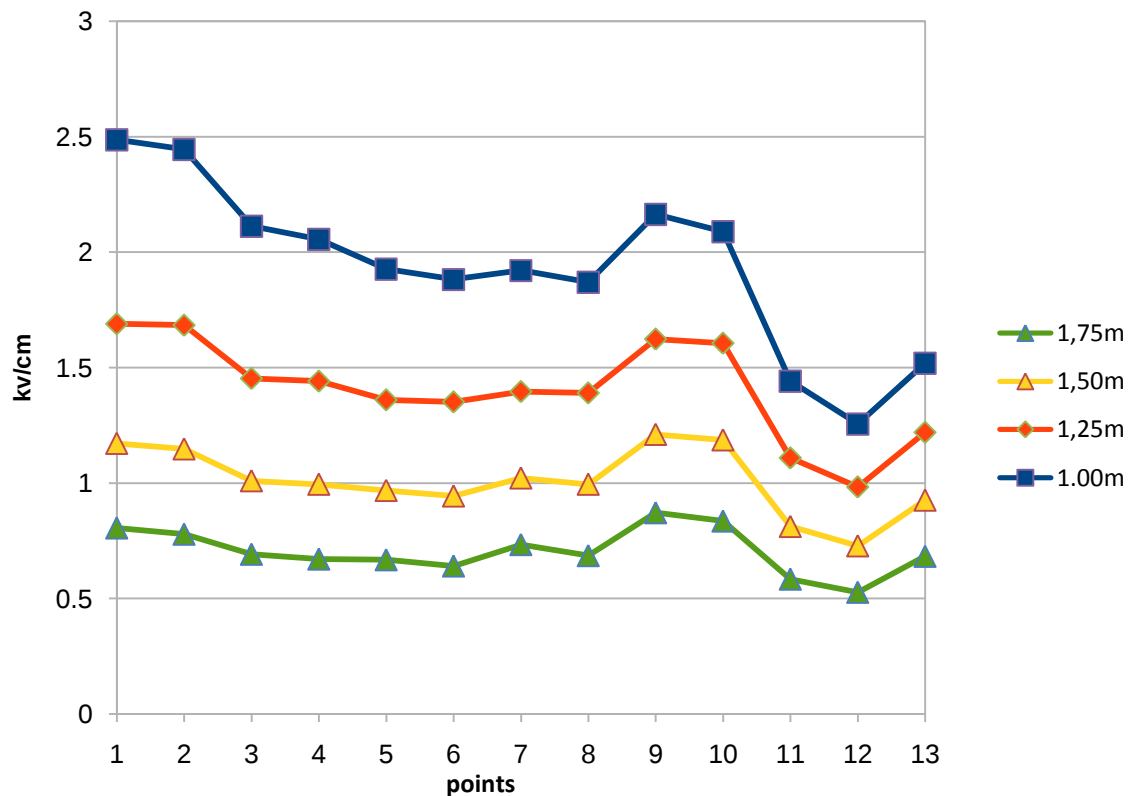


Figure IV.3: Champ électrique en fonction de chaque points vertical avec $V=80\text{ kV}$

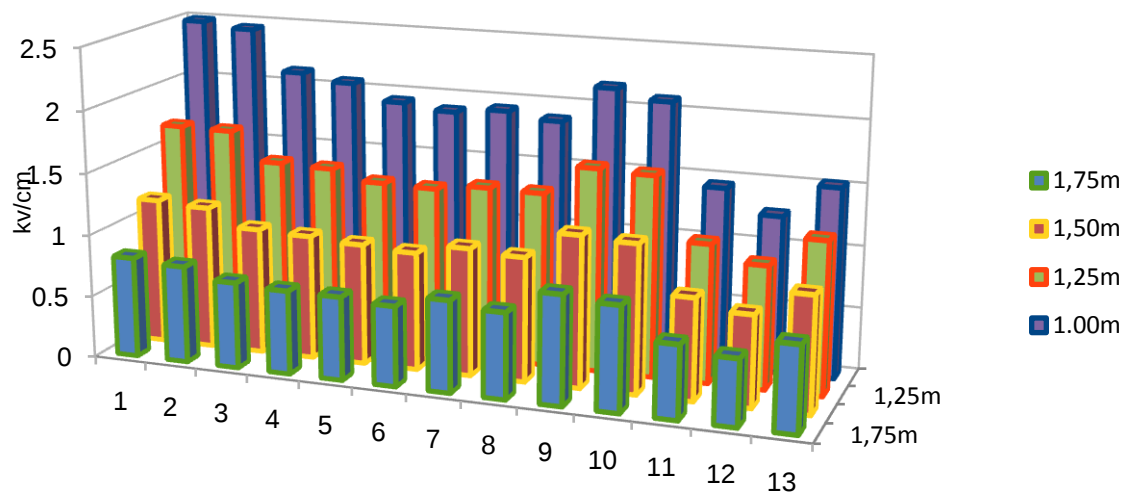


Figure IV.4: Champ électrique en fonction de chaque point vertical avec $V=80$ kV

IV.2.1.2 Variation de niveau de la tension:

La variation du champ électrique en fonction de la tension appliquée, en fixons la distance sur 1m, et montrées la figure IV.5.

Pour les quatre niveaux de tension appliquée, nous remarquons que, la tension a une grande influence sur la valeur du champ électrique, cela si nous augmentons le niveau de tension, l'intensité du champ électrique augmente, aussi d'une façon linéaire.

Les caractéristiques donnant l'intensité du champ électrique en fonction de chaque point dans la chaîne des isolateurs avec la variation de tension, ces variations sont tracées sur les figures IV.6, IV.7 et IV.8

Ces figures montrent qu'il y a un changement du champ électrique, pour les différentes positions au long de la chaîne des isolateurs, et celle pour chaque point verticale. On observe une augmentation importante en chaque fois quand on augmente le niveau de tension l'intensité du champ électrique.

- Le distance = 1m

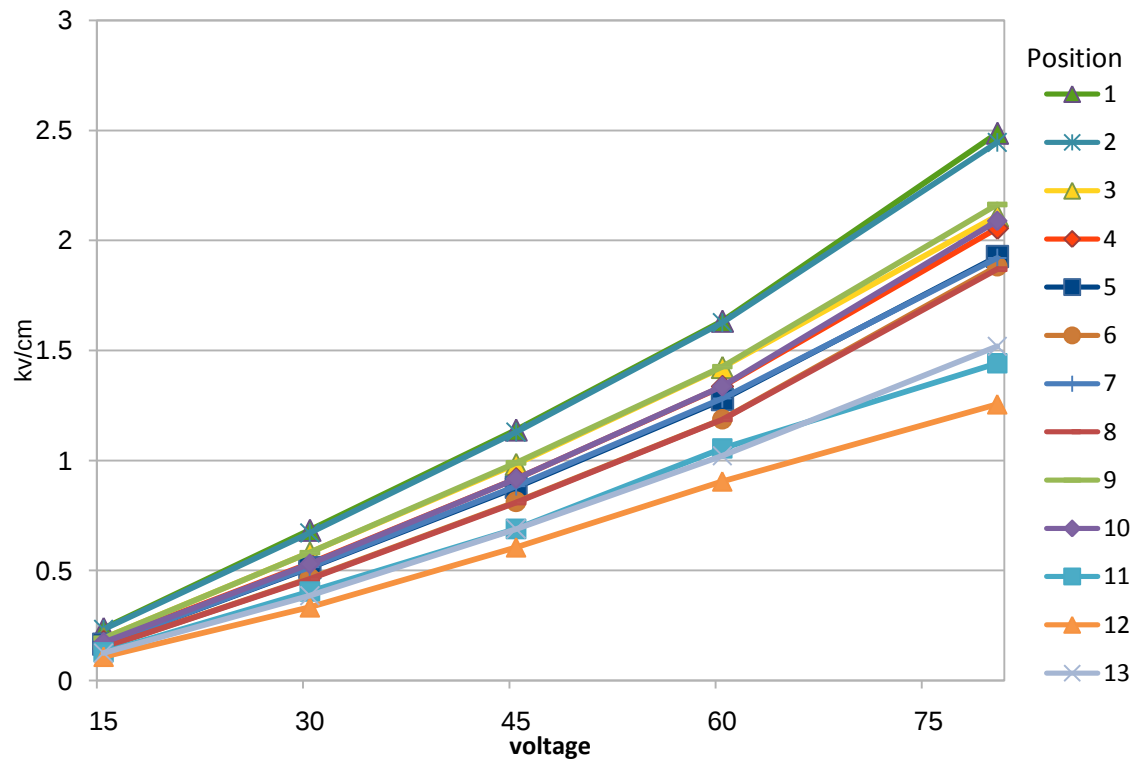


Figure IV.5: Influence de la position de la distance latérale sur l'intensité du champ électrique pour 1m.

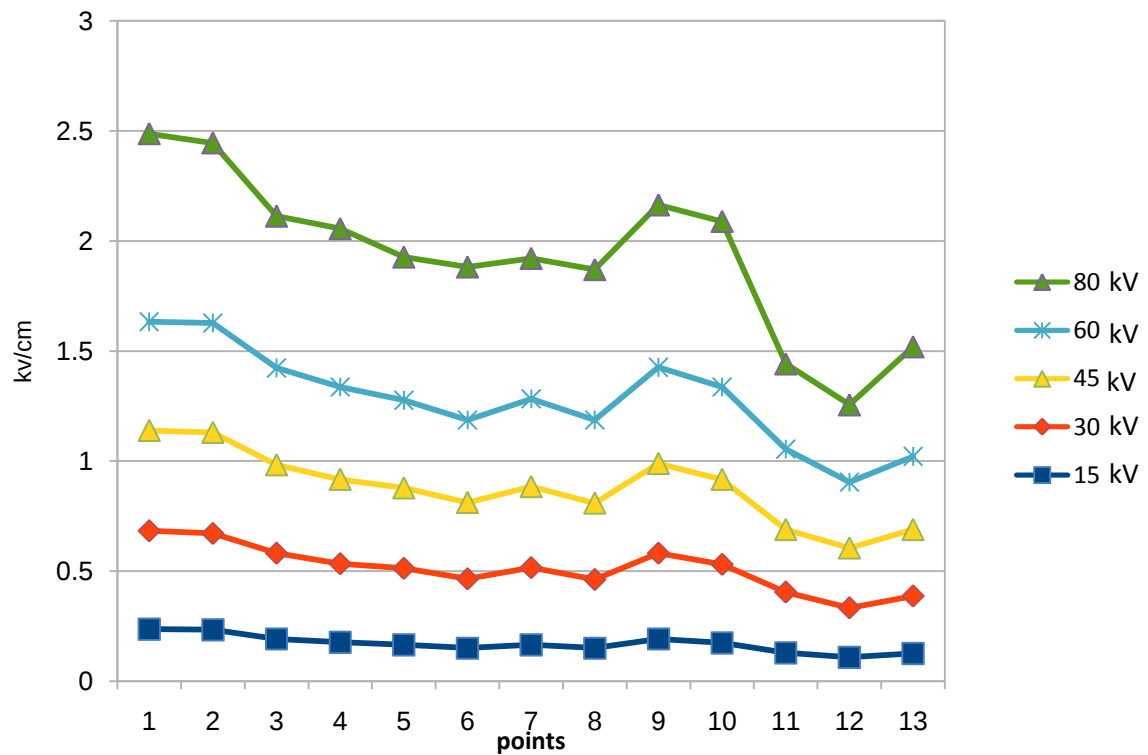


Figure IV.6: distributions du champ électrique en fonction de chaque points pour 1m.

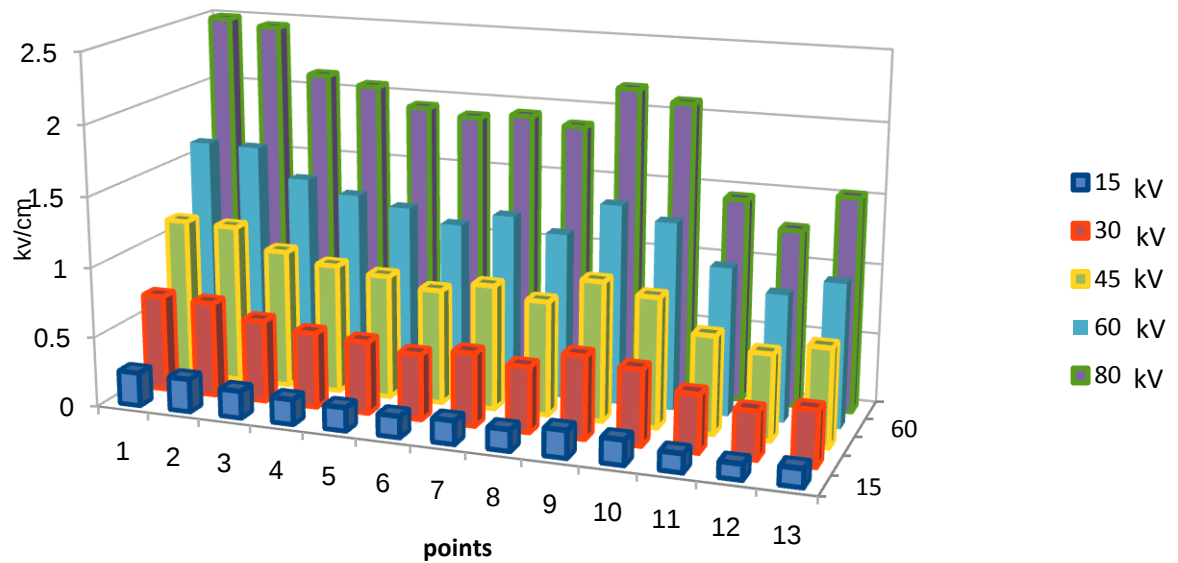


Figure IV.7: distributions du champ E à 1m pour chaque point.

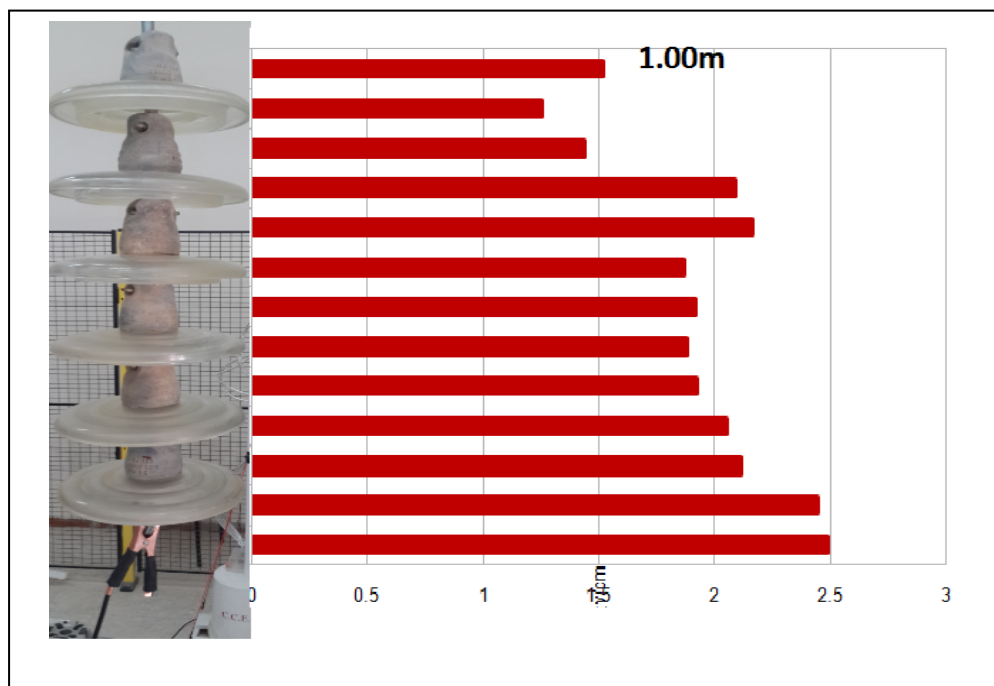


Figure IV.8: vue transversal de la distribution du champ E à 1 m pour chaque point.

IV.2.2 L'EFFET DE LA CONDUCTIVITE DU LA POLLUTION SUR LE CHAMP ELECTRIQUE

La distribution du champ E se déformé en cas des isolateurs polluée, nous avons appliqué à la surface des isolateur quatre type de conductivités (0.5 1.4 1.72 et 1.97) ms/cm^2 , toute les essais sont réalisé sous la tension de 80kV et à une distance de 1m.

La pollution dans ce cas sera pulvérisé pour quatre configuration possible, en disc (1,2), disc (3,4), disc (5,6) et ensuite pour toute la chaine.

D'après la figure ci-dessous, la variation du champ électrique a une augmentation en fonction de la conductivité, si nous augmentons, on observe une augmentation important.

Nous constatons que, lorsque la conductivité de la pollution augmente de 0.5 jusqu'à 1.97 ms/cm^2 , l'intensité du champ électrique autour du long du chaine des isolateur augmente aussi d'une façon linéaire.

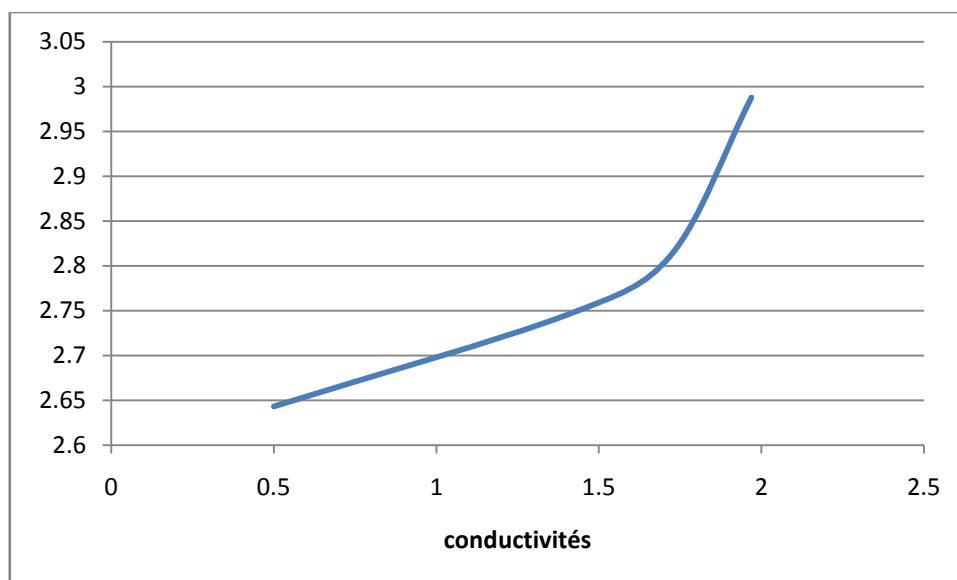


Figure IV.9 : variation du champ électrique en fonction de la conductivité pour la position vertical 1.

En ce qui concerne, le champ sur l'axe de 1m à partir du centre de la chaine avec la tension appliquée de l'ordre de 80kV (figure IV.10), les résultats montrent que, l'intensité du champ diminue, et tend vers un niveau inférieur au niveau des valeurs du champ à la première position près d'électrode de haute tension. Cela dû à la répartition du potentiel, après il augmente a une valeur prédéterminer à la position 4, puis se diminue a une valeur minimale, cette observation la même pour toutes les conductivités de la pollution.

D'autre part, la valeur du champ est très intense pour la haute conductivité et ainsi de suite il diminue avec la diminution de la conductivité sur le même axe de la mesure.

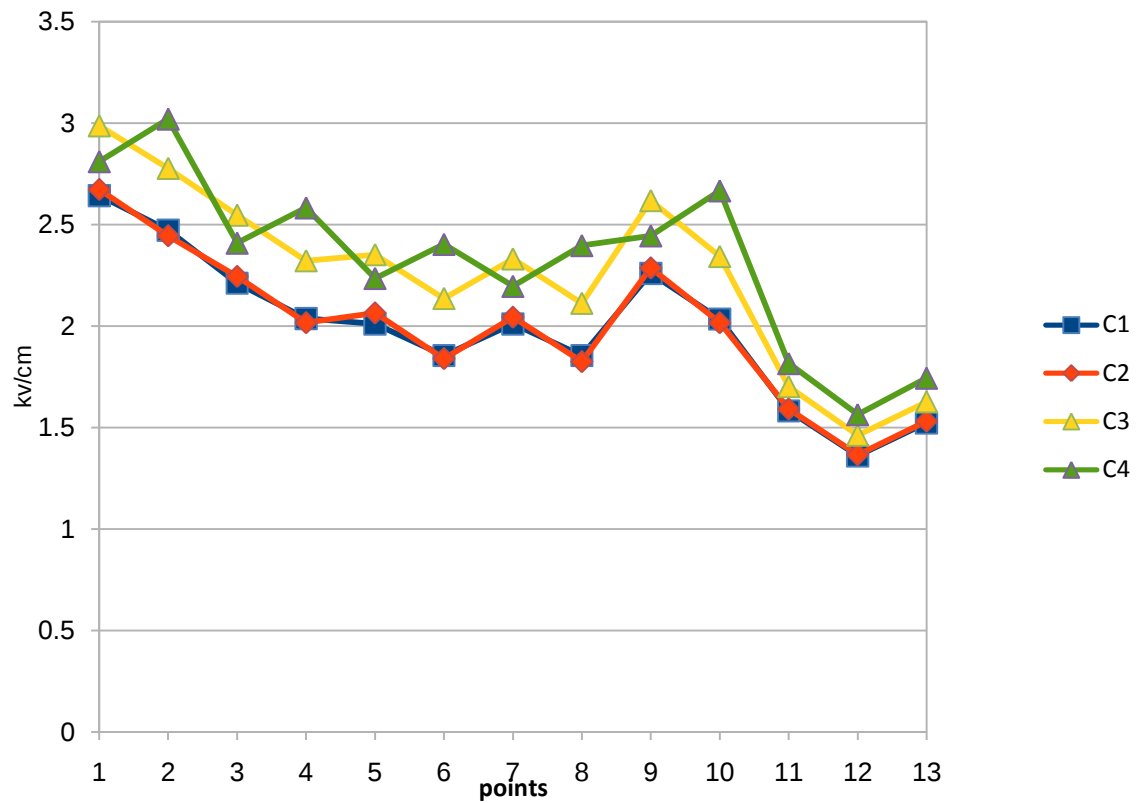


Figure IV.10: distributions du champ E pour les différentes conductivités de pollution.

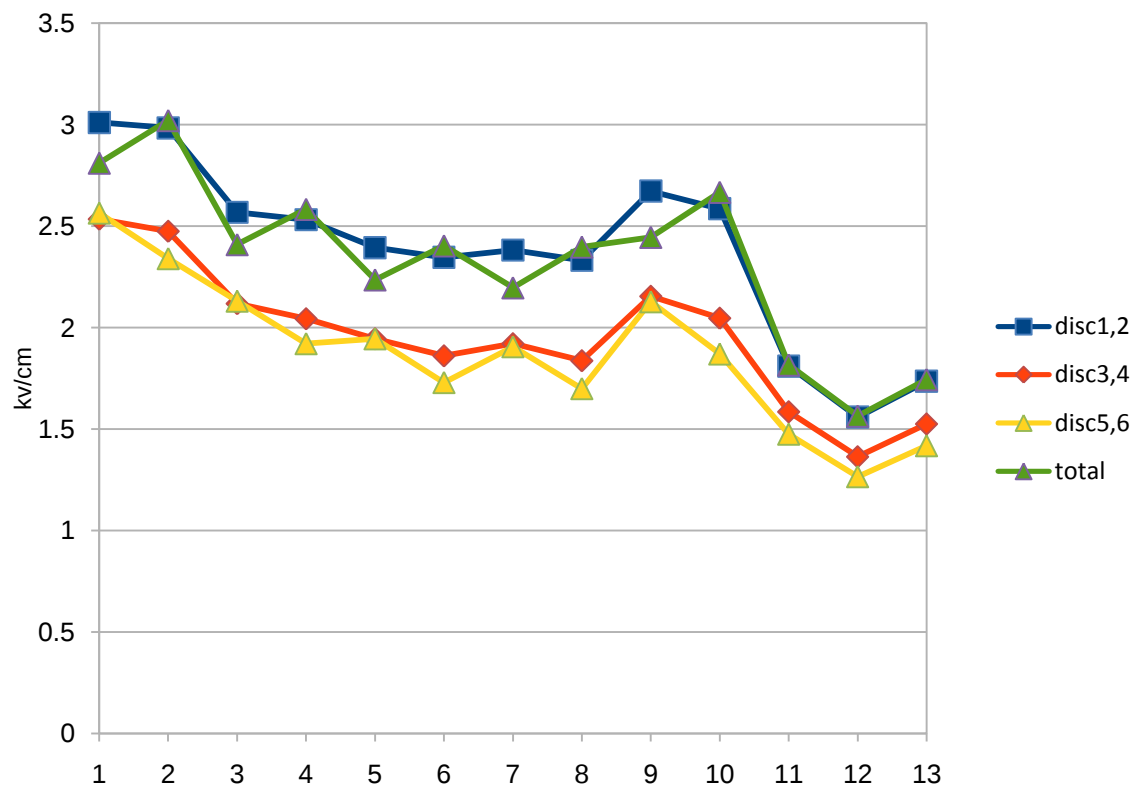


Figure IV.11: distributions du champ E pour différent état de contamination

La courbe présenté par la figure IV.11 montre la variation du champ électrique du chaque position en cas de la conductivité 1.97 ms/cm^2 et pour les différents cas polluée, les résultats obtenu

montre que le cas le plus sévère a la distribution du champ est quand la chaîne totalement polluée, aussi si la pollution appliquée aux éléments près d'électrode de HT (1,2).

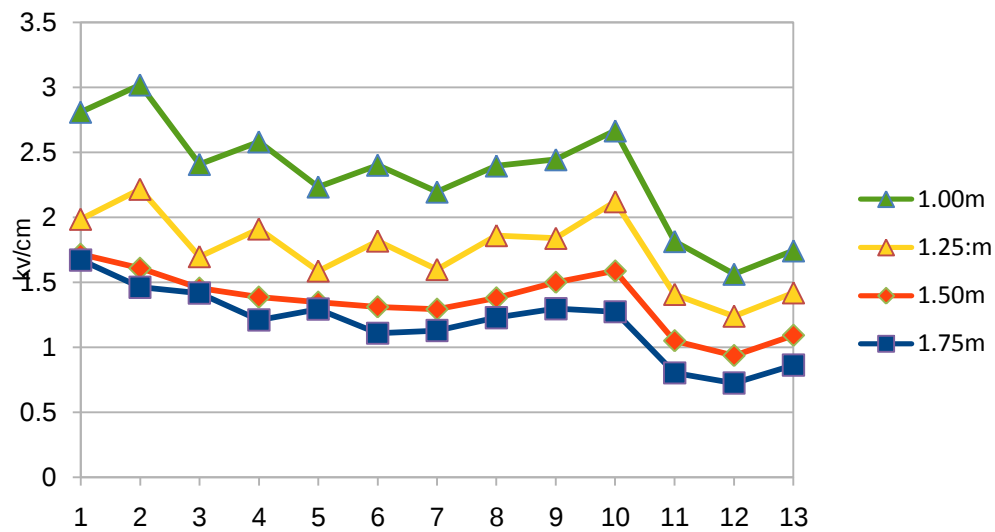


Figure IV.12: distributions du champ E pour la défèrent position latéral

D'après la figure, on peut illustrer que l'intensité du champ mesuré est très précis pour les cas de 1m et 1.25m, cela est visible par l'augmentation de l'intensité du champ dans les positions autour les parties en verre polluées (1.97 ms/cm^2), ces résultats confirment l'impact de la pollution sur la surface d'isolateur sous tension de 80kV.

IV.2.3 L'EFFET D'UN DISC CASSE SUR LA DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE

Pour démontrer l'impact de la rupture ou en cas d'un élément brisé, nous avons cassé un disc de la chaîne des isolateurs, la figure IV.13 présente les positions occupées par le disque brisé sur la chaîne étudiée (prés d'électrode de tension, au milieu de la chaîne et auprès d'électrode de terre).

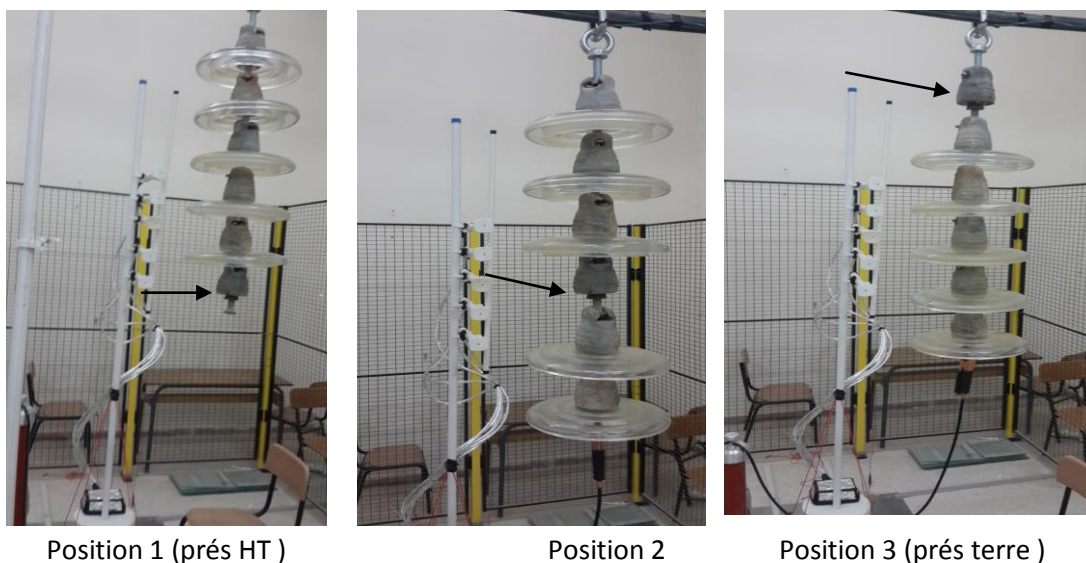


Figure IV.13: les configurations réalisées pour une chaîne des isolateurs en cas d'un élément brisé.

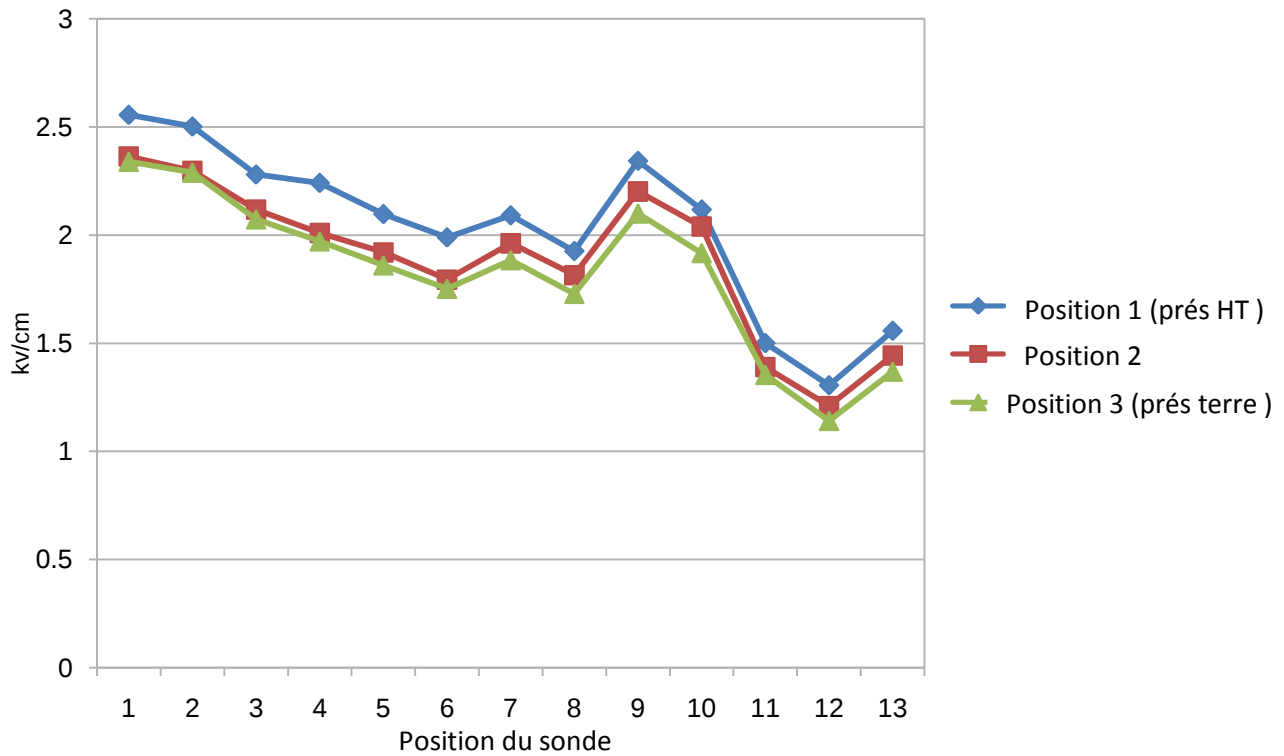


Figure IV.14 : la distribution du champ E pour différents emplacement du disc brisé.

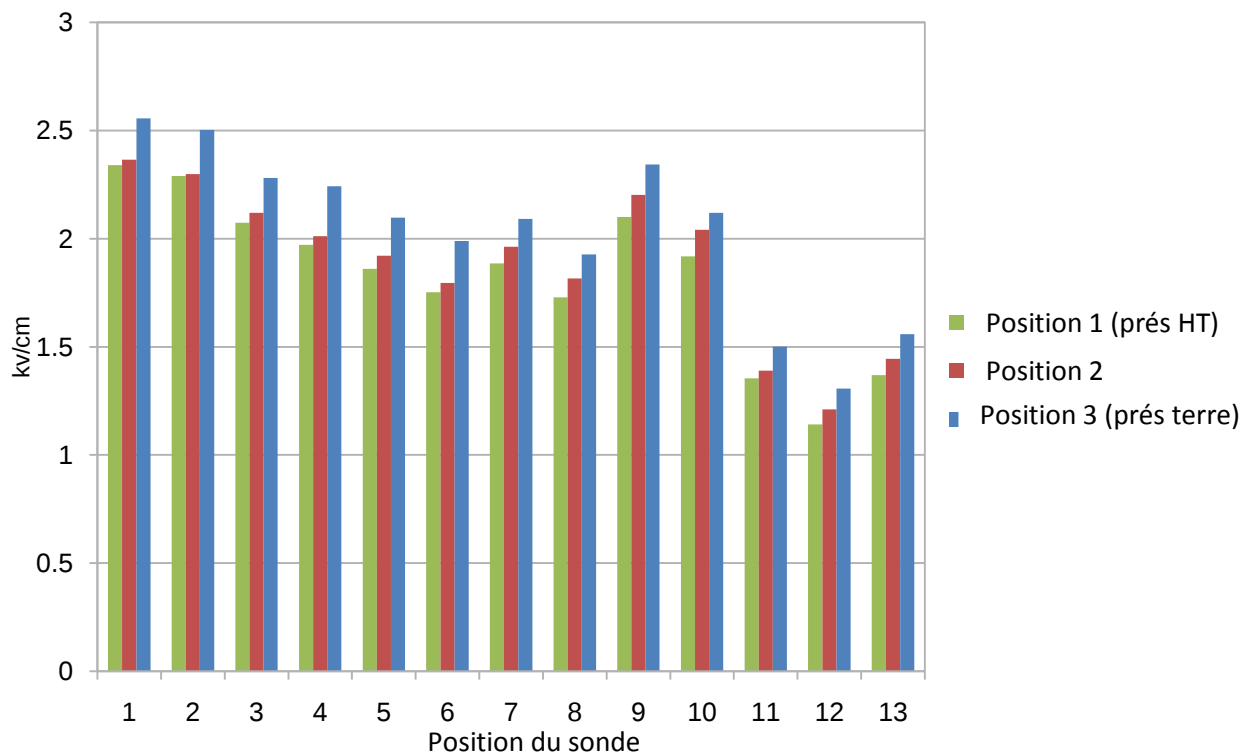


Figure IV.15: organigramme de la distribution du champ E pour les différents emplacements du disque brisé.

La figure IV.14 et IV.15 présente la variation du champ électrique en chaque points vertical avec les différentes positions du disc brisé (Position1, Position 2 et Position3),on peut illustrer si le disc 1 sera en dommage la distribution du champ électrique atteint ces valeurs maximale, et ces valeurs se diminué fur à mesure que la localisation de ce disc sera proche à l'électrode de terre.

IV.2.4 COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENT CAS INFLUES SUR LE COMPORTEMENT DE LA CHAÎNE DES ISOLATEURS

Pour démontrer le cas le plus sévère influés sur le comportement du chaîne utilisé dans le laboratoire, l'effet de la pollution et l'endommagement d'un disc. Pour ce faire nous avons fait une comparaison de la distribution du champ obtenu aux états précédents à un état original propre.

Dans cette partie nous fixons la distance latérale et la tension appliquée constant (1m, 80kV).

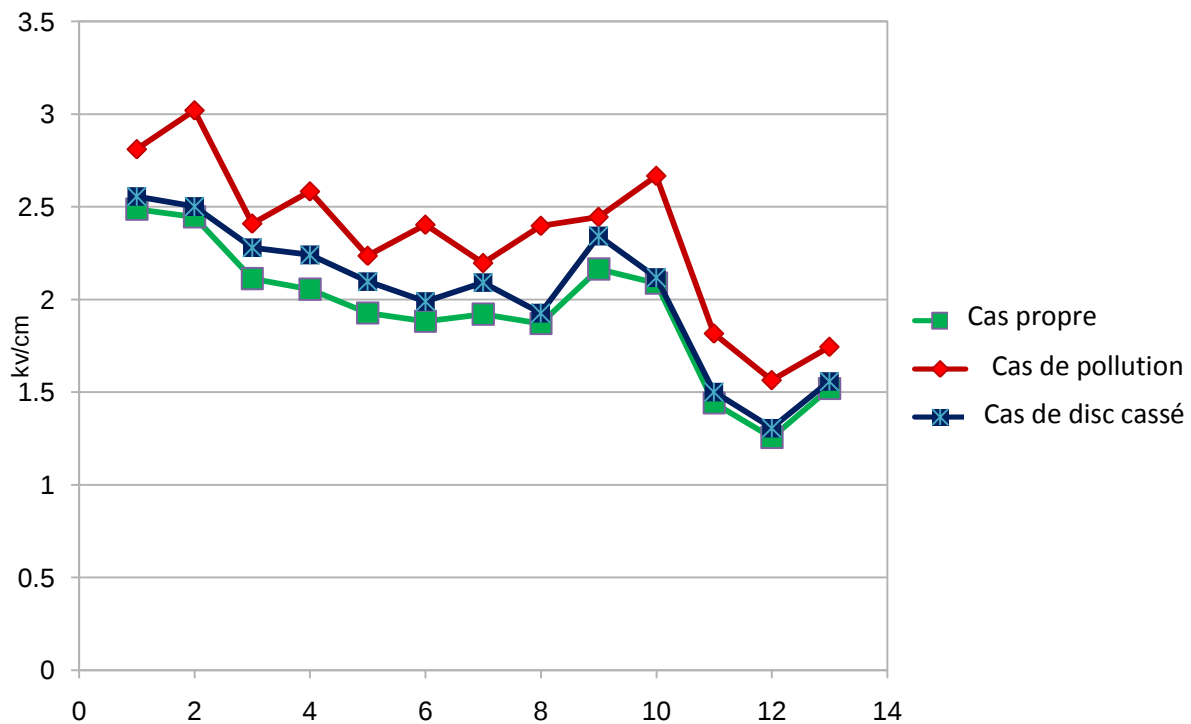


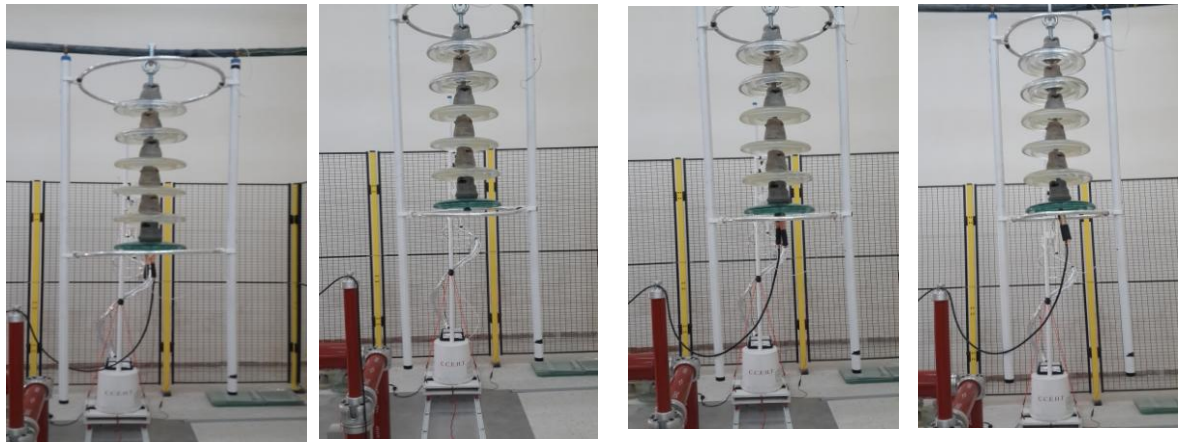
Figure IV.16: distributions du champ E pour les différents cas supposés

Le figure IV.16 obtenu montre que le cas plus sévère influe sur le comportement du chaîne des isolateurs est le cas des isolateurs pollués, aussi on remarque que l'absence d'un élément du chaîne augmente l'intensité du champ.

IV.2.5 L'EFFET DE L'ANNEAU DE GARDE POUR LA DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE

IV.2.5.1 Le cas avec deux anneaux :

Nous avons installé deux anneaux de garde sur la chaîne avec la variation de la position des anneaux de garde par rapport à la terre et l'électrode de Haut tension. Dans cet essai nous avons fixé la tension sur 80kv et la distance latérale de la mesure à 1 m.



type1(30cm)

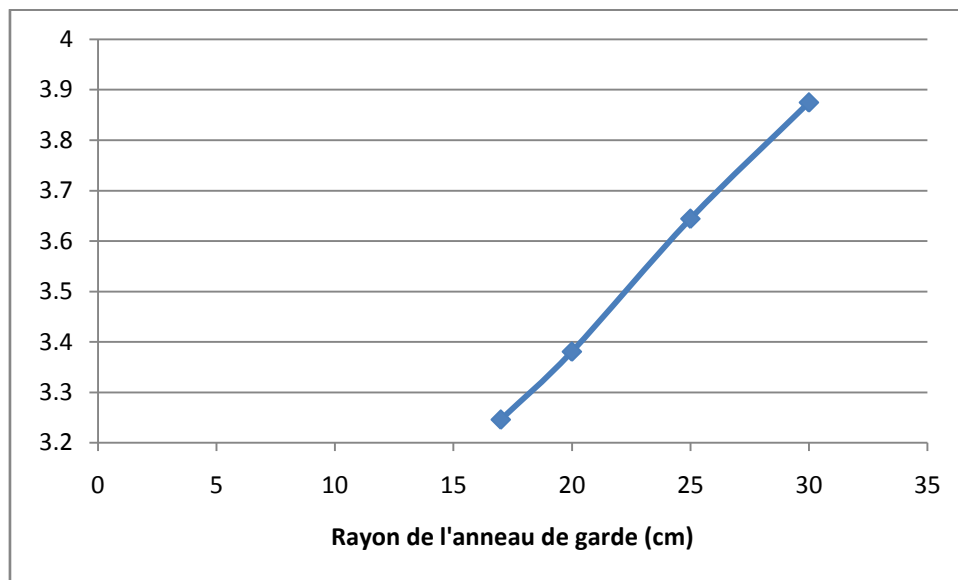
Type2 (25cm)

Type3 (20cm)

Type4 (17cm)

Figure IV.17:Le chaine d'isolateur avec deux anneaux de garde

La figure IV.17 illustre l'effet du rayon de l'anneau de garde sur l'intensité du champ électrique en même position latérale. Par ailleurs, La figure IV.18 et IV.19 montre la variation de la valeur maximale du champ électrique en fonction du rayon de l'anneau de garde . Les résultats de mesure montrent que, l'augmentation du rayon de l'anneau de garde engendre une légère augmentation de la valeur maximale du champ électrique.

**Figure IV.18:** Intensité maximale du champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau de garde.

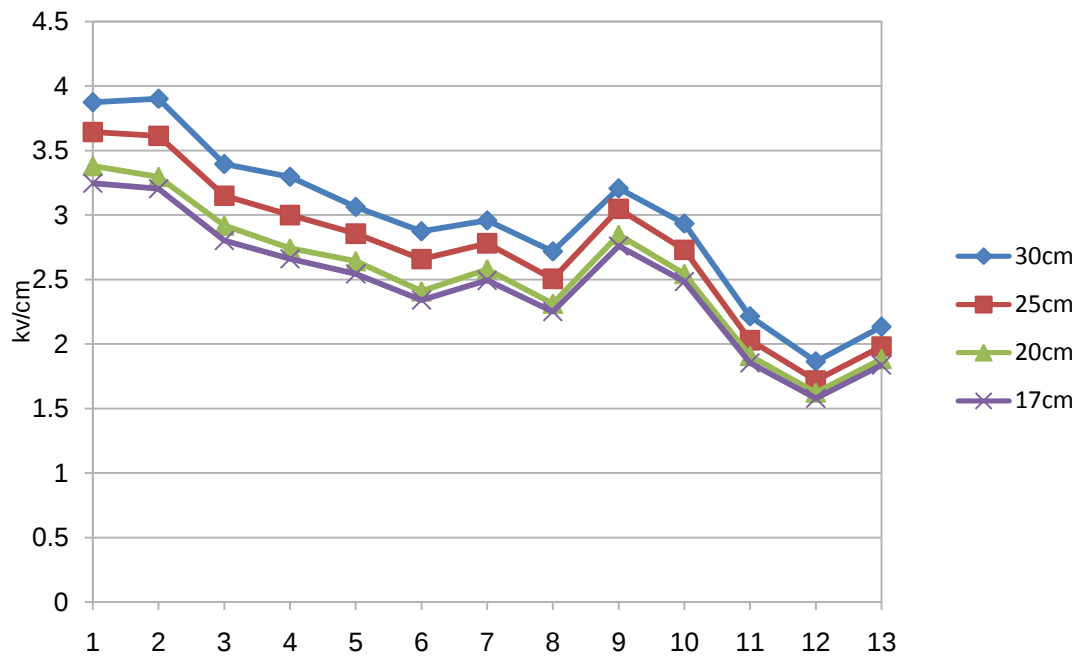


Figure IV.19: Distribution du champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau de garde.

IV.2.5.2. cas d'un seul anneau :

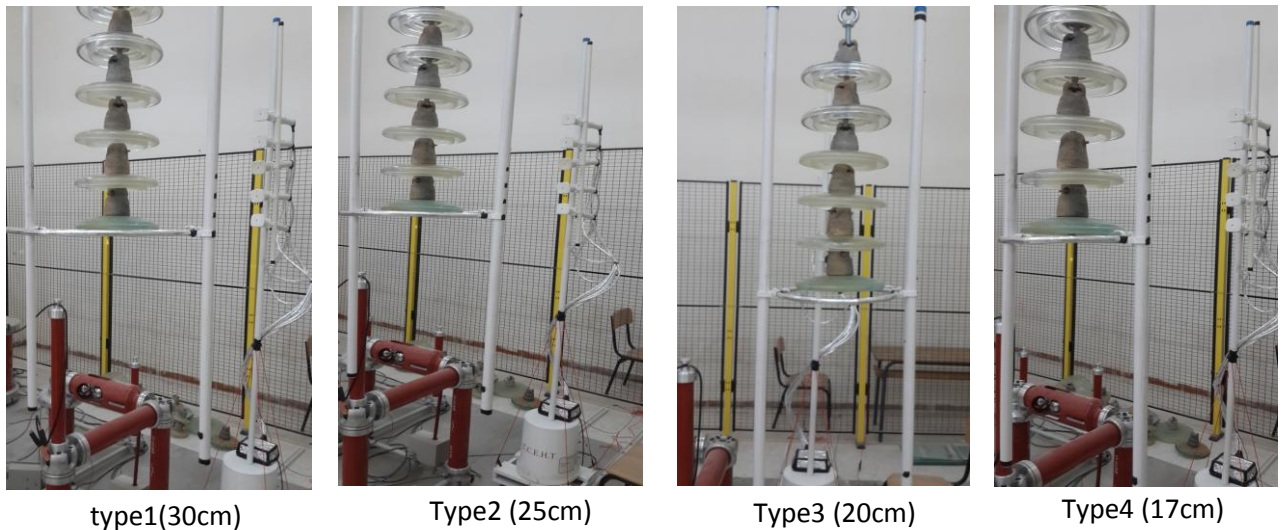


Figure IV.20 : le différent rayon de l'anneau de garde chaine.

La figure IV.20 illustre l'effet du rayon de l'anneau de garde sur l'intensité du champ électrique le long de l'axe d'isolateur en verre pour un seul anneau. D'après la courbe on peut conclure (figure IV.21) que l'intensité du champ mesuré augmente avec l'augmentation du rayon.

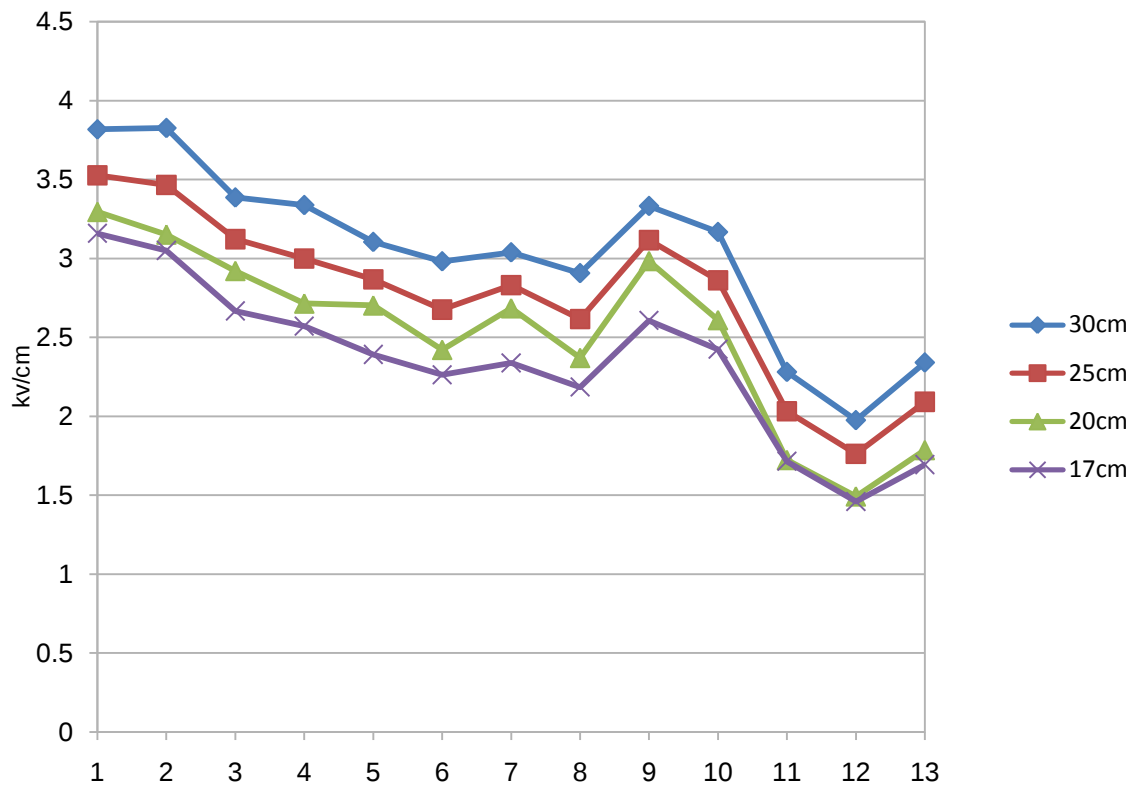


Figure IV.21: le champ électrique en fonction du rayon de l'anneau de garde (un seul anneau).

IV.2.6 L' avantage de anneau de garde :

Pour montrer l'effet de l'anneau de garde sur la distribution du champ électrique autour de la chaîne des isolateurs, nous avons fait une comparaison en cas de la chaîne propre avec et sans anneau de garde (un et deux anneaux).

Les résultats obtenus nous démontrons l'avantage des anneaux de garde pour la distribution du champ électrique (figure IV.22), les valeurs du champ pour les cas en présence des anneaux est plus intense que l'absence des anneaux ce que justifiée la protection de ces anneaux au chaîne des isolateurs. Elle permet d'éloigner les lignes du champ à la surface des isolateurs installé à la chaîne.

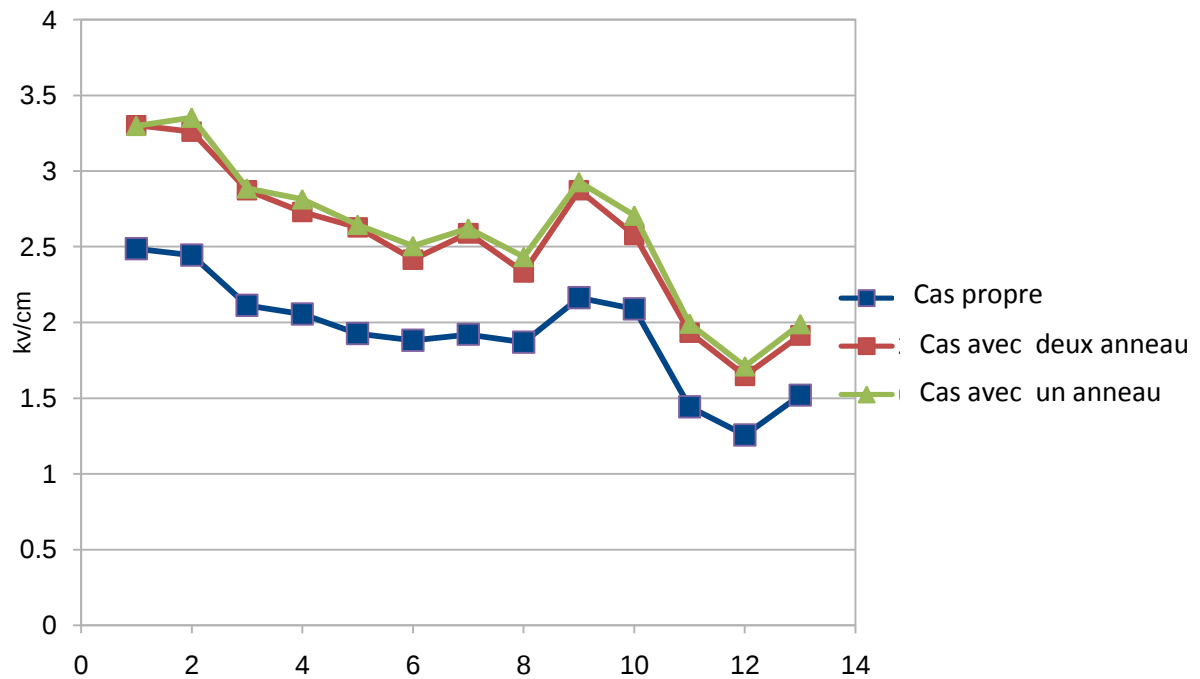


Figure IV.22: la distribution du champ électrique autour de la chaîne des isolateurs avec et sans anneaux de garde.

VI.3 CONCLUSION:

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats des différents essais effectués en laboratoire de haute tension à l'université de E'chahid Hamma Lakhdar d'El oued.

D'après les différents essais faits pour mesurer le champ électrique autour d'une chaîne d'isolateurs prenant en considération l'état de la surface, nous avons abouti aux résultats suivants :

Par la variation de la position latérale, si la position de mesure sera éloignée de la chaîne, l'intensité du champ électrique diminue, d'une façon linéaire avec la distance horizontale de mesure.

La variation d'intensité du champ le long des axes parallèles à l'axe centrale de la chaîne est non linéaire, ce qui veut dire que le champ électrique est non uniforme.

Pour les quatre niveaux de tension appliquée, nous remarquons que la tension a une grande influence directe sur la valeur du champ électrique.

Le cas le plus sévère de la distribution du champ électrique est quand la chaîne est totalement polluée, aussi si la pollution est appliquée aux éléments près de l'électrode de HT (1,2)

L'impact d'un isolateur brisé ou endommagé sur le comportement de la chaîne des isolateurs est très clair en point de vue que la distribution du champ électrique sera très intense sur le long de cette chaîne touchée.

En cas avec l'anneau de garde, l'augmentation du rayon de l'anneau de garde engendre une légère augmentation de la valeur maximale du champ électrique.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail était la mesure de la distribution du champ le long d'une chaîne des isolateurs de types capot et tige sous différents cas, dans les cas propres, pollués et le cas des isolateurs endommagés dans les trois scénarios, le premier concerne la partie supérieure, le deuxième concerne la partie inférieure et le dernier scénario concernant l'endommagement d'élément en centre.

Dans cette étude nous avons réalisé un capteur pour mesurer le champ électrique en haute tension par l'utilisation de la carte Arduino. Ce capteur nous permet de mesurer l'intensité maximale du champ électrique pour les différentes positions latérales et horizontales autour de la chaîne utilisée ce qui veut dire que ce capteur est un capteur en 3D. Alors, notre étude ouvre des nouveaux axes des recherches qui permettront de faciliter les essais et les mesures en domaine de haute tension.

Par cette méthode la distribution du champ en espace entourant la chaîne sera dominée.

Les importants résultats obtenus par cette étude sont mentionnés par la suite :

- L'augmentation de l'intensité du champ électrique se situe si on s'approche du conducteur sous Haute tension avec une façon linéaire.
- L'intensité du champ électrique est proportionnelle à la tension appliquée, aussi d'une façon linéaire.
- la conductivité de la pollution appliquée sur la surface de la chaîne a un impact très important sur l'intensité du champ électrique mesuré.
- On peut conclure que le cas le plus sévère à la distribution du champ est quand la chaîne est totalement polluée, aussi on peut constater la même remarque pour le cas si la pollution est appliquée aux éléments près de l'électrode de HT (1,2).
- L'intensité du champ augmente autour des parties en verre en cas de la pollution qu'en état propre.
- L'endommagement d'élément près de l'électrode de haute tension influe sur la valeur du champ, ce dernier s'augmente.
- l'avantage des anneaux de garde sur la distribution du champ électrique est très visible, les valeurs du champ pour les cas en présence des anneaux sont plus intenses que l'absence des anneaux ce qui justifie la protection de ces anneaux sur la chaîne des isolateurs.



BIBLIOGRAPHIE

- [1] **B.Hamoum, A.Kerbouche**, "Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 2007.
- [2] **M.A. Douar, M.C. Bouzidi**, "Caractéristique de l'état de surface d'un isolateur pollué à l'aide des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 2009.
- [3] **M.Benakouche, R.Timghellette**, "Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 2005.
- [4] **A. Bouleghlem, F. Taleb**, "Comportement de l'isolateur capot et tige 1512L artificiellement pollué sous tension alternative 50Hz", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 2009.
- [5] **D. Dumora**, "Matériaux isolants céramiques en électrotechnique", Technique de l'ingénieur D275.
- [6] **G. Leroy et all**, "Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions ", Edition Ayrolles, Paris, France, 1984.
- [7] **G.Riquel, E.Span Genberg**, "De la céramique au synthétique", EDF-Epure, N° 58, Avril 1998.
- [8] **Y.Porcheron**, "Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne ", Technique de l'ingénieur D4425.
- [9] **M.Terkmani, M.Babouamer**, "Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension" , PFE, Département de Génie Electrique, USTO, Oran, Juin 2005.
- [10] **L. Chougui, R. Belaicha**, " Contribution à l'Etude de la Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région d'Arzew ", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Janvier 1983.
- [11] **S. Lotfi, S. Djafri**, "Contribution à l'Etude de la Pollution des Isolateurs des Lignes Ariennes de Haute Tension dans la Région de l'Arbaa", PFE, Département d'électronique et d'électrotechnique, USTHB, Alger, Juin 1982.
- [12] **L. Arrabiy**, " Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée ", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, 1999.
- [13] **M. Tegar, A. Boubakeur**, "Pollution des Isolateurs de Haute Tension ", Cours 4^{ème}

- Année, Département de Génie Electrique, ENP, Alger.
- [14] **Z. DJEMAI, F. BENNAI**, " Essais sur Site et au Laboratoire d'Isolateurs Contamines par la Pollution Industrielle au Bord de la Mer ", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 1986.
- [15] **QUILLET**, "Encyclopédie des sciences industrielles", 1981.
- [16] **A.Mekhaldi**, "Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternative 50 Hz", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, ENP, Alger, Décembre 1999.
- [17] **R.Pinnet**, " Prévention des Incidents dus à la Pollution des Isolateurs sur les Ouvrages de Transport", RGE, Tome 82, Mars 1973.
- [18] **A.K.Mujundar, N.Vasudev, K.N.Ravi Channakeshava**, "Pollution Test Method of Insulators Under DC Voltage Using Dust Chamber", Ninth international symposium on high voltage engineering, 28 Aout –1 September 1995.
- [19] **S. Bouazabia, T. Chikhaoui**, "Méthodes d'essais sur des isolateurs pollués dans les conditions désertiques ", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 1988.
- [20] **M.A.B El-Koshairy, F.A.M. Rizk**, "Comportement des isolateurs des lignes de transport a très haute tension dans les conditions de pollution désertiques", CIGRE, Rapport 33-05, Paris, 1970.
- [21] **A. El-Arabaty, A.Nosseir, S. El-debeiky, A.El-Awady, E. Nasser, A. El-Sarky**, "Effects of insulator shape, dimensions and material on its flashover characteristics", 4^{eme} international symposium on high voltage engineering, Rapport 46-04, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [22] **D.A. Swift**, "AC disc insulators :Accumulation of pollution within and around the pin cavity", 7^{eme} international symposium on high voltage engineering, Rapport 44-22, Dresde, Allemagne, 26-30 Aout 1991.
- [23] **D. Namane**, " Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, ENP, Alger, Février 1998.
- [24] **CEI 60 - 1**, "Techniques des essais à haute tension", Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.
- [25] **B.M'hamdi**, "Modélisation D'un Isolateur Naturellement Pollue Sous Tension Impulsionnelle Utilisant Des Circuits Electriques Equivalents", Mémoire de Magister,

- Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, ENP, Alger, 2008.
- [26] **M. Tegar**, "Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées ", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juillet 1993.
- [27] **T.Guia**, "Comportement d'un modèle isolateur sous à une tension impulsionnelle", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, ENP, Alger, Mai 2004.
- [28] **P. J. LAMBETH, H. AUXEL et M. P. VERMA**, " Méthode de mesure de la sévérité de la pollution compte tenu de son influence sur le comportement des isolateurs à haute tension ", Electra N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972.
- [29] **A.Cimador, S. Vitet**, "la pollution des isolateurs", EDF-Epure, N°.27, Paris, France, Juillet 1990.
- [30] **R. Wilkins**, "Flashover voltage of high voltage insulators with Unite en Surface pollution films ", Proc. IEE, 116, No3, MARS 1969.
- [31] **W. Heise, G.F. luxa, G.Revrery, M. P. Verma**, " Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide ", CIGRE, Rapport 33-09, Paris. France, 1982.
- [32] **CIGRE** groupe de travail 04 du comité d'étude n°33, "Mesure de la Sévérité de Pollution des Sites et Application au Dimensionnement des Isolateurs pour les Réseaux à Courant Alternatif ", Electra n°64, Paris, France, Mai 1979.
- [33] **A.K.Mujundar, N.Vasudev, K.N.Ravi Channakeshava**, "Pollution Test Method of Insulators Under DC Voltage Using Dust Chamber", Ninth international symposium on high voltage engineering, 28 Aout –1 September 1995.
- [34] **C.H.A. Ely, P.J. Lambeth, J.S.T. Looms, D.A. Swift, C.E.G.B**, "Contournement des polymères humides et polluées : l'ailette BOOSTER", CIGRE, Rapport 15-02, Paris, France, 1978.
- [35] **Z.Sahli**, "Etude de la non uniformité de la pollution sur des caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continu", Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia.
- [36] **M. dobarzic**, "Station d'essais de choc de laboratoire haute tension", Thèse de docteur ingénieur, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, ENP, Alger, juin 1972.
- [37] **A.Abimouloud**, "Comportement d'une surface isolante partiellement polluée sous tension alternative 50 Hz ", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Décembre 1999.

- [38] **A.Boubakeur, M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi**, "Simulation Expérimentale sous Tension Alternative 50 Hz du Comportement d'un Isolateur de Haute Tension Naturellement Pollué ", Quatrième Conférence Régionale des Comités CIGRE dans les Pays Arabes, Vol. 2, pp. 271-278, 19-21, Tripoli, Libye, Mars 2001.
- [39] **M.Teguar, A.Mekhaldi, A.Boubakeur**, " Conduction Phenomenon on HV Insulators with Discontinuous Pollution under ac Voltage ", International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, APTADM'2001, Special Issue of Przegląd Elektryczny, edited by Polish Electrical Society, pp. 267-270, September 17-19, Wroclaw, Poland, 2001.
- [40] **M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, A.Boubakeur**, " Influence of Discontinuous Pollution Width on the Surface Conduction. Frequency Characteristics of the Leakage Current", 2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 211-214, October 15-18, Victoria, British Columbia, Canada, 2000.
- [41] **M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, A.Boubakeur**, " Effect of Discontinuous Pollution Layer Conductivity on the Flashover and Leakage Current Characteristics", CIGRE Symposium, Behaviour of Electrical Equipment and Components in Tropical Environment, Report No. 200-02, September 3-7, Cairns, Australia, 2001.
- [42] **A.Mekhaldi, S.Bouazabia**, " Conduction Phenomena on Polluted Surface under ACHV " , 9th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 310-314, August 28th-September 1st, Graz, Austria, 1995.
- [43] **A.Mekhaldi, M.Teguar, A.Abimouloud, A.Boubakeur**, " Caractéristique Fréquentielle du Courant de Fuite Sur une Surface Isolante Partiellement Polluée Sous Tension Alternative 50 Hz ", Quatrième Conférence Régionale des Comités CIGRE dans les Pays Arabes, Vol. 2, pp. 290-296, 19-21, Tripoli, Libye, Mars 2001.
- [44] **A.Mekhaldi, M.Teguar, A.Boubakeur**, " Leakage Current Waveform characteristics On HV Insulators under Discontinuous Pollution ", International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, APTADM'2001, Special Issue of Przegląd Elektryczny, edited by Polish Electrical Society, pp. 263-266, September 17-19, Wroclaw, Poland, 2001.
- [45] **M.Teguar, A.Mekhaldi, A.Boubakeur**, "Contournement d'isolateur partiellement pollué et caractéristique du courant de fuite", EJE Vol.12/3, Juin 2009.
- [46] **M. D. R. Beasley, J. H. Pickles, L. Beretta, G. d'Amico, M. Fanelli, G. Giuseppetti, M. Morin, J. P. Grégoire, G. Gallet**, « Etude comparative de trois méthodes de calcul automatique du champ électrostatique », RGE, Tome 88, Vol. 1, pp.7-18, Janvier 1979.

- [47] **E.P.Nicolopoulou, E.N.Gralista, V.T.Kontargyri, I.F.Gonos, I.A. Stathopoulos**, "Electric field and voltage distribution around composite insulators", XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.
- [48] **B.M'hamdi, M.Teguar, A.Mekhaldi**, "Potential and Electric Field Distributions on HV Insulators String", 7th International Conference on Electrical Engineering (CEE'12), 8- 10 Oct 2012, pp. 158-163, Batna, Algeria.
- [49] **Haddad and D.F. Warne**, "Advances in High Voltage Engineering", IET Power and Energy Series 40, The Institution of Engineering and Technology, (2007).COMSOL Multiphysics 3.5a User's Guide: COMSOL AB., 2008.
- [50] **Ravi K. N., Ramamoorthy M., and Naidu M. S.**, "Voltage distribution of a string insulator under DC voltages," in Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1992, pp. 805-810.
- [51] **C. Volât**, "Modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735 kV recouvert de glace", Thèse de Doctorat en Ingénierie, Département de Génie Electrique, Université du Québec à Chicoutimi, Juin 2002.
- [52] **G. Dhatt, G. Touzot**, "Une présentation de la méthode des éléments finis" Maloine S. A. Editeur, Paris, 1984.
- [53] **Hidaka K.**, "Electric field and voltage measurement by using electro-optic sensor," in Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, (Conf. Publ. No.467), 1999, pp. 1-14 vol.12.
- [54] **Huang S. J. and Erickson D. C.**, "The potential use of optical sensors for the measurement of electric field distribution," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, pp. 1579-1585, 1989.
- [55] **Daochun H., Jiangjun R., Yong C., Feng H., Shifeng Y., and Shoubao L.**, "Calculation and measurement of potential and electric field distribution along 1000 kV AC transmission line composite insulator," in Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2008, pp. 428-433.
- [56] **Schümann U., Barcikowski F., Schreiber M., Kärner H. C., and Seifert J. M.**, "FEM Calculation and Measurement of the Electrical Field Distribution of HV Composite Insulator Arrangements," in CIGRE Proceedings, Session 33, No. 404, Paris, 2002.
- [57] **Abdel-Salam M. and Stanek E. K.**, "Optimizing Field Stress on High-Voltage Insulators," IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-22, pp. 47-56, 1987.
- [58] **Gerdin G., Lakdawala V., and Basappa P.**, "Computation of ac and dc electric field

- around a wet polluted insulator," in Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002, pp. 176-179.
- [59] **Chakravorti S. and Mukherjee P. K.**, "Power frequency and impulse field calculation around a HV insulator with uniform or nonuniform surface pollution," IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 28, pp. 43-53, 1993.
- [60] **Dhalaan S. M. A. and Elhirbawy M. A.**, "Simulation of voltage distribution calculation methods over a string of suspension insulators," in IEEE Proceedings of Conference on Transmission and Distribution, 2003, pp. 909- 914 vol.903.
- [61] **R.F. Harrington**, "Field Computation by Moment Method", Wiley- IEEE Press, 1993.
- [62] **T. Misaki, H. Tsuboi**, « Computation of 3-Dimensional Eddy Current Problems by Using Boundary Element Method », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. MAG-21, No. 6, pp. 2227-2230, Novembre 1985.
- [63] **Yunn-Shiuan L., Shiang-Woei C.**, and Jeng-Tzong C., "FEM versus BEM," Circuits and Devices Magazine, IEEE, vol. 20, pp. 25-34, 2004.
- [64] **Sebestyn I.**, "Electric-field calculation for HV insulators using domain decomposition method," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, pp. 1213- 1216, 2002.
- [65] **A. Skopec, J. G. Wankowicz et B. Sikorski**, « Electric Field Calculation for an Axiallysymmetric Insulator with Surface Contamination », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No.2, pp. 332-339, Avril 1994.
- [66] **M. Aguet** ; « Haute Tension » , Vol. XXII, Presses Polytechniques Romandes, 1987.
- [67] **Frédéric Bouquet , Julien Bobroff**, "Projets de physique statistique Magistère de physique fondamentale Université Paris Sud "

Résumé

L'objectif de ce travail consiste en l'amélioration des performances des chaînes d'isolateurs en verre. Pour cela, les mesures des distributions du champ électrique le long de ces chaînes en absence et présence de pollution a été effectuée et en cas d'un disque brisé du la chaînedes isolateurs. Une nouvelle technique de la mesure du champ électrique a été développée à l'intermédiaire d'un microcontrôleur Arduino. On se base lors des positions latérales et horizontales autour du chaine utilisée, le balayage en 3D sera effectuée pour toucher la distribution du champ en espace entouré cette chaine, en effet la valeur du champ mesurée présente l'état du surface d'isolateur propre, pollué ou endommagé. Notre méthode de la mesure sera une nouvelle outil pour les diagnostics et la sélection des isolateurs les plus fiables a utilisé dans le réseau électrique.

Les mots clés: chaînes des isolateurs - distributions du champ électrique – pollution - disque brisé – Arduino.

Abstract

The objective of this work consists of the performance enhancement of the glassinsulator strings. For that, the measurements of the electric field distribution along of these chains for the absence and presence of pollution was carried out and in the event of a broken disc of the chain of the insulators. A novel method of the measurement of the electric field was spread with the Arduino microcontroller. One bases oneself at the positions lateral and horizontal around the used chain, the scanning in 3D will be carried out to touch the delivery of the field in space surrounded this chain, indeed the measured value of the field forwards the state of the surface area of insulator clean, polluted or damaged. Our method of the measurement will be a new instrument for the diagnostic ones and the selection of the most reliable insulators used in the electrical network.

Key words: chains of the insulators - electric field distribution - pollution - broken disc - Arduino.

ملخص

يكمن هدف هذا العمل في تحسين أداء سلسل ة العوازل. لأجل ذلك، تم قياس الحقل و الكهربائي على طول سلسل ة العوازل في غياب وجود الملوث وفي حالة انكسار قرص من أقراص سلاسل العوازل . وقد تم تطوير تقنية جديدة لقياس الحقل الكهربائي من خلال متحكم اردوينو. وهي تستند إلى مواقف جانبية وأفقية حول سلسل ة العوازل ، سيتم تنفيذ المسح ثلاثي الأبعاد للوصول إلى مجال التوزيع حقل في الفضاء حول هذا العازل ، من اجل ملاحظة تأثيرات على قيم حقل الكهربائي في عدة حالات. طريقة القياس تكون بجهاز جديد لتشخيص واختيار العوازل الأكثر موثوقية المستخدمة في شبكة الكهرباء.

الكلمات المفتاحية: نموذج عازل ، تلوث متقطع ، تيار متسرب ، جهد الإحاطة