

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس - سطيف - 1

UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1

UFAS (ALGERIE)

THESE

Présenté à la Faculté de Technologie

Département D'électrotechnique

Pour l'Obtention du Diplôme de

DOCTORAT 3^{ème} cycle (LMD)

Domaine : Science et Technologie

Filière : Electrotechnique

Option : Electrotechnique

Par

M^r : Hocine TERRAB

Contribution à l'étude et l'analyse de la pollution et ses effets sur les isolateurs haute tension utilisés dans le réseau électrique national

Soutenu le :

devant un Jury composé de:

Dr. Ahmed GHERBI

Prof à l'université de Sétif 1

Président

Dr Abdelhafid BAYADI

Prof à l'université de Sétif 1

Rapporteur

Dr. Leila MOKHNACHE

Prof à l'université de Batna

Examinatrice

Dr. Hocine MOULAI

Prof à l'USTHB

Examineur

Dr. Nouri HAMOU

M.C.A à l'université de Sétif 1

Examineur

REMERCIEMENTS

Je tiens premièrement à remercier le bon dieu le tout puissant de m'avoir donné la volonté, le courage et la patience afin d'achever ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, le professeur Abdelhafid BAYADI pour m'avoir guidé, encouragé et conseillé tout au long de ce travail.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur Andrea CAVALLINI, Professeur à l'université de Bologna qui m'a accueilli au sein de son équipe de recherche. Je remercie également monsieur Ayman EL-HAG, Professeur à l'université Américaine au Sharjah pour m'avoir accueilli au niveau de son laboratoire de système d'énergie sans oublier Dr Khaider BOUACHA de l'université de Souk Ahras. Je les remercie pour tout ce qu'ils ont apporté à cette thèse, aussi bien pour ses conseils scientifiques que pour ses encouragements.

Je tiens aussi à remercier tous les membres de laboratoire LGEG de l'université de Guelma, pour l'aide qui m'ont apporté.

J'adresse mes vifs remerciements au professeur Ahmed GHERBI, pour avoir accepté de juger ce travail et m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je tiens aussi à remercier Madame Leila MOKHNACHE, Professeur à l'Université de Batna, Monsieur Hocine MOULAI, Professeur à l'USTHB d'Alger et Monsieur Nouri HAMOU, Maître de Conférence à l'université de Sétif, d'avoir accepté d'être examinateurs de ce travail.

Je ne saurais terminer sans remercier mes amis et collègues pour leurs encouragements.

Déclaration

Ce travail n'a pas été déjà accepté et n'est pas soumis en considération pour un diplôme quelconque.

Signé (Hocine TERRAB)

Date

Déclaration 1

Cette thèse est soumise pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT 3ème cycle (LMD).

Signé (Hocine TERRAB)

Date

Déclaration 2

Cette thèse est le résultat de mes propres investigations, sauf indication contraire. D'autres sources sont reconnues par des références explicites. Une bibliographie est jointe en annexe.

Signé (Hocine TERRAB)

Date

Déclaration 3

Je donne mon consentement pour la reproduction (partielle ou totale) de ma thèse à l'université seulement. Le titre et le résumé peuvent être mis à la disposition des organisations externes.

Signé (Hocine TERRAB)

Date

Liste des publications

Publication internationales

- H.Terrab and A.Bayadi « Experimental study using design of experiment of pollution layer effect on insulator performance taking into account the presence of dry bands» IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, No. 6, pp. 2486-2495, December 2014.

Communication internationales

- H.Terrab, A.Bayadi and A.El-hag “Characterization of Leakage Current on the Surface of Porcelain Insulator under Contaminated Conditions” 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Sharjah – UAE, November 2015,
- H.Terrab and A.Bayadi «Analyse de l’effet de la Pollution sur la Performance des Isolateurs de HT en Utilisant la Méthodologie des Plans d’expérience» International conference on Electrical and Computer Engineering, Setif– Algeria, Mai 2015.
- H.Terrab and A.Bayadi « Experimental study of non uniform pollution Layer with dry bands effects on surface insulator rigidity» International conference on electrical engineering and automatic control, Setif– Algeria, November 2013.

Communication nationales

- H.Terrab and A.Bayadi « Modeling flashover voltage on polluted insulator using ANNs and regression analysis» 1st workshop on pollution of electrical networks insulators, Oran- Algeria, April 2013.

ملخص

أداء العوازل الجهد العالي هو العامل الرئيسي في تحديد موثوقية شبكات الطاقة الكهربائية. العوازل يجب أن تتحمل ليس فقط جهد التشغيل العادي، ولكن أيضا يجب تمنع ظهور القوس الكهربائي. الانخفاض في أداء العازل يتأثر أساسا بتوضع التلوث الجوي على سطحه .

الجزء الأول من هذا العمل خصص لدراسة تأثير تلوث الهواء على أداء عوازل الجهد العالي المستخدمة في شبكات نقل الكهرباء. إذ يقدم دراسة تجريبية لاحتمال العازل الملوث وفقا لخصائص طبقة التلوث مثل: الناقلية، طول الطبقة، الموضع وعدد وعرض المناطق الجافة. يتم دراسة العديد من توزيعات التلوث باستخدام منهجية التصميم التجريبي. وقد تم دراسة الآثار المترتبة على المعاملات وتفاعلاتهم وتقييمها عن طريق تقنية التحليل الإحصائي. النتائج أظهرت كيف يتأثر توتر الاحاطة الكهربائية لسطح غير منتظم التلوث أساسا بطول الطبقة وناقلتها. المعلومات التي تم الحصول عليها يمكن استخدامها لتحسين تصميم العوازل المستخدمة في المناطق الملوثة، من خلال تطوير تصميم مناسب لإنشاء عدة مناطق جافة و واسعة في وسط العازل.

الجزء الثاني من هذا العمل التجريبي يهدف إلى فهم مراحل تطور تيار التسرب على سطح عازل الخزفي. النتائج أثبتت أن تحليل زاوية الطور بين الجهد المطبق و تيار التسرب، و التغير في نسبة المركبة التوافقية الثالثة إلى المركبة الأساسية والانحراف المعياري التي حصل عليه عن طريقة الموجات. هذه المؤشرات تبدو جد واعدة للنتبؤ في وقت مبكر بمرحلة الترطيب وبداية المرحلة الأولى من حدوث التفريعات الكهربائية عبر السطح، ويمكن استخدام هذه المؤشرات لإطلاق الصيانة الوقائية عن طريق غسل العازل. وتقدم هذه الدراسة معلومات مفيدة عن مراحل تطور خصائص التسرب الحالي على سطح العوازل الملوثة وستمند إلى تطبيقات التشخيص .

Abstract

The performance of HV outdoor insulators is a key factor in the determination of power systems reliability. The insulators not only must withstand normal operating voltage, but also must avoid flashovers from occurring. The reduction of its performance is mainly affected by the pollution contamination deposits from airborne. The first part of this work is aimed to investigate the atmospheric contamination effect on the performance of high voltage outdoor insulators used in electrical network. It presents an experimental study of the flashover voltage of polluted insulator as a function of pollution layer parameters such as; conductivity, layer length, position, number and width of dry bands. Many configurations of pollution distribution are studied using design of experiment methodology. Parameters effects and their interactions have been investigated and evaluated using ANOVA variance analysis statistical technique. Results show how much the flashover voltage of non-uniformly polluted surface is mainly influenced by length of contamination layer and conductivity. The obtained information can be exploited to optimize the design of glass insulator used in polluted areas, by making suitable design to create much and wider dry bands in the middle of the insulator surface. The second part of this Experimental study is aimed to understand the LC evolution stages prior to flashover on the surface of real porcelain insulator. It was shown that the LC phase angle analysis is useful indicator for the wetness surface prediction. Moreover, 3rd harmonic components variation is remarkable with the discharge activity on the insulator surface. STD-MRA using DWT for details component seems very promising to predict the early signs of dry band arcing as an indication for insulation washing. This study brings interesting information about LC evolution stages of polluted insulator and it will be extended for diagnosis applications.

Résumé

La performance des isolateurs de haute tension est un facteur principal dans la détermination de la fiabilité des systèmes d'énergie électrique. Les isolateurs ne doivent pas seulement résister à la tension normale de service, mais également doivent éviter l'apparition du contournement. La réduction de sa performance est principalement affectée par les dépôts de contamination atmosphérique à sa surface.

La première partie de ce travail est consacré pour investir l'effet de pollution atmosphérique sur la performance des isolateurs de haute tension utilisés dans le réseau électrique. Il présente une étude expérimentale de la tension de contournement de l'isolateur pollué en fonction des caractéristiques de la couche de pollution comme ; la conductivité, la longueur de couche, la position, le nombre et la largeur des bandes sèches. Plusieurs configurations de pollution sont étudiées en utilisant la méthodologie des plans d'expérience. Les effets de paramètres et leurs interactions ont été étudiés et évalués par la technique statistique d'analyse des variances ANOVA. Les résultats montrent combien la tension de contournement de la surface non-uniformément polluée est principalement influencée par longueur de la couche et de la conductivité de pollution. Les informations obtenues peuvent être exploitées pour optimiser la conception des isolateurs utilisés dans des régions polluées, en envisageant une conception appropriée pour créer plusieurs bandes sèches larges au milieu de l'isolateur. La deuxième partie de ce travail expérimental a pour but de comprendre les étapes d'évolution du courant de fuite sur la surface d'un isolateur réel en porcelaine. Cette partie nous a démontré que l'analyse de l'angle de déphasage du courant de fuite, la variation de la 3ème harmonique par rapport à la composante fondamentale et la déviation standard multi-résolution STD-MRA obtenue par la transformée en ondelette des détails semblent très prometteuses pour prévoir précocement la phase d'humidification et la phase d'apparition des premières décharges à travers la surface, ces indicateurs peuvent être utilisées pour lancer la maintenance préventive par lavage d'isolation. Cette étude apporte des informations utiles sur les étapes d'évolution des caractéristiques du courant de fuite sur la surface d'un isolateur pollué et sera étendue pour des applications de diagnostic.

Table des matières

Remerciements	
Liste des publications	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Abréviations	

Chapitre 1 : Introduction générale

1.1. Contexte général	1
1.2. Problématique	4
1.3. Objectif	6
1.4. Originalité de ce travail	7
1.5. Structure de la thèse	9

Chapitre 2: Effet de la pollution sur la performance de l'isolation ;

Revue de littérature

2.1. Introduction	11
2.2. Effet de la non-uniformité de la contamination	11
2.3. Effet de la discontinuité de la contamination	18
2.4. Paramètres d'influence	25
2.4.1. La polarité	25
2.4.2. La sévérité de la pollution	26
2.4.3. La constitution chimique de la pollution	27
2.4.4. La matière insoluble	28
2.4.5. Le processus d'humidification	30
2.4.6. Le profil d'isolateur	32
2.4.7. La non-uniformité de la pollution	34
2.4.8. La formation des bandes sèches	35
2.4.9. La discontinuité de la couche de pollution	37
2.5. Méthode de surveillance et de diagnostic de l'état des isolateurs	38
2.5.1. La densité du dépôt de sel équivalent DDSE	38
2.5.2. Densité du dépôt de sel non soluble DDNS	40

2.5.3.	La conductance superficielle	40
2.5.4.	Mesure de courant de fuite	41
2.5.5.	Mesure de la décharge partielle.....	46
2.6.	Conclusion	48

Chapitre 3 : Approche et procédure expérimentale

3.1	Introduction	49
3.2.	Mesure des tensions de contournement.....	50
3.2.1	Dispositif expérimental	50
3.2.1.	Modèle expérimental	52
3.2.2.	Mode opératoire et procédé d'essai	53
3.2.3.	Répartitions étudiées de la contamination	56
3.2.3.1.	Répartition uniforme	56
3.2.3.2.	Répartition non-uniforme	56
3.2.3.2.1.	Mise en place des plans d'expérience	57
3.2.3.2.2.	Plan de Taguchi	58
3.2.3.3.	Répartition discontinue	60
3.2.3.3.1.	Plan factoriel mixte	60
3.3.	Mesure des courants de fuite	61
3.3.1.	Dispositif expérimental	61
3.3.2.	Mode opératoire et procédé d'essai	63
3.4.	Conclusion	64

Chapitre 4 : Effet de la pollution sur les tensions de la tenue diélectrique de l'isolateur

4.1.	Introduction	65
4.2.	Analyse de l'effet de la répartition de la pollution	66
4.2.1.	Répartition uniforme	66
4.2.1.1.	Test de normalité	67
4.2.1.2.	Modélisation et analyse statistique	69
4.2.2.	Répartition non-uniforme	72
4.2.2.1.	Test de normalité	74
4.2.2.2.	Analyse statistique des variances	74

4.2.2.3.	Effets principaux et effets des interactions	76
4.2.2.4.	Modélisation statistique	78
4.2.2.5.	Courbes 3D	79
4.2.3.	Répartition discontinue	82
4.2.3.1.	Test de normalité	82
4.2.3.2.	Analyse statistique des variances	83
4.2.3.3.	Effets principaux et effets des interactions	84
4.2.3.4.	Modélisation statistique	86
4.2.3.5.	Courbes 3D	87
4.3.	Comparaison des différentes répartitions	89
4.4.	Proposition pour l'amélioration de la tenue diélectrique des isolateurs sous la contrainte de la pollution	91
4.5.	Conclusion	92

Chapitre 5 : Effet de la pollution sur l'évolution des courants de fuite

5.1.	Introduction	93
5.2.	Analyse des signaux de courants de fuite	95
5.2.1.	Evolution du courant de fuite	95
5.2.2.	Analyse de déphasage tension-courant	99
5.2.3.	Analyse des composantes harmoniques	100
5.2.4.	Analyse par la transformée en ondelettes	104
5.3.	Variation des caractéristiques de courant de fuite pour différents niveau de pollution.	106
5.4.	Conclusion	108
5.5.		

Chapitre 6 : Conclusion générale et perspective

Références	114
-------------------------	------------

Liste des figures

Figure 2.1 Modèle de non-uniformité de pollution	13
Figure 2.2 Effet de non-uniformité de la couche de pollution	14
Figure 2.3 Modèle de laboratoire de slama	15
Figure 2.4 Configurations de non-uniformité de slama	15
Figure 2.5 Tensions de contournement en fonction de la résistivité et la polarité	15
Figure 2.6 Modèle de non-uniformité de Sahli	16
Figure 2.7 Tension de contournement en fonction du rapport de la longueur de la bande sèche sur la longueur de fuite	17
Figure 2.8 modèle de non-uniformité de Boudissa	18
Figure 2.9 Modèle de J. Danis	19
Figure 2.10 Modèle expérimental de non uniformité de Makhaldi	20
Figure 2.11 Schémas de modèle de Diampeni	21
Figure 2.12 Circuit électrique équivalent proposé par Tegar	22
Figure 2.13 Modèles d'isolateurs utilisés de Slama	24
Figure 2.14 Morphologie de la décharge pour une configuration de pollution 3BP3BS	24
Figure 2.16 Effet de l' DDNS sur les tensions de tenue diélectrique.	29
Figure 2.17 Relation entre le courant de fuite et le temps d'humidification	30
Figure 2.18 Variation du courant de fuite et du temps d'humidification	31
Figure 2.19 Influence du diamètre sur la tension de tenue	32
Fig.2.19 L'influence du diamètre moyen de l'isolateur sur la tension de tenue	33
Figure 2.20 Formation des bandes sèches par l'effet des décharges de couronne	37
Figure 2.21 Signaux du courant de fuite	43
Figure 2.22 Signal de courant de fuite durant la phase de contournement, b- Std_mra	43
Figure 2.23 Evolution du rapport des harmoniques d'ordres 3 et 5 par rapport à celui du fondamental	45
Figure 2.24 Evolution de l'amplitude des DP	46
Figure 2.25 Amplitude des DP mesuré par une antenne RF	47
Figure 3.1 Dispositif Expérimental de mesure de la tension de contournement, (a) circuit de test de haute tension, (b) cellule de test de haute tension.	51
Figure 3.2 Contrôleur du transformateur de régulation	52
Figure 3.3 Instrument de mesure digitale DMI 551	52
Figure 3.4 Modèle de l'isolateur proposé	53

Figure 3.5 Procédure de pulvérisation	55
Figure 3.6 Dispositif Expérimental de mesure des courants de fuite	62
Figure 3.7 Isolateur porcelaine capot et tige	63
Figure 4.1 Graphique de normalité pour le cas d'une pollution uniforme	69
Figure 4.2 Tension de contournement en fonction de la conductivité	71
Figure 4.3 Graphique de la courbe de normalité pour le cas de pollution non- uniforme	74
Figure 4.4 Graphiques des effets principaux	77
Figure 4.5 Graphique des interactions	77
Figure 4.6 Valeurs expérimentales et estimées pour la répartition non-uniforme	79
Figure 4.7 Surfaces de réponse en 3D pour une couche de pollution non-uniforme ..	81
Figure 4.8 Graphique de normalité pour une couche de pollution discontinue.....	82
Figure 4.9 Graphiques des effets principaux	85
Figure 4.10 Graphiques des interactions	85
Figure 4.11 Valeurs expérimentales et estimées pour la répartition discontinue.....	87
Figure 4.12 Surfaces de réponse en 3D pour la tension de tenue sous une pollution discontinue	89
Figure 4.13 Comparaison de la tenue diélectrique sous différentes répartition de la couche polluante.....	90
Figure 4.14 Formation des bandes sèches sur la surface supérieure de l'isolateur par l'effet des décharges couronne.....	91
Figure 5.1 Evolution de la valeur courant de fuite maximal avec le temps.....	96
Figure 5.2 Forme d'onde de la tension et du courant de fuite	98
Figure 5.3 Variation de l'angle de déphasage pour différentes phases d'évolution de courant de fuite.....	99
Figure 5.4 Composantes Harmonique.....	102
Figure 5.5 Rapport entre la 3eme harmonique/fondamentale.....	103
Figure 5.6 Déviation Standard pour différents phase d'évolution de courant de fuite .	105
Figure 5.7 Distribution de l'angle de déphasage pour différentes niveau de pollution .	106
Figure 5.8 Distribution du rapport de 3 ^{ème} /1 ^{er} pour différentes niveau de pollution..	107
Figure 5.9 Distribution de la déviation standard pour différentes niveau de pollution.	107

Abréviations

Anova	Analyse des variances
BS	Bande sèche
BP	Bande polluée
DDSE	Densité de dépôt de sel équivalente
DDNS	Densité de dépôt de sel non soluble
C	Conductivité de la pollution
L	Longueur de la couche polluante
P	Position de la couche
N	Nombre des bandes sèches
W	Largeur des bandes sèches
α	Seuil de test de signification
U_c	La tension de contournement
C	La conductivité de la pollution en (mS / cm)
P	Probabilité de test de la signification de l'hypothèse nulle
S	Représente l'écart type
F	La statistique standard "F"
R^2	La somme des carrés des résidus
R^2 ajst	La somme résiduelle des carrés ajustées
DL	Les degrés de liberté
SC	La somme des carrés
CM	La somme de la moyenne des carrés

Chapitre 1 : Introduction générale

Chapitre 1 : Introduction générale

1.1. Contexte générale

Au cours des dernières années, la société est devenue largement dépendante de l'approvisionnement continu en énergie électrique, celle-ci exige l'installation de lignes aériennes de haute tension afin de minimiser les pertes d'énergie et pour répondre aux besoins électro-énergétiques des consommateurs. Ces lignes peuvent parcourir des centaines de kilomètres en traversant ainsi des régions diverses (littoral, désert, concentrations urbaines et industrielles,...). De ce fait, ces lignes aériennes qui sont conçues, réalisées, entretenues et exploitées conformément aux normes, prescriptions et directives de sécurité, de même qu'aux règles de l'art, sont exposées à diverses contraintes. Parmi celles-ci la pollution des isolateurs qui constitue l'un des facteurs de première importance dans l'altération de la qualité et la fiabilité du transport d'énergie ; ce qui implique de la prendre en considération lors du dimensionnement et de la conception de l'isolement des systèmes de transport.

L'intégrité de l'isolation externe est cruciale pour le maintien de la fiabilité et la rentabilité d'un système moderne de transport d'électricité. En service, les isolateurs, ne doivent pas seulement supporter les tensions de fonctionnement normal, mais aussi empêcher le contournement de se produire, car, sa performance est fortement affectée par les dépôts de contamination aérienne qui pourrait former une couche conductrice ou partiellement conductrice sur la surface lors de toute éventualité de brouillard ou d'humidité. La présence d'une

telle couche qui recouvre la surface isolante peut réduire considérablement la résistivité superficielle et par conséquent provoquer la réduction de la tension de tenue des isolateurs causant ainsi le contournement. En fait, la formation d'une telle couche est inévitable, c'est pour cette raison que les isolateurs doivent être conçus de telle sorte que la tenue diélectrique reste suffisamment élevée pour résister à tous types de contraintes de tension prévues en présence de pollution. Sauf dans certaines situations où la pollution est très grave, d'autres mesures préventives ou curatives tels que le lavage ou le graissage périodique qui s'avèrent alors nécessaires [1- 3].

Les mécanismes de contournement des isolateurs pollués sont étudiés par nombreux chercheurs; plusieurs modèles statiques et dynamiques ont été développés [4-8]. La chronologie du processus qui mène au contournement est constituée essentiellement de quatre grandes phases [5, 9- 11]. :

- dépôt d'une couche solide constituée de sels et de matériaux insolubles, sauf dans le cas d'une pollution marine où la pollution est sous la forme d'embruns marins,
- humidification de la couche de pollution et circulation d'un courant dû à la dissolution des sels contenus dans le dépôt (formation d'un électrolyte),
- apparition de bandes sèches dues à l'échauffement par effet Joule résultant de la circulation du courant et conduisant à l'amorçage de décharges locales,
- élongation des décharges jusqu'à court-circuiter l'isolateur : contournement.

Les difficultés rencontrées jusqu'à ce jour quant à l'assurance d'une bonne maîtrise de la tension de tenue des isolateurs sous pollution nous incitent à plus d'efforts et de recherches approfondies pour y prévenir. La mise au point de modèles plus performants est donc nécessaire. Elle doit donc passer par une analyse approfondie des processus physiques qui conduisent au contournement : le dynamique de développement de l'arc de contournement, la répartition du dépôt polluants à la surface des isolateurs, processus d'humidification de la couche de pollution....etc.

En général, la distribution de la pollution à la surface des isolateurs n'est pas répartie de façon uniforme. En effet, les conditions électro-géométriques et climatiques jouent un rôle important dans l'accumulation et la distribution de la pollution sur la surface d'un isolateur. Afin de mieux étudier le comportement des isolateurs sous plusieurs formes de pollution, différents modèles de laboratoire ont été proposés pour contourner la difficulté liée à la forme complexe de l'isolateur par des modèles de simple géométrie. C'est dans ce contexte que plusieurs chercheurs ont remplacé l'isolateur par une simple plaque isolante de forme rectangulaire ou circulaire, et la ligne de fuite de l'isolateur est représentée par la plus courte distance inter-électrodes [3-7]. De plus, les auteurs des références [12-14] ont proposé des modèles qui tiennent compte de la discontinuité de la couche de pollution, car celle-ci constitue un facteur incontournable dans le comportement de l'isolateur. Beaucoup de questions concernant l'effet de la non-uniformité et la discontinuité de contamination sur la

performance de surface isolante restent sans réponses et doivent faire objet d'études plus approfondies.

1.2. Problématique

En général, la sévérité et la répartition de la couche de contamination sur la surface de l'isolateur dépendent principalement de l'interaction entre les conditions environnementales dans lequel l'isolateur doit fonctionner, conjointement avec la conception et le profile de l'isolateur lui-même. En effet, plusieurs facteurs vont déterminer la sévérité (légère, moyenne et sévère), et la répartition de la couche de pollution sur la surface de l'isolateur (uniforme, non-uniforme ou discontinue). Le comportement imprévisible des paramètres environnementaux présente l'un des problèmes fondamentaux dans la conception de l'isolation externe en respectant des conditions polluées. Cela est dû à la large gamme de conditions possibles telles que ceux trouvés dans les zones côtières, industrielles, agricoles et désertiques, des combinaisons de ces conditions peuvent également se produire. En outre, l'augmentation de la demande de l'énergie électrique dans une zone, grâce à la construction d'une nouvelle sous-station, peut déclencher une croissance industrielle qui peut contribuer à la génération de pollution ce qui influe négativement sur le comportement de l'isolation concernée [1, 15, 16].

La complexité du phénomène de contournement et le grand nombre de paramètres qui le caractérisent tels que la nature du dépôt polluant [2- 5], la non-uniformité du dépôt de pollution [6, 7], la conductivité superficielle [6] et le profil de l'isolateur [6, 8], rendent la compréhension et la maîtrise du mécanisme de

contournement très difficiles. Les résultats des travaux antérieurs ont néanmoins permis d'établir des modèles permettant d'accéder aux caractéristiques des décharges se propageant sur les surfaces d'isolateurs et ce jusqu'au contournement. La plupart des modèles développés sont empiriques ou semi-empiriques. Les quelques travaux qui traitent des modèles analytiques ne conduisent pas à de bonnes prévisions théoriques [9, 10].

La plupart des recherches déjà entreprises pour maîtriser le phénomène de contournement sont effectuées sur la base d'une distribution uniforme de la contamination, ce qui ne reflète pas le comportement réel de l'accumulation de pollution en service qui est loin d'être uniforme [1, 3, 17]. C'est pour cela, il s'avère tout à fait insuffisant d'étudier la performance de l'isolateur sous une répartition uniforme de pollution [18, 19]. Par conséquent, étudier et tester la performance d'isolateur sous différentes configurations de la pollution uniforme, non-uniforme et discontinue s'avère très utile durant la conception de nouveaux profils d'isolateur [1, 2]. Cependant, l'effet de la distribution de la pollution sur la performance d'isolation externe n'est pas encore pratiquement traité en raison de nombreuses contradictions entre les chercheurs concernant la différence entre la tension de contournement sous pollution uniforme et non-uniforme. Les auteurs dans les références [20, 21] ont observé que la tenue diélectrique de l'isolateur dans la répartition de la pollution non-uniforme est plus élevée que celui obtenu dans le cas uniforme, tandis que dans [22], les auteurs ont prouvé le contraire ; ce qui nous a incité à nous approfondir dans ces recherches.

Les difficultés rencontrées pour arriver à une bonne compréhension du phénomène de contournement des isolateurs sous pollution montrent que des efforts en matière de recherche restent indispensables. La mise au point de modèles plus performants est donc nécessaire. Elle passe par une analyse approfondie des processus physiques qui conduisent au contournement : dynamique de développement de l'arc de contournement, répartition du dépôt de polluants à la surface d'isolateur, processus d'humidification de la couche de pollution et la création des bandes sèches [23, 24, 25, 26] ...etc. Par conséquent, l'étude de la création et l'élongation des décharges sur les surfaces isolantes polluées de façon non-uniforme et discontinue en présence de plusieurs bandes sèches reste insuffisamment documenté, comparée aux multiples travaux consacrés au cas d'une répartition uniforme.

1.3. Objectif

L'analyse, la compréhension et la modélisation des phénomènes de décharges surfaciques sur des isolants propres ou contaminés par la pollution est d'une importance capitale pour l'optimisation de l'isolement externe des réseaux électriques. Cela nécessite des investigations sur plusieurs fronts à savoir:

- étude de la nature physique de la décharge et son interaction avec le dépôt de pollution,
- estimation de l'impédance du dépôt polluant en présence de la décharge,
- étude des mécanismes d'élongation de la décharge,

- influence de la nature et la configuration du dépôt sur le phénomène, etc.

C'est dans cette perspective que s'inscrit notre travail qui représente :

- une investigation expérimentale sur l'effet de la sévérité et de la répartition de la couche polluante sur la performance de surface isolante, en tenant compte les paramètres suivants : la conductivité de polluant, la longueur de la couche et sa position, le nombre des bandes sèches et leur largeur.
- Une modélisation de la tension de tenue diélectrique pour une plaque isolante sous différentes répartitions de pollution, en basant sur l'utilisation de La méthodologie des plans d'expérience.
- Une application de l'analyse statistique des variances pour évaluer les effets, les interactions et les sens d'influence de tous les facteurs. Les tests probabilistes sont utilisés pour valider les résultats obtenus.
- Mettant en relief l'un des avantages de cette étude susceptibles de nous orienter vers la conception de nouveaux profils d'isolateurs.

1.4. Originalité du sujet

L'apport scientifique de cette thèse est d'accroître les connaissances sur l'effet de la répartition de la contamination sur les tensions de contournement des isolateurs. Les travaux expérimentaux réalisés ont pour but de déterminer l'influence de la sévérité de contamination et sa répartition (longueur, position, largeur des bandes sèches et leur nombre) sur la tension de contournement. Des

modèles statistiques basés sur la régression multiple sont développés pour contourner les différentes répartitions de contamination (uniforme, non-uniforme et discontinue). Cette étude fait ressortir un tas d'informations à fournir à ceux qui s'engagent dans ce travail sur le l'optimisation et le développement des nouvelles conceptions d'isolateur, ainsi qu'à ceux qui s'intéressent au mécanisme d'élongation des décharges sur les surfaces isolantes polluées.

Dans les références [3, 29], les auteurs ont développés des modèles statistiques basés sur la régression simple (une seule variable indépendante et une seule variable dépendante). Ces modèles ont pour but de déterminer la tension de contournement en fonction de la densité de dépôt de sel équivalente et la longueur de fuite pour différents types d'isolateurs (verre et céramique), D'autres modèles ont été développés afin de prédire la tension de contournement d'isolateur en silicone [27,28].

Les auteurs dans les références [3] ont traité l'effet de la non-uniformité de la distribution de la pollution sur le Dimensionnement des isolateurs des lignes en courant continu. Ils ont présenté un modèle de prédiction des caractéristiques des décharges se propageant sur des surfaces isolantes polluées de manière non-uniforme, basé sur la régression multiple. Ce modèle permet de déterminer les différents paramètres de la décharge en tenant compte de la conductivité et de la largeur de la bande polluée, de la polarité de la tension continue et du diamètre des isolateurs. Ainsi, Il est démontré que la largeur des bandes polluées et leurs conductivités ont une influence significative sur les paramètres de la décharge. La

tension de contournement est d'autant plus faible que la conductivité de la couche de pollution et le diamètre des isolateurs sont élevés.

À ce jour et au meilleur de nos connaissances, il n'existe aucune étude relative à l'élaboration de modèle statistique basé sur la méthodologie des plans d'expérience pour étudier le phénomène de contournement des isolateurs haute tension pollués de manière non-uniforme ou discontinue. Pour cette raison, ce travail aura tenu compte de cinq facteurs caractérisant la répartition de couche de contamination. Le plan utilisé va nous permettre de minimiser considérablement le nombre des essais au laboratoire et l'analyse des variances va nous offrir le maximum d'informations pour une meilleure interprétation du phénomène de développement de la décharge sous différentes conditions de pollution.

1.5. Structure de la thèse

Cette thèse comporte six chapitres présentés comme suit:

Le premier chapitre présente le contexte général, la problématique, l'objectif et la structure de cette thèse.

Dans le deuxième chapitre, nous abordons l'état de l'art et les connaissances acquises à ce jour sur le phénomène des décharges apparaissant à la surface des isolateurs pollués. L'effet de la configuration de la couche polluante, ainsi que les paramètres d'influence et les techniques de diagnostic de la sévérité de la pollution seront présentés.

Dans le troisième chapitre, Nous présentons l'approche expérimentale utilisée lors de nos investigations ainsi que les moyens matériels utilisés et les plans d'expérience adoptés.

Le quatrième chapitre, est consacré à la discussion et interprétation des résultats obtenus en élucidant de l'effet de la conductivité et de la répartition de la couche polluante sur la tension de tenue de l'isolateur, en utilisant l'analyse statistique des variances.

Dans le cinquième chapitre, nous parachevons cette thèse par une investigation sur les caractéristiques des signaux de courant de fuite qui se développent sur la surface d'un isolateur réel en porcelaine. Cette partie à pour des fins de diagnostic de l'état de surface des isolateurs en service.

En clôturant par une conclusion générale dénotant des perspectives prometteuses et des recommandations pour des travaux futurs.

**Chapitre 2 : Effet de la pollution sur la
performance de l'isolation : Revue
bibliographique**

Chapitre 2 : Effet de la pollution sur la performance de l'isolation : Revue bibliographique

2.1. Introduction

La performance des isolateurs de haute tension est un facteur principal dans la détermination de la fiabilité des systèmes d'énergie électrique. Les isolateurs ne doivent pas seulement résister à la tension normale de service, mais également doivent empêcher le contournement de se produire. La réduction de sa performance est principalement affectée par les dépôts de contamination atmosphérique à sa surface. Les conditions environnementales dans lequel l'isolateur doit fonctionner, conjointement avec le profil de l'isolateur lui-même, à sa position en service, aux conditions météorologiques, à la nature des particules polluantes et leur attraction électrostatique en présence d'un champ électrique, font que la couche de pollution qui se dépose sur les surfaces des isolateurs en service soit le plus souvent non-uniforme. C'est pour cela, nombreux travaux ont été déjà entrepris afin de déterminer le comportement des isolateurs pollués de manière discontinue et non-uniforme, la plupart des auteurs ont remplacé l'isolateur par une plaque isolante de simple géométrie; ce qui offre l'avantage de contourner la difficulté liée à la forme complexe de l'isolateur, les paramètres d'influence sur le tenue diélectrique des isolateurs qui doivent être pris en considération durant le dimensionnement des isolateurs sont aussi présentés. Les techniques développées pour la surveillance et le diagnostic des

isolateurs pollués présente une thématique très riche due à la grande complexité du phénomène d'accumulation de la pollution et les phases précédant le contournement.

2.2. Effet de la non-uniformité de la contamination:

L'étude de l'effet de la non- uniformité de la pollution est largement étudiée et les résultats obtenus présentent une large altération. Streubel [30] a proposé trois types de non-uniformité de la pollution (non-uniformité longitudinale, non-uniformité par secteur, non-uniformité longitudinale périodique).

- Pour le cas d'une non-uniformité longitudinale, l'auteur a conclu que : si la couche polluante dont la conductivité la plus élevée représente 80 à 85% de la ligne de fuite, la tension de contournement devient plus faible que celle obtenue avec une couche uniforme de même conductivité. Cette observation est confirmée par d'autre chercheur [17].

- Pour le cas de la non-uniformité par secteur. L'auteur affirme que : dans le cas ou la couche polluante couvre seulement un demi, un quart ou un huitième de la circonférence de l'isolateur, la tension de contournement augmente légèrement par rapport à celle mesurée sur un isolateur totalement pollué. La différence n'est considérable que si la pollution est réduite à 10% de la circonférence (360%). Il a trouvé aussi que, lorsque la pollution est constituée par plus d'un secteur pollué, la tension de contournement est imposée par le secteur de plus grande conductivité.

- Pour le cas de non-uniformité longitudinale périodique, les résultats sont assez différents : Pour une conductivité constante c_0 de la face supérieure de l'ailette, et une conductivité c_1 variable de la face inférieure et le corps de l'isolateur ($c_0/c_1 < 1$), la tension de contournement aura une valeur maximale correspondant à un rapport de conductivité c_0/c_1 proche de 1. Ce rapport désigne la répartition uniforme. En augmentant la conductivité c_0 de la face supérieure et en gardant la conductivité de la face inférieure et du corps c_1 constante, on remarque une nette décroissance de la tension de contournement à partir du rapport $c_0/c_1 = 1$.

Teguar et Al [31] a proposé un modèle de laboratoire comprenant deux électrodes planes, l'une circulaire mise sous tension et l'autre rectangulaire mise à la terre dont la distance totale inter-électrode est égale a 400 mm. La discontinuité de la pollution étant simulée à l'aide de couches semi-conductrices de largeur différentes. Il a considéré Deux configurations de la pollution montrée dans la (fig. 2.1).

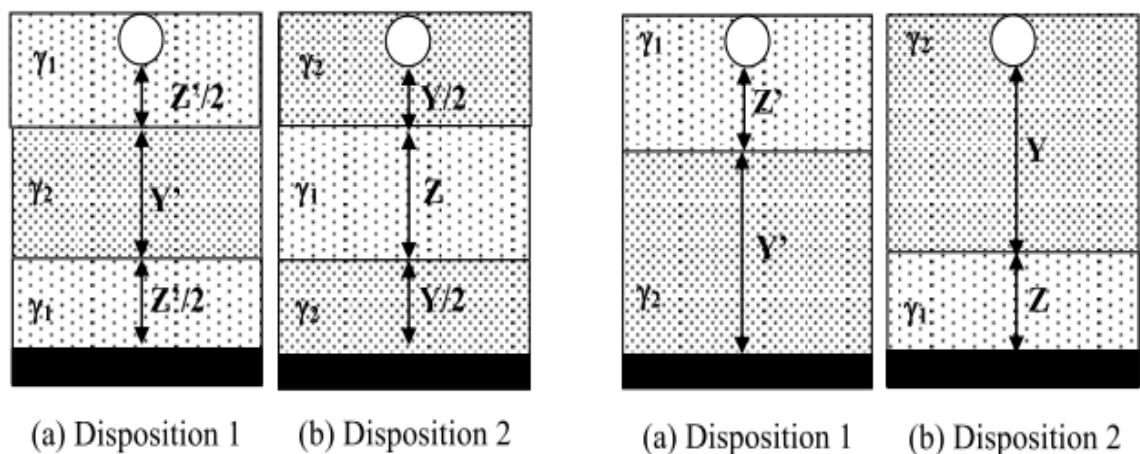


Figure 2.1 Modèle de non-uniformité de pollution proposé dans [31], Y ; bande polluée, Z ; bande sèche.

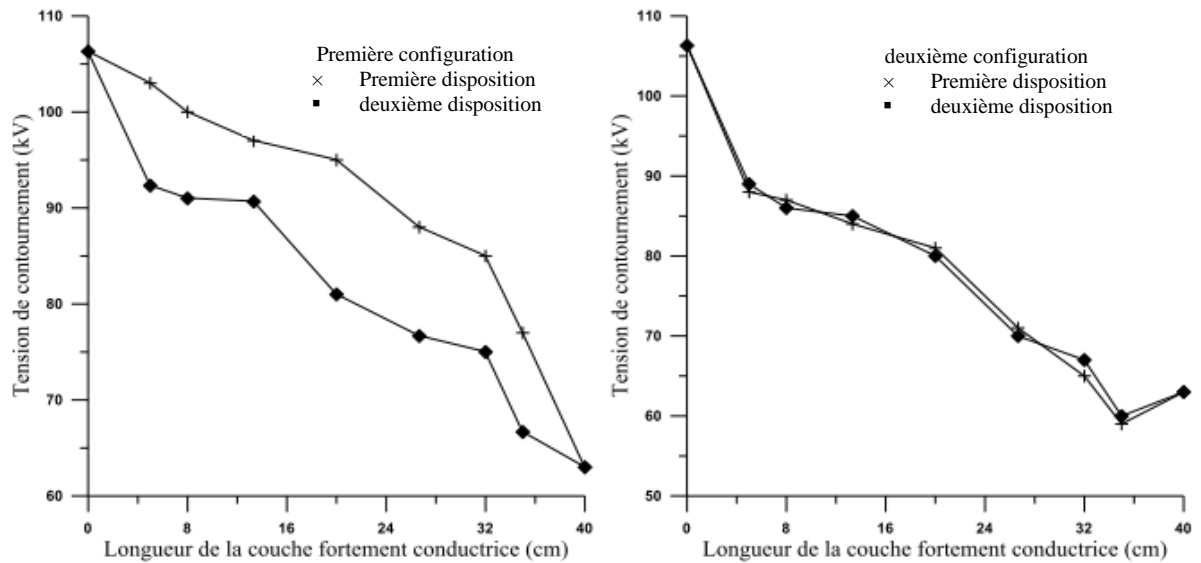


Figure 2.2 Effet de non-uniformité de la couche de pollution [31]

Il a constaté que la tension de contournement diminue avec l'augmentation de la longueur de la couche la plus conductrice. Il a prévu ce résultat, car l'augmentation de la longueur de la couche à forte conductivité provoque la diminution de l'impédance équivalente totale inter-électrodes, engendrant ainsi la dégradation de la tension de tenue diélectrique du système (fig. 2.2).

Il a remarqué aussi pour les deux dispositions de la deuxième configuration qu'il y a une légère augmentation de la tension de contournement pour des longueurs de la couche fortement conductrice dépassant 87.5 % de la ligne de fuite totale du modèle. Ce résultat confirme la constatation faite par H.Streubel [30]. En plus, la tension de contournement pour la deuxième configuration est pratiquement insensible à la position des deux couches polluées par rapport aux électrodes.

Slama [18] a proposé un dispositif expérimental comportant un canal rectangulaire en verre d'une profondeur de 18 mm, d'une largeur de 50mm et d'une longueur de fuite totale de 200 mm (fig. 2.3). Ce dispositif permet de

contrôler l'épaisseur de la couche de pollution le long de la ligne de fuite de l'isolateur. La non-uniformité de la pollution est fonction de l'angle d'inclinaison α de la pollution tel que représenté dans la (fig. 2.4).

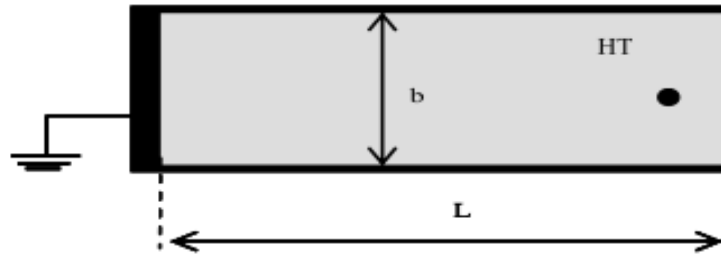


Figure 2.3 Modèle de laboratoire dans [18]

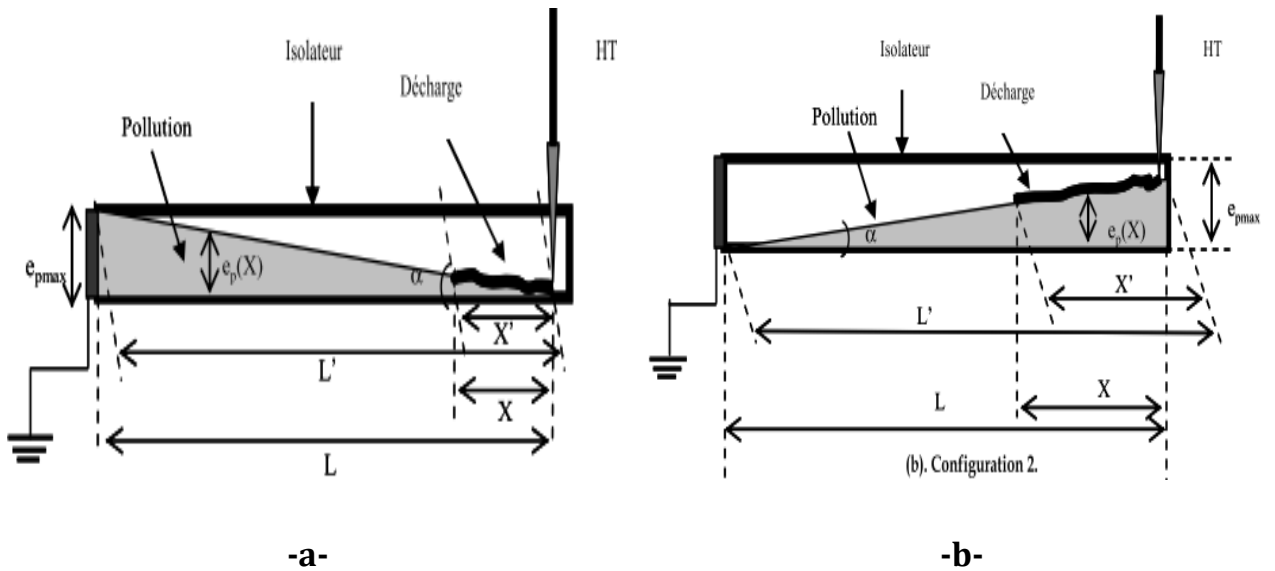


Figure 2.4 Configurations de non-uniformité [18]

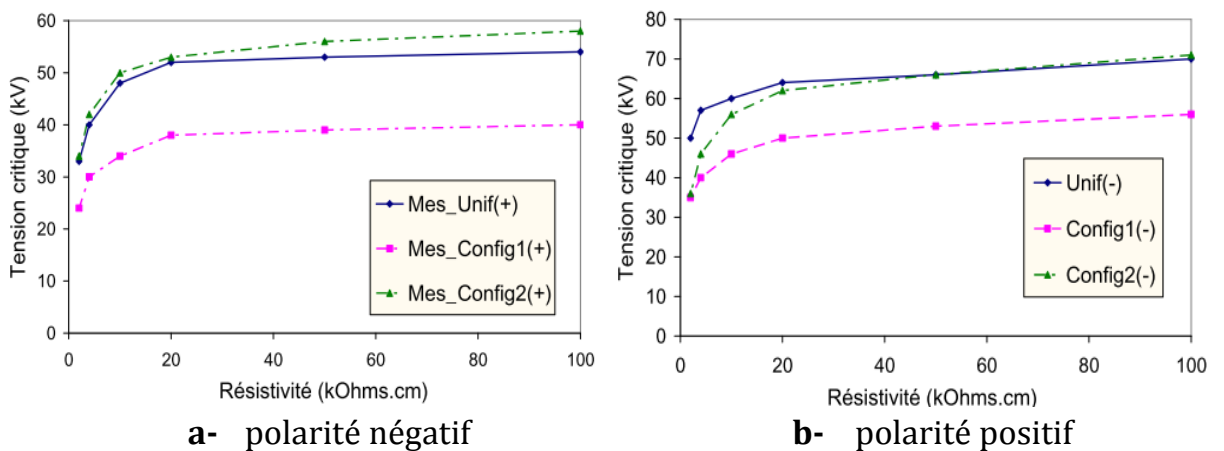


Figure 2.5 Tensions de contournement en fonction de la résistivité et la polarité dans [18]

Slama et al [18] a noté que les tensions critiques en polarité positive sont inférieures à celles en polarité négative quelle que soit la configuration de la pollution (fig. 2.5). Ce qui met en évidence l'effet du non-uniformité linéaire de la pollution sur la tension de contournement, il a montré aussi que les courants critiques et les tensions critiques dépendent de la configuration, de la résistivité de la pollution et de la polarité de l'électrode HT.

Sahli et al [3] a simulé la non-uniformité de la pollution, en intercalant une bande propre et sèche de longueur variable (de 0 à 10 cm avec un pas de 1 cm) en gardant la constante la conductivité, la polarité et le diamètre de l'isolateur. Le modèle est montré dans la (fig. 2.6).

Sahli et Al [3] ont observé que l'arc apparaît d'abord du côté de la borne haute tension quelles que soient la longueur de la bande sèche X , la conductivité volumique de la couche de pollution σ_v et la polarité.

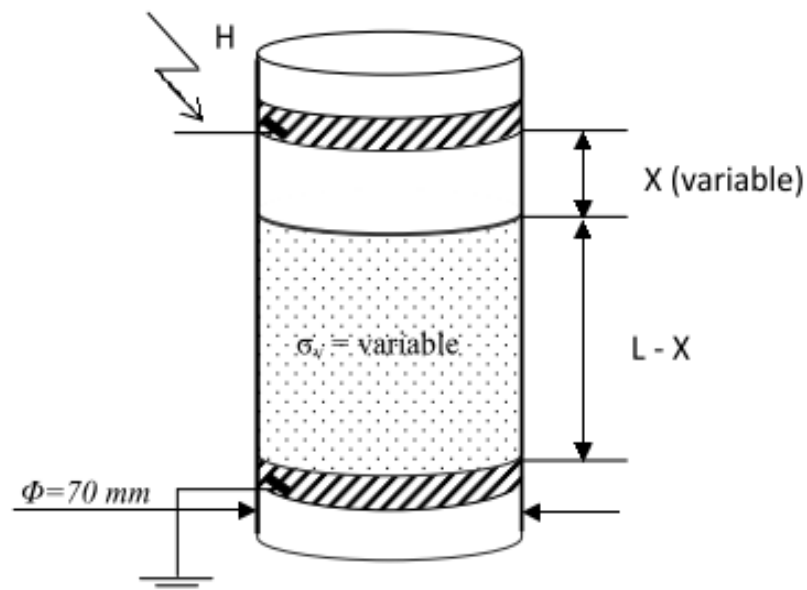


Figure 2.6 Modèle de non-uniformité dans [3]

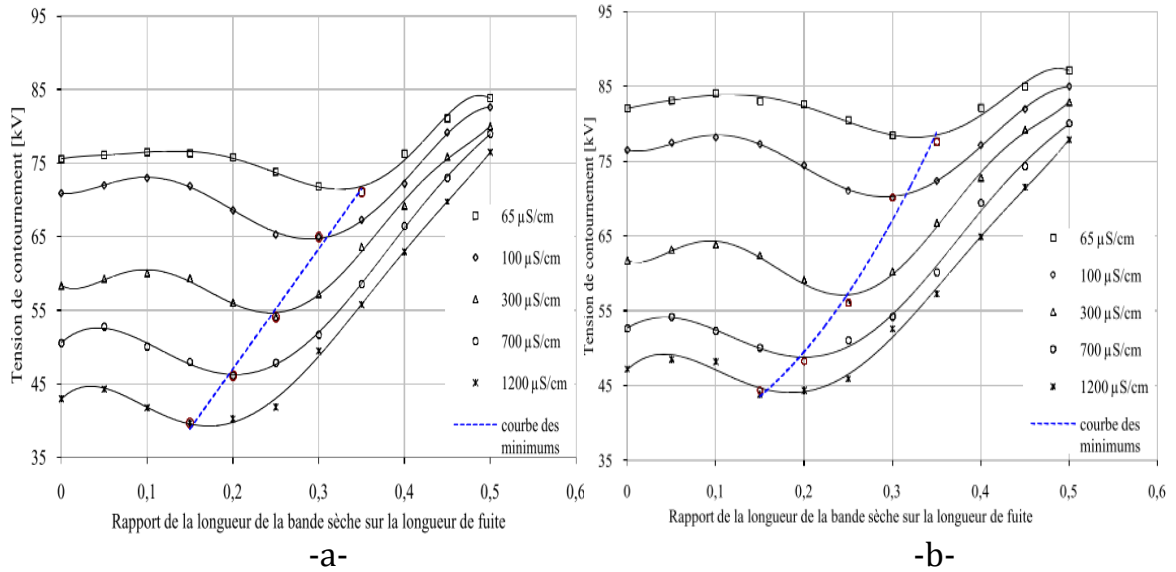


Figure 2.7 Tension de contournement en fonction du rapport de la longueur de la bande sèche sur la longueur de fuite. a- polarité négative, b-polarité positive. [3]

Cet arc s'allonge progressivement au fur et à mesure que la tension augmente jusqu'à l'apparition d'un contournement totale de l'isolateur. Il a remarqué aussi que L'apparition de la décharge est toujours précédée d'un effet de couronne très intense.

Il a prouvé expérimentalement que la polarité positive conduit à des tensions de contournement plus élevée que celle obtenues à une polarité négative quelles que soient la longueur de la bande sèche, la conductivité de la couche polluante et le diamètre de l'isolateur utilisé (fig. 2.7).

Boudissa et Bayadi [19] ont proposé trois scénarios de pollution, transversale, longitudinale périodique et longitudinale non périodique, ces scénarios sont les plus rencontrés en service dans les zones polluées caractérisés par des vents violents. L'étude a été effectuée au laboratoire sous tension alternative. Les configurations sont représentées dans la (fig. 2.8).

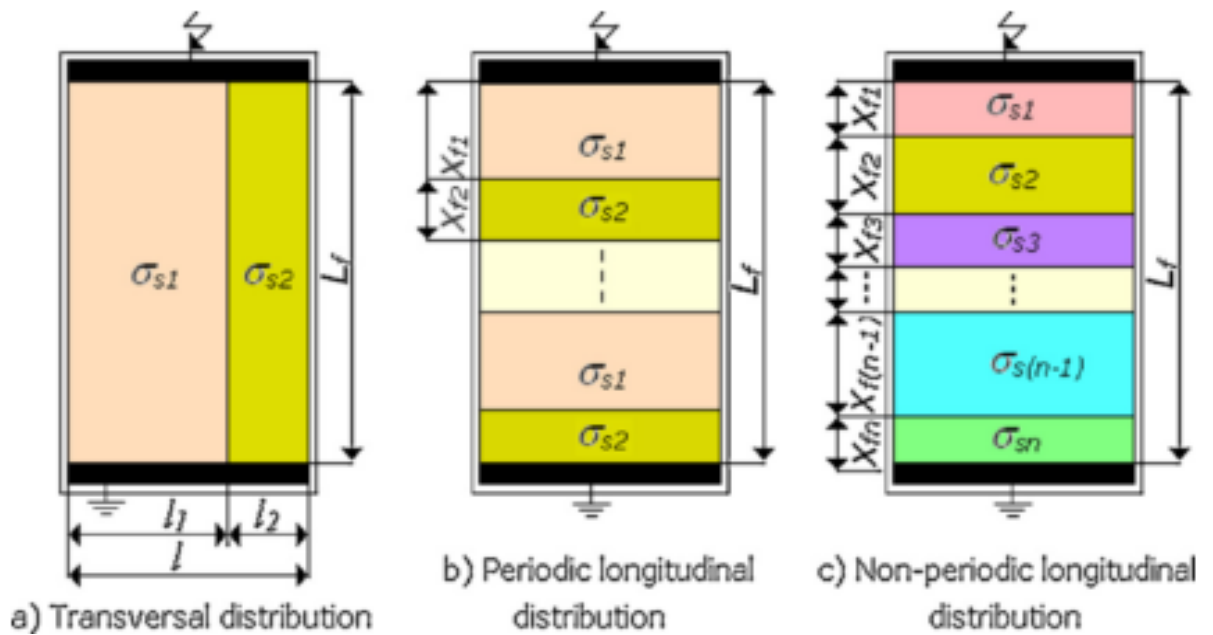


Figure 2.8 modèle de non-uniformité dans [19].

Du premier scénario, ils ont remarqué que la tension de contournement sous pollution non-uniforme transversale est de 21% plus grande qu'en distribution uniforme. En plus, les valeurs de tension de contournement sous pollution longitudinale périodique est au maximum 30% plus petite que les valeurs obtenues sous pollution uniforme. Le troisième scénario a illustré la présence d'une tension de contournement minimal égale à 42% plus petite qu'en configuration uniforme, celle-ci représente le cas non défavorable qui doit être pris en considération durant le dimensionnement et la conception des nouveaux isolateurs.

2.3. Effet de la discontinuité de la contamination:

Plusieurs travaux traitant l'effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement des surfaces isolantes ont été établis. J.Danis [32] a proposé un

modèle constitué d'une plaque de verre de forme géométrique simple possédant plus d'une zone sèche pour reproduire les cas rencontrés en service. Dans ses investigations expérimentales, il a montré que l'arc électrique se développe toujours d'abord à travers la zone sèche, puis dans la zone humide. Il naît de façon aléatoire le long de la zone sèche. Aux premiers stades du processus, plusieurs arcs se développent en parallèle puis disparaissent progressivement lorsque le courant augmente pour ne laisser place qu'à un seul arc dominant qui persiste jusqu'au contournement final qui se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche (fig. 2.9).

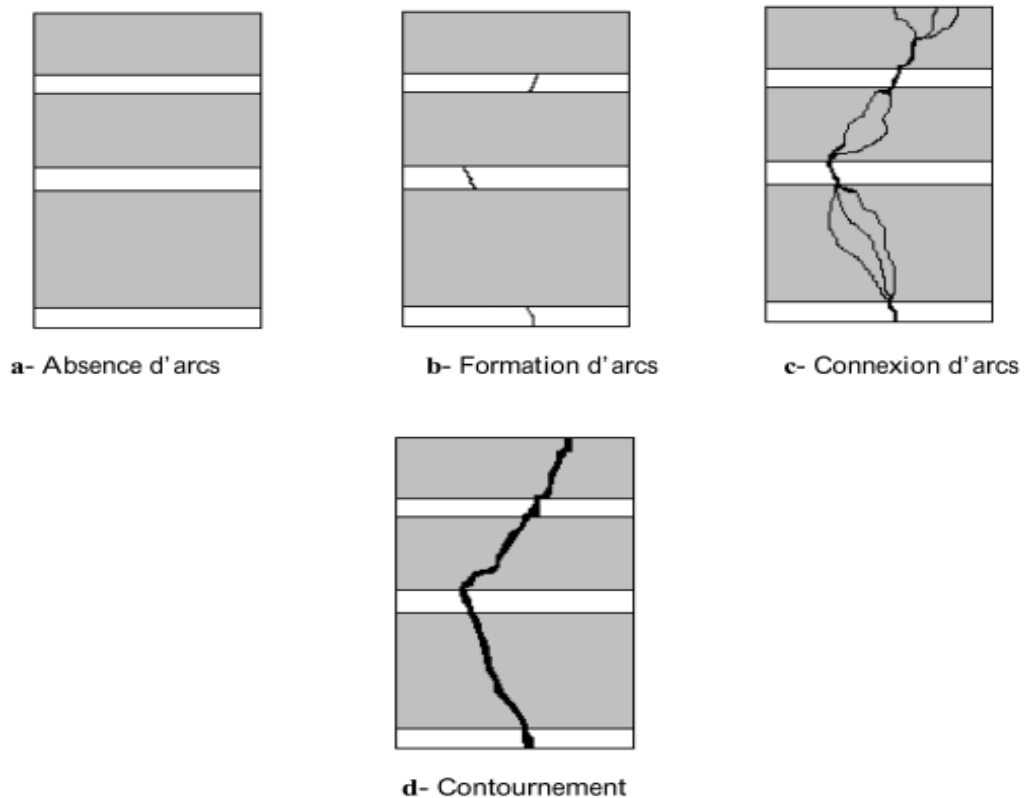


Figure 2.9 Modèle de J. Danis [32]

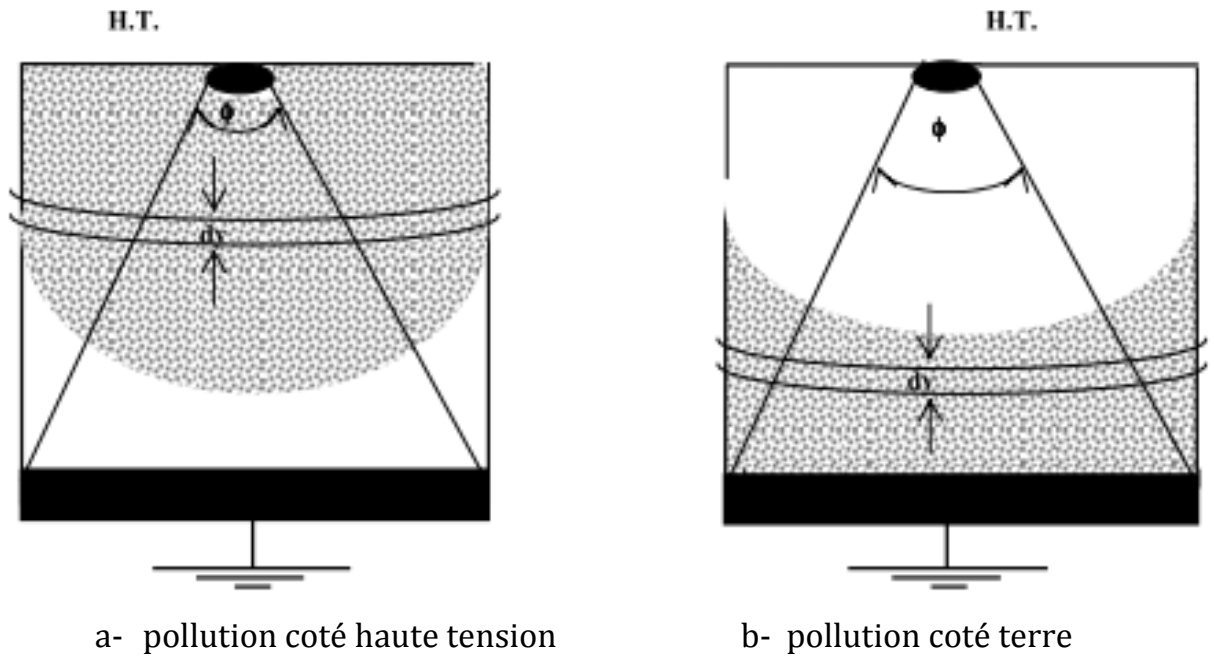


Figure 2.10 Modèle expérimental de non uniformité par [12]

Mekhaldi et al [12] ont développé un modèle mathématique à partir d'observations expérimentales sur une surface isolante plate couverte d'une couche de pollution discontinue constituée de deux bandes ; une bande sèche et une bande polluée (fig. 2.10), L'effet de la localisation de la bande sèche à proximité de la haute tension ou de la masse sur la longueur de la décharge et l'intensité du courant de fuite ont été pris en compte. Après, l'impédance totale serait la somme des impédances de la bande sèche et de la résistance de la couche de pollution en fonction des configurations (a) et (b). Ils ont développé un modèle mathématique capable de donner l'impédance équivalente d'une couche de pollution discontinue de la forme suivante :

$$Z(y) = Z_{od} \left(\frac{L-y'}{L} \right)^{0.42} + \frac{K}{\sigma_p} \ln \left(\frac{\varphi+L}{\varphi+L-y'} \right) \quad 2.1$$

Où: y et y' sont les rayons de la bande polluée mesurée à partir de l'électrode HT comme indiquée dans la (fig 2.10). Le facteur K est une constante et le terme σ_p représente la conductivité de la couche de pollution.

Basant sur le calcul du bilan énergétique, les circuits électrique équivalentes et les caractéristique physique de l'arc. Diampeni et al [33] ont proposé un modèle dynamique autonome pour prédire les caractéristiques de décharges qui se propagent sur les surfaces isolantes polluées d'une manière discontinue soumise à diverses formes de tension (continue, alternative et impulsionnelle). La particularité de se modèle est qu'il comporte trois bandes sèches et trois polluées, les deux configurations sont représentées au (fig 2.11),

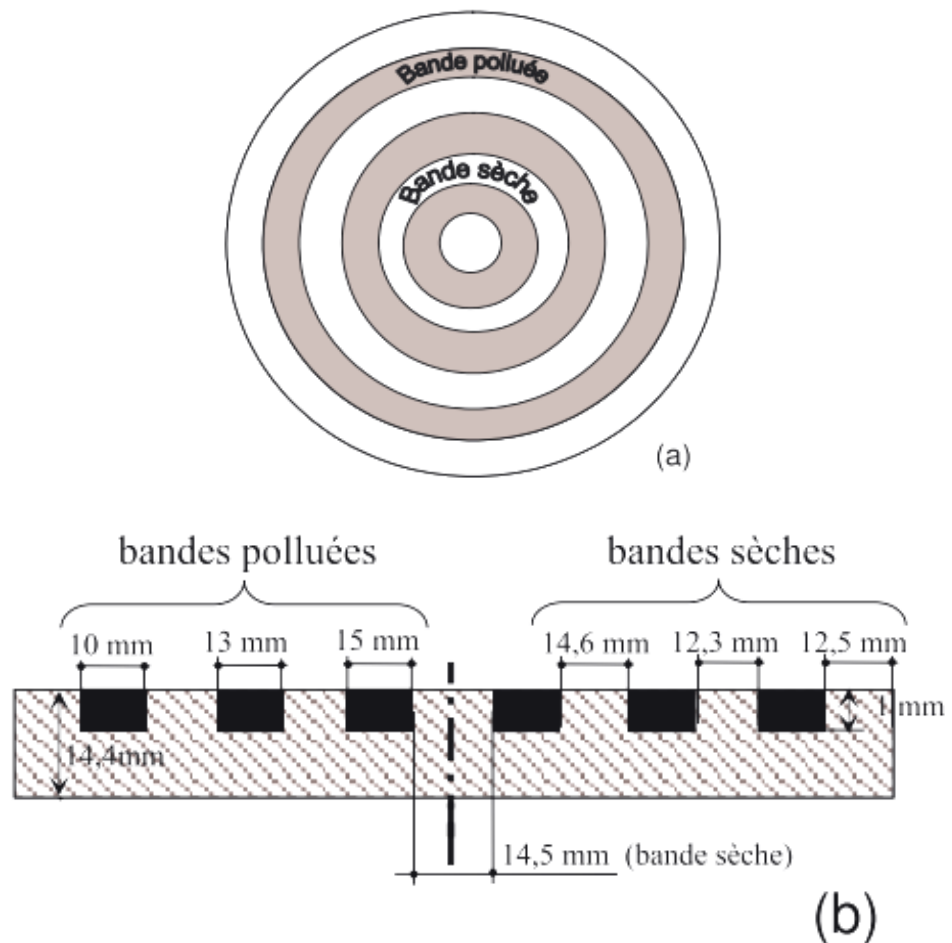


Figure 2.11 Schémas de modèle de Diampeni [33].

Ils ont remarqué qu'en tension alternative la disposition des bandes et leurs propriétés et plus particulièrement leurs largeurs et leurs conductivités agissent de façon significative sur les caractéristiques de décharge.

Teguar [13] a proposé un algorithme qui permet de définir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées par des circuits électriques comme montré dans la (fig. 2.12).

Les composants de ces circuits sont définie à partir des essais expérimentaux effectués sur une plaque propre et celle uniformément polluée. La tension de contournement est calculée à partir de la valeur de la tension de tenue obtenue expérimentalement dans le cas où les couches de la pollution discontinue sont remplacées par du papier aluminium.

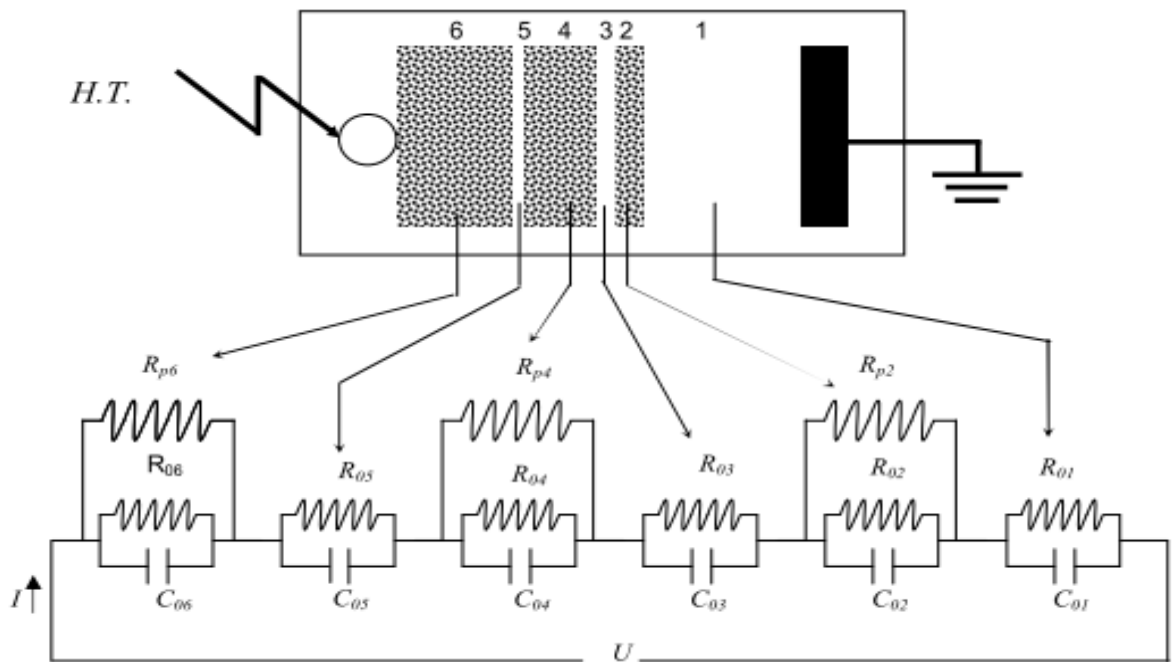


Figure 2.12 Circuit électrique équivalent proposé par [13]

(fig. 2.12) représente le circuit électrique équivalent au modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Dans ce circuit, chaque bande i ($i=1$ à 6) est constituée d'une résistance R_{0i} en parallèle avec une capacité C_{0i} . Pour chaque bande polluée i ($i=2, 4, 6$), ces circuits sont shuntés par une résistance R_{pi} représentant la couche de pollution (peinture semi-conductrice à base de graphite) Le fait que les couches polluantes possèdent des formes rectangulaire et selon la recommandation de la CEI 60-1 [32], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée i peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^l \frac{dl}{b} = R_{sp} \frac{L_i}{b} = R_p f + \frac{L_i}{b} \quad 2.2$$

Avec $i=2, 4, 6$, R_{pi} la résistance de la couche de pollution, dl élément de longueur, L_i la longueur de la pollution, b la largeur de la couche de pollution et f le facteur de forme. Les résultats de simulation s'accordent totalement avec ceux obtenus expérimentalement sur les grandes largeurs de couches polluantes. Il a observé aussi que l'initiation de décharge commence autour de l'électrode HT ; ensuite, le contournement se produit directement sans apparition au préalable de décharges préliminaires. Dans ce cas, la valeur critique de la bande propre équivalente à partir de laquelle aucune décharge stable ne se propage représente 42.12 % de la distance inter-électrodes.

Slama [14] a utilisé un dispositif de mesure optique pour étudier la morphologie de la décharge sur les surfaces polluées d'une manière discontinue. Les trois configurations proposées sont montrées dans la (fig. 2.13).

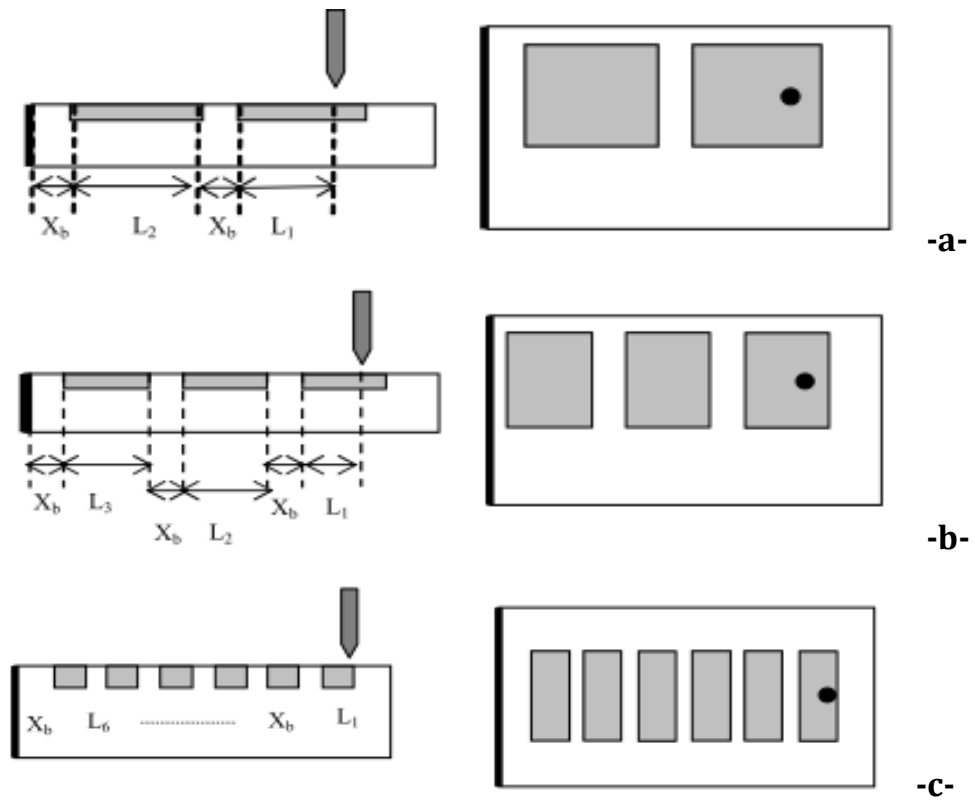
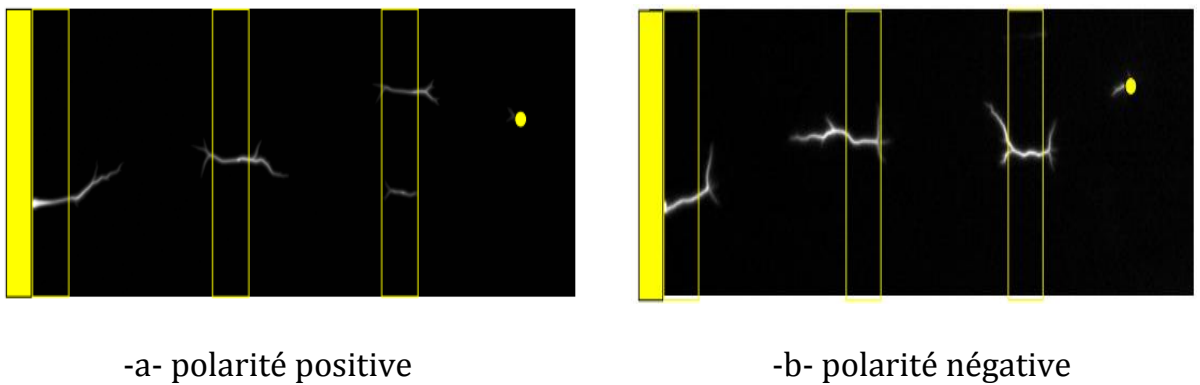


Figure 2.13 Modèles d'isolateurs utilisés par [14]. -a- configuration 2BP2BS, -b- configuration 3BP3BS, -c- configuration 6BP6BS.

Les résultats obtenus montrent que plusieurs décharges mono-tronc ou multi-troncs apparaissent presque simultanément (fig. 2.14) au niveau de l'électrode HT et d'autres décharges au niveau des bandes sèches.



-a- polarité positive

-b- polarité négative

Figure 2.14 Morphologie de la décharge pour une configuration de pollution

3BP3BS. [14]

Slama [14] a conclu que la morphologie de la décharge change en fonction de la polarité de l'électrode HT, la conductivité et la répartition de la pollution. La forme de la décharge est très similaire à celle observée dans les longs intervalles d'air. En plus, les oscillogrammes du courant et de l'impédance changent en fonction de la répartition du dépôt de pollution et de la polarité. La présence de bandes sèches influe sur l'écart entre les tensions de contournement positif et négatif. Il a mis en évidence l'effet de l'épaisseur de la pollution et les observations expérimentales montrent que seule une partie de la couche de pollution contribue à la conduction.

2.4. Paramètres d'influence

2.4.1. La polarité

Les travaux déjà entrepris sous tension continu rapportent qu'il y a une influence des polarités sur la tension de contournement dont les tensions critiques en polarité négative sont environ 2/3 des tensions critiques en polarité positive [4, 34-36]. Cette constatation n'était pas prise en considération dans les modèles classiques.

Wilkins et al [37] ont remarqué que, les tensions négatives génèrent des courants critiques légèrement inférieurs à ceux des tensions positives dans le cas où les valeurs de résistances sont grandes. Ceci peut être expliqué par leur théorie de l'élongation par ionisation. Dans le cas de tension négative, on a un gradient de tension sur la tête de la décharge plus important dû à la charge d'espace, favorisant plus l'ionisation, et donc un courant critique inférieur à celui d'une

tension positive appliquée. Renyu et al [38] ont trouvé que l'influence de la polarité est liée au profil de l'isolateur. En cas de symétrie d'objet de test, il n'y a aucune différence entre les deux polarités.

Slama et al [18] ont montré expérimentalement que les valeurs de I_{cri} et V_{cri} pour un isolateur pollué uniformément ou non-uniformément dépendent essentiellement de la configuration de la pollution et la polarité. Le sens de propagation des décharges varie selon la polarité de l'électrode HT. En polarité positive, la décharge située au niveau des bandes sèches du milieu tend à s'allonger beaucoup plus vers le côté où se situe la masse que vers le côté HT. Par contre, les décharges sur les dernières bandes sèches tendent à s'allonger vers l'électrode HT. Lorsque la pointe est négative, les décharges situées au niveau des bandes sèches du milieu ont tendance à s'allonger vers l'électrode de masse alors que celles sur les dernières bandes sèches tendent à s'allonger vers l'électrode HT comme en polarité positive.

Sahli [39] a obtenu expérimentalement que la polarité positive conduit à une tension de contournement plus élevée que celle correspondant à une polarité négative et ce quelles que soient la longueur de la bande sèche, la conductivité de la couche polluante et le diamètre de l'isolateur utilisé.

[40-42] Ont expliqué les valeurs faibles de la tension trouvées en polarité négative en évoquant le rôle de la « pulvérisation cathodique ». En polarité positive, une pulvérisation de gouttelettes d'eau dans la colonne de la décharge peut avoir lieu et modifier ainsi à la fois les gradients de tension dans celle-ci et

l'atmosphère dans laquelle brûle la décharge. En polarité négative, la pulvérisation n'ayant pas lieu, la décharge brûlera dans l'air sec.

2.4.2 La sévérité de la pollution

La Sévérité de la pollution constitue le facteur le plus influent sur les tensions de tenue diélectrique des isolateurs, donc, il faut bien tenir compte du degré de pollution lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de transport et de l'appareillage de haute tension. Ce problème est largement traité par différents chercheurs [1-40], mais la difficulté majeure est que la sévérité de la pollution se présente comme un ensemble de facteurs, tout aussi complexes les uns que les autres. Les dépôts polluants qui recouvrent les surfaces isolantes peuvent engendrer une diminution considérable de la tension de tenue des isolateurs. La connaissance du degré de pollution est par conséquent une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau d'isolement des ouvrages installés sur site, en vue d'un dimensionnement convenable de l'isolation

2.4.3 La constitution chimique de la pollution

Sunraradjan et Gorur [43] ont établi un modèle de décharge qui prend compte de l'influence des matières insolubles. Ces auteurs traduisent cependant cette influence par une modification du paramètre qui caractérise le degré de pollution, dans ce cas l'ESDD, et ne donnent aucune indication sur l'influence de l'humidité. D'autre part, différentes études ont été menées en vue de déterminer l'influence du type de sel sur la tension de contournement. slama [14] a démontré que La constitution chimique de la couche de pollution a peu d'effet sur la tension

critique contrairement aux courants critiques, qui eux sont sensibles à la nature chimique du dépôt de pollution. Les valeurs des constantes caractéristiques n et N sont fonction de la nature chimique des dépôts et de la polarité de la tension.

Sahli [39] a noté que la mesure de la conductivité superficielle n'est pas suffisante pour la construction d'un modèle statistique fiable pour prédire le degré de sévérité de pollution d'un site. Et pour le but d'optimiser les prévisions du modèle, il a associé les résultats des analyses chimiques avec les mesures de la DDSE. Il a développé un modèle de régression fortement significatif capable de prédire le Degré de sévérité de pollution d'un site en fonction des concentrations (C_i) et des conditions climatiques.

2.4.4. La matière insoluble

A travers les tests au laboratoire, il est établi que le type et le degré de la matière non soluble influent sur les tensions de tenue aussi que sur les caractéristiques de courants de fuite [41]. Le Tonoko et le Kaolin sont les plus utilisés pour les tests au laboratoire pour faciliter l'obtention d'une couche polluante continue sur la surface. [44] Ils ont mentionné que la densité de la matière insoluble influence négativement sur les tensions de tenue (fig. 2.16). La réduction de la tension de tenue avec l'augmentation du NSDD peut être expliquée par la grande épaisseur des matières insolubles parce qu'il absorbe plus d'eau ce qui implique l'augmentation de la quantité du sel dissolue, la conductivité surfacique augmente et la tension de contournement réduit.

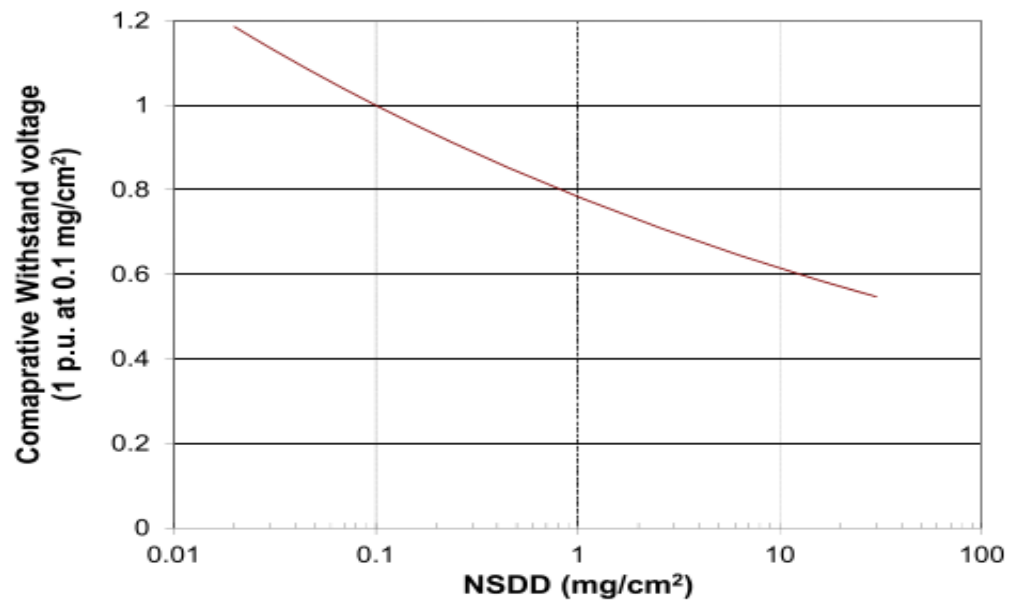


Figure 2.16 Effet de l' DDNS sur les tensions de tenue [44]

Montoya [45] a démontré expérimentalement que la quantité de la matière insoluble influe sur les courants de fuite générés aux surfaces isolantes polluées. D'après ces résultats, la relation qui relie l'ESDD avec un niveau spécifique de NSDD est généralement linéaire.

Slama [14] a confirmé que la présence de la matière insoluble influe sur les caractéristiques statiques de la décharge de contournement en courant continu dans les deux polarités. Cela est expliqué, dans un premier temps, par les variations des constantes statiques de la décharge N et n . Aussi, Les tensions critiques de contournement sont identiques pour les faibles valeurs des résistances linéiques de la pollution. A partir de $r_p=3,125 \text{ k}\Omega/\text{cm}$, les tensions critiques deviennent plus ou moins différentes selon la quantité de DDNS dans les deux polarités. Au-delà de cette valeur de la résistance, l'écart entre les tensions critiques devient de plus en plus important.

2.4.5. Le processus d'humidification

Les expériences en service sur la mise hors service des substances indiquent que le contournement des isolateurs est survenu dans les conditions pluvieuse ou bien humide. Jiang [46] a trouvé que le temps de l'humidification de la couche polluante dépend du type, de la géométrie et la sévérité de la pollution au surface de l'isolateur, généralement ; à chaque fois qu'on augmente le degré de la pollution, le temps d'humidification augmente. Aussi, le temps nécessaire pour humidifier un isolateur composite est plus grand qu'un isolateur céramique, celle-ci est due à l'effet de hydrophobicité de la surface. La relation entre le courant de fuite et le temps d'humidification d'un isolateur composite est montré au (fig. 2.17).

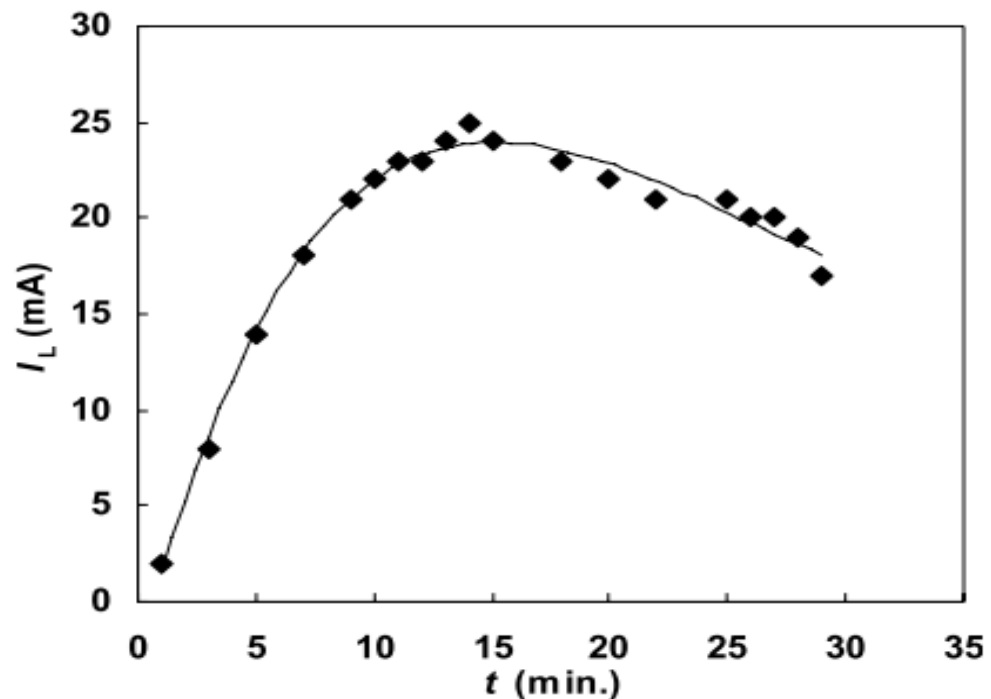


Figure 2.17 Relation entre le courant de fuite et le temps d'humidification [46]

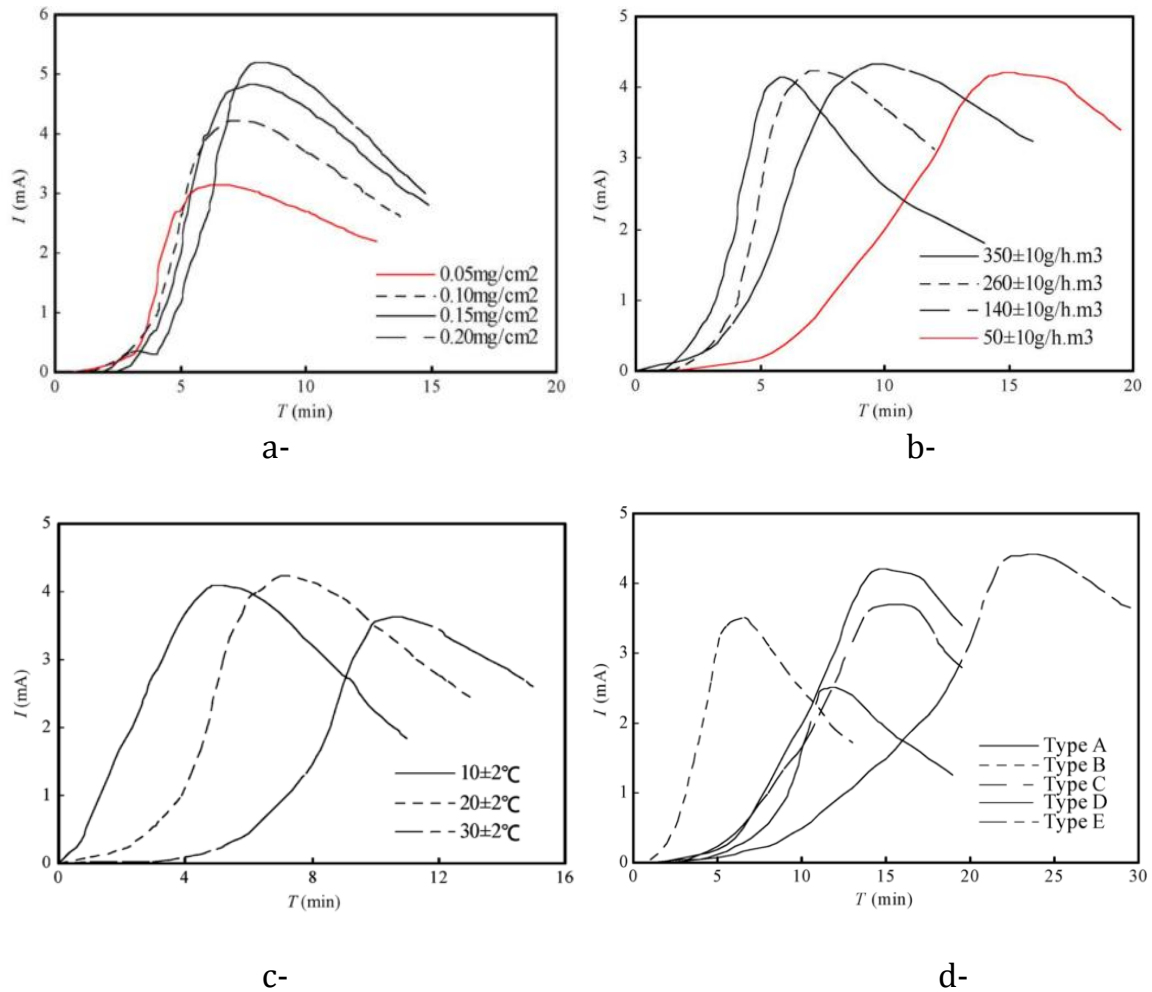


Figure 2.18 Variation du courant de fuite et du temps d'humidification [47], a- effet de l'ESDD, b- effet d'humidité, c- effet de la température, c- effet du type d'isolateur.

Zhang et al [47] ont illustré l'effet des conditions climatiques (pollution, température, humidité et la géométrie d'isolateur) sur le processus et le temps d'humidification de couche polluante. Les auteurs ont noté que, pour les isolateurs céramiques, le temps nécessaire est dans l'intervalle de 5 à 20 minutes, et dans l'intervalle 15 à 25 minutes pour l'isolateur en polymère. L'influence de paramètres climatiques est présentée au (fig 2.18).

2.4.6. Profil de l'isolateur

Le profil de l'isolateur est un important paramètre qui influence sur la tension de tenue sous pollution. Pour augmenter la performance d'un isolateur, plusieurs mesures doivent être respectées durant son dimensionnement telles que :

- La longueur de fuite doit être maximale.
- une géométrie permettant le nettoyage naturel.
- une géométrie complexe assurant une contamination non-uniforme et donc des tensions de contournement plus élevées. La plupart des études expérimentales et les modèle théoriques trouvent que la tension de tenue se réduit au fur et à mesure avec l'augmentation du diamètre. L'effet est plus notable pour les isolateurs céramiques qu'en isolateurs composites (fig. 2.19).

LeRoy [48] a montré que, pour un niveau de pollution donné, la tension de contournement des isolateurs est d'autant plus faible que le facteur de forme de profil est plus petit.

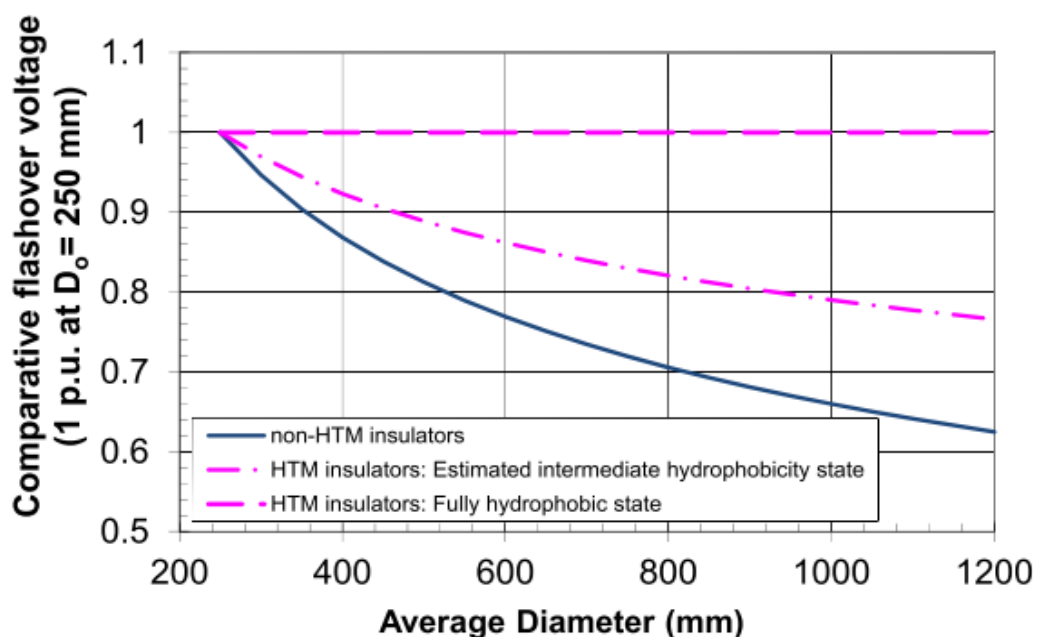


Figure 2.19 Influence du diamètre sur la tension de tenue [44]

Il a été aussi démontré que, pour une certaine densité de contamination, la tension critique de contournement diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente et ce, jusqu'à une certaine valeur où la tension de contournement cesse de diminuer. Cela a été expliqué par le fait qu'un large diamètre signifie une plus grande exposition de la surface à la pollution, l'augmentation de la conductivité engendre par conséquent une réduction de la tension de contournement.

Matsuoka et al [41] ont démontré que la tension de tenue diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente. La variation du diamètre influence aussi la densité du dépôt de contamination sur l'isolateur : plus le diamètre augmente, plus la densité du dépôt contaminant diminue.

Baker et al [49] ont montré que la forme de l'isolateur a plus d'influence sur la performance de l'isolateur en continu qu'en alternatif. Sundararajan et al [20] aussi, a traité l'influence du profil de l'isolateur sur la tension de contournement.

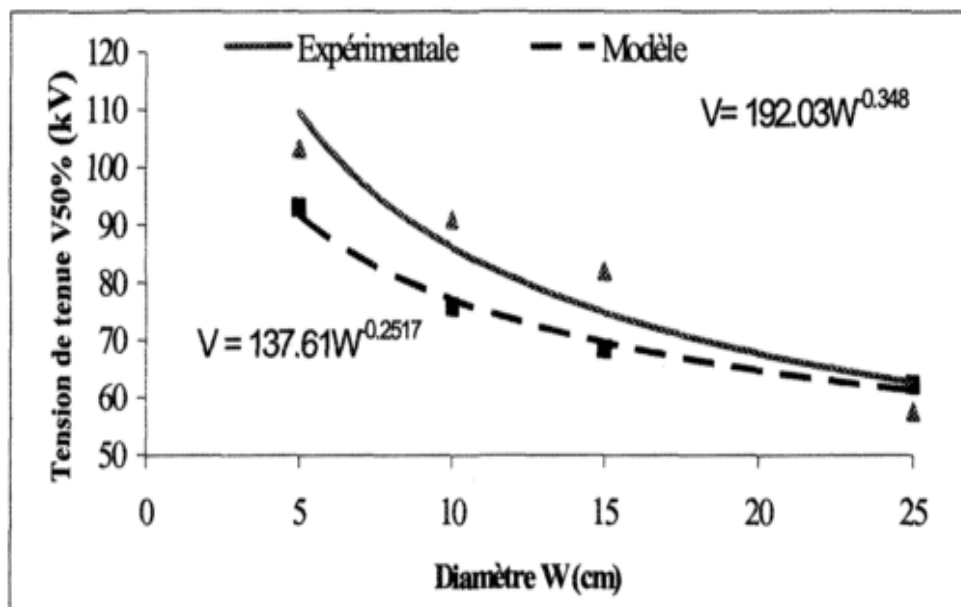


Fig.2.19 L'influence du diamètre moyen de l'isolateur sur la tension de tenue [50].

Chaarani [50] à déterminer l'influence du diamètre d'un isolateur électrique recouvert de glace sur la tension de tenue à 50%. Il a trouvé que l'intensité des décharges et le courant de fuite augmente avec l'accroissement du diamètre. En plus, le résultat pour la tension de tenue est montré dans la (fig. 2.19), la diminution est expliquée par le fait que pour un diamètre d'isolateur plus grand, le dépôt de glace présente une résistance de surface plus faible ce qui réduit la tension de tenue d'isolateur.

2.4.7. la non-uniformité de la pollution

La plupart des recherches déjà entreprises pour maîtriser le phénomène de contournement sont effectuées sur la base d'une distribution uniforme de la contamination, ce qui ne reflète pas le comportement aléatoire de l'accumulation de la pollution en service qui est loin d'être uniforme [3, 17]. C'est pour cela, il s'avère tout à fait insuffisant d'étudier la performance de l'isolateur sous une répartition uniforme de pollution [19, 20]. Cependant, l'effet de la distribution de la pollution sur la performance d'isolation externe n'est pas encore pratiquement traité en raison de nombreuses contradictions entre les chercheurs concernant la différence entre la tension de contournement sous pollution uniforme et non-uniforme. Gorur [20] et Aouabed [21] ont observé que la tenue diélectrique de l'isolateur dans la répartition de la pollution non-uniforme est plus critique que celui obtenu dans le cas uniforme, tandis que Boudissa [22] a prouvé le contraire, c'est pour cela, l'étude de la performance d'isolateur sous différentes configurations

de la pollution ; uniforme, non-uniforme et discontinue s'avère très utile durant la conception de nouveaux profile d'isolateur [1, 2, 44].

2.4.8. La formation de bandes sèches

Le problème de la formation de bandes sèches a été traité par plusieurs chercheurs pour prédire la formation des bandes sèches sur des surfaces d'isolateurs simples et des isolateurs réels [23-26, 51-56]. Gellert et Rasmussen [53] ont modélisé la formation de bandes sèches par éléments finis en considérant la relation entre la formation de la buée, la tension et la distribution de la température, ils ont considéré que :

- La pénétration de l'eau d'un élément de volume à un autre se fait par diffusion, l'influence de la gravitation est négligeable, le mouillage et l'évaporation ont lieu sur la surface mais sont supposés à travers la couche (acceptable lorsque la couche est fine).
- La tension appliquée et la conductivité déterminent le courant de fuite ;
- Aucune accumulation de charge n'est possible ;
- La tension doit être de préférence alternative et la capacité aux voisinages est négligeable ;
- La chaleur développée indique les températures locales dans la couche de pollution ; elle est supposée indépendante de la surface de l'isolateur.

En utilisant en plus des conditions aux limites bien définies, Gellert et Rasmussen [53] ont trouvé une concordance qualitative avec les résultats expérimentaux.

Akuzuki [24] a prouvé que la formation des bandes sèches sur la surface des isolateurs pollués et humidifié est inévitable. Ces bandes peuvent contribuer fortement à la discontinuité de la couche de pollution, ce qui mène à la déformation de la distribution potentielle sur la surface des isolateurs qui rend le champ électrique appliqué sur ces bandes sèches plus intense. Cependant, la tension de tenue des isolateurs pollués est directement liée à la formation sèche de bandes.

Jian Bo et al [25] ont proposé un modèle analytique en 3D pour l'étude de l'effet des bandes sèches sur la distribution du potentiel et du champ électrique autour d'un isolateur pollué en basant sur la méthode des éléments finis, ils ont conclu que :

- la création des bandes sèches engendrent la déformation de distribution du potentiel sur la surface d'isolateur ce qui augmente le champ électrique sur ces bandes.
- le champ électrique maximal se réduit non linéairement avec l'augmentation de largeur des bandes sèches.
- le champ électrique maximal des bandes sèches vas se réduire avec l'augmentation du nombre de es bandes. La création de plusieurs bandes au même temps peut affaiblir le champ appliqué à chacune de ces bandes.

Bologna et al [26] ont montré que la création d'une bande sèche est largement associée aux décharges couronne sur la surface supérieure, et les décharges partielles sur la surface empêchent la formation d'une couche faiblement conductrice de l'eau dans les endroits où le verre est le plus mince (fig. 2.20)

Les décharges couronne sont observés dans les zones où le verre est le plus mince; ces décharges empêchent la formation d'une couche conductrice d'eau dans ces endroits

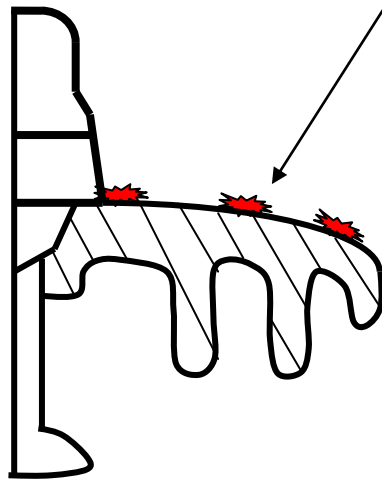


Figure 2.20 Formation des bandes sèches par l'effet des décharges de couronne.

2.4.9. La discontinuité de la couche de pollution

En général, la répartition de la couche de contamination sur la surface de l'isolateur dépend principalement de l'interaction entre les conditions environnementales dans lequel l'isolateur doit fonctionner, conjointement avec la conception et le design de l'isolateur lui-même. La plupart des travaux considèrent des modèles expérimentaux de géométries simples et rarement le profil d'un isolateur réel. Cependant, si ces modèles équivalents ne reflètent pas exactement le comportement des isolateurs réels, ils permettent par contre, une meilleure visualisation du phénomène des décharges électriques. Plusieurs travaux expérimentaux et théoriques ont été entrepris en vue de représenter le plus fidèlement possible l'influence de discontinuité sur les caractéristiques de la décharge du contournement [12, 13, 14, 33]. Par contre, L'étude de la génération et l'élongation des décharges sur les surfaces isolantes polluées de façon non-

uniforme et discontinue en présence de plusieurs bandes sèches reste insuffisamment documenté, comparée aux multiples travaux consacrés au cas d'une répartition uniforme.

2.5. Méthode de surveillance et de diagnostic de l'état des isolateurs

Le problème principal qui se présente durant le dimensionnement de l'isolement dans des zones polluées est l'évaluation de la sévérité de la pollution du site. Pour cette raison, plusieurs techniques sont adoptées pour prédire le plus tôt possible les stages qui mènent au contournement. Que se soit la technique offline ou bien online, elle permet au concepteur de mesurer des paramètres caractérisant une ou plusieurs phases d'accumulation de la pollution ou bien du processus du contournement. Ces méthodes basent sur l'exposition directe des isolateurs dans le site concerné et de faire des mesures de façon continue ou soit périodique pendant une période de temps bien déterminé. Les informations accumulées par chaque méthode de mesure sont stockées et traitées par différentes techniques parmi celles-ci les analyses statistiques qui sont utilisées pour avoir une meilleure décision durant le choix du profil d'isolateur le plus adéquat et la géométrie qui présente une meilleure performance. En plus, elle permet aussi de bien déterminer et optimiser les programmes de lavage pour la société d'électricité.

2.5.1. La densité du dépôt de sel équivalent DDSE

La naissance de cette application a été au Japon au milieu des années soixante. Elle permet de comparer le pouvoir conductimétrique d'une solution contenant de la pollution à une référence qui est une solution de chlorure de sodium (NaCl).

En utilisant cette méthode peut caractériser la première phase du processus qui mène au contournement. La densité de dépôt de sel équivalent ESDD est exprimée par le dépôt équivalent de chlorure de sodium en mg/cm^2 de la surface de l'isolateur, qui a la même conductivité que celle du dépôt réel lorsqu'il est dissout dans le même volume d'eau déminéralisée. L'ESDD est déterminée en prélevant un échantillon de la pollution de la surface d'un isolateur choisi et on le dissout dans une quantité prédéfinie d'eau distillé. La conductivité de la solution résultante, son volume et sa température, en collaboration avec la zone de surface de l'isolateur sont utilisés pour calculer La densité de dépôt de sel équivalent. Des instructions détaillées sur la façon d'effectuer cette mesure seront fournis dans la CEI 60815 [54].

La forme de tension appliquée (continue ou alternative) sur l'isolateur influe sur la DDSE. Sous tension continue, l'accumulation de la pollution est plus sévère que sous tension alternative [55]. Et quand la couche polluante contient des matières insolubles, il est indispensable de prendre en considération ce paramètre. En introduisant alors la notion de dépôt de densité de matière non soluble (DDNS). En effet, des travaux antérieurs ont montré que pour une DDSE constante et une DDNS variable, le courant de fuite augmente avec l'accroissement de la DDNS [45]. L'avantage majeur de cette méthode est qu'elle est souple et peut être utilisée à n'importe quel endroit du réseau. Elle permet aussi de quantifier et de qualifier la non-uniformité de la pollution. Malheureusement, elle prend beaucoup de temps pour l'exécuter par des personnels bien qualifiés aussi elle ne rend pas compte de l'influence de l'humidité.

2.5.2. La densité du dépôt de sel non soluble DDNS

La densité de dépôt non soluble (NSDD) est parfois mesurée en liaison avec l'ESDD et elle caractérise la teneur des contaminants non-solubles dans une couche de la pollution. Il est exprimé par quantité de dépôt en mg par cm² de la surface de l'isolateur. La mesure de NSDD peut également être couplée avec une analyse physico- chimique des dépôts polluants. Ces données peuvent indiquer la source de la pollution. En outre, le type et la densité de ces contaminants pourraient être importants pour l'évaluation de la hydrophobicité des isolateurs en polymère. La DDNS peut être mesurée en filtrant l'eau de lavage utilisée pour la mesure DDSE à travers des filtres en papier qui sont séchées dans un four après que la solution est drainé à travers les filtres. Le poids du composant non soluble est déterminé en soustrayant le poids du papier séché de celle du papier de re-séchés. Une description plus détaillée de cette méthode est fourni dans CEI 60815 [54].

2.5.3. La conductance superficielle

Les premières applications de cette méthode de mesure datent de la fin des années soixante. La conductance superficielle est donnée par le rapport du courant de fuite qui traverse l'isolateur à la tension appliquée. Elle est caractéristique aux premières phases du processus qui mène au contournement. Elle caractérise l'état de surface de l'isolateur avant l'apparition des bandes sèches. La conductivité superficielle résulte de la dissolution des sels qui se trouvent dans la couche de pollution qui recouvre l'isolateur par l'effet de l'humidité [56].

La résistance superficielle totale de l'isolateur se diminue avec l'augmentation du degré d'humidité dans l'air jusqu'au point de saturation qui traduit la dissolution totale des sels dans la couche de pollution. A ce point de saturation, il est possible de déterminer la correspondance entre la résistivité (la conductivité) superficielle et la DDSE. D'une manière globale, si on considère que la pollution uniquement constituée du sel, on peut prédire que la résistivité superficielle varie linéairement avec la DDSE. Cependant, cette méthode de mesure ne prend pas compte de la non-uniformité de la couche de pollution, tant de point de vue quantitatif que qualitatif.

2.5.4. La mesure du Courant de fuite

Le courant de fuite qui circule à travers la surface de l'isolateur dépend essentiellement de la tension de service et la conductance de la couche sur la surface. Il est possible d'estimer l'importance de contournement l'isolateur partir de la mesure du courant de fuite. La mesure de la crête de ces impulsions est très représentative de l'état superficiel de l'isolateur. Il a été montré que la plus forte crête du courant de fuite joue un rôle important dans l'évolution des arcs partiels. Lors de la création des zones sèches, le courant de fuite cesse d'être sinusoïdal pour n'être constitué que d'impulsions périodiques d'amplitudes variables ce qui peut renseigner sur l'importance du contournement [57].

Il existe deux méthodes de mesure du courant de fuite qui s'écoulent vers la terre à travers une résistance de mesure ou bien un HFCT. Ces méthodes sont:

- Mesure de la crête maximale du courant de fuite.

- mesure du nombre d'impulsions du courant de fuite.

La première repose sur la mesure de la plus forte crête du courant de fuite enregistrée pendant une période donnée sur un échantillon ou un isolateur réel constamment soumis à sa tension de service.

L'existence des impulsions du courant de fuite est due à l'établissement des arcs correspondant à la phase qui précède le contournement. La fréquence et l'amplitude de ces impulsions augmentent au fur et à mesure que l'on s'approche du contournement. Le comptage d'impulsions consiste à enregistrer pendant une période donnée le nombre d'impulsions du courant de fuite qui dépassent une certaine amplitude, pour un isolateur soumis à sa tension de service [57].

Shandrasekar et al [58] ont investi les caractéristiques du déphasage entre la tension appliquée le courant de fuite qui circule à travers la surface ainsi que par l'analyse tempo-fréquentielle du signal du courant de fuite. Pour le but de développer un outil performant capable d'évaluer la sévérité de pollution des isolateurs sous tension alternative. La transformation en ondelettes discrète (DWT) a été utilisé pour décomposé le signal du courant de fuite en (déviations standard multi résolution) pour comprendre les caractéristiques temps-fréquence du signal (LC). La transformée de Fourier est adoptée pour calculer le déphasage entre tension- courant. Les résultats rapportés sur les isolateurs en silicone et en porcelaine montrent que la sévérité de pollution des isolateurs pourrait être identifiée par l'analyse du rapport des détails 4, 5, 6 et 7 obtenus par l'analyse du Standard Déviation multi résolution des signaux du courant de fuite (fig. 2.21).

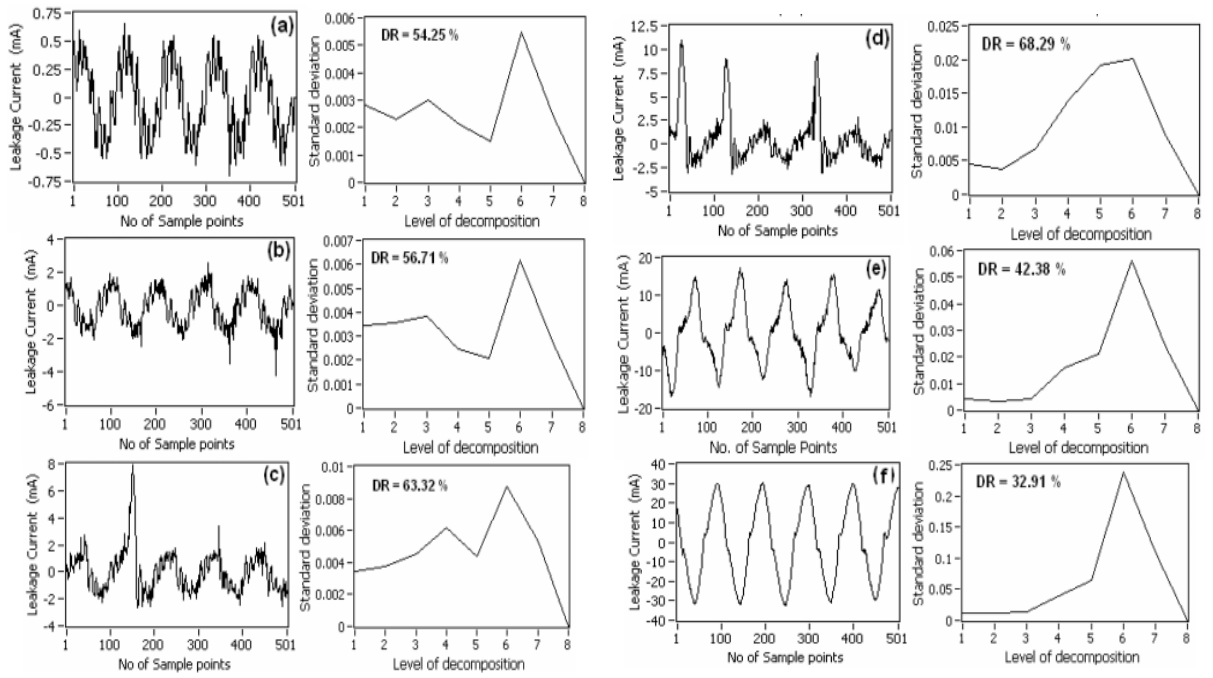


Figure 2.21 Signaux du courant de fuite, (a) sèche et propre (b) polluée et humide (c, d) décharges de courte durée (e, f) décharge long

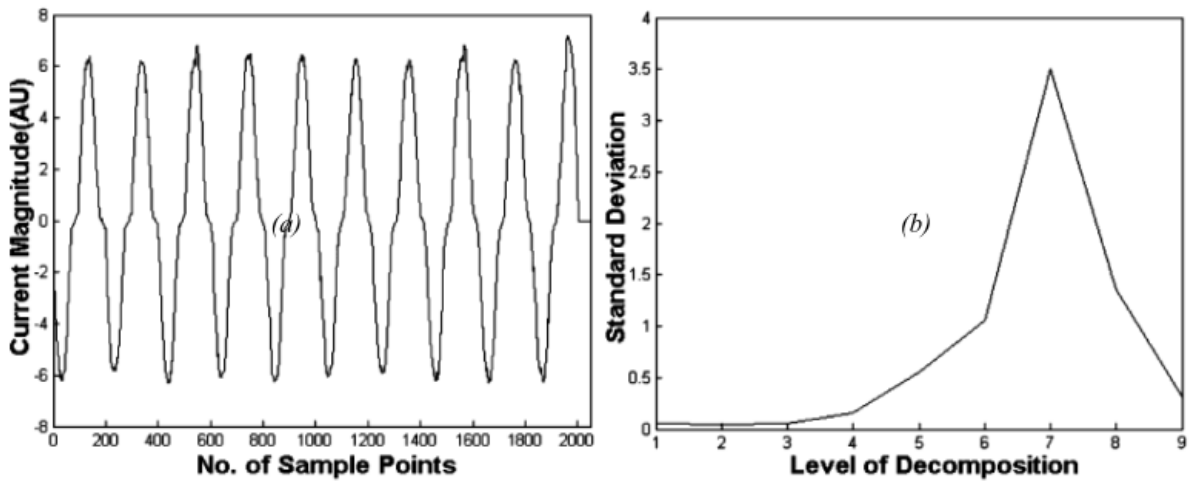


Figure 2.22 Signal de courant de fuite durant la phase de contournement, b-STD_MRA

R.Sarathi et al [59] ont étudié l'évolution des caractéristiques de courante fuite jusqu'àu contournement sous tension alternative. Les phénomènes de décharges

partielles et de contournement, ont été évalués par la mesure du courant de fuite. La transformée en ondelettes a été appliquée sur Pour bien analyser l'amplitude et la fréquence du signal du courant de fuite, l'amplitude du LC et STD_MRA correspondant (fig. 2.22). Ils ont fait l'appelle au RNA pour développé un système capable de classifier l'état de surface de l'isolateur en trois catégories (état normal, présence de décharges partielles, contournement le taux d'identification obtenu est 85%. Cela indique que les RNA peuvent évaluer et surveiller l'état de surface de l'isolateur en service.

F. Meghnefi et al [60] ont analysé le signal du LC d'un isolateur en porcelaine recouvert de glace. Les résultats obtenus montrent que le signal du courant de fuite lors de l'accumulation de glace est caractérisé par des formes d'ondes et des fréquences des harmoniques spécifiques.

ils ont démontré que le taux de gel peut être estimé à travers l'analyse du signal du courant de fuite a travers l'étude de l'évolution des harmoniques d'ordres 1, 3 et 5 (fig. 2.23) ainsi que par le déphasage entre les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite. Ils ont déduit que les amplitudes des 3 et 5eme harmonique sont faibles par rapport à celle du fondamental, aussi que le déphasage augmente avec l'accumulation de la glace. L'étude du déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite permet d'estimer l'accumulation de la glace sur les isolateurs.

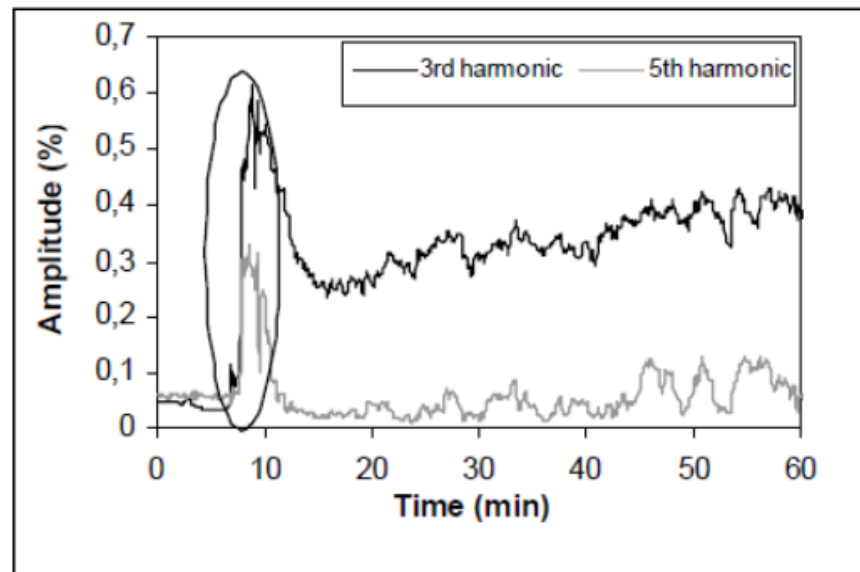


Figure 2.23 Evolution du rapport des harmoniques d'ordres 3 et 5 par rapport à celui du fondamental

[61] Moula a contribué au diagnostic des isolateurs HT à travers l'analyse des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée caractérisant l'état de surface d'un isolateur pollué. L'étude expérimentale de Moula consiste à récolter les différents signaux pour plusieurs sévérités, configurations et natures de pollutions. En premier lieu, il a caractérisé des décharges électriques par la technique de la transformée en ondelettes discrètes. En outre, deux autres approches à savoir la décomposition en paquet d'ondelette et la représentation en scalogramme ont été développées afin d'estimer le degré de sévérité de pollution. Par ailleurs, il a procédé à une classification de la sévérité de pollution en trois classes distinctes par l'utilisation des méthodes hybrides basées sur deux techniques de traitement de signal (FFT et transformée en ondelettes) et deux méthodes de classification (SVM, NB). Ses investigations sont complétées par une étude expérimentale sur un isolateur réel, Les résultats obtenus lors de la

validation de ces modèles ne sont pas toujours fiables à 100%, mais restent tout de même assez prometteurs (entre 9 jusqu'aux 14 bonnes réponses sur 15). Elle sert à comparer les amplitudes des différents paramètres électriques afin de déterminer la nature ainsi que la configuration de pollution les plus néfastes.

2.5.5. La mesure de la décharge partielle

La corrélation existante entre l'évolution des décharges partielles et le niveau de pollution des isolateurs en a été investigué par [62]. Ils ont utilisé un système de détection des décharges partielles par l'intermédiaire d'un HFCT. Ils ont démontré que la tension d'apparition des décharges partielles diminue avec l'augmentation de la concentration de la solution polluante. La propagation de ces décharges commence à l'électrode haute tension et la surface intérieure de l'isolateur, puis sur le côté extérieur de l'isolateur. L'amplitude des DP augmente proportionnellement avec la tension appliquée et le niveau de pollution (fig. 2.24) ; ceci est concrétisé par l'élongation progressive des DP à travers les zones sèches.

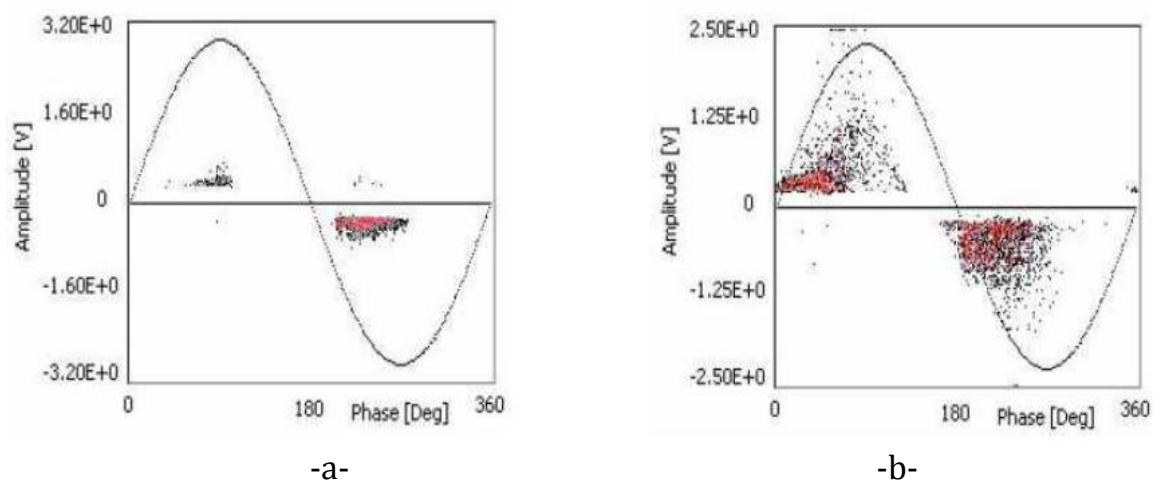


Figure 2.24 Evolution de l'amplitude des DP, a- état sec et Propre, b- état pollué

Pour le but de développer une méthode de diagnostic de la sévérité de la pollution des isolateurs : les auteurs dans la références [63] ont étudiée les caractéristiques de décharges partielles apparait sur la surface d'un isolateurs en silicone. Les tests sont effectués sur les isolateurs en silicone sous tension alternative à différents niveaux de pollution et d'humidité. Les signaux des DP sont acquis grâce à un système innovant de détection TechIPM. Il est montré que les variations de caractéristiques temporelles et de fréquentielle des impulsions de PD sont étroitement liées à l'état de surface de l'isolateur. Les résultats préliminaires de cette étude semblent prometteurs pour prédire la sévérité de la pollution des isolateurs.

Les auteurs de [64] ont réalisé une étude dont l'objectif est d'étudier la faisabilité d'utiliser une antenne RF pour détecter des décharges partielles due à la pollution sur la surface isolante.

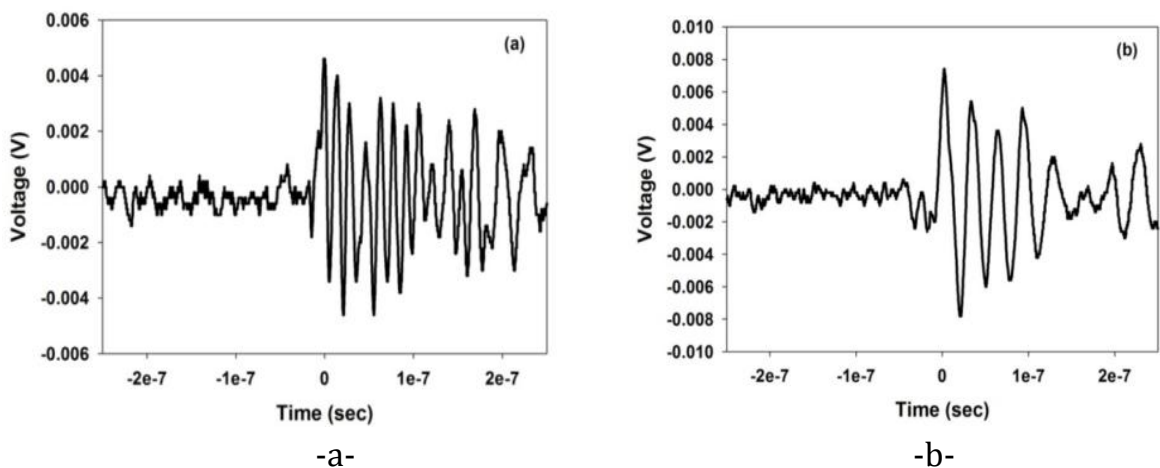


Figure 2.25 Amplitude des DP mesuré par une antenne RF, a- corona due à l'électrode, b- DP due à la goulette d'eau

Ce travail est combiné avec un système d'identification des sources de décharge partielle par les réseaux de neurones artificiels. Ils ont démontré que les

décharges partielles pourraient être surfacique due de la pollution ou des décharges corona à l'électrode sous tension (fig. 2.25). Ils ont arrivé à atteindre un taux de reconnaissance de la source de décharge de 93%. L'utilisation cette technique est suggérée pendant l'inspection en ligne pour évaluer l'état des isolateurs non céramique.

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons synthétisé les connaissances déjà entreprise sur le phénomène de contournement des isolateurs pollués d'une façon non-uniforme et discontinue ainsi que les paramètres d'influence. Les principales investigations ont été présentées et l'influence de différents paramètres et la répartition de la pollution (uniformité, discontinuité, épaisseur) sur les tensions de contournement et les principales contradictions sont discutées. A partir de ces travaux Il est évident que ce thématique reste encore moins documenté et présente plusieurs contradictions qui nécessitent à traiter de plus en plus. En plus, différents techniques sont utilisé afin d'évaluer l'état des isolateur en service, chaque technique présente des avantages et des inconvénients mais la méthode d'analyse des signaux du courant de fuite constitue l'outil le plus efficace pour la prédiction l'état des isolateurs en service. L'objectif principal reste toujours de trouver la méthode adéquate pour chaque zone sous tel ou tel condition pour développer le meilleur plan de lavage et de maintenance avant l'apparition du contournement.

Chapitre 3 : Approche et procédure expérimental

Chapitre 3 : Approche et procédure expérimentale

3.1. Introduction

Les premières investigations des tensions de tenue de l'isolement ont été réalisées sous pollution naturelle, Les stations d'essais étaient sélectionnées dans des zones variées tous dépend du types de pollution qu'on veut analyser, Ce type de station permet d'exposer différents type de chaînes d'isolateurs au même conditions climatiques, L'objectif de cette méthode est d'estimer les qualités des chaînes exposées et de évaluer la sévérité de la pollution du site considéré, Cependant, cette méthode s'est avérée très lente vu qu'elle dépend de la progression du dépôt de pollution et ses résultats présentent de grande fluctuation [65]. Pour contourner cet inconvénient, plusieurs méthodes ont été proposées pour simuler les différentes conditions climatiques sous pollution [44, 57], L'objectif de ces recherches est de trouver une méthode à adopter pour simuler le mieux possible les conditions climatique naturelles de pollution et d'aboutir à une méthode de laboratoire permet d'avoir une meilleur reproductibilité des résultats afin de faciliter l'étude des performances des isolateurs CEI-60507 [66].

Plusieurs techniques de pollution artificielle permettent au concepteur d'estimer la tension maximale qu'un isolateur peut tenir sans contourner pour une sévérité donnée, la plus part de ces méthodes utilisent le NaCl comme produit soluble et

dans plusieurs cas on ajoute en plus un agent liant inerte insoluble (kaolin). Le but de l'essai est de simuler le plus fidèlement possible le comportement de l'isolateur pollué d'une ligne sous une tension donnée, Dans la réalité, les isolateurs sont au début pollués puis humidifiés ou les deux à la fois ; les méthodes que nous allons utiliser se prêtent bien à ce cas [66],

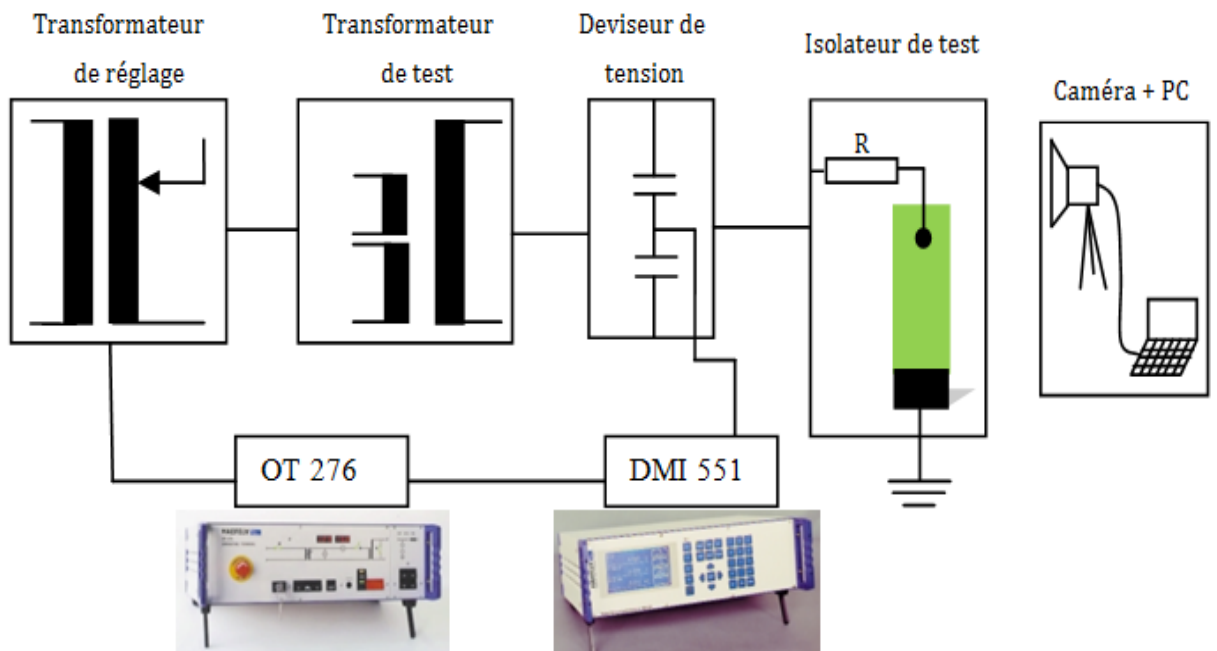
Dans ce chapitre, notre travail expérimental est présenté en deux parties, Les premières expériences ont été effectuées et au Laboratoire de Génie électrique (LGEG), de l'Université de Guelma, la deuxième partie a été réalisée au niveau de laboratoire des systèmes d'énergie à l'université Américaine au Sharjah, UAE.

3.2. Mesure de la tension de contournement

3.2.1. Dispositif expérimental

Le travail expérimental est réalisé dans le laboratoire LGEG à l'Université de Guelma, Le schéma de dispositif expérimental est montré dans la (fig. 3.1), Il est constitué d'un : cage de Faraday, transformateur de haute tension, Circuit de contrôle, système mesure de tension de contournement, résistance de limitation 'R', Modèle expérimental en verre, Caméra et PC. Le circuit d'alimentation est constitué d'un transformateur d'essai type HAEFELY PZT 100-0,1 (5 kVA, 100 kV, 50 Hz), dont le primaire est relié à un transformateur de réglage (STL 5) permettant d'ajuster la tension à la valeur désirée à travers un circuit de contrôle (OT 276), ce contrôleur est basé sur la technologie de relais classique, son fonctionnement se fait par un bouton-poussoir, L'état des contacteurs, ainsi que

le courant et la tension du côté secondaire du transformateur de réglage sont clairement indiqués sur la face avant au moyen d'un afficheur LED (fig. 3.2).



(a)



(b)

Figure 3.1 Dispositif Expérimental, (a) circuit de test de haute tension, (b) cellule de test de haute tension



Figure 3.2 Contrôleur du transformateur de régulation



Figure 3.3 Instrument de mesure digitale DMI 551

Le circuit de mesure de la tension appliqué est constitué d'un diviseur de tension capacitif, relié à un instrument de mesure digitale de la tension de contournement DMI 551. Ce système de mesure est équipé par trois canaux de mesure indépendants (AC, DC, IMP) et il peut afficher les trois valeurs simultanément sur un écran LCD, La DMI 551 est équipé par un détecteur d'éclair, il sauvegarde et affiche la dernière valeur de la tension et la polarité avant que le contournement se produit, L'instrument est spécialement conçu pour une utilisation dans les laboratoires de haute tension où un haut degré de précision est nécessaire (fig. 3.3).

3.2.2. Modèle expérimental

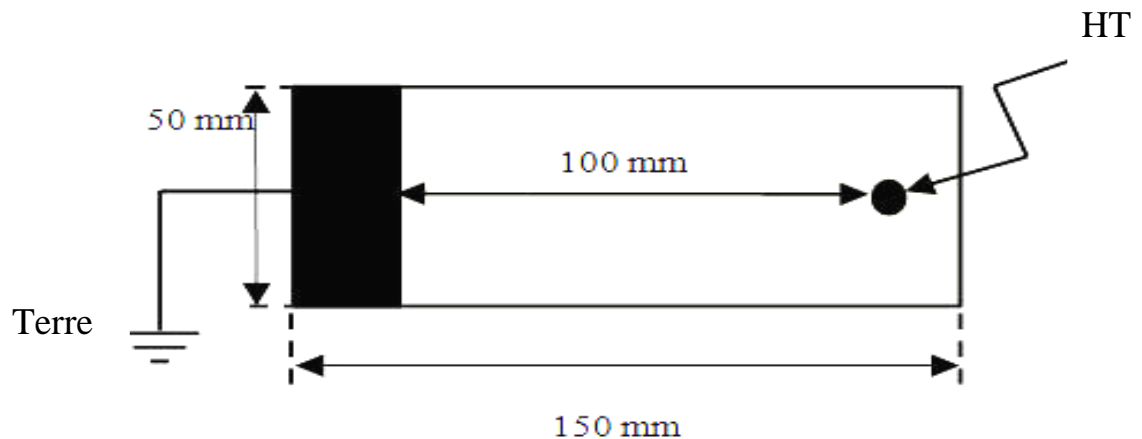


Figure 3.4 Modèle de l'isolateur proposé

Le modèle d'isolateur utilisé est montré dans la figure 3.4. Il est constitué d'une plaque rectangulaire en verre, Cette plaque a une épaisseur de 6 mm, une largeur de 50 mm et une longueur totale de 150 mm, L'électrode de masse est constituée d'une bande d'acier (30 mm * 50 mm * 6 mm) en contact avec le modèle expérimental, L'électrode haute tension est constituée d'un pointe en acier, La ligne de fuite totale entre les électrodes est égale à 100 mm, cette distance est gardé constantes durant tous les essais,

3.2.3. Mode opératoire et procédé d'essai

Au début de chaque essai, l'isolateur doit être bien rincé avec de l'eau puis séché à l'aide du papier absorbant, Puis, il est parfaitement nettoyé par l'alcool pour assurer la propreté parfaite du modèle, Les électrodes sont bien fixées sur la surface de l'isolateur, L'objet d'essai est disposé horizontalement sur un banque en bois, L'isolateur se trouve à une distance suffisamment grande du

transformateur d'essai afin d'éviter tout phénomène parasite dû au bobinage du transformateur,

La contamination est préparée en utilisant un simple électrolyte de l'eau distillée et du chlorure de sodium, La variation du conductivité de pollution est obtenue par la variation de la concentration du NaCl dans l'eau, La conductivité volumique de la solution est contrôlée à la valeur désirée à l'aide d'un conductimètre qui affiche la conductivité de la solution ionique ramenée à la température normale de 20°C, Les solutions sont réajustées avant chaque début d'une série d'essais, afin de garder les mêmes caractéristiques de la solution,

La méthode pulvérisation est adoptée pour obtenir les répartitions souhaitées indiquées dans le tableau 1, 2 et 3. Pour assurer une bonne reproductibilité de la continuité de la couche polluante, on a gardé la même méthode de pulvérisation durant tous les essais (même nombre de pulvérisations de la même distance en utilisant le même pulvérisateur), Par la suite, pour avoir les distributions non-uniforme et discontinue indiqués dans les tableaux 3.2 et 3.3. On a masqué les parties qu'on veut garder propre, Afin de mieux simuler la discontinuité de la pollution et la présence des bandes sèches. Puis, on applique 5 pulvérisations à une distance de 50 cm en utilisant un pulvérisateur adéquat, cette technique peut permettre une simulation de la pollution type brouillard salin dans les zones côtières (fig. 3.5),

La tension d'alimentation est augmentée graduellement en utilisant une vitesse constante jusqu'à quand le contournement se produit, Ce processus est répété pour toutes les configurations indiquées dans le tableau 1, 2 et 3, Afin de réaliser

une étude fiable, les valeurs de tension de contournement rapporté dans cette étude sont la moyenne arithmétique des vingt-cinq répétitions pour chaque cas.

Les paramètres physiques de l'air tels que la température, la pression et l'humidité influent d'une manière directe sur le mesure de la tension de contournement, pour cela, Les valeurs de tension obtenus sont converties aux conditions standards de pression, de température et d'humidité ($T_0 = 20^\circ\text{C}$, $P_0=100\text{ kPa}$, $H_0 = 11\text{g/m}^3$), conformément à la norme CEI 60-1 [67],

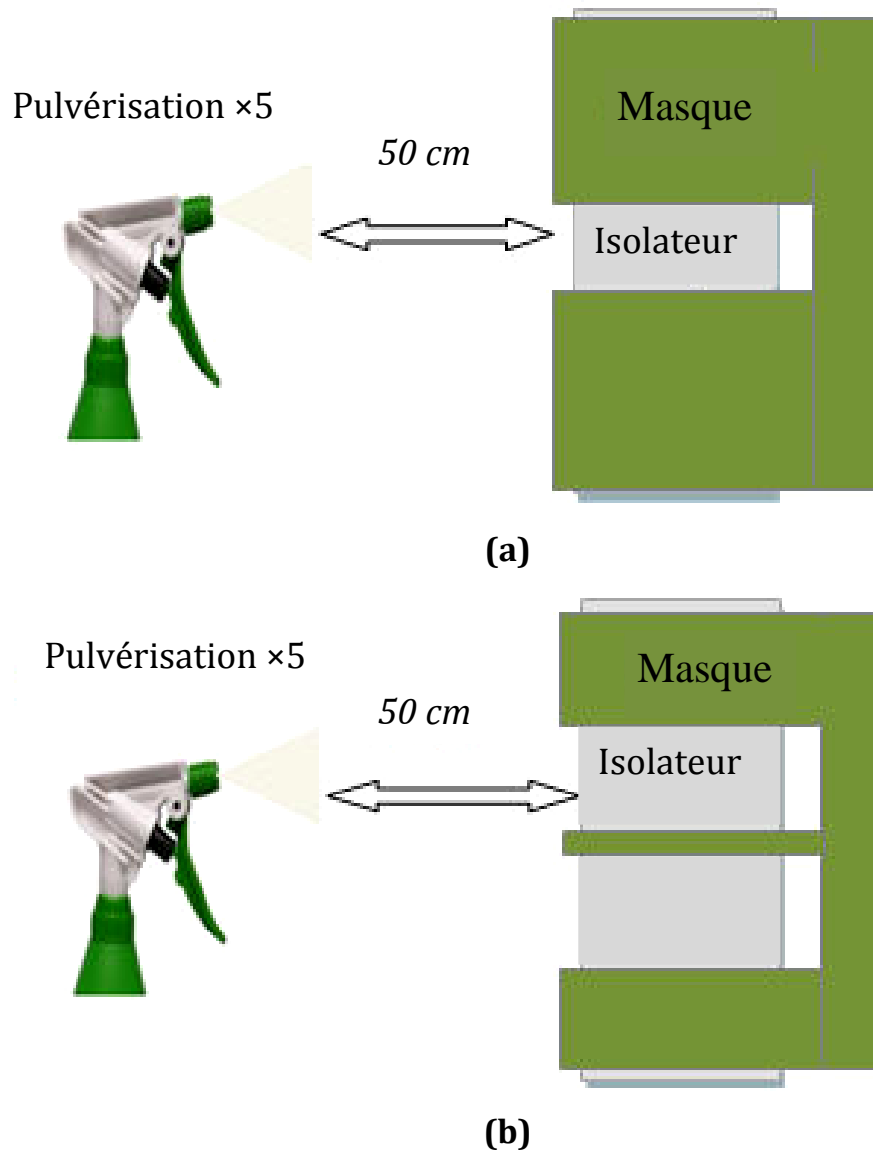


Figure 3.5 Procédure de pulvérisation (a) couche non-uniforme de 20 mm, (b) couche discontinue de 50 mm avec une bande sèche au milieu,

3.2.4. Répartitions étudiées de contamination

Le travail expérimental a été divisé en trois séries : La première série vise à déterminer l'effet de la conductivité sur de la tension de contournement pour une distribution de pollution uniforme, Le deuxième a pour but d'étudier l'effet de la pollution non-uniforme et la dernière série vise à déterminer l'effet de la répartition discontinue en présence des bandes sèches,

3.2.4.1. Répartition uniforme (Effet de la conductivité)

Dans cette série, une couche uniforme de pollution est déposée sur la surface d'isolateur, Le tableau 3.1 présente la variation de la valeur moyenne de la tension de contournement en fonction de la conductivité volumique de la contamination, la valeur de la tension de contournement est obtenue pour un large intervalle de conductivités entre 10 et 90 mS/cm représentant les niveaux (légère, moyenne et forte),

Tableau 3.1. Variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité

Conductivité (mS/cm)	Tension de contournement (kV)
10	19,78
30	17,69
50	16,46
70	15,26
90	14,43

3.2.4.2 Répartition non-uniforme

Dû à la forme des isolateurs, à leur position en exploitation, aux conditions météorologiques, à l'attraction électrostatique des particules polluantes en

présence du champ électrique, la couche de pollution se déposant sur les surfaces des isolateurs plus souvent d'une manière non-uniforme. Pour cela, une deuxième série d'expérience est réalisée pour le but d'étudier l'impacte de la pollution non-uniforme sur la tension de contournement, Trois paramètres de la couche de pollution sont étudiés, la conductivité, la longueur de la couche polluante et sa position, Les effets de ces facteur et ses interactions seront évaluer, tracer et modéliser, pour enrichir les connaissances déjà entreprises concernant ce problématique,

3.2.4.2.1. Mise en place des plans d'expérience

La méthode classique pour déterminer l'influence des facteurs sur un système quelconque consiste à tester l'effet des facteurs sur une réponse choisie en ne faisant varier qu'un seul facteur à la fois par chaque expérience. On maintient alors les autres facteurs dans un état constant. Dans le cas où les facteurs ne sont pas indépendants, l'effet du facteur trouvé est conditionnel de l'état dans lequel se trouvent les autres facteurs du système. L'utilisation de la méthode classique signifie implicitement que l'effet de chaque facteur est totalement indépendant de l'effet des autres facteurs. Toutefois, l'interaction entre les facteurs n'est pas évaluée. Par contre, les plans d'expériences se basent sur l'utilisation de tables orthogonales pour concevoir une série d'expériences ainsi que pour en extraire les résultats. L'effet d'un facteur est donc un effet moyen tenant compte de toutes les possibilités sur l'état des autres facteurs (68, 69, 70) . Les principaux avantages de la méthode des plans d'expérience sont:

- Diminution du nombre d'essais;
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs;
- Détection des interactions entre facteurs;
- Modélisation des réponses étudiées;
- Précision optimum des résultats.

Elle permet aussi de faire une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié.

Le déroulement d'une analyse passe par les étapes suivantes : la définition du système ainsi que de la réponse du système à connaître ou modéliser, ainsi que les facteurs susceptibles de modifier cette réponse. Ensuite, le nombre de facteurs pour l'étude, ainsi que le nombre de niveaux est défini. Dans le cadre de cette étude. Le nombre de facteur permet ensuite de choisir le niveau de précision du plan d'expériences en fonction de la réduction choisie. L'étape suivante est la définition de la table orthogonale correspondante au plan d'expériences. Cette table orthogonale constitue la liste des expériences. Enfin, l'analyse statistique peut être réalisée à partir des résultats des expériences.

3.2.4.2.2. Plan de Taguchi

Dans la deuxième série, le tableau orthogonal standard de Taguchi L27 est adopté comme un plan expérimentale, Les niveaux des paramètres ont été choisis dans des intervalles bien déterminer pour s'adapter avec le modèle choisis, Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le (tableau 3.2), Trois niveaux pour chaque paramètre sont choisis, Trois

conductivité (10 mS / cm , 50 mS / cm , 90 mS / cm) , trois largeurs de couche de pollution (20 mm , 50 mm , 80 mm) , et trois positions sont adoptées pour obtenir une pollution non-uniforme (de la bande de la pollution dans la côté de l'électrode HV, bande à côté de l'électrode de masse et la dernière au centre du modèle), les positions sont codées par les valeurs 1 , -1 et 0 respectivement à HV , masse et en position centré.

Tableau 3.2 Tension de contournement pour une couche de pollution non-uniforme

Conductivité (mS/cm)	Longueur de la couche (mm)	position	Tension de contournement (kV)
10	20	-1	41,38
10	20	0	42,71
10	20	1	41,03
10	50	-1	30,66
10	50	0	32,20
10	50	1	30,46
10	80	-1	19,67
10	80	0	20,23
10	80	1	20,10
50	20	-1	38,84
50	20	0	40,41
50	20	1	37,04
50	50	-1	26,66
50	50	0	28,01
50	50	1	26,68
50	80	-1	17,33
50	80	0	18,97
50	80	1	18,00
90	20	-1	36,45
90	20	0	37,91
90	20	1	35,79
90	50	-1	26,22
90	50	0	27,10
90	50	1	26,00
90	80	-1	13,80
90	80	0	15,30
90	80	1	15,58

3.2.4.3. Répartition discontinue (présence des bandes sèche)

La formation des bandes sèches a une grande influence sur la distribution du champ électrique le long de la surface de l'isolateur, ce qui se traduit par des arcs partiels qui peuvent s'allonger jusqu'à un contournement total, Cette troisième série d'essais est pour le but d'étudier l'effet de la couche de pollution discontinue et la présence des bandes sèches sur la tenue diélectrique de la surface isolante, Deux paramètres de deuxième série sont fixés, la longueur de la couche à 50 mm et la position au milieu du modèle, les trois paramètres choisis pour cette série sont : le nombre des bandes sèches et son largeur en interaction avec la conductivité,

3.2.4.3.1. Plan factoriel mixte

Dans la troisième série, le plan factoriel mixte L18 est adopté comme un plan expérimental, Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le (tableau 3.3). les niveaux choisis pour chaque paramètre sont, deux conductivités (10 mS / cm, 90 mS / cm), trois largeurs de des bandes sèches (4 mm , 8 mm et 12 mm) , et li nombre des bandes est varié entre 1 et 3 bandes.

Table 3.3 Tension de contournement pour une couche de pollution discontinue

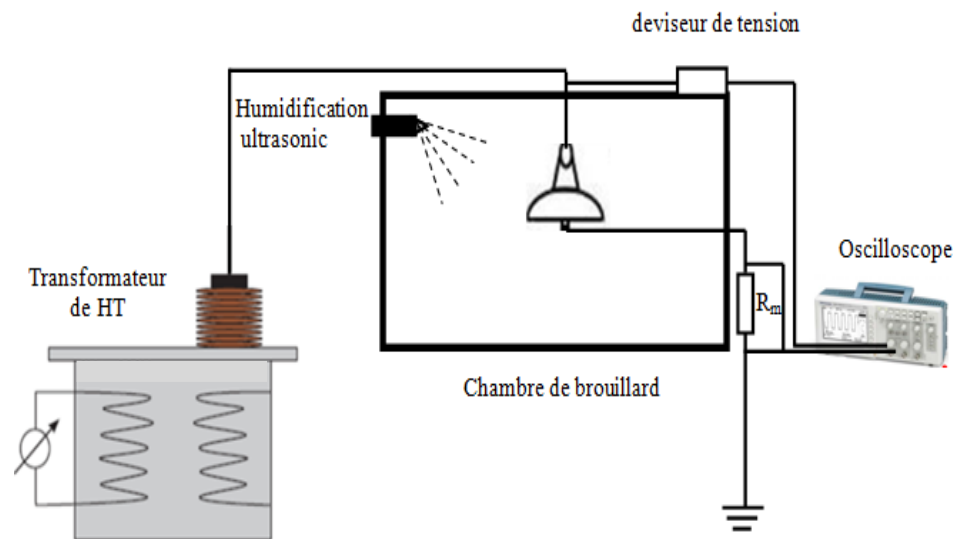
Conductivité (mS/cm)	Nombre des bandes sèches	Largeur (mm)	Tension de contournement (kV)
10	1	4	37,60
10	1	8	38,05
10	1	12	38,83
10	2	4	38,80
10	2	8	39,71
10	2	12	41,00
10	3	4	41,22
10	3	8	42,08
10	3	12	42,50
90	1	4	35,39
90	1	8	37,22
90	1	12	38,24
90	2	4	36,34
90	2	8	38,37
90	2	12	39,00
90	3	4	37,64
90	3	8	38,98
90	3	12	40,97

3.3. Mesure de courant de fuite

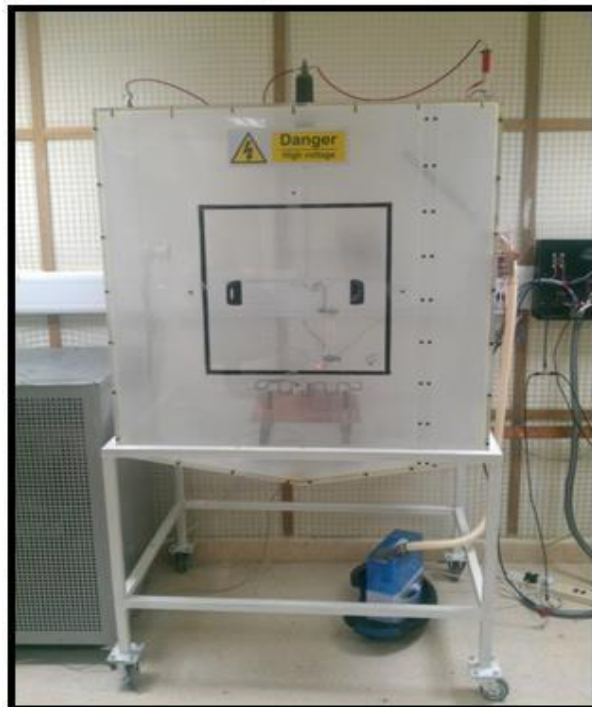
3.3.1. Dispositif expérimental

Le travail expérimental est réalisé dans le laboratoire de système d'énergie à l'Université Américaine au Sharjah, UAE, Le dispositif expérimental est montré dans la (fig. 3.6). Il est constitué de chambre de brouillard, Un transformateur d'essai : 220 V/20 kV, 50Hz, Un diviseur de tension, un oscilloscope numérique. La chambre de brouillard est de dimension (1.2 m x 1.2 m x 0.9 m) dont on peut contrôler les conditions atmosphériques dans le range de température de 20 à 70 degré, et de l'humidité entre 0 % à 100 %, le bouillard est fourni par un nébuliseur ultrasonique. Le Circuit de mesure constitué par un diviseur de tension relié au secondaire du transformateur d'essai pour enregistré la forme de tension appliqué, le courant de fuite est mesurer à travers une résistance de

mesure 100 ohms connecté à l'oscilloscope en passant par un circuit de protection. Le modèle de test adopté pour les essais de contamination est un isolateur en porcelaine capot et tige, la Figure 3.7 montre l'isolateur pollué avec une concentration de Kaolin de 40 g/L.



(a)



(b)

Figure 3.6 Dispositif Expérimental de mesure des courants de fuite, (a) circuit de test de haute tension,

(b) Chambre de brouillard,

**Figure 3.7** Isolateur porcelaine capot et tige

3.3.2. Mode opératoire et Procédé d'essai

L'isolateur d'essai est suspendu verticalement à l'intérieur de la chambre et Les électrodes sont bien fixées sur les deux extrémités, le capot est relié au borne haute tension venant du transformateur, l'autre extrémité est connecté à la terre est relié à une résistance de mesure par l'intermédiaire du circuit de protection.

Les essais ont été réalisés conformément a la méthode d'essai brouillard propre « clean fog » comme indiqué dans la norme CEI 60507 [66]. Au début, la surface d'isolateur a été parfaitement lavée et nettoyée avec de l'eau distillée, afin d'enlever n'importe quelle trace de graisse et de saleté. Puis, il est parfaitement nettoyé à l'alcool pour assurer la propreté parfaite du modèle. Deuxièmement, la solution polluante est préparée en mélangeant une quantité de kaolin avec 1 litre de l'eau distillé, une quantité du sel de NaCl a été ajoutée pour obtenir les conductivités volumiques désirées. la pollution est appliquée en plongeant l'isolateur dans le mélange, puis, l'isolateur est séchée naturellement pour 24 h. durant le test. Finalement, on a appliqué une tension constante de $5 \text{ kV}_{\text{rms}}$, En

même temps, le générateur de brouillard est mis en marche, pour obtenir le niveau d'humidité désiré à l'intérieur de la chambre. Dans cette étude, tous les signaux courants de fuite ont été mesurés à une fréquence d'échantillonnage de 25 kilohertz par un oscilloscope numérique TEKTRONIX TDS1002B, et les données sont enregistrées dans le PC pour des futures analyses.

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les technique d'essais de performance des isolateurs sous pollution utilisées, on a adopté la méthode de pulvérisation appliquée sur un modèle de laboratoire de forme rectangulaire en verre pour simuler le comportement de pollution atmosphérique marine de type brouillard salin sous forme d'approche simplifiée, On a par la suite utilisé plusieurs conductivités pour avoir une idée qualitative de l'effet de la pollution légère, moyenne et sévère. Pour nous rapprocher du cas réel, plusieurs répartitions de la couche polluante sont proposées et examinées afin de contourner les différent cas possible (uniforme, non-uniforme ou discontinue),

La deuxième partie de ce travail expérimental représente une étude des caractéristiques des courants de fuite qui se développe sur la surface d'un isolateur en porcelaine pollué, les différent signaux de courant de fuite sont mesurés et enregistrés en respectant la méthode « clean fog test ». Cette partie a pour des fins de diagnostic.

**Chapitre 4 : Effet de la pollution sur la
tension de la tenue diélectrique
d'isolateur**

Chapitre 4 : Effet de la pollution sur la tension de la tenue diélectrique d'isolateur

4.1. Introduction

D'après la littérature, les investigations de tenue diélectrique des isolateurs se font généralement sous une pollution uniforme ; ce qui ne reflète pas le comportement réel de la couche de pollution laquelle en réalité est souvent non-uniforme ou discontinue. Plusieurs configurations de pollution sont récemment adoptées dans les tests de laboratoire sur les isolateurs [1, 2]. Plusieurs chercheurs ont trouvé que la distribution de la couche de la pollution sur la surface externe d'isolateurs installés dans les zones polluées n'est pas uniforme [3, 17] ; Ce qui induit que l'étude de la performance de l'isolateur sous une pollution uniforme n'est pas suffisante [18, 19]. L'effet de la distribution de la couche de pollution sur la rigidité de la surface n'est pas encore pratiquement traité en raison de nombreuses contradictions entre les chercheurs. [20, 21, 70] Ils ont trouvé que la tension de contournement de l'isolateur sous distribution non-uniforme de la pollution est supérieure à celle obtenue dans le cas uniforme.

Par contre [22] a prouvé le contraire. Cette contradiction nécessite plus d'investigations approfondies.

La performance des isolateurs sous pollution dépend essentiellement de la répartition et la conductivité de couche polluante, ce qui rend très important de les prendre en considération pendant la conception des nouveaux isolateurs. Ce chapitre présente l'analyse de l'effet de la distribution de la couche polluante et sa conductivité sur le tenue diélectrique de la surface isolante en tenant compte de cinq facteurs ; la conductivité, la longueur de la couche, la position de la couche, le nombre des bandes sèches et leur largeur. Cette étude est basée sur l'utilisation de la méthodologie des plans d'expérience et la technique statistique d'analyse des variances pour évaluer et déterminer l'effet de chacun de ces facteurs. La méthodologie de surface de réponse est utilisée pour modéliser la relation entre les facteurs étudiés et la tension de contournement de l'isolateur. Cette étude présente de nombreux avantages, car elle enrichit les connaissances sur ce sujet ce qui peut réduire le temps, l'argent et le travail impliqués dans les tests de laboratoire pour le dimensionnement et la conception des isolateurs.

4.2. Analyse de l'effet de la répartition de la pollution

4.2.1. Répartition uniforme

Cette partie du travail vise à étudier l'effet de la conductivité de pollution sur la tension contournement dans le cas d'une répartition uniforme. Les résultats sont présentés dans (Tableau 3.1).

4.2.1.1. Testes de normalité

Droite de Henry

L'utilisation de la droite de Henry permet de vérifier que les données ne s'écartent pas sensiblement des résultats attendus lorsque l'échantillonnage est réalisé à partir d'une loi normale.

- Si les données proviennent d'une loi normale, les points doivent suivre plus ou moins la droite d'ajustement ;
- Si les données ne proviennent pas d'une loi normale, les points ne suivent pas la droite.

Test de normalité d'Anderson-Darling

Le test d'Anderson Darling est utilisé pour tester si un échantillon de données est issu d'une population ayant une distribution spécifique. Le test Anderson Darling est défini comme suit :

- L'hypothèse nulle H_0 : Les données proviennent d'une population distribuée normalement ;
- L'hypothèse alternative H_1 : Les données ne proviennent pas d'une population distribuée normalement.

Les valeurs de P sont souvent utilisées dans les tests d'hypothèses dans lesquels on peut ou non rejeter une hypothèse nulle. La valeur de P représente la probabilité de faire une erreur de type 1, ou de rejeter l'hypothèse nulle si elle est vraie. Plus la valeur de P est petite plus la probabilité de faire une erreur en

rejetant l'hypothèse nulle est faible. Une valeur limite de 0,05 est utilisée.

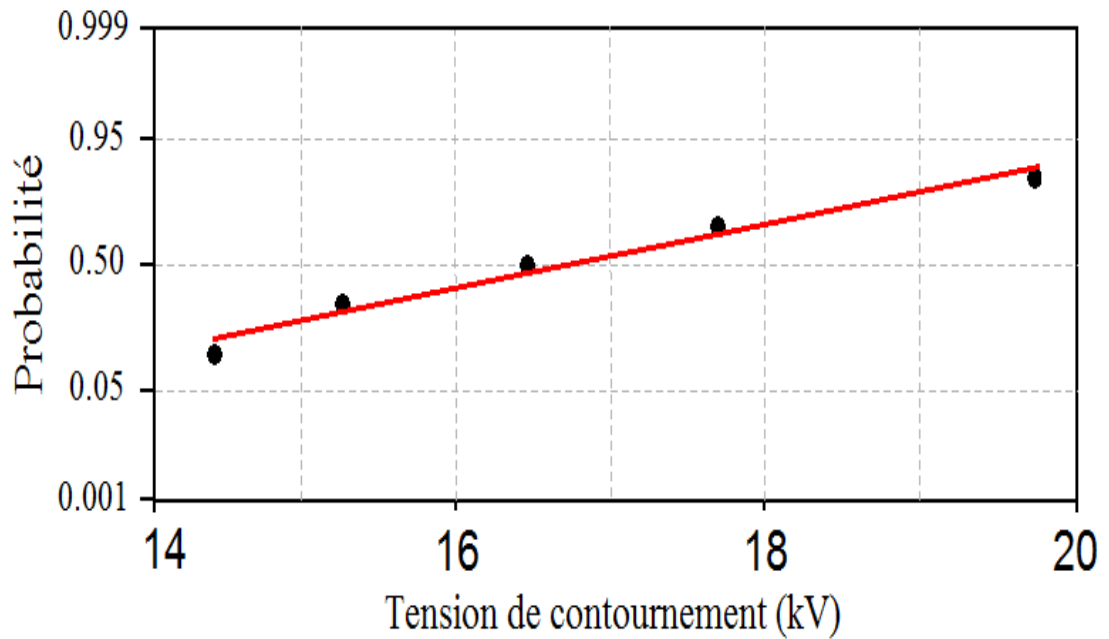
Autrement dit, rejeter l'hypothèse nulle si la valeur de P est inférieure à 0,05.

Pour prendre une décision, on choisit le niveau de signification du α avant le test:

- Si P est inférieur ou égal à α , on rejette H_0 ;
- Si P est supérieur à α , on ne rejette pas H_0 .

La valeur de P issue du test d'Anderson-Darling (0.82) évalue la probabilité que les données proviennent d'une population distribuée normalement (figure 4.1). Avec un niveau d' α de 0,05, il n'existe pas de preuve suffisante permettant de supposer que les données ne proviennent pas d'une population normalement distribuée.

Le graphique obtenu est un diagramme de probabilité normale en fonction des données. Les données se rapprochent le plus nettement de la droite d'ajustement aux extrêmes, en queue de la répartition. La valeur de P du test de Anderson-Darling indique que, à des niveaux de $\alpha = 0.05$ (α inférieurs à P), on a la preuve que les données suivent une loi normale. Ces données montrent une forte tendance à être une loi normale.



Moyenne : 16.724
 Ecart type: 2.1064
 N : 5

Test de normalité de: Anderson-Darling
 A-Carré : 0.182
 Valeur de P : 0.820

Figure 4.1 Graphique de normalité pour le cas d'une pollution uniforme.

4.2.1.2. Modélisation et analyse statistique

Modèle linéaire :

Un Modèle de régression linéaire est proposé pour estimer la tension de contournement sous une pollution uniforme en fonction de la conductivité de contamination. La forme générale du modèle est donnée par l'équation;

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad 4.1$$

Table 4.1 représente le modèle obtenu et l'analyse statistique des variances dans le cas d'une répartition uniforme de la pollution. Le modèle a un coefficient de détermination de 97%.

Tableau 4.1 Résultats statistiques du modèle linéaire pour une couche uniforme

L'équation de régression est :		$U_c = 20,0 - 0,0659 * C$			
Régresseur	Coef	Er-T	coef	T	
Constante	20,027	0,383	52,25	0,000	
C	-0,066	0,006	-9,88	0,002	
S = 0,4220		R-carré = 97,0%		R-carré (ajust) = 96,0%	
Analyse de variance					
Source	DL	SC	CM	F	P
Régression	1	17,398	17,398	97,70	0,002
Erreur résid	3	0,534	0,178		
Total	4	17,932			

Où;

U_c est la tension de contournement ;

C ; est la conductivité de la pollution en (mS / cm) ;

P : Probabilité de test de la signification de l'hypothèse nulle ;

S : représente l'écart type;

F est la statistique standard "F";

R^2 est la somme des carrés des résidus;

R^2 (ajust) est la somme résiduelle des carrés ajustées;

DL est les degrés de liberté;

SC est la somme des carrés ;

CM est la somme de la moyenne des carrés.

Modèle quadratique

Un Modèle quadratique est élaboré pour estimer la tension de contournement sous une pollution uniforme en fonction de la conductivité de la contamination.

La forme générale du modèle quadratique est donnée par l'équation;

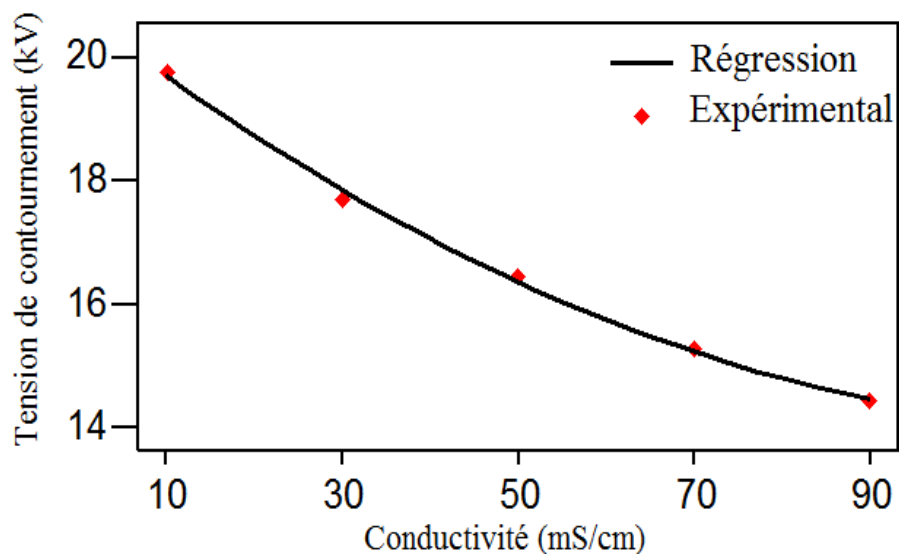
$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} X_i^2 \quad 4.2$$

Tableau 4.2 Résultats de modèle quadratique pour une couche uniforme

L'équation de régression est					
$U_c = 20,7806 - 0,111186 * C + 0,0004554 * C^2$					
S = 0,147590 R-carré = 99,8 % R-carré (ajust) = 99,5 %					
Analyse de la variance					
Source	DL	SC	CM	F	P
Régression	2	17,7042	8,85208	406,378	0,002
Erreur	2	0,0436	0,02178		
Total	4	17,7477			

Le tableau 4.2 représente le modèle et les résultats d'analyse des variances dans le cas d'une répartition uniforme de la pollution. Le modèle quadratique proposé est capable d'expliquer la totalité des résultats avec un coefficient de détermination égale à 99.8 %.

La valeur élevée de R^2 indique que le modèle peut expliquer la variabilité dans un large intervalle, une valeur élevée de "F" avec une faible valeur "P" signifie que le modèle est fortement significatif. Les modèles développés ont été validés par l'analyse des coefficients du modèle, les valeurs prédites et en utilisant des résultats expérimentaux.

**Figure 4.2** Tension de contournement en fonction de la conductivité

Les valeurs des coefficients de détermination pour les deux modèles linéaires et quadratique sont respectivement: $R^2 = 96 \%$ et 99.8% . Les valeurs de P dans les Tableau 4.1 et 4.2, sont très faibles, ce qui indique la signification des modèles proposés. Par conséquent, on dit que les deux modèles de prédiction sont hautement significatifs et estiment de manière adéquate les données observées.

La Figure 4.2 montre que la variation de la tension de contournement est non linéaire et diminue avec l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution, ce résultat est obtenu expérimentalement pour un intervalle de variation de la conductivité entre 10 à 90 ms/cm. Cela peut être expliqué par le fait que l'augmentation de la conductivité mène à circuler plus de courant de fuite sur la surface de l'isolateur. L'effet Joule provoque plus d'évaporation de l'eau qui conduit à créer des bandes sèches sur la surface où la densité du courant est la plus élevée. Le champ électrique sur la surface augmente et il devient supporté par ces bandes sèches. Le champ électrique dans l'air immédiatement au-dessus de ces points a approximativement la même valeur. Une fois que le niveau d'ionisation dans l'air est atteint, la décharge se produit et son allongement génère probablement un contournement total pour des faibles tensions.

4.2.2. Répartition non-uniforme

Cette partie vise à étudier l'effet des paramètres de la couche de pollution non-uniforme telles que : la conductivité, la longueur de la couche et sa position sur la tenue diélectrique de la surface isolante, leur impact est identifié en utilisant

l'analyse statistique des variances. On a adopté le plan L27 de Taguchi pour cette série des tests, les résultats expérimentaux sont montrés au Tableau 3.2. Ce plan a été élaboré pour établir le modèle quadratique de la tension de contournement sous pollution non-uniforme. Le modèle quadratique est donné par la forme suivante:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i X_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^3 a_{ij} X_i X_j \quad 4.3$$

Où Y est la réponse souhaitée : tension de contournement. a_0 est un constant. a_i , a_{ii} et a_{ij} représentent les coefficients linéaires, quadratiques et termes de produits croisés respectivement. X_i , X_j révèle les variables qui correspondent aux facteurs étudiés : la conductivité, la longueur et la position de la couche de pollution. Le test de signification des coefficients du modèle est effectué pour vérifier la qualité du modèle obtenu. Ensuite, les effets principaux, les interactions et les tests de normalité sont présentés. Ces courbes sont utilisées pour déterminer l'effet des caractéristiques de la couche de la pollution non-uniforme sur la tension de contournement d'isolateur. La signification statistique des modèles quadratiques est évaluée en utilisant les valeurs de P, Lorsque les valeurs de P sont inférieures au seuil de 0,05 .Le modèle obtenu est considéré comme statistiquement significatif. Cela signifie que les termes choisis dans le modèle ont une influence significative sur les réponses. Le coefficient de détermination R^2 représente le rapport de la variation expliquée à la variation totale, donc, le modèle obtenu est meilleure lorsque le R^2 rapproche de l'unité.

4.2.2.1. Testes de normalité

La valeur de P issue du test d'Anderson-Darling (0.134) évalue la probabilité que les données proviennent d'une population distribuée normalement (figure 4.3). Avec un niveau d' α de 0,05, il n'existe pas de preuve suffisante permettant de supposer que les données ne proviennent pas d'une population normalement distribuée. Donc, les données suivent une loi normale,

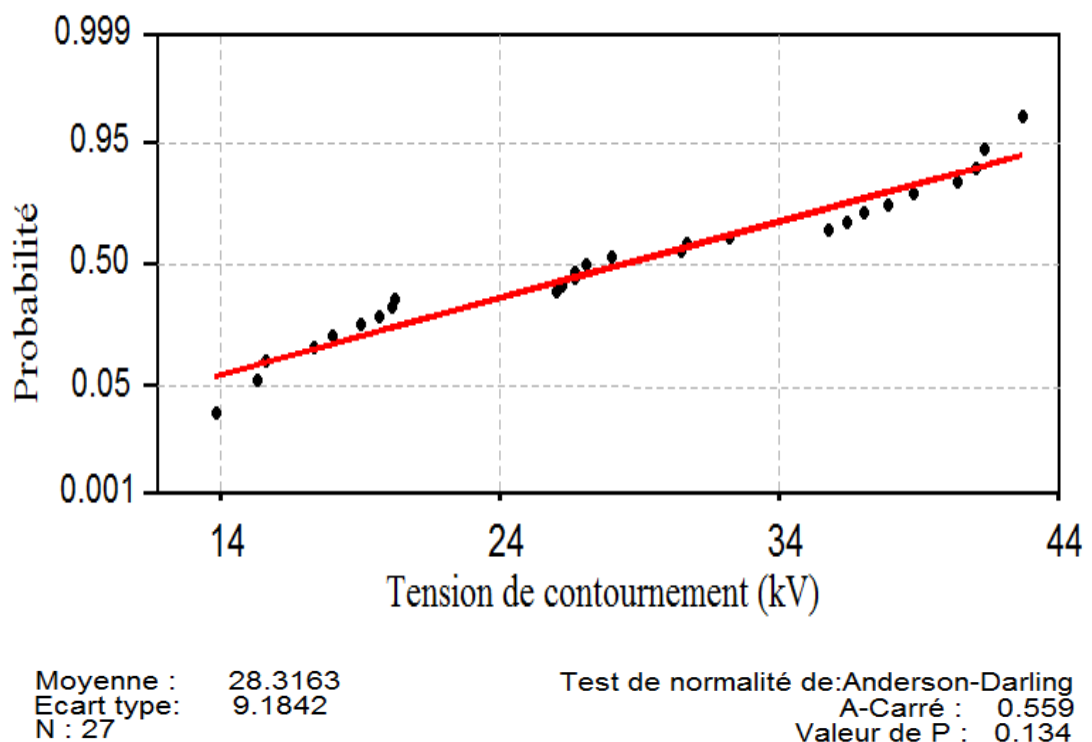


Figure 4.3 Graphique de la courbe de normalité pour le cas de pollution non-uniforme.

4.2.2.2. Analyse des variances (ANOVA)

Modèles Linéaires

Tableau 4.3 représente L'analyse des variances pour la tenue diélectrique sous une répartition non-uniforme. L'analyse a été effectuée en utilisant des données non codées. La valeur du coefficient de détermination est 98.9 %.

Tableau 4.3 Régression linéaire pour une répartition non-uniforme de pollution

Coefficients de régression estimés pour U		Analyse des variances pour U							
Term	Coeff	Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P	PC%
C	-0,061504	C	1	108,94	108,94	108,94	105,68	0,00	4.967
L	-0,356633	L	1	2060,43	2060,43	2060,43	1998,67	0,00	93.95
P	-0,0183	P	1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,94	0.00
Constante	49,2232	Erreur	23	23,71	23,71	1,03			0.14
R ² = 98.9%		Total	26	2193,10					

Modèles quadratiques réduits

L'analyse des variances pour la tension de tenue diélectrique sous une répartition non-uniforme en utilisant la SC ajustée pour les tests, ainsi que les coefficients de régression estimés sont présentés sur le tableau 4.4. L'analyse a été effectuée en utilisant des données non codées. Les termes qui n'ont pas un effet significatif sont éliminés.

Tableau 4.4 Régression Quadratique pour une répartition non-uniforme

Coefficients de régression estimés pour U		Analyse des variances pour U							
Term	Coeff	Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P	PC%
c	-0,0615042	c	1	108,94	108,94	108,94	221,28	0,000	4.967
l	-0,356633	l	1	2060,43	2060,43	2060,43	4184,99	0,000	93.95
p	-0,808333	p	1	0,01	2,28	2,28	4,62	0,043	0.00
p*p	-1,33389	p*p	1	10,68	10,68	10,68	21,68	0,000	0.486
l*p	0,0158000	l*p	1	2,70	2,70	2,70	5,48	0,029	0.123
Constante	50,1124	Erreur	21	10,34	10,34	0,49			0.471
R ² = 99.5%		Total	26	2193,10					

Où;

C : est la conductivité de la pollution en (mS / cm) ;

L : est la longueur de la couche de pollution ;

P : la position de la couche de pollution ;

PC : le pourcentage de contribution à la variation.

D'après le tableau 4.4, on peut voir que le L, C, P, P * P et le produit L * P sont des termes qui ont une influence significative sur la tension de contournement sous pollution non-uniforme. En outre, le plus grand facteur significatif sur la tenue diélectrique est la longueur de la couche de pollution Avec une contribution de 93,95 % dans la variation totale, la deuxième plus grande contribution vient de la conductivité avec une contribution de 4,97%. Enfin, la valeur de l'influence de la position et de ses interactions avec la longueur de la couche est inférieure à 0.61 %, il n'a pas de contribution importante sur la tension de tenue d'isolateur.

4.2.2.3. Effets principaux et effets des interactions

(Fig. 4.4 et 4.5) représentent les effets principaux et les interactions des trois facteurs. Il est clairement montré que la longueur de la couche de pollution influe fortement sur la tension de contournement; la tenue diélectrique de l'isolateur diminue avec l'augmentation de la longueur de la couche polluante. De plus, la conductivité de la couche polluante a un effet décroissant. La tenue diélectrique de l'isolateur est améliorée par la diminution de la conductivité de pollution. Enfin, il ya une petite différence observée sur la tension de contournement en raison de la position de la pollution, mais, on remarque que la tension de contournement est plus élevée lorsque la couche est positionnée au centre du modèle. Le modèle d'isolateur a la plus grande rigidité quand la couche polluante est située au centre du modèle.

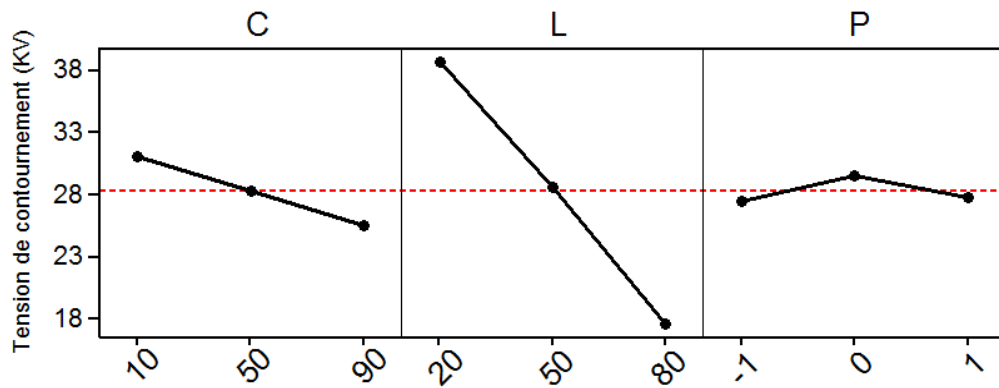


Figure 4.4 Graphiques des effets principaux

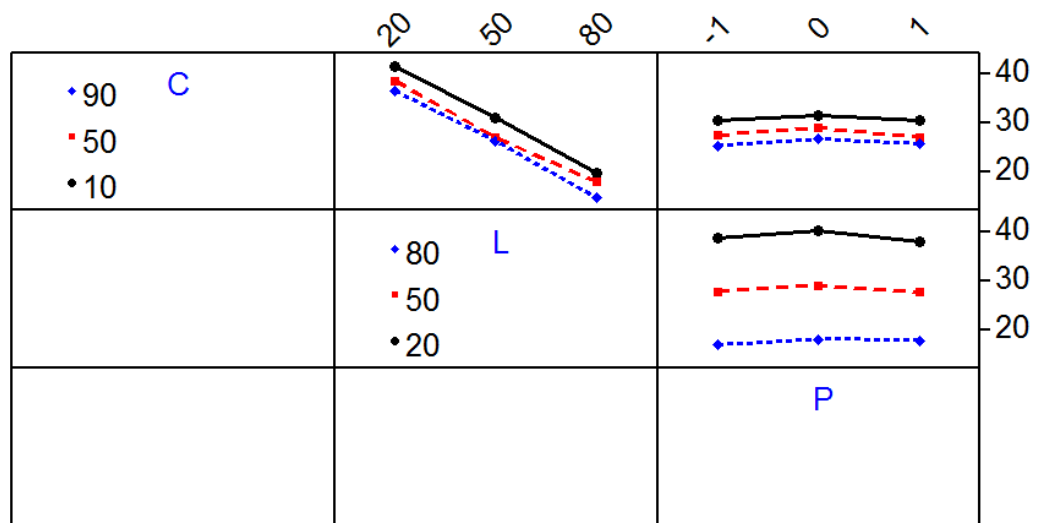


Figure 4.5 Graphique des interactions.

L'explication de l'effet de la conductivité a été déjà illustrée dans le premier cas d'une distribution de pollution uniforme. Pour l'effet de la longueur de la couche de pollution, la grande réduction de la tenue diélectrique est liée à la réduction de la largeur de la bande sèche qui augmente le champ électrique appliqué sur cette bande, cela peut conduire à la génération d'arcs partiels à travers cette bande pour une faible tension. La présence de la couche conductrice dans le centre augmente légèrement la tension contournement, cela peut être expliquée par la présence de deux bandes sèches à proximité des deux électrodes ; ce qui conduit

à la diminution du champ maximal appliqué aux bandes sèches et augmente la tenue diélectrique de surface isolante.

4.2.2.4. Modélisation statistique

L'analyse de la réponse obtenue prend en compte tous les effets des facteurs et leurs interactions. Les termes sans effet significatif sur la réponse ont été éliminés. Le modèle quadratique final est représenté comme suit

$$U = 50.112 - 0.062 * C - 0.357 * L - 0.808 * P \\ - 1.334 * P * P + 0.016 * L * P \quad 4.4$$

Avec, $R^2 = 99.5 \%$ $R^2 (\text{adj}) = 99.4 \%$

La valeur de coefficient de détermination pour le modèle quadratique réduit est $R^2 = 99.5 \%$, ce qui signifie que le modèle est fortement significatif et en bonne adéquation avec les résultats expérimentaux. Les valeurs de probabilité P indiquent que la signification des coefficients du modèle de régression sont très faible (Tableau 4.4). De plus, la contribution de chacun des termes linéaires et quadratiques est hautement significative au seuil de 1 % (valeur de $P < 0.05$). Par conséquent, on peut conclure que les deux modèles de prédiction linéaire et quadratique sont hautement significatifs et estiment de manière adéquate les données observées.

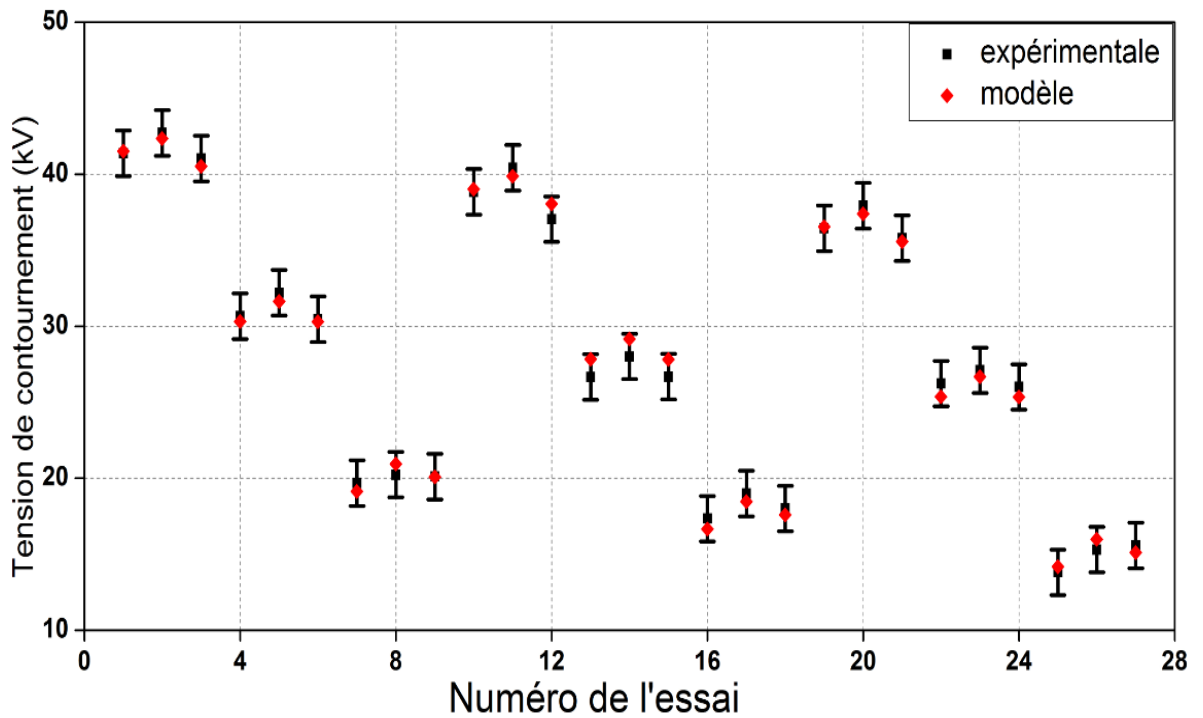


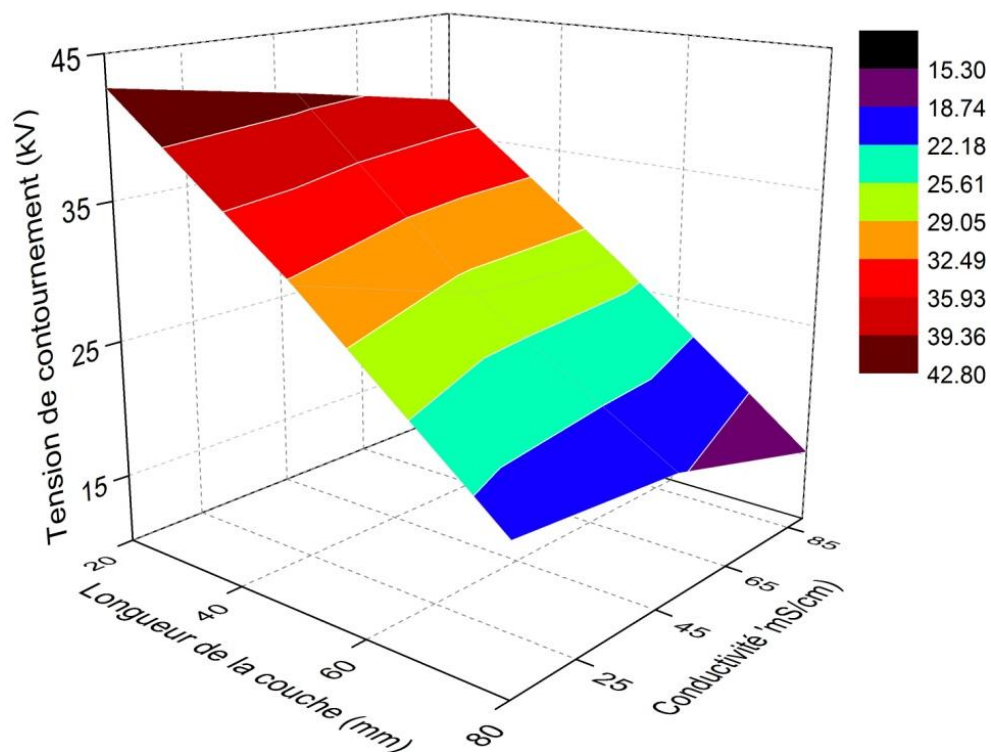
Figure 4.6 Valeurs expérimentales et estimées pour la répartition non-uniforme

(Figure 4.6) représente une comparaison entre les résultats expérimental et les résultats obtenues à partir du modèle quadratique pour les 27 cas testés. Les tensions de tenues calculées par le modèle quadratique développé trouvent un bonne accordance avec les valeurs expérimentales. Il est remarqué que les résultats calculés varient dans une marge d'erreur acceptée.

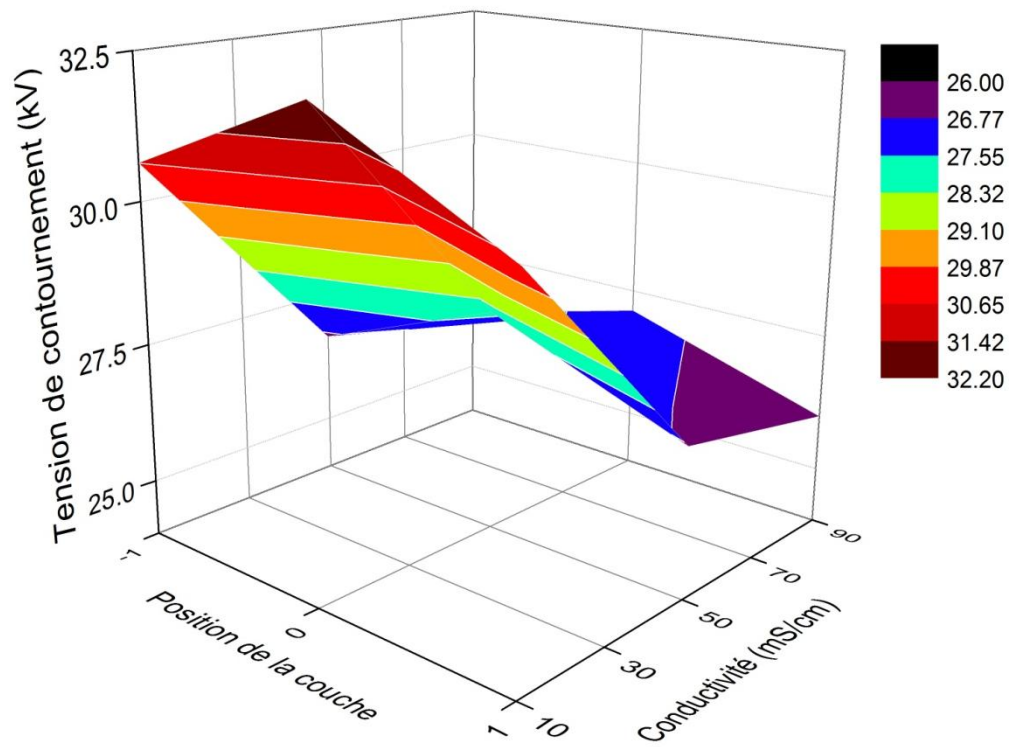
4.2.2.5. Courbes 3D de la surface de réponses

La figure 4.7 synthétise les surfaces de réponse estimées pour la tenue diélectrique sous une pollution non-uniforme en fonction de la Conductivité, la longueur de couche et la position, Pour chaque surface de réponse, les variables non représentées sont maintenues constantes (au niveau médian). La figure 4.7a met en évidence l'impact de la conductivité et la longueur de pollution sur la

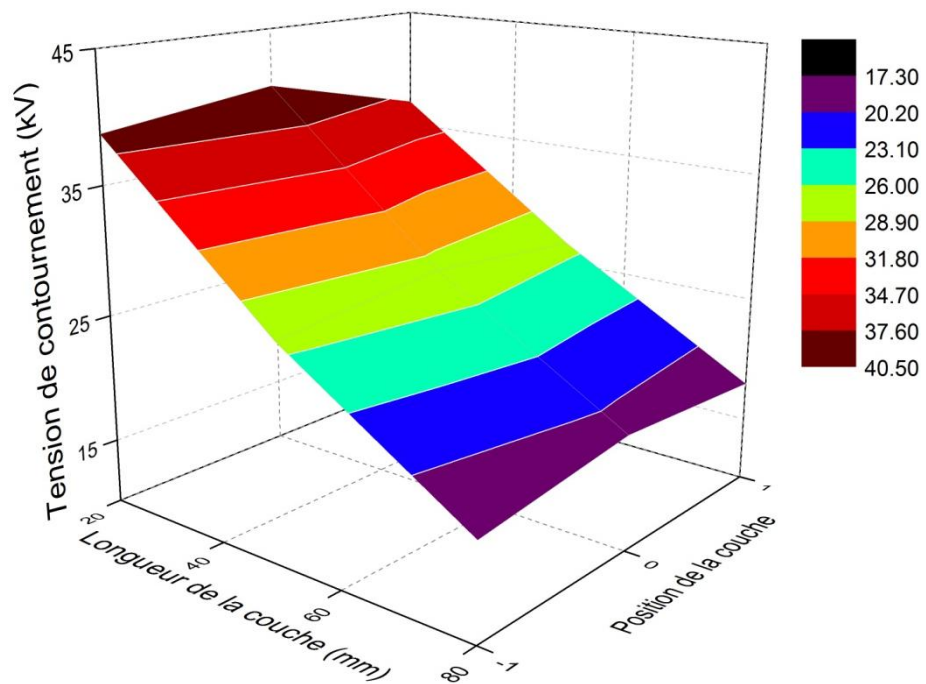
tension de contournement. Alors que la position est maintenue au niveau centre. L'influence de la conductivité et la position de la couche sur la tension de contournement est représenté dans la figure 4.7b, cependant la longueur de la couche est gardée au niveau médian. La figure 7a présente la surface de réponse estimée des effets de la position et la longueur de la couche, tandis que la conductivité est maintenue au niveau médian. Les courbes en 3D confirment les résultats de l'analyse des graphiques des effets principaux et des diagrammes des interactions (fig. 4.4 et 4.5). En effet, Les courbes en 3D de la surface de réponse montrent que la tension de contournement est fortement liée à l'augmentation de la longueur de la couche polluante que les autres paramètres, et chaque augmentation de la couche engendre une réduction de la tension de tenue.



- a -



- b -



- c -

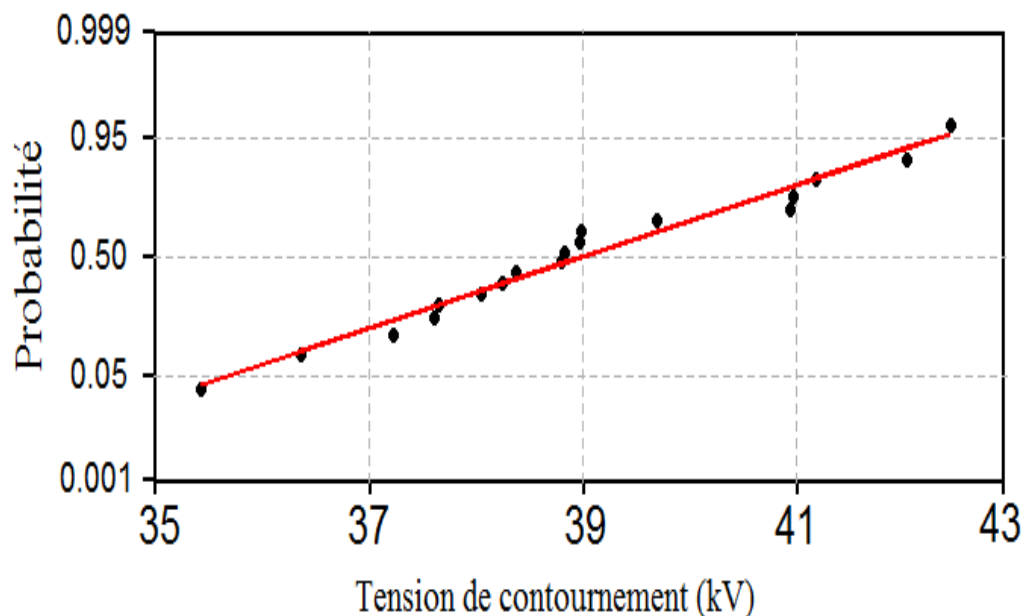
Figure 4.7 Surfaces de réponse en 3D pour une couche de pollution non-uniforme.

4.2.3. Répartition discontinue

Cette partie vise à étudier l'effet des paramètres de la couche de pollution discontinue tels que, le nombre des bandes sèches et leur largeur sur la tenue diélectrique de la surface isolante, Leur influence est identifiée par l'utilisation de l'analyse des variances. Le plan factoriel mixte L18 est utilisé dans ce cas, les résultats expérimentaux sont donnés dans le Tableau 3.3.

4.2.3.1. Testes de normalité

La valeur de P issue du test d'Anderson-Darling ($0.533 > \alpha$) indique que les données proviennent d'une population distribuée normalement (figure 4.8). Il n'existe pas de preuve suffisante permettant de supposer que les données ne proviennent pas d'une population normalement distribuée. Donc, Ces données suivent une loi normale,



Moyenne : 38,996
Ecart type: 1,941
N : 18

Test de normalité de: Anderson-Darling
A carré : 0.305
Valeur de P: 0.533

Figure 4.8 Graphique de normalité pour une couche de pollution discontinue.

4.2.3.2. Analyse des variances (ANOVA)

Modèles Linéaires

L'analyse des variances du modèle linéaire pour la tenue diélectrique sous une répartition discontinue est présentée dans le tableau 4.5. L'analyse a été effectuée en utilisant des données non codées. Le coefficient de détermination est égal à 93.3 %.

Tableau 4.5 Régression linéaire pour la tenue sous une répartition discontinue

Coefficients de régression		Analyse des variances pour U							
Term	Coeff	Source	DL	SC séq	SCajust	CM ajust	F	P	PC%
C	-0,024500	C	1	17,287	17,287	17,287	56,10	0.00	26.976
N	1,5050	N	1	27,180	27,180	27,180	88,21	0.00	42.41
W	0,28229	W	1	15,300	15,300	15,300	49,65	0.00	23.87
Constante	34,9533	Erreur	14	4,314	4,314	0,308			6.73
R ² = 93.3 %		Total	17	64,082					

Où;

C : est la conductivité de la pollution en (mS / cm) ;

N : est le nombre des bandes sèches;

W : la largeur des bandes sèches ;

Modèles quadratiques réduits

L'analyse des variances du modèle quadratique pour la tenue diélectrique sous une répartition discontinue est présentée dans le tableau 4.6. L'analyse a été effectuée en utilisant des données non codées. Les termes qui n'ont pas un effet significatif sont éliminés.

Tableau 4.6 Analyse du modèle quadratique pour une couche discontinue

Coefficients de régression estimés pour U		Analyse des variances pour U							
Term	Coeff	Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P	PC%
C	-0,022625	C	1	17,287	1,134	1,134	11,89	0,005	26.97
N	1,9821	N	1	27,180	18,398	18,398	192,91	0,000	42.41
W	0,17474	W	1	15,300	2,288	2,288	23,99	0,000	23.87
C*N	-0,009542	C*N	1	1,748	1,748	1,748	18,33	0,001	2.72
C*W	0,002151	C*W	1	1,421	1,421	1,421	14,90	0,002	2.21
Constante	34,8596	Erreur	12	1,144	1,144	0,095			
R ² = 98.2%		Total	17	64,082					

Le tableau 4.6 montre que le C, N, W, C * N, et le produit C * W sont les termes qui ont une influence importante sur la tension de contournement sous distribution de pollution discontinue. Le plus grand facteur significatif sur la tension de contournement est le nombre de bandes sèches, avec une contribution de 42,41 % dans la variation totale, la deuxième plus grande contribution vient de la conductivité avec la contribution de 26,976 %. Les dernières contributions proviennent de la largeur des bandes sèches avec 23,875 %. Les interactions de la conductivité avec la largeur et le nombre de bandes sèches ont 4,94 % de contribution à la réponse totale.

4.2.3.3. Effets principaux et effets des interactions

(Figures 4.9 et 4.10) représentent les effets principaux et les interactions. Il est montré que l'augmentation du nombre des bandes sèches implique l'augmentation de la tension de contournement, La conductivité de la couche de pollution a aussi un effet inversement proportionnel comme obtenu aux deux premiers cas (uniforme et non uniforme). La tenue diélectrique de la surface de l'isolateur est aussi améliorée par l'augmentation de la largeur des bandes sèches.

Enfin, une faible variation est observée sur la tension contournement due aux interactions entre ces facteurs. On peut dire alors que la surface isolante atteint sa tenue diélectrique maximale lorsque la couche polluante contient plusieurs bandes sèches de grande largeur au centre du modèle. L'explication de l'effet de la conductivité a été déjà illustrée dans le premier cas d'une distribution uniforme de la pollution. L'effet croissant de la largeur des bandes sèches sur la tenue diélectrique est lié à la diminution de l'intensité de champ maximal sur les bandes sèches.

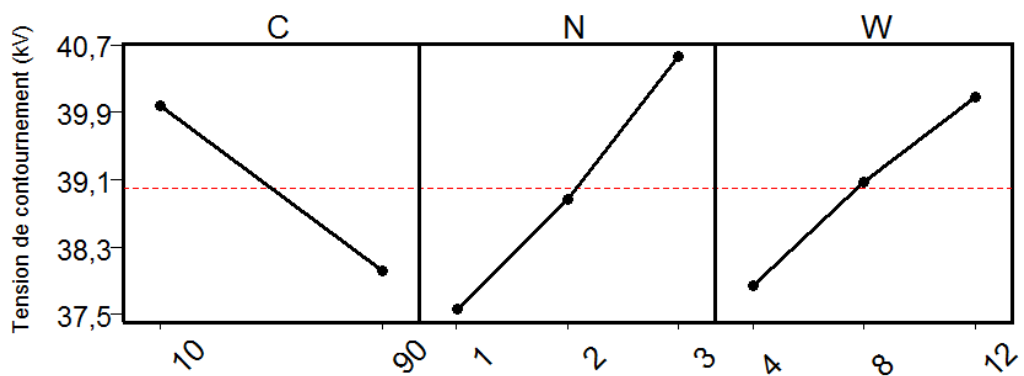


Figure 4.9 Graphiques des effets principaux

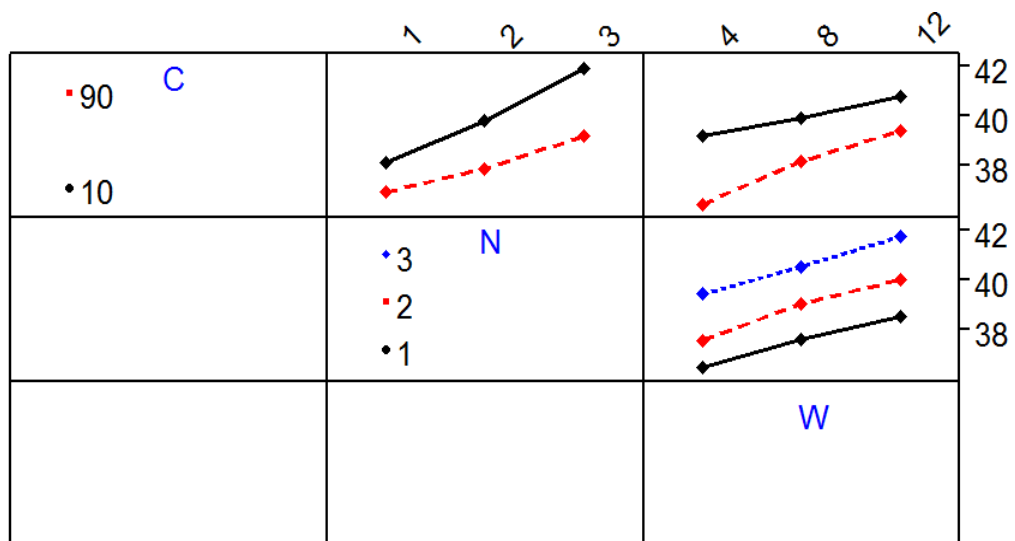


Figure 4.10 Graphiques des interactions

L'augmentation de la tenue diélectrique peut être expliquée par le fait de présence de plusieurs bandes sèches ; l'intensité du champ sur chacun d'entre eux est généralement inférieure à celle quand elle est individuellement existe, cela signifie que la présence de plusieurs bandes sèches créées en même temps peut avoir la capacité d'affaiblir l'intensité du champ électrique [25].

4.2.3.4. Modélisation statistique

L'analyse par la méthodologie de surface de réponse prend en considération tous les effets de facteurs et de leurs interactions. Les termes sans effet significatif sur la réponse sont éliminés. Le modèle quadratique final est représenté comme suit ;

$$U = 34.8596 - 0.0226 * C + 1.9821 * N + 0.1747 * W \\ - 0.0095 * C * N + 0.0022 * C * W \quad 4.5$$

Avec, $R^2 = 98.2 \%$ $R^2 \text{ (adj)} = 97.5 \%$

La valeur de coefficient de détermination pour le modèle quadratique réduit est : $R^2 = 98.2 \%$. Cela signifie que le modèle est fortement significatif et en bonne adéquation avec les résultats expérimentaux.

Les valeurs de probabilités P indiquent la signification du modèle (Tableau 4). La contribution de chacun des termes linéaires et quadratiques est hautement significative au seuil de 1 % (valeur de $P < 0.05$). Par conséquent, on peut conclure que le modèle quadratique de prédiction est hautement significatif et estime de manière adéquate les données observées.

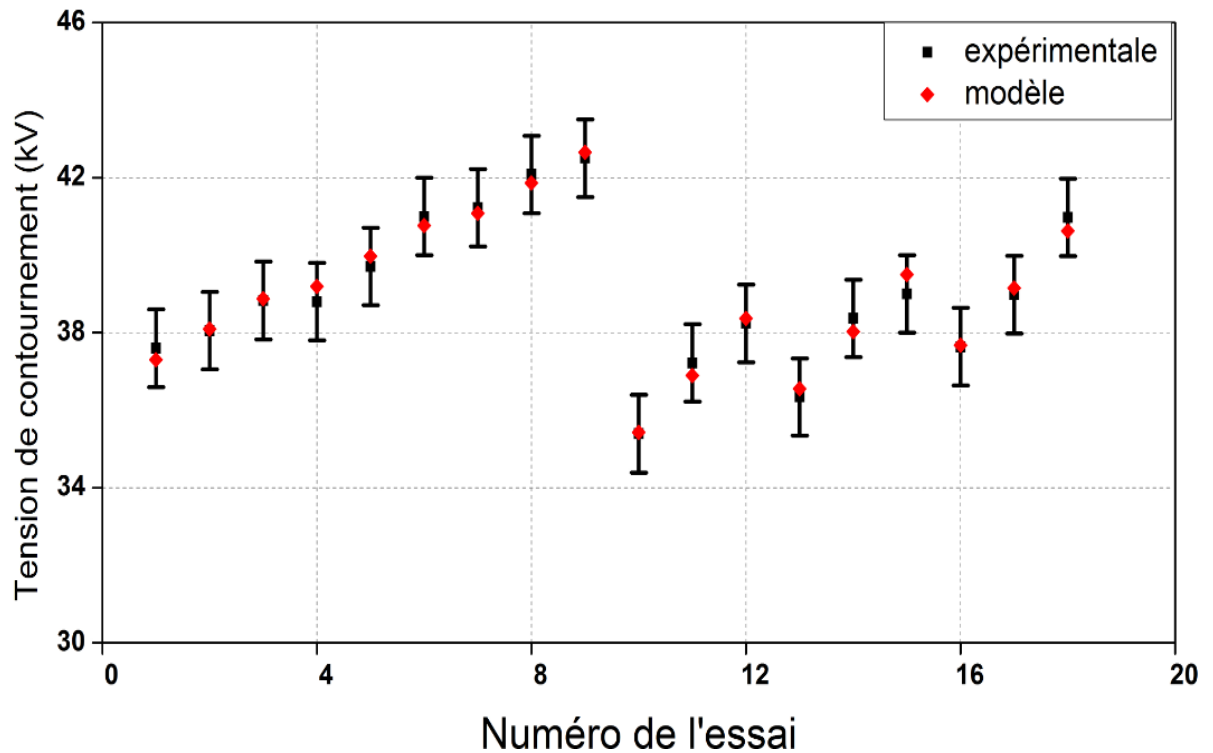


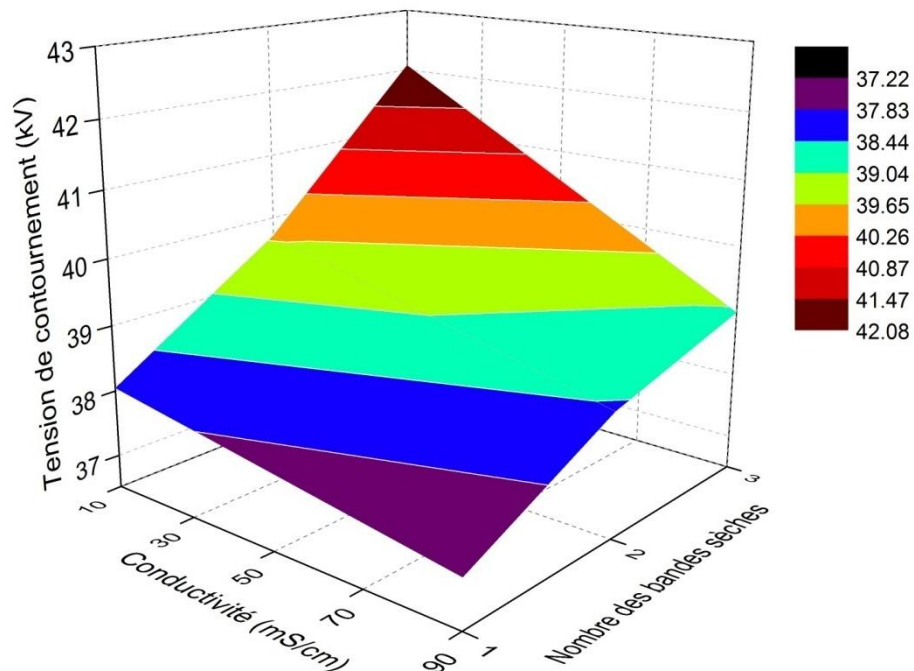
Figure 4.11 Valeurs expérimentales et estimées pour la répartition discontinue.

(Figure 4.11) représente une comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs calculées obtenues à partir du modèle quadratique dans les 18 cas testés. Les tensions de contournement calculées par le modèle quadratique développé sont en bonne accordance avec les valeurs expérimentales. Il est montré que les résultats calculés varient dans une marge d'erreur acceptée.

4.2.3.5. Courbes 3D de la surface de réponse

La figure 4.12 synthétise les surfaces de réponse estimées pour la tenue diélectrique sous une pollution non-uniforme discontinue en fonction de la Conductivité, le nombre et la largeur des bandes sèches, Pour chaque surface de réponse, la variable non représentée est maintenue constante (au niveau médian). La figure 4.12a met en évidence l'impact de la conductivité et le nombre

des bandes sur la tension de contournement. Alors que sa largeur est maintenue au niveau centré. L'influence de la conductivité et la largeur des bandes sur la tension de contournement sont représentés dans la figure 4.12b, cependant le nombre des bandes est gardé au niveau médian. La figure 4.12c présente la surface de réponse estimé l'effet du nombre et de la largeur des bandes, tandis que la conductivité est maintenue au niveau médian. Les courbes en 3D confirment les résultats de l'analyse des graphiques des effets principaux et des diagrammes des interactions (figure 4.9 et 4.10). En effet, Les courbes en 3D montrent que les la tension de contournement dépend du nombre des bande sèches,



- a -

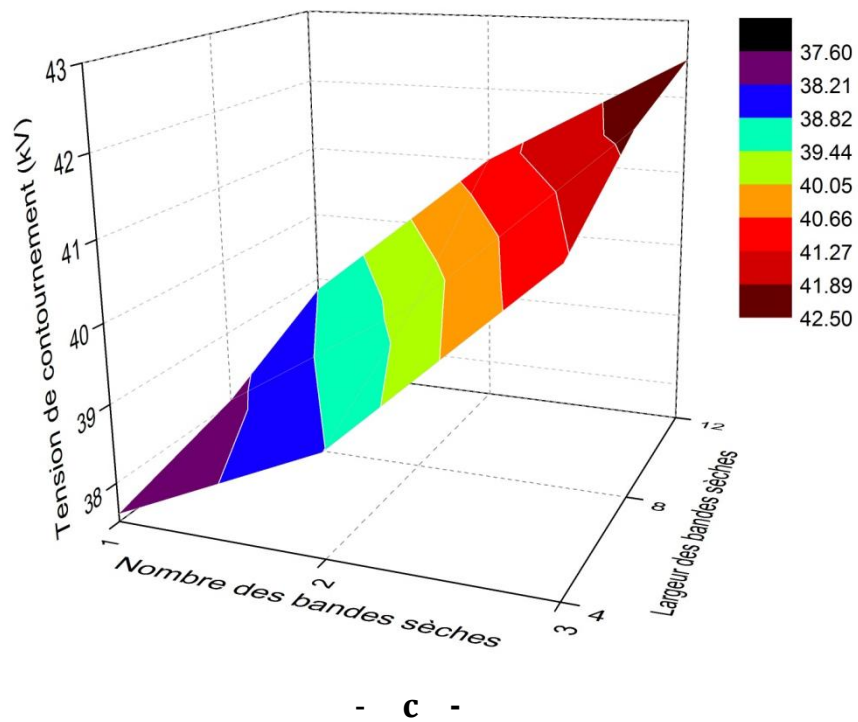
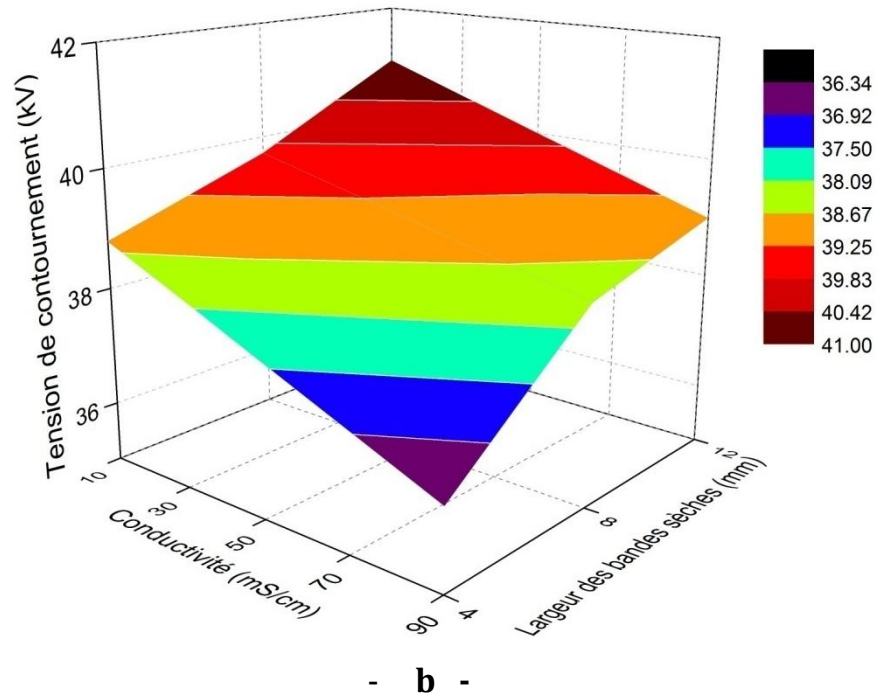


Figure 4.12 Surfaces de réponse en 3D pour la tension de tenue sous une pollution discontinue

4.3. Comparaison des différentes répartitions

La (Figure 4.13) représente une comparaison entre la tension de contournement sous une répartition de pollution uniforme, non-uniforme et discontinue. Les

résultats montrent que la répartition de la pollution a une grande influence sur la tenue diélectrique d'isolateur, la valeur de la tension de contournement de l'isolateur sous la distribution non-uniforme est supérieure à celle du pollution uniforme. De plus, pour une même longueur de couche de la pollution sur la surface, il est montré aussi que la tension de contournement est plus élevée dans le cas de la distribution discontinue et en présence des bandes sèches. La valeur de tension de contournement pour une couche de pollution de 50 mm qui se trouve dans la position centrée avec trois bandes sèches peut atteindre la valeur de contournement de la couche de pollution de 20 mm continue sur la surface de l'isolateur.

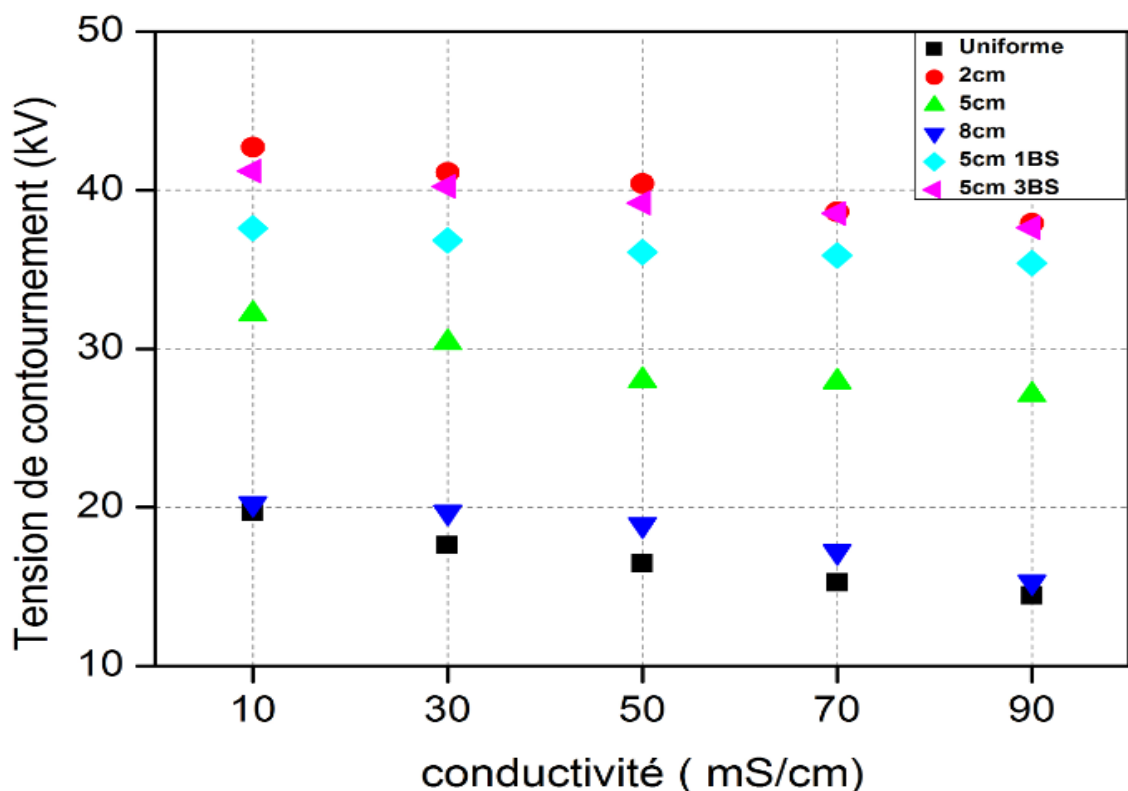


Figure 4.13 Comparaison de la tenue diélectrique sous différentes répartition de la couche polluante.

A partir de ce résultat, on a trouvé que la rigidité de l'isolateur peut être améliorée si la répartition de la pollution de la couche sur sa surface n'est pas uniforme. En outre, si la couche conductrice contient beaucoup de bandes sèches plus larges, la tenue diélectrique sera fortement améliorée.

4.4. Proposition pour l'amélioration de la tension de tenue diélectrique des isolateurs sous la contrainte de pollution

La conception proposée de l'isolateur est basée sur la combinaison entre les résultats obtenus et les résultats qui sont montrés au (figure 4.14) (formation des bandes sèches) [25, 26]. Il est clair que l'isolateur atteint sa meilleure performance lorsque la couche de pollution est positionnée au milieu de l'isolateur, qui peut être obtenu par recouvrement de la surface proche du capot et de la tige de l'isolateur par une couche mince de silicone hydrophobe ou bien par glass semi-conducteur pour empêcher la création de l'électrolyte pollué dans ces endroits.

Les décharges couronne sont observées dans les zones où le verre est le plus mince; ces décharges empêchent la formation d'une couche conductrice d'eau dans ces endroits

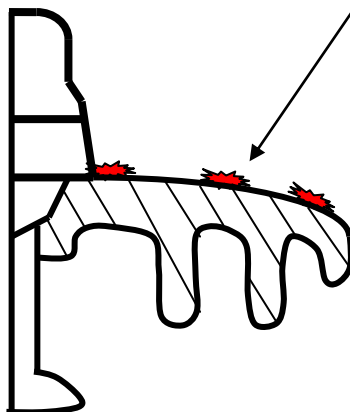


Figure 4.14 Formation des bandes sèches sur la surface supérieure de l'isolateur par l'effet des décharges couronne.

En outre, à partir de la figure 4.14, on observe que la formation de bandes sèches commence sur la surface supérieure où le verre est le plus mince et entre l'axe et la première nervure par l'effet de décharge couronne. Cela empêche la formation d'une couche mince d'eau dans ces zones. D'après les résultats obtenus et la littérature de mécanisme de génération des bandes sèches sur la surface de l'isolateur pollué, il semble possible d'améliorer la conception de l'isolateur à travers l'augmentation du nombre des nervures sur la surface inférieure. Aussi, en augmentant la distance entre eux, où le verre est plus mince. Cette conception mène à créer un grand nombre de bandes sèches plus larges sur la surface supérieure qui augmente la tenue diélectrique de l'isolateur. Le nouveau design est basé sur le changement de la forme des nervures et ses dimensions.

4.5. Conclusion

Cette étude nous a montré que la tenue diélectrique d'isolateur dépend de la répartition et de la conductivité de la couche de pollution, il est démontré que la tension de contournement diminue fortement avec l'augmentation de la longueur de la couche de la pollution et de la conductivité. La surface isolante présente la meilleure tenue diélectrique lorsque la couche conductrice est située au milieu de la surface isolante. En outre, la rigidité de la surface avec pollution discontinue augmente avec l'augmentation du nombre de bandes sèches et leur largeur successivement. Les bandes sèches peuvent être considérées comme une barrière de potentiel dans la couche conductrice qui en fait la tension de contournement de pollution discontinue plus élevé que le cas non-uniforme et uniforme.

Chapitre 5: Effet De La Pollution Sur L'évolution Des Courants De Fuite

Chapitre 5: Effet De La Pollution Sur L'évolution Des Courants De Fuite

5.1. Introduction

En service, les isolateurs sont exposés à diverses conditions climatiques. En présence d'humidité, de brouillard ou de faible pluie, la couche de contamination permet la création et la circulation des courants de fuite (LC), ce qui conduit finalement au développement de contournement total de la surface. L'évolution des courants de fuite à la surface des isolateurs pollués sous différents types et niveaux de brouillard a été étudiée dans [58, 72-74]. Dans la référence [75-78], il a été démontré que la valeur et le nombre des crêtes du courant de fuite peuvent fournir des indications sur la conductance de la couche de pollution et l'état de surface en général. Il a été aussi mentionné dans la référence [47] que l'évolution de la forme d'onde du courant de fuite dépend essentiellement des variations qui se produisent au niveau de la couche de la pollution par l'influence de l'humidité et la température. En outre, il a été aussi montré dans la référence [45] que le processus de l'humidification de la couche de pollution peut être ainsi caractérisé par le changement de la forme de signal de ces courants. Il a été noté que, du moment où le courant de fuite atteint sa valeur maximale c'est une indication sur

la saturation de la couche de la pollution par le brouillard. Il a été trouvé que les facteurs environnementaux et le profil de l'isolateur ont une grande influence sur la valeur maximale de ces courants et sur le temps nécessaire avant la saturation. La maintenance préventive par le lavage de surface de l'isolateur est en fait inévitable pour réduire le risque de contournement sous des circonstances extrêmes, mais le coût de cette opération est relativement élevé pour les entreprises. Par conséquent, plusieurs études ont été menées pour optimiser le programme de lavage. L'entretien basé sur la carte de pollution est largement utilisé, mais il est subit à des conditions météorologiques anormales. La méthode conventionnelle équivalente Densité de dépôt de sel équivalente (DDSE) a été proposé, mais elle présente l'inconvénient de la difficulté d'automatisation et la nécessité des personnels qualifiés [8, 10]. Un nouvel algorithme pour définir la sévérité de pollution par une approche innovante basant sur la détection de décharge partielle a été développé [62, 79]. Cependant, les décharges partielles causées par la pollution sur la surface de l'isolateur dépendent de l'interaction entre nombreux facteurs complexes qui influent simultanément sur le processus de mouillage ; ce qui rend la mesure de DP pas très prometteuse dans certaines conditions extrêmes. Récemment, les techniques de traitement du signal et d'intelligence artificielle sont largement appliquées dans le domaine de la surveillance de l'état des isolateurs pour la prévention du contournement. [80-85] ont utilisé l'analyse de l'amplitude et les composantes harmoniques pour diagnostiquer l'apparition des décharges et pour contrôler la perte de la performance des isolateurs sous l'effet de la pollution. La mesure de l'angle de

déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite est utilisée dans les références [17, 85, 86] pour comprendre les différentes phases d'évolution du courant de fuite en fonction du niveau d'humidification ainsi que pour comprendre le comportement électrique des courants traversant la surface. L'analyse des signaux de courants de fuite par la transformée en ondelette est utilisée pour détecter la présence des décharges électrique sur la surface [59, 88]. Ils ont montré que La représentation STD_MRA peut identifier le signal approprié pour le diagnostic de la sévérité de la pollution.

Sur cette base, le but de ce travail est de réaliser des expériences de laboratoire pour étudier la variation des caractéristiques LC pour prédire les premiers signes des arcs traversant les bandes sèches comme une indication pour le lavage des isolateurs en céramique.

5.2. Analyse et caractérisation des signaux de courant de fuite

5.2.1. Evolution de courant de fuite

Afin de montrer l'influence de la pollution sur L'évolution des caractéristiques des courants de fuite. les signaux ont été enregistrés pour une durée de 40 minutes, les quatre phases montrées dans la figure 5.1 illustrent les principaux étapes d'évolution du courant de fuite sur la surface d'un isolateur en Porcelaine polluée avant l'apparition de longue décharge (la conductivité est 10 mS/cm, la quantité du Kaolin est 40g/L), l'étude des caractéristiques de courant dans ces phases est très importante pour prévenir la phase précoce de l'apparition des décharges. Ces signaux peuvent être considérés comme des indicateurs sur la

nécessité de la maintenance ou bien de l'intervention par le lavage. On remarque que la valeur maximale du courant de fuite augmente au fur et à mesure avec l'augmentation du niveau de brouillard dans la chambre. Quand l'isolateur est sec, l'amplitude du courant est très faible. Après trois minutes et quand le processus d'humidification commence, le courant de fuite commence à augmenter rapidement et la surface de l'isolateur sera complètement mouillée après 5 minutes et l'effet de la chaleur engendrée par la circulation des courants de fuite aide à la création des bandes sèches sur la surface, ce qui mène au déclenchement des décharge à travers ces bandes. La figure 5.2 montre les formes d'onde des courants de fuite obtenus durant quatre étapes différentes avant l'apparition du contournement.

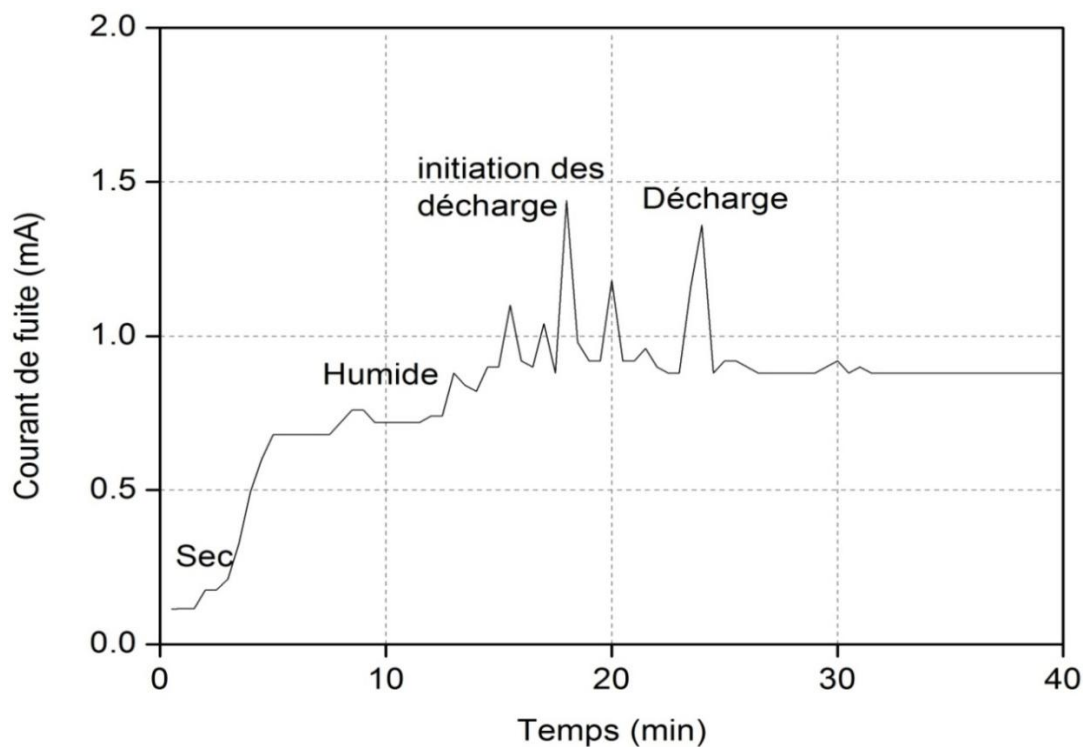
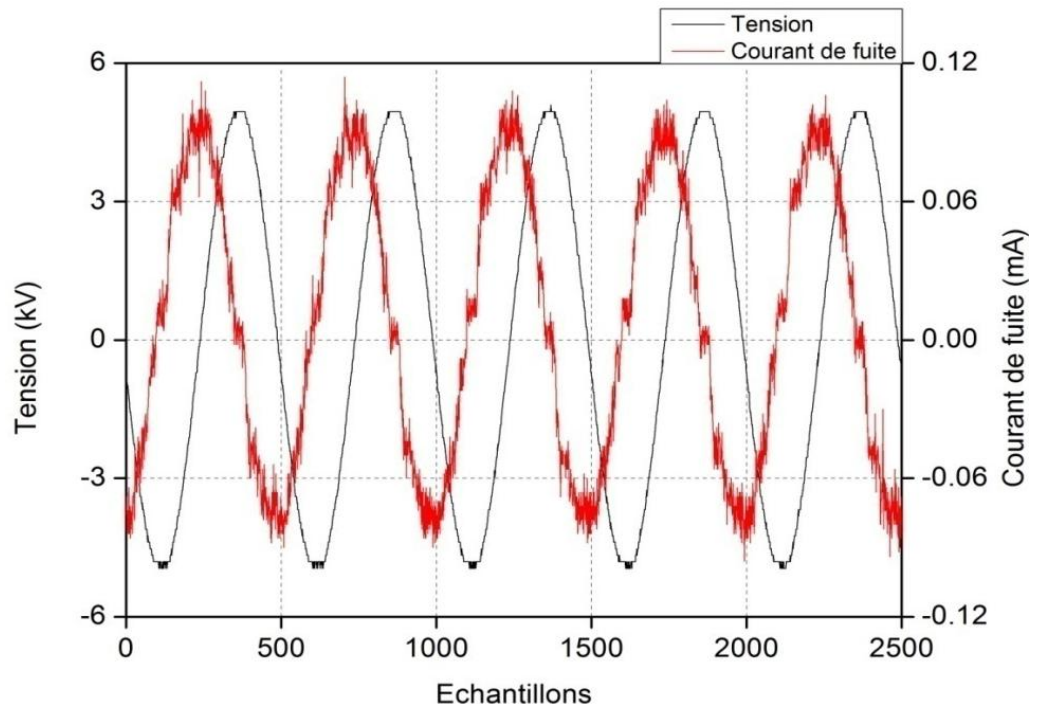
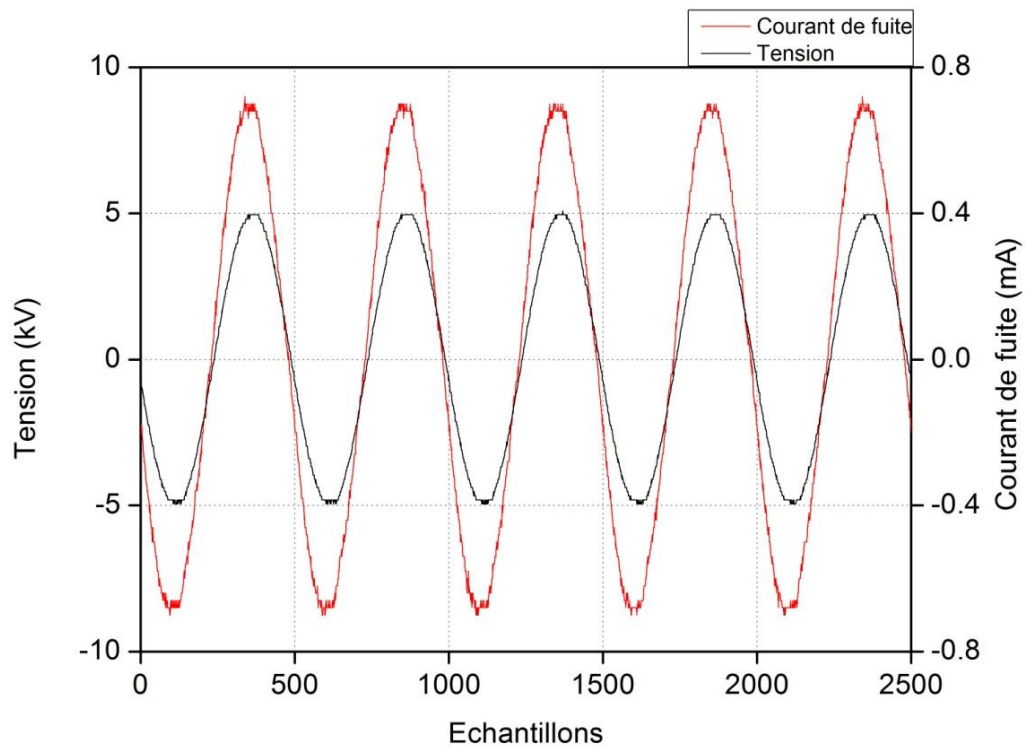


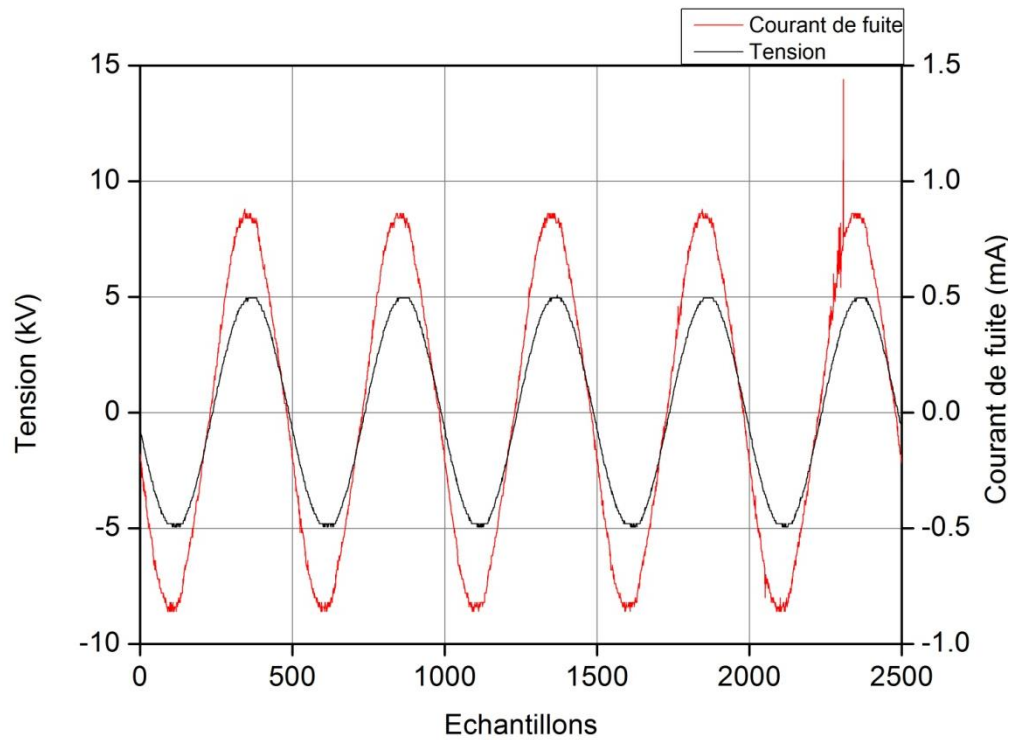
Figure 5.1 Evolution de la valeur courant de fuite maximal avec le temps



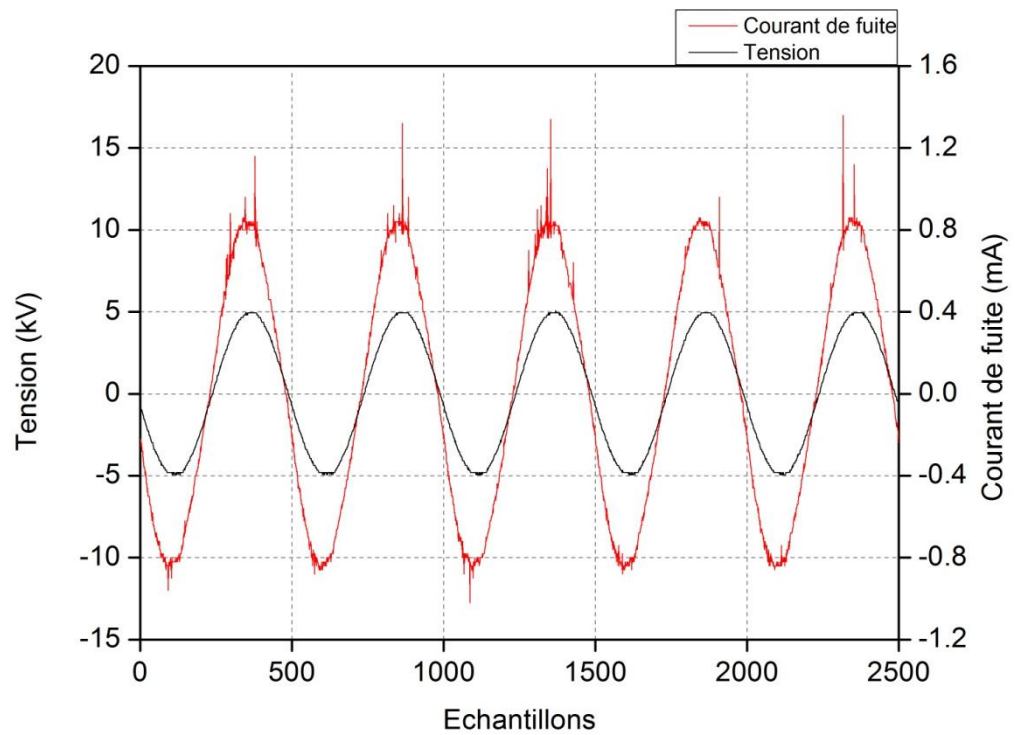
-a-



-b-



-c-



-d-

Figure 5.2 Forme d'onde de la tension et du courant de fuite: a- surface sec, b- surface humide, c- initiation des décharges, d- décharges

5.2.2. Analyse de déphasage tension- courant

L'analyse de l'angle de déphasage entre la tension appliquée et le signal du courant de fuite peut fournir des informations utiles pour comprendre le comportement du circuit électrique équivalent de l'isolateur. L'analyse spectrale par la transformée discrète de Fourier (FFT) du signal du courant de fuite pour 5 cycles a été effectuée. L'amplitude de la fréquence fondamentale est utilisée pour évaluer l'angle de déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite. Lorsque la surface est sèche, elle présente le comportement d'un réseau R-C, le courant de fuite (figure 5.2a) est déphasé de la tension appliquée à un angle de 75 degrés.

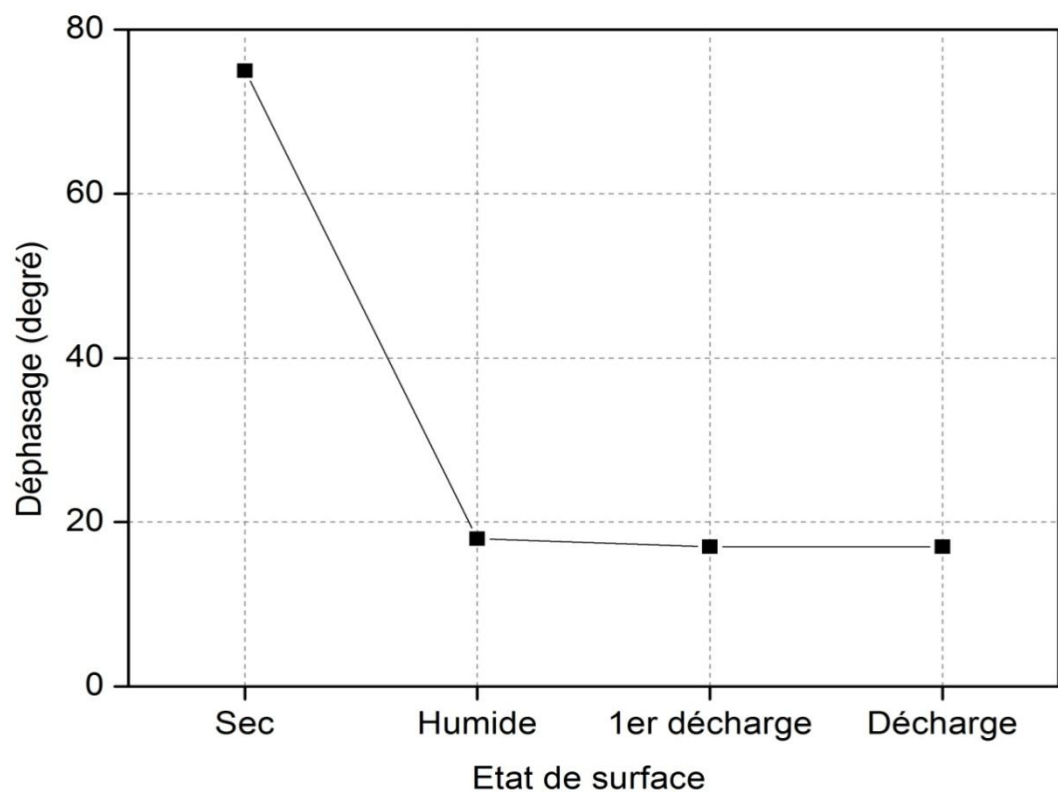


Figure 5.3 Variation de l'angle de déphasage pour différentes phases d'évolution de courant de fuite

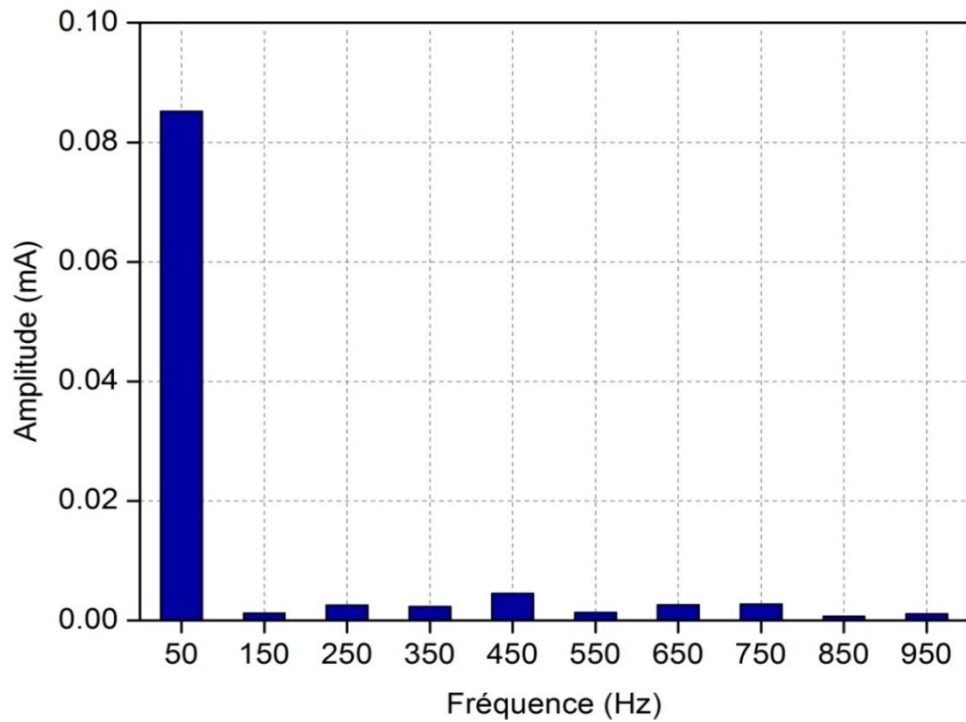
Par conséquent, l'isolateur à l'état sec se comporte comme un réseau RC hautement capacitif, ce qui permet aux courants de très faible amplitude de s'écouler sur la surface. Lorsque la surface de l'isolateur est humidifiée, on remarque que l'angle de déphasage diminue d'une façon significative (environ 18 degrés) avec une augmentation considérable de l'amplitude du courant de fuite (figure 5.2b). Ceci peut être expliqué par la réduction importante de la résistance surfacique lors du mouillage de la pollution ; ce qui augmente relativement le courant résistif. Durant la phase initiale de formation des décharges, les valeurs de l'angle de déphasage deviennent un peu plus basses, comme le montrent (figure 5.2c et 5.2d). Ceci indique que le circuit équivalent de l'isolateur lors des décharges devient fortement résistif.

La figure 5.3 montre la variation de l'angle de déphasage de différentes phases d'évolution du courant de fuite, à partir des résultats obtenus, il est évident que l'initiation des décharges dues à la pollution donne des valeurs d'angle de déphasage similaires, par conséquent, la valeur de l'angle de déphasage ne présente pas un indicateur prometteur pour distinguer les différents états de surface. Cependant, l'analyse de déphasage peut distinguer clairement entre les deux conditions de surface sèche et humide.

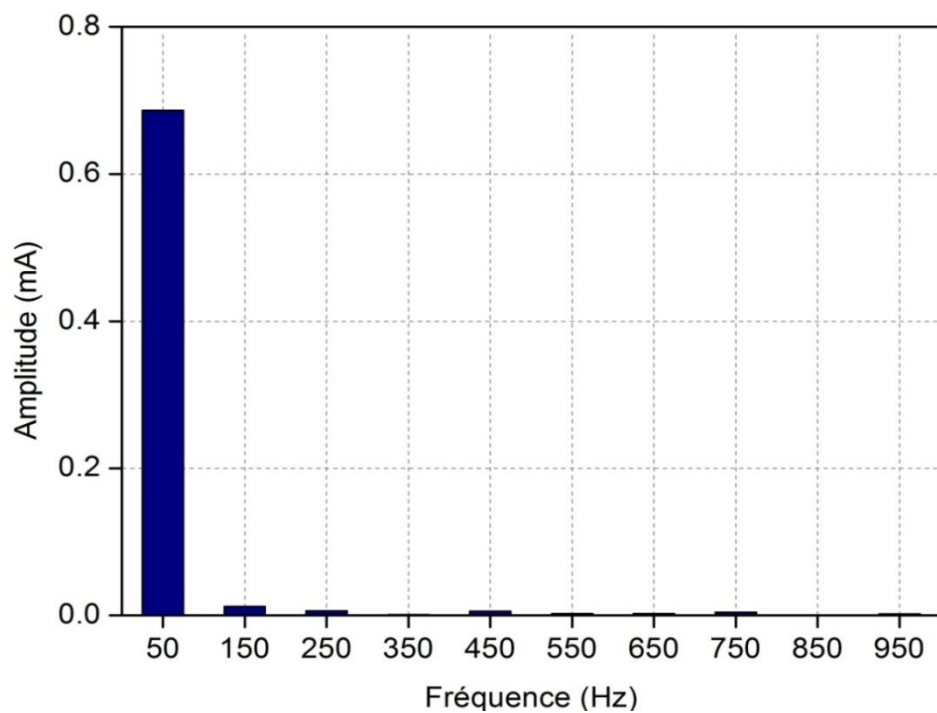
5.2.3. Analyse des composantes harmoniques

L'analyse par la transformée discrète de Fourier du signal de courant de fuite est effectuée pour évaluer le changement aux composantes harmoniques de signal dans différentes étapes d'évolution avant le contournement.

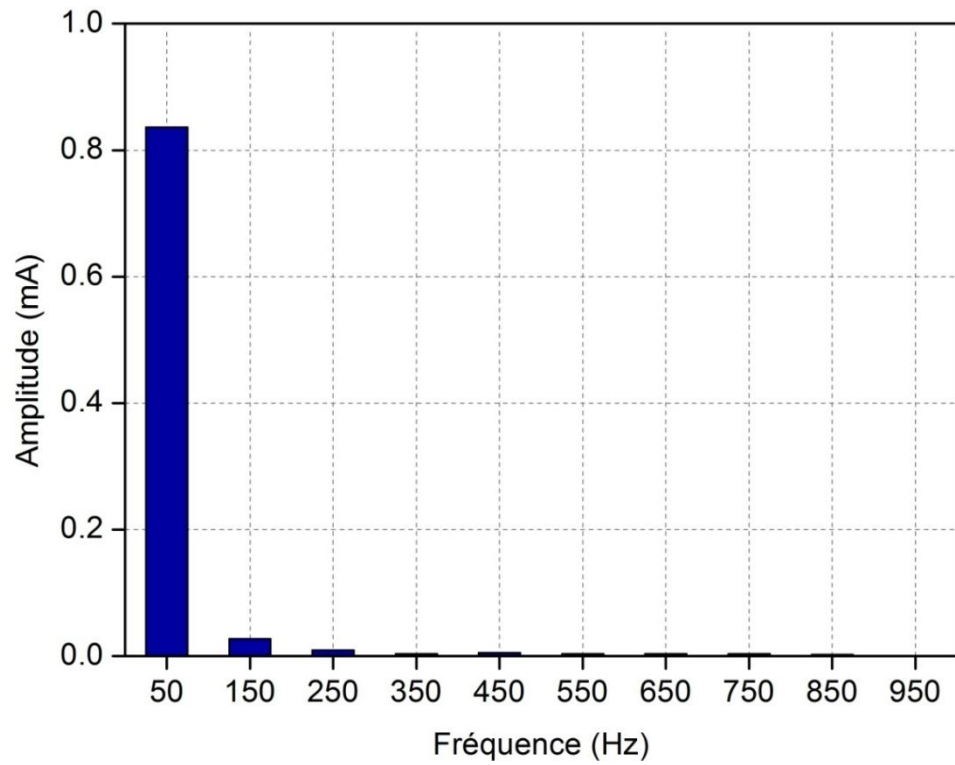
L'analyse du rapport de la troisième harmonique et la composante fondamentale sera utilisée pour distinguer les différentes phases d'évolution du courant de fuite.



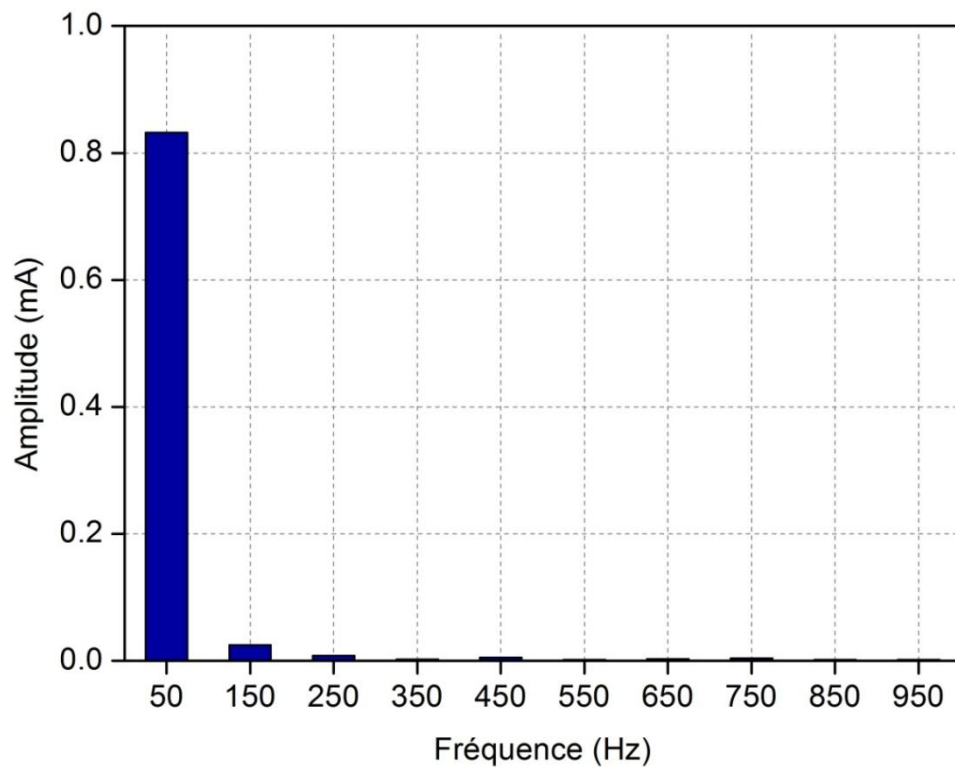
-a-



-b-



-c-



-d-

Figure 5.4 Composantes Harmonique, a- surface sèche, b- surface humide, c- initiation des décharges, d- décharges

La figure 5.4 montre la variation de l'amplitude des composantes harmoniques dans différentes étapes d'évolution du courant de fuite. Quand la surface est sèche, on remarque qu'il y a une augmentation significative de l'amplitude de la 5^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème} composantes harmoniques en comparaison avec la troisième composante. De l'autre côté, l'amplitude du courant de fuite est très faible. Quand la surface est humide, on observe qu'il y a une augmentation de la troisième composante comparée aux autres composantes. L'amplitude du courant de fuite dans cette phase augmente considérablement. En présence de la décharge surfacique, il est évident qu'il y a une augmentation de la troisième harmonique. L'amplitude du courant de fuite augmente d'une manière significative avec l'apparition des décharges sur la surface.

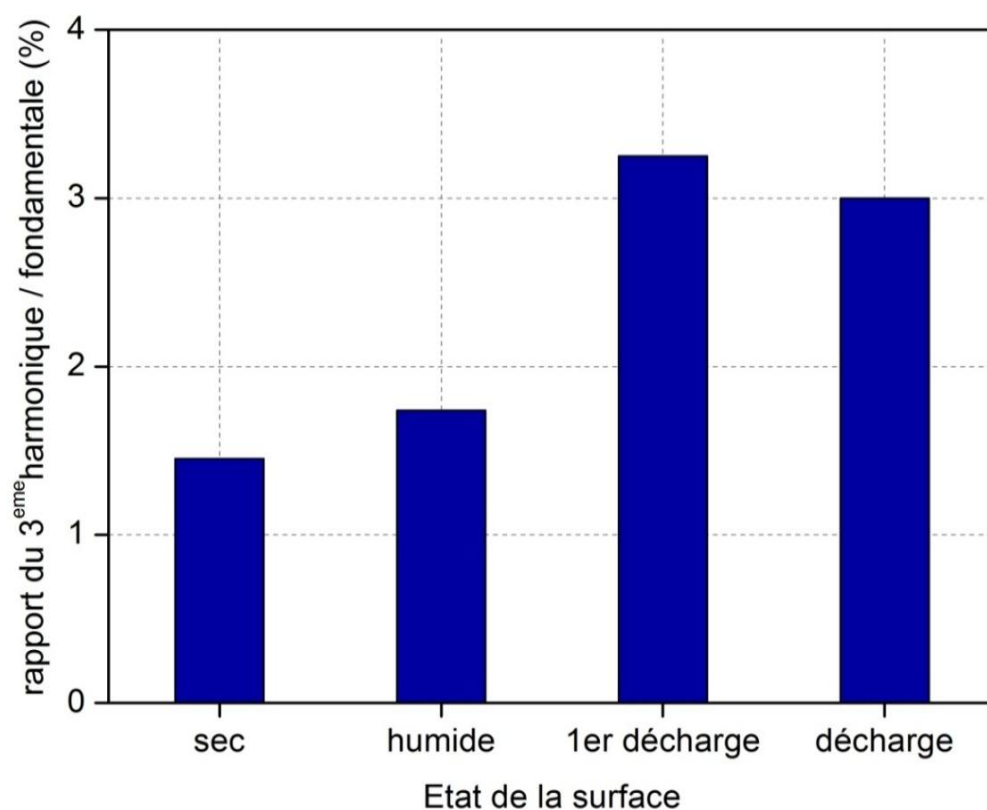


Figure 5.5 Rapport entre la 3eme harmonique/fondamentale pour différentes phase d'évolution de courant de fuite

Figure 5.5 montre le rapport entre la troisième harmonique et la composante fondamentale du courant de fuite pour les différentes phases. On le note bien que le rapport du 3ème / 1er a clairement augmenté entre l'état humide et l'état de présence des décharge, ce qui signifie que ce rapport peut être employé pour distinguer les phases initiales de la génération des arcs dûes à la pollution.

5.2.4. Analyse par la transformée en ondelette

Les signaux du courant de fuite pour les quatre phases d'évolution déjà étudiées ont été décomposés en 10 niveaux en utilisant la transformée en ondelette de Daubechies 4 afin d'identifier n'importe quelle transition dans le signal du courant de fuite dû aux hautes fréquences. Les bandes de fréquence pour les 10 détails de la décomposition par ondelette sont données dans le tableau 5.1. La déviation standard peut être considérée comme une mesure de l'énergie actuelle dans le signal avec zéro moyen. Par conséquence, les valeurs de la déviation standard (STD_MRA) sont calculées pour que des composants détaillés identifient l'énergie passagère actuelle dans le signal dans différents niveaux de la décomposition (D1 à D10).

Tableau 5.1 Bande de fréquence des niveaux de décomposition

Niveau de décomposition	bande de Fréquence (Hz)
D1	62500 – 12500
D2	3125,0 – 6225,0
D3	1562,5 – 3125,0
D4	781,25 – 1562,5
D5	390,62 – 781,25
D6	195,31 – 390,62
D7	76,562 – 195,312
D8	48,828 – 76,562
D9	24,414 – 48,828
D10	12,207 – 24,414

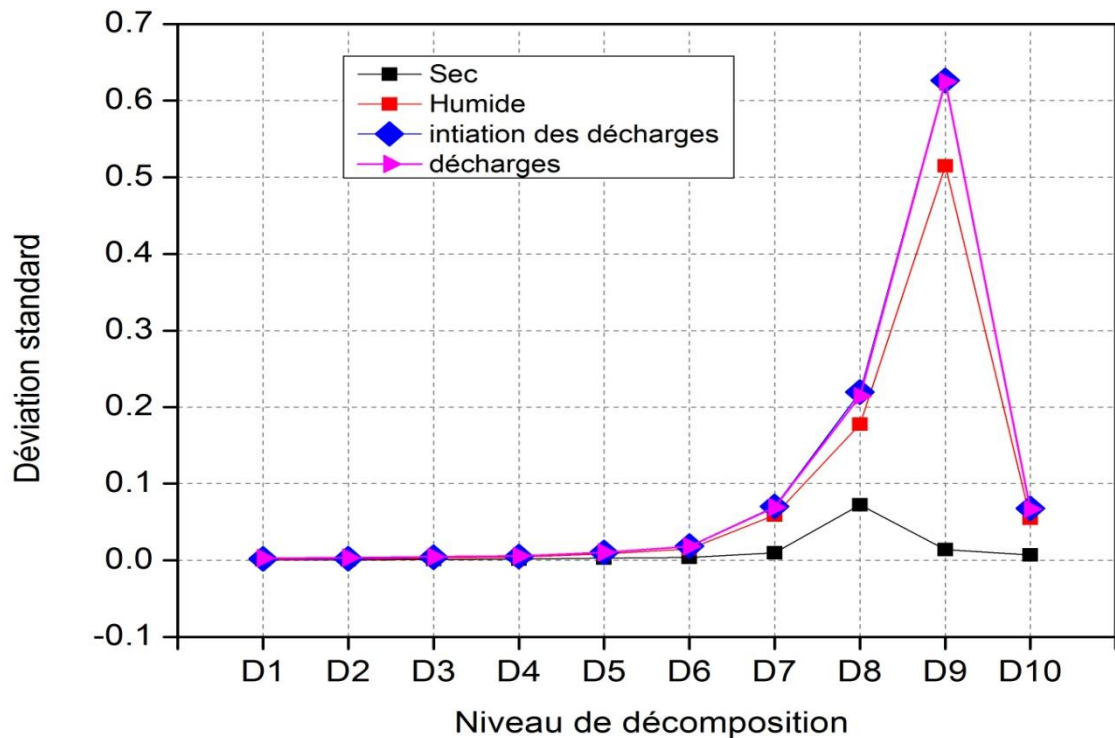


Figure 5.6 Déviation Standard pour différents phase d'évolution de courant de fuite

La figure 5.6 montre l'analyse spectrale basée sur la transformée en ondelette multi-résolution du courant de fuite. Cette analyse est exécutée pour comprendre l'évolution des détails du signal pendant les différentes étapes avant l'apparition des longues décharges. Dans l'état sec de la surface, l'amplitude du courant de fuite est très faible. Par contre quand la surface est humide, une augmentation remarquable des détails 7, 8 et 9 est remarqué, indiquant la présence des décharges de courte durée. Le changement dans le 9ème détail est très considérable ; ce qui en fait un indicateur important pour distinguer l'apparition des décharges sur la surface due à la pollution.

5.3. Variation des caractéristiques de courant de fuite pour différents niveaux de pollution

Afin de qualifier les intervalles de variation de différents indicateurs à des fins de diagnostic, des boîtes à moustache montrant les 25%, 50% et 75% quartiles, ainsi que les valeurs minimales et maximales de la distribution de chaque indicateur sont utilisées (divisées en groupes en fonction de l'état de la surface). Idéalement, les boîtes à moustache évaluent les différents états de la surface devraient avoir des plages de variation qui ne se chevauchent pas pour permettre meilleure distinction de l'état d'isolateur. Dans la pratique, un chevauchement minimal est acceptable. Les figures (5.7 5.8 5.9) illustrent la variation de l'angle de déphasage, du 3^{ème} /1^{er} harmonique et du STD-MRA du 9^{ème} détail obtenues pour de 75 signaux de courant de fuite obtenus pour différentes conductivités (5mS/cm, 10mS/cm, 15 mS/cm), et différents niveau de matière insoluble (10g/L, 40g/L, 70g/L).

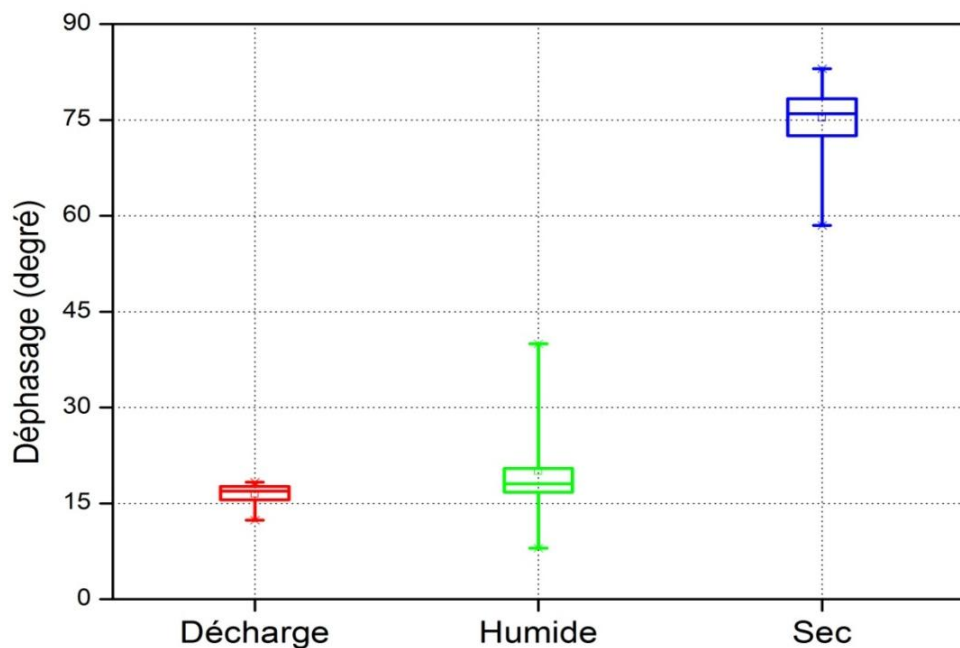


Figure 5.7 Distribution de l'angle de déphasage pour différents niveau de pollution

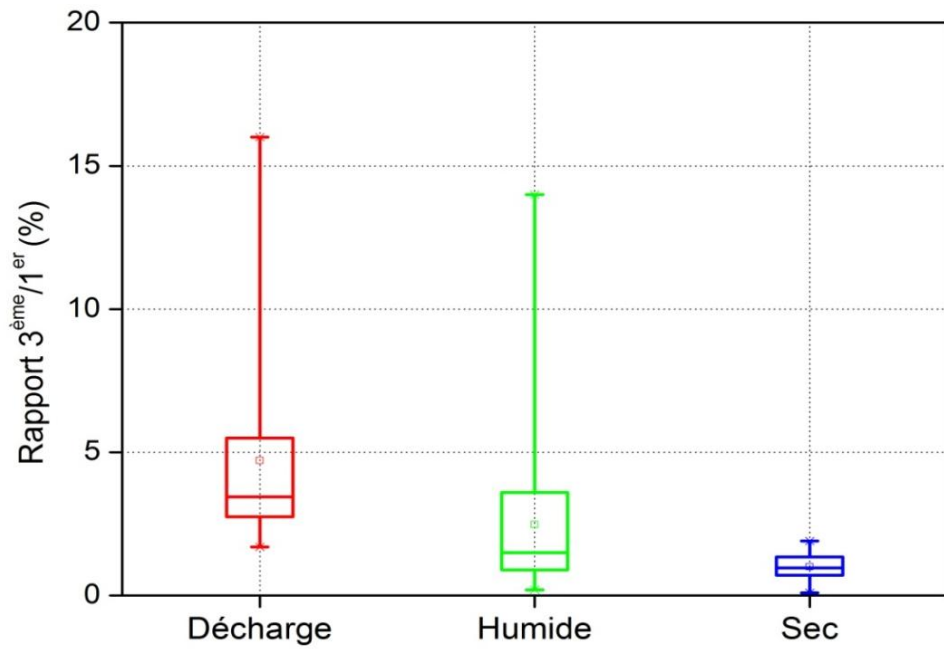


Figure 5.8 Distribution du rapport de 3^{ème} /1^{er} pour différents niveau de pollution

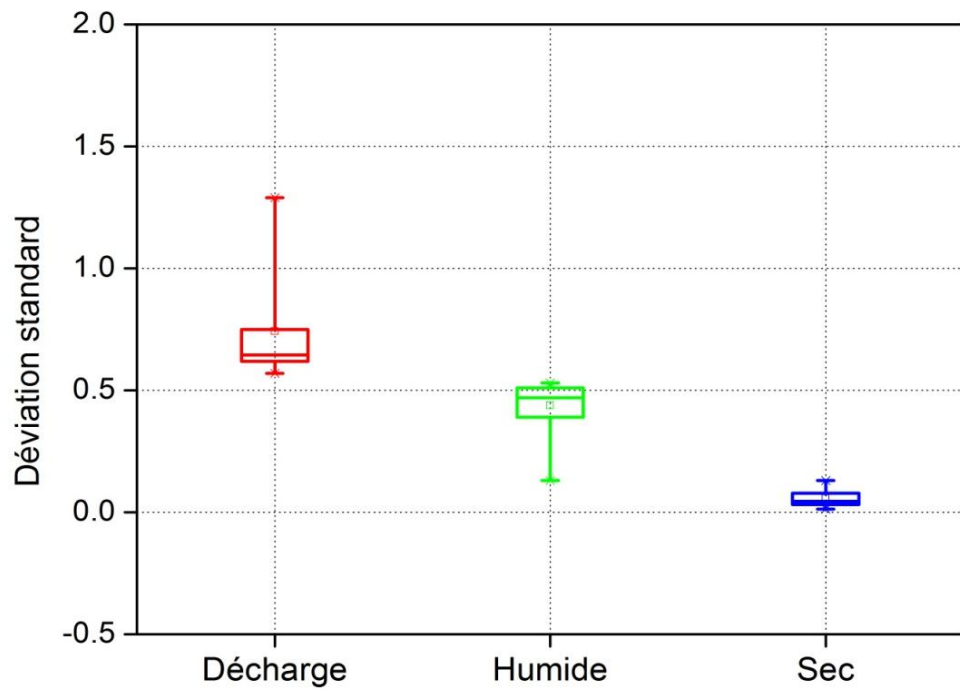


Figure 5.9 Distribution de la déviation standard pour différents niveau de pollution

On a trouvé que le déphasage tension-courant est le meilleur indicateur pour distinguer l'état de surface de l'isolateur, il a la capacité de différencier l'état sec au autre cas humide et présence des décharges, comme représenté dans la figure 5.7 Le déphasage en cas sec est généralement autour de 75 degré. Il est bien montré l'absence de chevauchement entre le cas sec et les deux autres cas.

La figure 5.8 représente la distribution du rapport du 3^{ème} harmonique/fondamentale pour différents niveaux de pollution. On peut remarquer que le chevauchement entre le cas humide et en présence des décharges est très grand. Toutefois, il est également à noter que ce paramètre est capable partiellement de séparer le cas sec du cas des décharges surfaciques.

En ce qui concerne la déviation standard du 9^{ème} détail de l'analyse multi-résolutions obtenue par la transformée en ondelettes montré dans la figure 5.9. Les trois états de la surface d'isolateur ayant des différents intervalles de variation, ce qui indique que cet indicateur pourrait être approprié pour distinguer l'état de surface surtout en présence des décharges surfaciques,

5.4. Conclusion

Dans ce chapitre, les étapes d'évolution du courant de fuite sur la surface d'un isolateur en porcelaine ont été présentées ; Lesquelles nous ont démontré que l'analyse de l'angle de déphasage du courant de fuite est un indicateur important dans la prévision de l'état de surface humide. D'ailleurs, la variation de la 3^{ème} harmonique par rapport à la composante fondamentale est remarquable en présence d'activité de décharge partielle sur la surface d'isolateur. La déviation

standard de l'analyse multi-résolutions STD-MRA obtenue par la transformée en ondelette des détails semble très prometteuse pour prévoir précocement les premières décharges à travers les bandes sèches, ce que l'on peut considérer – par adjonction- comme indicateur pour lancer la maintenance ou bien pour le lavage d'isolation. Cette étude apporte des informations utiles sur les étapes d'évolution du courant de fuite sur la surface d'un isolateur pollué et sera étendue pour des applications de diagnostic.

Chapitre 6 : Conclusion générale et perspectives

Chapitre 6 : Conclusion générale et perspectives

Les travaux présentés s'inscrivent dans le cadre général de l'étude de l'effet de la pollution sur la performance des isolateurs de haute tension utilisés dans le réseau de transport d'énergie électrique. Ce travail est divisé en deux parties :

La première partie : a pour but d'analyser l'effet de la répartition de la couche polluante et sa conductivité sur les tensions de tenue d'isolateur pour contribuer à l'amélioration des techniques de la conception des isolateurs.

La deuxième partie : est consacrée à la caractérisation des signaux de courants de fuite à des fins de diagnostic.

Dans cette étude expérimentale, on a choisi les techniques adéquates des tests au laboratoire en respectant les normes internationales reconnues. Nous pouvons dresser ici un bilan des principales conclusions dégagées au fil des chapitres:

Une recherche bibliographique nous a permis de connaître les principales investigations sur l'influence de différents paramètres et la répartition de la pollution sur les tensions de contournement. Il a été remarqué que ce thème reste encore moins documenté et présente plusieurs contradictions, ce qui nous a inspiré de traiter ce sujet dans le présent travail. En plus, les avantages et les inconvénients de différentes techniques de diagnostic de l'état des isolateurs en service sont discutés et à cause de la difficulté liée à ce problème de la pollution, notre investigation est dirigée vers la caractérisation des

signaux de courant de fuite avec objectif à atteindre le développement d'une méthode plus efficace de planification de la maintenance et du lavage avant l'apparition du contournement.

A partir de la première partie du travail expérimentale, on a vu que la tenue diélectrique d'isolateur dépend de la répartition et de la conductivité de la couche de pollution, il est montré que la tension de contournement diminue fortement avec l'augmentation de la longueur de la couche de la pollution et de la conductivité. La surface isolante présente la meilleure tenue diélectrique lorsque la couche conductrice est située au milieu de la surface isolante. En outre, la rigidité de la surface avec pollution discontinue augmente conjointement avec le nombre de bandes sèches et leurs largeurs. Les bandes sèches peuvent être considérées comme des barrières de potentiel dans la couche conductrice qui font que la tension de contournement sous pollution discontinue soit plus élevée que dans le cas non-uniforme et uniforme. Les résultats obtenus peuvent être utiles pour optimiser la conception de l'isolant dans les zones polluées. Par exemple, améliorer la forme des isolateurs en ajoutant mince couche de silicone ou bien une glace semi-conductrice près des électrodes pour rendre difficile la création d'un film électrolytique près d'électrodes HT et BT. En outre, faire une conception appropriée pour augmenter le nombre et la largeur des bandes sèches Créées au milieu de l'isolant en changeant la forme des nervures, leur nombre et leur dimensions. L'utilisation de plans d'expériences semble un outil très intéressant pour l'étude et la prévision de la rigidité de surface isolante. Finalement, les

résultats expérimentaux proposés et les approches statistiques ont été effectués sur un modèle de laboratoire ; ce qui apporte une méthodologie fiable pour optimiser la conception des isolateurs. En outre, cette approche peut être étendue de manière efficace à l'étude de différents isolateurs de haute tension. La deuxième partie de cette étude expérimentale destinée à des fins de diagnostic sur un isolateur en porcelaine nous a permis de mettre en évidence les caractéristiques de chaque étape d'évolution du courant de fuite. On a montré que l'analyse de l'angle de déphasage du courant de fuite est un indicateur important pour la prévision de l'état de surface humide. D'ailleurs, la variation de la 3ème harmonique par rapport à la composante fondamentale est remarquable avec l'activité de décharge sur la surface d'isolateur. La déviation standard multi-résolution STD-MRA obtenue par la transformée en ondelettes des détails semble très prometteuse pour prévenir les décharges ; ce qui peut être considéré comme indicateur pour entamer la maintenance par le lavage d'isolation. Cette étude apporte des informations utiles sur les étapes d'évolution du courant de fuite sur la surface d'un isolateur pollué et sera étendue pour des applications de diagnostic.

Comme perspectives à ce travail, il nous paraît important de développer les points suivants :

- quantifier l'influence de la température et de l'humidité sur le développement du courant de fuite pour différentes formes d'isolateurs pour construire un système de diagnostic plus fiable.

- valider notre approche d'une forme d'isolateur amélioré en réalisant un prototype. Ceci permettra d'enrichir les connaissances et les techniques statistiques utilisées dans le dimensionnement et la conception des isolateurs.
- Il serait souhaitable d'approfondir l'étude par la méthode des plans d'expériences des effets et des interactions entre d'autres facteurs qui peuvent influencer sur le comportement des isolateurs en présence de pollution.
- contribuer au développement d'un modèle explicatif de résultats de tension de contournement obtenu en utilisant la simulation par la méthode d'éléments finis et les théories des circuits électriques.

Références

Références

- [1] Cigré technical brochure n°158, Working Group 33.13, "Polluted insulators: A Review of Current Knowledge", June 2000.
- [2] R. Gorur, R. Olsen "Prediction of Flashover Voltage of Insulators Using Low Voltage Surface Resistance Measurement" Power System Engineering Research Center, Final Project Report, Arizona State University, 2006.
- [3] Z. Sahli, A. Mekhaldi, R. Boudissa, and S. Boudrahem, "Prediction parameters of dimensioning of insulators under non-uniform contaminated conditions by multiple regression analysis," *Electrical Power System Research.*, vol. 81, no. 4, pp. 821–829, 2011.
- [4] R. Wilkins, "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films," *Proc. IEE*, vol. 116, no. 3, pp. 457–465, 1969.
- [5] B. F. Hampton, "Flashover mechanism of polluted insulation," *Proc. IEE*, Vol. 111, no. 5, pp. 985–990, 1964.
- [6] Z. Aydogmus and M. Cebeci, "A New Flashover Dynamic Model of Polluted HV Insulators," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 11, no. 4, pp. 577–584, 2004.
- [7] N. Dhahbi-Megrache and A. Beroual, " flashover dynamic model of polluted Insulators under ac Voltage," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, no. 2, pp. 283–289, 2000.
- [8] L. Bo and R. S. Gorur, "Modeling Flashover of Outdoor insulators under Cotaminated Conditions with Dry Bands and Arcing" , *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* , vol. 19, no. 3, pp. 1037-1043, 2012.
- [9] A.Haddad and D. Warne "Advances in High Voltage Engineering", IET Power and Energy Series 40 Advances, London, United kingdom, 2007.
- [10] L. Alston, S. Zoledziowsky, "Growth of discharges of polluted insulation, *Proceedings of IEEE*, vol. 110, pp.1260-1266, 1963.
- [11] E. C. Salthouse, "Initiation of dry bands on polluted insulation," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 115, pp. 1707-1712, 1968.
- [12] A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia, A. Beroual "Flashover of discontinuous pollution layer on high voltage insulators", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 6, pp. 900-906, 1999.

-
- [13] M. Tegar, A. Mekhaldi, A. Boubakeur, "Algorithm for HV insulator flashover under discontinuous pollution", *Archives of Electrical Engineering*, vol. LI, n° 2, pp. 119-136, 2002.
- [14] M.A. Slama "Étude expérimentale et modélisation de l'influence de la constitution chimique et de la répartition de la pollution sur le contournement des isolateurs haute", Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2011.
- [15] Y. Mizuno, H. Kusada and K. Naito, "Effect of Climatic Conditions on Contamination Flashover Voltage of Insulators", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 4, No. 3, pp. 286-289, 1997.
- [16] A.S. Ahmad, P.S. Ghosh, S. Shahnawaz Ahmed, S.A.K. Aljunid, "Assessment of ESDD on high-voltage insulators using artificial neural network", *Electrical Power System Research*, Vol. 72, no. 2, pp. 131-136, 2004.
- [17] M.A. Douar, A. Mekhaldi, and M. C. Bouzidi, "Flashover process and frequency analysis of the leakage current on insulator model under non-uniform pollution conditions," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 4, pp. 1284-1297, 2010.
- [18] M. E. Slama, A. Beroual, and H. Hadi, "Influence of the Linear Non-uniformity of Pollution Layer on the Insulator Flashover under Impulse Voltage - Estimation of the Effective Pollution Thickness," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 2, pp. 384-392, 2011.
- [19] R. Boudissa, A. Bayadi, and R. Baersch, "Effect of pollution distribution class on insulators flashover under AC voltage," *Electrical Power System Research*, vol. 104, pp. 176-182, 2013.
- [20] R. Sundararajan R. S. Gorur, "Dynamic arc modelling of pollution flashover of insulators under DC voltage", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 28, no. 2, pp. 209-218, 1993.
- [21] F. Aouabed, A. Bayadi, S. Satta, and R. Boudissa, "Conductivity Effect On The Flashover Voltage Of Polluted Polymeric Insulator Under AC Voltage," *Universities power engineering conference UPEC*, Cardiff, Wales, 2010.
- [22] R. Boudissa, S. Djafri, and R. Belaicha, "Effect of Insulator Shape on Surface Discharges and Flashover under Polluted Conditions", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 3, pp. 429-437, 2005.
- [23] H. Terrab and A. Bayadi, "Experimental Study Using Design of Experiment of Pollution Layer Effect on Insulator Performance Taking into Account the Presence of Dry Bands," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 21, No. 6; pp. 2486- 2495, December 2014.

-
- [24] M. Akizuki, O. Fujii, S. Ito, T. Irie, and S. Nishimura, "A Study on Anti-contamination Design of Suspension Insulators – A Stress Grading Insulator," Power engineering summer meeting, pp. 300–307, Chicago, USA, 2002.
- [25] Z. Jian-bo, G. A. O. Bo, and Z. Qiao-gen, "Dry Band Formation and Its Influence on Electric Field Distribution along Polluted Insulator," Power and energy engineering conference, pp. 10–14, Chengdu, 2010.
- [26] F. Bologna, J. Reynders, and A. Britten, "Corona Discharge Activity On A String Of Glass Cap-And-Pin Insulators Under Conditions Of light wetting, light non-uniform contamination," IEEE power tech conference, Vol. 3, pp. 23–26, Bologna, Italy, 2003.
- [27] S. Venkataraman and R. S. Gorur, "Prediction of Flashover Voltage of Non-ceramic Insulators Under Contaminated Conditions," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, no. 4, pp. 862–869, 2006.
- [28] S. Venkataraman and R. S. Gorur, "Non Linear Regression Model to Predict Flashover of Non ceramic Insulators" Power Symposium, pp. 663–666, Carbondale, USA, 2006.
- [29] E.A. Solomonik, N. N. Tikhodeev, S. Member, L. L.Vladimirsky, and I. Gutman, "Methods of Statistical Dimensioning of the Outdoor Insulation with Respect to Polluted Conditions," IEEE Power tech conference, Petersburg, Russia, 2007.
- [30] H. Streubel, "The Influence of Non-uniform Contamination on the Flashover Voltage of Insulators", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-10, Athènes, September 1983.
- [31] M. Tegar, "Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro-géométriques", Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, Algérie, 2003.
- [32] J. Danis, «A Stochastic Pollution Flashover Model», 4e International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-12, Athens, September 1983.
- [33] S. Diampeni Kimbakala, "Modélisation dynamique des décharges se propageant sur de surfaces isolantes polluées avec des dépôts discontinus sous différentes formes de tension", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2007.
- [34] A. M. Rahal, "Sur les Mécanismes Physiques du Contournement des Isolateurs Haute Tension", Thèse de Doctorat en Sciences Physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1979.
- [35] S. Flazi, "Étude du contournement électrique des isolateurs HT pollués. Critères d'élongation de la décharge et dynamique du phénomène", Thèse de doctorat en Sciences Physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1987.

-
- [36] W. Sima, Q. Yang, G. Ma and C. Jiang "Experiments and Analysis of Sand Dust Flashover of the Flat Plate Model", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, No. 2; pp. 572-581, April 2010.
- [37] R. Wilkins and A. A. J. Al-Baghdadi, "Arc Propagation Along an Electrolyte Surface", Proc IEE, Vol. 118, no. 12, pp. 1886-1894, 1971.
- [38] Z. Renyu and G. Zhicheng, "A Study on the Difference between the Flashover Voltages of Contaminated Insulators under AC and DC Voltage", IEEE Trans, pp. 332-334, 1985.
- [39] Z. Sahli " Etude du mécanisme de contournement de surfaces isolantes polluées sous tension continue", Thèse de doctorat, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, Algérie, 2011.
- [40] P. S. Ghosh and N. Chatterjee, "Polluted Insulator Flashover Model for AC Voltage", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, no. 1, pp. 128-136, 1995.
- [41] R. Matsuoka, K. Kondo, K. Naito and M. Ishii, "Influence of Non Soluble Contaminants on the Flashover Voltage of Artificially Contaminated Insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, no. 1, pp. 420-430, 1996.
- [42] G. Pyrène and A. M. Rahal, C. Huraux, "Flashover of a Liquid Conducting Film, part 2: Time to Flashover-Mechanisms", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, no. 1, pp. 10-19, 1982.
- [43] R. Sundararajun and R. S. Gorur, "Role of Non Soluble Contaminants on the Flashover Voltage of Porcelain Insulators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, no. 1, pp. 113-118, 1996.
- [44] Cigré technical brochure n°518, Working Group C4.303 "Outdoor insulation in polluted conditions: guidelines for selection and dimensioning", December 2012.
- [45] G. Montoya, I. Ramirez and J. I. Montoya, "Correlation Among ESDD, NSDD and Leakage Current in Distribution insulators", IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, vol. 151, no. 3, pp. 334-340, 2004.
- [46] X. Jiang, S. Wang, Z. Zhang, . Hu et Q. Hu "Investigation of Flashover Voltage and Non-uniform Pollution Correction Coefficient of Short Samples of Composite Insulator Intended for $\pm 800\text{kV}$ UHVDC" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 1, pp. 71-80, 2010.
- [47] Z. Zhang, X. Jiang, H. Huang, C. Sun, J. Hu, et D. Gao.; "Study on the Wetting Process and Its Influencing Factors of Pollution Deposited on Different Insulators Based on Leakage Current", IEEE Transactions on Power Delivery, , vol. 28, no. 2, pp. 678-685, 2013.

-
- [48] LeRoy et Cie, « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions », Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, Paris, 1984.
- [49] A.C. Baker, L.E Zaffanella, L.D. Anzivino, H.M. Schneider, J.H. Moran, "A comparison of HVAC and HVDC contamination performance of station post insulators" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, no. 2, pp 1486 – 1491, 1989
- [50] R. Chaarani, " étude de l'influence des caractéristiques des isolateurs sur leurs performances électriques dans des conditions de givrage", thèse de doctorat, Université du Quebec, Canada, 2003.
- [51] O. E. Gouda and A. El-Mershedy, "Factors Affecting the Dry Band Formation on Energized Polluted Insulators", 5th International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, Germany, 1987.
- [52] S. Gopal and Y. N. Rao, "Initiation and Growth of Dry band on Polluted Insulator Surfaces", 5th International Symposium on High Voltage Engineering, paper. 5207, Braunschweig, Germany, 1987.
- [53] B. C. Gellert, J. K. Rasmussen et al, "Finite Element Modelling of Dry Zone Formation on Polluted Outdoor HV Insulators", 6th International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, USA, 1989.
- [54] CEI 60815: "Selection and dimensioning of high-voltage insulators for polluted conditions – part I: definitions, information and general principles", 2004.
- [55] L. E. Zaffanella, H. M. Schneider, J. H. Dunlap, «Performances des Isolateurs Pollués pour Lignes CCHT », Cigré rapport 33-05, 1986.
- [56] P. J. Lambeth, H. Auxel, M. P. Verma, «Méthodes de mesure de la sévérité de la pollution naturelle et son influence sur le comportement des isolateurs à HT», Electra, n° 20, 1972.
- [57] Cigré technical brochure n°361, Working Group C4.303 "Outdoor insulation in polluted conditions: Guidelines for selection and dimensioning", June 2008.
- [58] S. Chandrasekar, C. Kalaivanan, A. Cavallini and G.C. Montanari, "Investigations on Leakage Current and Phase Angle Characteristics of Porcelain and Polymeric Insulator Under Contaminated Conditions", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.16, no.2, pp. 574-583, 2009.
- [59] R. Sarathi, S. Chandrasekar, "Diagnostic study of the surface condition of the insulation structure using wavelet transform and neural networks", Electrical Power System Research. Vol. 68, pp. 137-147, 2003.

-
- [60] F. Meghnefi, C. Volat et M. Farzaneh «Temporal and Frequency Analysis of the Leakage Current of a Station Post Insulator during Ice Accretion», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, no. 6; pp 1-6, 2007.
- [61] B. Moula, “ Diagnostic des isolateurs haute tension sous tension alternative 50Hz”, Thèse de Doctorat d’Etat, Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, Algérie, 2014.
- [62] A. Cavallini, S. Chandrasekar and G.C. Montanari, “Inferring Ceramic Insulator Pollution by an Innovative Approach Resorting to PD Detection IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. vol. 14, no. 1; February 2007
- [63] S. Chandrasekar, C. Kalaivanan, G. C. Montanari and A. Cavallini, “Partial Discharge Detection as a Tool to Infer Pollution Severity of Polymeric Insulators”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 1, pp. 181-188, 2010.
- [64] I. Y. Shurrab, A. El-Hag, K. Assaleh and R. Ghunem, "Partial Discharge On-Line Monitoring of Outdoor Insulators", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 391-394, San Juan, Porto Rico , 2012.
- [65] R. Znaidi “Pollution Test Station: An Optimizing Tool for Selection & Live Washing of Conditions Insulators In Polluted” 1^{er} workshop sur la pollution des isolateurs des réseaux électriques, Oran , Algerie, 2013.
- [66] IEC 60507, “Artificial pollution test on high-voltage insulators to be used in high-voltage systems”, 1991.
- [67] IEC 60600-1 “International Standard, High-voltage testing techniques” second edition, 1989.
- [68] J. Goupy, “Les plans d'expériences”, Revue Modulad, No.34, pp. 74-116, 2006.
- [69] J. Goupy, “Plans d’expériences pour surfaces de réponse”, 3^{eme} édition, Dunod. Paris, 1999.
- [70] D. C. Montgomery, “Design and analysis of experiments”, 6^{eme} édition, Wiley, New York, 2004.
- [71] I. Stathoplos, “Study of the dielectric behaviour of non-uniformly polluted insulators,” international Symposium on high Voltage Engineering, pp. 4-7, Rotterdam, Netherlands, 2003.
- [72] G. Karady, “The effect of fog parameters on the testing of artificially contaminated insulators in a fog chamber,” IEEE Transaction on Power Application System, vol. 94, no. 2, pp. 378-387, 1975.

-
- [73] T. Suda, "Frequency characteristics of leakage current waveforms of an artificially polluted suspension insulator", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol.8, no. 4, pp.705-709, 2001.
- [74] Jingyan Li, Wenxia Sima, Caixin Sun, and S.A. Sebo, "Use of Leakage Currents of Insulators to Determine the Stage Characteristics of the Flashover Process and Contamination Level Prediction", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, no. 2, 2010
- [75] F. Kawa, M.J. Chavez, T. Orbeck and C. Lumb, "Practical PCA- DA system for measurements of leakage current pulses on polymer insulators under wet contaminated conditions", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 8, no. 2, pp. 5-13, 1992.
- [76] B. S. Reddy, G.R. Nagabhushana, "Study of leakage current behavior on artificially polluted surface of ceramic insulator", Plasma Science Technology, Vol 5. No. 4, pp. 1921-1926. 2003
- [77] J. H. Kim, W.C. Song, J.H. Lee, Y.K. Park, H.G. Cho, Y.S. Yoo, K.J. Yang, "Leakage current monitoring and outdoor degradation of silicone rubber", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 8, no. 6, pp.1108-1115. 2001
- [78] K. Karpagavani and A. Kumaravel "Fuzzy Data Mining as a Tool to Infer Pollution Severity of Power Transmission Line System", Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 79-87. 2013
- [79] A. Cavallini, G. C. Montanari, S. Chandrasekar and F. Puletti "A Novel Approach for the Inference of Insulator Insulator Pollution Severity", IEEE International Symposium Electrical Insulation, pp. 114-117, Toronto, Canada, 2006.
- [80] A.H. El-Hag, S.H. Jayaram, E.A. Cherney, "Fundamental and low frequency harmonic components of leakage current as a diagnostic tool to study aging of RTV and HTV silicone rubber in salt-fog", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 10, no. 1, pp. 128-136, 2003
- [81] Suwarno, « Leakage Current Waveforms of Outdoor Polymeric Insulators and Possibility of Application for Diagnostics of Insulator Conditions», Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 114-119, 2006
- [82] X. Jiang, Y. Shi, et Z. Zhijing, «Evaluating the Safety Condition of Porcelain Insulators by the Time and Frequency Characteristics of LC Based on Artificial Pollution Tests», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, No. 2; pp 1-7, 2010.
- [83] H.H. Kordkheili, H. Abravesh, M. Tabasi, M. Dakhem, and M.M. Abravesh "Determining the probability of flashover occurrence in composite insulators by using leakage current harmonic components", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, No. 2, pp. 502-512, 2010.

- [84] C. Muniraj†, K.Krishnamoorthi and S.Chandrasekar, “Investigation on Flashover Development Mechanism of Polymeric Insulators by Time Frequency Analysis” Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 8, No. 6, pp. 1503-1511, 2013
- [85] C. Muniraj, S. Chandrasekar, “Adaptive neuro-fuzzy inference system for monitoring the surface condition of polymeric insulators using harmonic content” IET Generation, Transmission and Distribution., , Vol. 5, no. 7, pp. 751–759, 2011
- [86] S. Chandrasekar, C. Kalaivanan and S. Karthikeyan” Study on Pollution Severity of Porcelain Insulators Using LC and Phase Angle Measurement” Third International Conference on Industrial and Information Systems, December 8 -10, Kharagpur, India, 2008
- [87] B. Moula, A. Mekhaldi, M. Tegar and A. Haddad, “Characterization of Discharges on non-Uniformly Polluted Glass Surfaces Using a Wavelet Transform Approach” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20, No. 4, pp. 1457-1466, 2013

ملخص

أداء العوازل الجهد العالي هو العامل الرئيسي في تحديد موثوقية شبكات الطاقة الكهربائية. العوازل يجب أن تتحمل ليس فقط جهد التشغيل العادي، ولكن أيضا يجب تمنع ظهور القوس الكهربائي. الانخفاض في أداء العازل يتأثر أساسا بتوضع التلوث الجوي على سطحه. الجزء الأول من هذا العمل خصص لدراسة تأثير تلوث الهواء على أداء عوازل الجهد العالي المستخدمة في شبكات نقل الكهرباء. إذ يقدم دراسة تجريبية لاحتمال العازل الملوث وفقا لخصائص طبقة التلوث مثل: الناقلية، طول الطبقة، الموضع وعدد وعرض المناطق الجافة. يتم دراسة العديد من توزيعات التلوث باستخدام منهجية التصميم التجريبي. وقد تم دراسة الآثار المترتبة على المعاملات وتفاعلاتهم وتقييمها عن طريق تقنية التحليل الإحصائي. النتائج أظهرت كيف يتأثر توتر الاحاطة الكهربائية لسطح غير منتظم التلوث أساسا بطول الطبقة وناقلتها. المعلومات التي تم الحصول عليها يمكن استخدامها لتحسين تصميم العوازل المستخدمة في المناطق الملوثة، من خلال تطوير تصميم مناسب لإنشاء عدة مناطق جافة و واسعة في وسط العازل الجزء الثاني من هذا العمل التجريبي يهدف إلى فهم مراحل تطور تيار التسرب على سطح عازل الخزفي. النتائج أثبتت أن تحليل زاوية الطور بين الجهد المطبق و تيار التسرب، و التغير في نسبة المركبة التوافقية الثالثة إلى المركبة الأساسية والانحراف المعياري التي حصل عليه عن طريقة الموجات. هذه المؤشرات تبدو جد واعدة للتنبؤ في وقت مبكر بمرحلة الترطيب وبداية المرحلة الأولى من حدوث التفريعات الكهربائية عبر السطح، ويمكن استخدام هذه المؤشرات لإطلاق الصيانة الوقائية عن طريق غسل العازل. وتقدم هذه الدراسة معلومات مفيدة عن مراحل تطور خصائص التسرب الحالي على سطح العوازل الملوثة وستممت إلى تطبيقات التشخيص.

الكلمات المفتاحية: العوازل, القوس الكهربائي, التلوث, تيار التسرب, التشخيص

Abstract

The performance of HV outdoor insulators is a key factor in the determination of power systems reliability. The insulators not only must withstand normal operating voltage, but also must avoid flashovers from occurring. The reduction of its performance is mainly affected by the pollution contamination deposits from air-borne. The first part of this work is aimed to investigate the atmospheric contamination effect on the performance of high voltage outdoor insulators used in electrical network. It presents an experimental study of the flashover voltage of polluted insulator as a function of pollution layer parameters such as; conductivity, layer length, position, number and width of dry bands. Many configurations of pollution distribution are studied using design of experiment methodology. Parameters effects and their interactions have been investigated and evaluated using ANOVA variance analysis statistical technique. Results show how much the flashover voltage of non-uniformly polluted surface is mainly influenced by length of contamination layer and conductivity. The obtained information can be exploited to optimize the design of glass insulator used in polluted areas, by making suitable design to create much and wider dry bands in the middle of the insulator surface. The second part of this Experimental study is aimed to understand the LC evolution stages prior to flashover on the surface of real porcelain insulator. It was shown that the LC phase angle analysis is useful indicator for the wetness surface prediction. Moreover, 3rd harmonic components variation is remarkable with the discharge activity on the insulator surface. STD-MRA using DWT for details component seems very promising to predict the early signs of dry band arcing as an indication for insulation washing. This study brings interesting information about LC evolution stages of polluted insulator and it will be extended for diagnosis applications.

Key words: Insulators, flashover, pollution, leakage current, diagnostic

Résumé

La performance des isolateurs de haute tension est un facteur principal dans la détermination de la fiabilité des systèmes d'énergie électrique. Les isolateurs ne doivent pas seulement résister à la tension normale de service, mais également doivent éviter l'apparition du contournement. La réduction de sa performance est principalement affectée par les dépôts de contamination atmosphérique à sa surface. La première partie de ce travail est consacré pour investir l'effet de pollution atmosphérique sur la performance des isolateurs de haute tension utilisés dans le réseau électrique. Il présente une étude expérimentale de la tension de contournement de l'isolateur pollué en fonction des caractéristiques de la couche de pollution comme ; la conductivité, la longueur de couche, la position, le nombre et la largeur des bandes sèches. Plusieurs configurations de pollution sont étudiées en utilisant la méthodologie des plans d'expérience. Les effets de paramètres et leurs interactions ont été étudiés et évalués par la technique statistique d'analyse des variances ANOVA. Les résultats montrent combien la tension de contournement de la surface non-uniformément polluée est principalement influencée par longueur de la couche et de la conductivité de pollution. Les informations obtenues peuvent être exploitées pour optimiser la conception des isolateurs utilisés dans des régions polluées, en envisageant une conception appropriée pour créer plusieurs bandes sèches larges au milieu de l'isolateur. La deuxième partie de ce travail expérimental a pour but de comprendre les étapes d'évolution du courant de fuite sur la surface d'un isolateur réel en porcelaine. Cette partie nous a démontré que l'analyse de l'angle de déphasage du courant de fuite, la variation de la 3^{ème} harmonique par rapport à la composante fondamentale et la déviation standard multi-résolution STD-MRA obtenue par la transformée en ondelette des détails semblent très prometteuses pour prévoir précocement la phase d'humidification et la phase d'apparition des premières décharges à travers la surface, ces indicateurs peuvent être utilisés pour lancer la maintenance préventive par lavage d'isolation. Cette étude apporte des informations utiles sur les étapes d'évolution des caractéristiques du courant de fuite sur la surface d'un isolateur pollué et sera étendue pour des applications de diagnostic.

Mots clés : isolateur, contournement, pollution, courant de fuite, diagnostic.

