

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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Électrotechnique
Laboratoire de Recherche en Électrotechnique

Thèse de Doctorat es Sciences en Électrotechnique

Présenté par :

Belkacem MOULA

Magister en Électrotechnique de l'ENP

Thème

*Diagnostic des isolateurs haute tension sous
tension alternative 50Hz*

Président :	BOUBAKEUR Ahmed	Professeur ENP
Rapporteur :	MEKHALDI Abdelouaheb	Professeur ENP
Examineurs :	SAIDI AMROUN Nadia	Professeur USTHB
	MOULAI Hocine	Professeur USTHB
	BAYADI Abdelhafid	Professeur UFA Sétif 1
Invités :	HADDAD Abderrahman	Professeur U. Cardiff UK
	TEGUAR Madjid	Professeur ENP

ENP 2014

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 Abdelouahab MEKHALDI pour m'avoir guidé, encouragé et conseillé tout au long de ce travail. Ses insignes observations et suggestions ont été d'un grand apport pour l'aboutissement de cette thèse. Mes remerciements vont également au professeur Madjid TEGUAR pour sa gentillesse et ses qualités humaines qu'il a manifestées à mon égard durant la préparation cette thèse. Il a également beaucoup contribué par ses nombreuses remarques et suggestions à améliorer la qualité de mes travaux, j'en suis très reconnaissant.

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

Mes remerciements vont également au professeur Abderrahman HADDAD, pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire, pour les conseils stimulants que j'ai eu l'honneur de recevoir de sa part, pour l'hospitalité dont il a fait preuve envers moi lors des deux séjours que j'ai effectués dans son groupe à Cardiff, et aussi pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de soutenance.

Je remercie chaleureusement Madame SAIDI AMROUN Nadia et Monsieur Hocine MOULAI, Professeurs à l'Université des Sciences et de Technologie Houari Boumédiène (USTHB) ainsi que Monsieur Abdelhafid BAYADI professeur à l'université Ferhat ABBAS de Sétif 1, qui ont bien voulu examiner mon travail et m'honorer de leur participation dans le jury.

Je ne saurais terminer sans remercier mes amis et collègues de l'Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou pour leurs encouragements et leur soutien moral.

« *Merci à tous* »

*A MES TRÈS CHERS PARENTS
A MA SŒUR
A MES FRÈRES
A MES ONCLES
A TOUS MES AMIS (ES) QUI M'AIMENT ET QUI M'APPRÉCIENT
A TOUTES CELLES ET TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS*

« JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL »

Sommaire

Introduction générale.....1

Chapitre I : État de l'art sur le diagnostic des isolateurs pollués

I.1 Introduction.....4

I.2 Détermination de la probabilité d'occurrence d'un contournement des isolateurs composites en utilisant les composantes harmoniques du signal du courant de fuite4

I.3 Evaluation des conditions de sureté des isolateurs en porcelaine en utilisant les caractéristiques temps/fréquence du signal du courant de fuite (LC).....5

I.4 Analyse des décharges partielles pour le diagnostic de l'état de surface des isolateurs en polymères7

I.5 Investigations sur les caractéristiques du signal du courant de fuite des isolateurs en porcelaine et en polymère sous les conditions de pollution.....9

I.6 Analyse du courant de fuite sur un isolateur en porcelaine 20 kV contaminé avec de la poussière de ciment et de la vapeur saline.....11

I.7 Analyse de l'état des isolateurs des lignes aériennes de distribution en utilisant une combinaison des supports vecteurs machines (SVM) et la transformée en ondelettes.....13

I.8 Diagnostic de l'état de surface d'un isolateur en utilisant la transformée en ondelettes et les réseaux de neurones.....15

I.9 Utilisation de la SGWT pour le filtrage des signaux de décharges partielles.....16

I.10 Évaluation de l'état de pollution de l'isolateur en se basant sur le signal du courant de fuite...17

I.11 Distribution du courant de fuite sur la surface d'isolateurs en polymère.....19

I.12 Caractérisation du procédé d'érosion par les méthodes d'analyse temps-fréquence.....20

I.13 Calcul de l'impédance de défaut due aux décharges électriques par la modélisation et l'expérimentation.....22

I.14 Etude de la pollution des isolateurs en céramique par la détection des décharges partielles...24

I.15 Décharges électriques sur un isolateur composite pollué sous 800 kV continue.....25

I.16 Comparaison des performances sous pollution d'un isolateur à long fut et d'un isolateur à disque utilisés en HVDC.....27

I.17 Analyse temporelle et fréquentielle du signal du courant de fuite d'un isolateur recouvert de glace.....28

I.18 Conclusion.....30

Chapitre II : Théories sur le traitement de signal et les méthodes de classifications

II.1 Théories sur la transformée en ondelettes.....	31
II.1.1 Introduction.....	31
II.1.2 Intérêt du diagnostic par la transformée en ondelettes.....	31
II.1.3 Transformée en ondelette continue.....	32
II.1.3.1 Définition.....	32
II.1.3.2 Illustration du changement d'échelle et de la translation.....	33
II.1.3.3 Calcul des coefficients de la CWT.....	33
II.1.4 Transformée en ondelette discrète (DWT).....	34
II.1.4.1 Définition.....	34
II.1.4.2 Expression mathématique.....	34
II.1.4.3 Algorithme de décomposition pyramidale.....	35
II.1.4.4 Choix de l'ondelette analysante.....	35
II.1.5 Décomposition en paquets d'ondelettes.....	36
II.2 Théories sur la technique Récurrent plot (RP).....	38
II.2.1 Introduction.....	38
II.2.2 Théorie du chaos.....	38
II.2.2.1 Origine et définition.....	38
II.2.2.2 L'attracteur de Lorenz.....	39
II.2.3 Systèmes dynamiques.....	39
II.2.3.1 Modèle déterministe, modèle stochastique et modèle chaotique.....	39
II.2.3.2 Espace des phases.....	40
II.2.3.2.1 Construction de Ruelle-Takens (méthode des délais).....	40
II.2.4 Le diagramme de récurrence (RP).....	41
II.2.4.1 Définition.....	41
II.2.4.2 Les structures dans les diagrammes de récurrence.....	41

II.3 Théories sur les supports vecteurs machines.....	43
II.3.1 Introduction.....	43
II.3.2 Principe général.....	44
II.3.2.1 Discrimination linéaire et hyperplan séparateur.....	44
II.3.2.2 Exemple.....	45
II.3.2.3 Construction de l'hyperplan optimal.....	45
II.3.2.3.1 Cas des données linéairement séparables.....	46
II.3.2.3.2 Cas des données non-linéairement séparables.....	48
II.4 Théories sur la méthode Naïve Bayésienne.....	49
II.4.1 Construction d'un classifieur à partir du modèle de probabilités.....	51
II.5 Conclusion.....	51

Chapitre III : Équipements et méthodologies expérimentales

III.1 Introduction.....	52
III.2 Equipements.....	52
III.2.1 Dispositif expérimental.....	52
III.2.2 Isolateurs testés.....	53
III.3 Procédures de test.....	55
III.3.1 Préparation des chaines d'isolateurs et des modèles plans étudiés.....	55
III.3.2 Préparation des solutions polluantes.....	55
III.3.2.1 Modèle plan.....	55
III.3.2.2 Chaîne d'isolateurs réelle.....	56
III.3.3 Méthode d'application de la pollution.....	56
III.3.3.1 Modèle plan.....	56
III.3.3.2 Chaîne d'isolateurs réelle.....	57
III.4 Circuits de mesures.....	58
III.4.1 Mesure de la tension de contournement.....	58
III.4.2 Mesure du courant de fuite et de la charge électrique.....	58

Chapitre IV : Caractérisation des décharges sous pollution non uniforme en utilisant la technique de la transformée en ondelettes

IV.1 Introduction.....	59
IV.2 Résultats expérimentaux et discussions.....	59
IV.2.1 Processus du contournement.....	59
IV.2.1.1 largeurs de bandes propres de 2 et 4 cm.....	59
IV.2.1.2 largeurs de bandes propres allant de 6 à 12 cm.....	62
IV.2.1.3 largeurs de bandes propres de 14 cm.....	64
IV.2.1.4 discussions.....	64
IV.2.2 Etude du courant de fuite.....	65
IV.2.3 Etude de la Charge électrique.....	68
IV.3 Caractérisation des décharges électriques par l'approche (DWT-STD-MRA) appliquée sur le signal du courant de fuite.....	72
IV.3.1 Illustration de la décomposition d'un signal par l'analyse multi-résolution (DWT-MRA).....	72
IV.3.2 En présence de l'effet d'arcs partiels.....	74
IV.3.3 En l'absence de l'effet d'arcs partiels.....	78
IV.3.4 Discussions.....	81
IV.4 Application de la transformée en ondelette continue et la décomposition en paquet d'ondelette pour la prédiction de la sévérité de pollution.....	81
IV.4.1 Prédiction de la sévérité de pollution par la transformée en ondelette continue.....	82
IV.4.2 Prédiction de la sévérité de pollution par la décomposition en paquet d'ondelettes.....	84
IV.5 Conclusion.....	85

Chapitre V : Classification de la sévérité de pollution en utilisant les signaux du courant de fuite

V.1 Introduction.....	87
------------------------------	-----------

V.2 Résultats expérimentaux et discussions.....	87
V.2.1 Etude de la tension de contournement.....	87
V.2.2 Etude du courant de fuite.....	90
V.2.3 Etude de la charge cumulée.....	91
V.3 Détermination de la classe de pollution en se basant sur le signal du courant de fuite.....	93
V.3.1 Traitement des signaux du courant de fuite pour la classification de la sévérité de pollution.....	94
V.3.1.1 Description des vecteurs d'états.....	96
V.3.1.2 Représentation de l'évolution des critères constituant les vecteurs d'état.....	96
V.3.1.2.1 Représentation de l'évolution des deux critères $K_{5/3}$ et $K_{7/5}$.....	96
V.3.1.2.2 Représentation de l'évolution des critères extraits de la décomposition par la transformée en ondelettes.....	98
V.3.1.2.2.1 Evolution de la standard déviation des approximations et des détails du signal du courant de fuite.....	98
V.3.1.2.2.2 Evolution des maximums des approximations et des détails du signal du courant de fuite.....	100
V.3.1.2.2.3 Evolution des minimums des approximations et des détails du signal du courant de fuite.....	101
V.3.2 Validation des modèles.....	102
V.3.2.1 Validation du modèle Naïve Bayésien.....	102
V.3.2.1.1 Avec utilisation des coefficients d'approximations d'ondelettes.....	102
V.3.2.1.2 Avec utilisation des coefficients de détails d'ondelettes.....	102
V.3.2.2 Validation du modèle SVM.....	103
V.3.2.2.1 Avec utilisation des coefficients d'approximations d'ondelettes.....	103
V.3.2.2.2 Avec utilisation des coefficients de détails d'ondelettes.....	104
V.4 Application de la technique Recurrent Plot à l'étude du phénomène de contournement des isolateurs.....	104
V.4.1 La technique RP appliquée directement au signal du courant de fuite.....	105
V.4.2 La technique RP appliquée au détail D1 du signal du courant de fuite.....	105
V.5 Conclusion.....	109

Chapitre VI : Etude expérimentale sur un isolateur réel

VI.1 Introduction.....	110
VI.2 Etude de la tension de contournement.....	110
VI.3 Etude du courant de fuite.....	114
VI.3.1 Résultats obtenus sous pollution uniforme.....	114
VI.3.2 Résultats obtenus sous pollution non-uniforme.....	115
VI.4 Etude de la charge électrique.....	116
VI.4.1 Résultats obtenus sous pollution uniforme.....	116
VI.4.2 Résultats obtenus sous pollution non-uniforme.....	117
VI.5 Etude de l'impédance équivalente vue entre les électrodes.....	118
VI.5.1 Résultats obtenus sous pollution uniforme.....	118
VI.5.2 Résultats obtenus sous pollution non-uniforme.....	120
VI.6 Etude de l'énergie dissipée.....	121
VI.6.1 Résultats obtenus sous pollution uniforme.....	121
VI.6.2 Résultats obtenus sous pollution non-uniforme.....	122
VI.7 Conclusion.....	123
Conclusion générale.....	124

Introduction générale

Les besoins économiques et le bien être des populations font partie aujourd'hui des raisons d'un développement croissant des installations de production, de transport et de transformation de l'énergie électrique. Son approvisionnement provenant des centrales exige l'installation des équipements haute tension permettant l'alimentation des consommateurs. Ces équipements qui sont conçus, réalisés, entretenus et exploités conformément aux normes, prescriptions et directives de sécurité, sont supposés opérer de façon fiable sous des conditions environnementales spécifiques pour lesquelles ils sont prévus. En particulier, les isolateurs, qui représentent relativement un faible pourcentage dans le prix du réseau électrique, constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de celui-ci. Par définition, leur rôle est d'assurer à la fois le support mécanique des parties portées à la haute tension et l'isolation électrique de ces dernières avec les parties mises à la terre.

Or, malgré le rôle fondamental que présentent ces pièces maîtresses dans les réseaux électriques, les isolateurs présentent une vulnérabilité quasi insurmontable. Leur surface est soumise à des contraintes quotidiennes se présentant sous forme d'accumulations de pollutions. En effet, ces dernières d'origine naturelles, industrielles ou bien mixtes, peuvent affecter considérablement les performances diélectriques des isolateurs. Une fois leur rigidité diélectrique affaiblie par ces dépôts, ces isolateurs subissent des contournements électriques pouvant entraîner des interruptions partielles, voire totales, de la distribution de l'énergie électrique. Un contournement électrique se traduit par un court-circuit, entre la partie portée à la H.T et celle mise à la terre, créé par un arc électrique s'établissant généralement à la surface de la couche polluée recouvrant l'isolateur.

Le champ de recherche concernant le contournement électrique des isolateurs n'est pas assez jeune, mais l'intérêt qu'il suscite se fait sentir de plus en plus par les chercheurs. Les différentes étapes conduisant au contournement sont fortement corrélées à la nature, la distribution de la pollution déposée sur la surface isolante ainsi qu'au degré de sévérité de celle-ci. L'objectif principal des nombreuses recherches effectuées est d'assimiler le comportement des décharges électriques durant le processus de contournement. Ceci a imposé aux chercheurs d'effectuer plus d'expériences en laboratoires et in situ, sous des conditions de pollution artificielles ou naturelles, afin de récolter le maximum d'informations à propos du mécanisme. Les méthodes d'essais sur site sont les plus intéressantes toutefois, elles nécessitent plusieurs années pour permettre une étude convenable du comportement de l'isolateur.

Les résultats obtenus concernant cette problématique ont permis de démontrer que le contournement des isolateurs est un processus dynamique fort complexe dont la compréhension passe par l'identification des paramètres qui peuvent l'influencer [1, 2]. Ces recherches auront aussi permis de démontrer que, du fait de la complexité inhérente au comportement de l'arc électrique en présence d'une couche conductrice, il est difficile de prédire le contournement des isolateurs pollués. A ce sujet, il devient nécessaire de développer des méthodes de diagnostic permettant de surveiller l'état de surface de l'isolateur pollué en temps réel. Ce diagnostic, qui sert à estimer la probabilité d'occurrence du contournement, permet également de minimiser les risques de dégradation des surfaces isolantes ainsi que le nombre et la durée des interruptions d'énergie électrique en prévoyant des entretiens imminents.

Les différentes investigations réalisées ont montré que l'évolution du courant de fuite est étroitement liée à celles de l'état de surface polluée et du processus de développement du contournement [3, 4]. Notons également que cette quantité est facile à récupérer continuellement en temps réel [5]. Ainsi la mesure et l'analyse du signal du courant de fuite ont attiré l'attention de beaucoup de chercheurs afin d'établir un bon diagnostic de l'état de surface de l'isolateur pollué [6].

L'humidification du dépôt solide, par un brouillard ou bien des rosées matinales etc., accumulé à la surface des isolateurs provoque la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique, caractéristique du phénomène de pollution. Un courant de fuite prend naissance, conduisant par effet joule à l'échauffement de la couche de pollution et par conséquent à son assèchement partiel, une partie importante de la tension appliquée sera reportée aux bornes de cette bande sèche engendrant, si le champ local dépasse un certain seuil, la création d'un arc électrique. L'activité de ce dernier va engendrer des déformations sur le signal du courant de fuite ainsi que des variations de ces composantes harmoniques [3-5]. Des chercheurs [6, 7] ont étudié les relations entre les caractéristiques fréquentielles du signal du courant de fuite et le degré de sévérité de pollution déposé sur les isolateurs. Il est noté [6] que le contournement total peut très probablement se produire quand le taux de certains harmoniques impaires dépasse un certain seuil. Dans certains travaux [8, 9], le signal du courant de fuite a été étudié par la transformée de Fourier discrète (TFD). Il est toute fois bien connu, que la transformée de Fourier n'est pas un excellent outil pour le traitement de signaux non-stationnaires, par conséquent, beaucoup de chercheurs se sont intéressés aux techniques des transformées en ondelettes. La décomposition du signal du courant de fuite par la transformée en ondelettes discrète (DWT) a été proposée comme un outil efficace pour comprendre les caractéristiques temps-fréquences du signal et d'extraire des informations importantes pour l'identification de l'état de surface d'un isolateur [10]. D'autres travaux d'investigations ont mis en évidence [11] que spécifiquement l'évolution des composantes harmoniques de hautes fréquences est étroitement liée à celle de l'état de surface de l'isolateur.

L'apprentissage supervisé a émergé ces dernières années comme un outil efficace pour la classification dans de nombreux domaines. Les Machines à Vecteurs de Supports (SVM) sont l'une de ces techniques. Elles ont été appliquées à de très nombreux domaines (bioinformatique, recherche d'information, finance) et récemment pour le diagnostic des isolateurs en haute tension. En Inde, les recherches réalisées par V.S.Murthy et al [12], se sont concentrées principalement sur l'application de la transformée en ondelettes basée sur l'extraction des caractéristiques de traitement d'image numérique et les SVM pour l'analyse de l'état de surface des isolateurs. La plus grande contribution de leur travail consiste à calculer les indices d'état pour les isolateurs de haute tension pour surmonter les difficultés liées aux applications de vidéo surveillance.

Afin de déterminer le comportement du contournement des isolateurs pollués de haute tension et à identifier les mécanismes physiques qui régissent ce phénomène, M.Uyar et al [13], ont prédit la tension de contournement des isolateurs en utilisant les machines à vecteurs de supports. A cet effet un ensemble d'apprentissage a été construit pour plusieurs isolateurs avec des géométries différentes. Par ailleurs, un ensemble de deux essais différents est utilisé pour évaluer l'efficacité et la faisabilité de la méthode proposée [13]. Dans cette étude, l'ensemble d'apprentissage a été élaboré à l'aide de la relation entre la tension critique de contournement et les variables d'entrée, telles que la hauteur de l'isolateur, le diamètre de l'isolateur, la longueur de fuite d'un élément de l'isolateur, la conductivité de sa surface et le nombre d'éléments sur une chaîne.

La présente thèse est consacrée au diagnostic de l'état de surface d'un isolateur pollué. Les parties expérimentales élaborées au laboratoire nous permettent d'évaluer et de comparer les différents paramètres électriques pour plusieurs configurations, sévérités et natures de pollution. En outre, des bases de données des signaux correspondantes à toutes ces configurations et sévérités de pollution ont été récupérées. Les signaux enregistrés sont ceux du courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge électrique. Par ailleurs, ces bases de données ont été exploitées afin de prédire le degré de sévérité de pollution déposé sur l'isolateur. Pour se faire, nous avons utilisé des techniques hybrides basées sur des méthodes de

traitement de signal et de classifications. Ce manuscrit comporte six chapitres dont nous décrivons succinctement leur contenu comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art sur les travaux les plus récents consacrés au diagnostic des isolateurs pollués. Ces travaux sont en grande partie basés sur l'étude du signal du courant de fuite avec plusieurs méthodes afin d'en extraire le maximum d'informations sur l'état de surface de l'isolateur considéré. Ils présentent également les méthodologies expérimentales adoptées pour enregistrer le signal du courant de fuite ainsi que leurs résultats d'investigations.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de l'environnement du traitement de signal par la transformée en ondelettes. Nous mettons l'accent sur la théorie de la transformée en ondelettes discrètes dans laquelle nous décrivons les principales idées se rapportant à la représentation temps-échelle ainsi qu'à l'analyse multi-résolution. Ces deux paramètres sont fortement recommandés pour qu'ils soient appliqués au traitement de signal. Par ailleurs, nous nous étalons également, dans ce chapitre, sur la théorie des différentes méthodes de classifications utilisées dans ce manuscrit.

Le troisième chapitre décrit les équipements ainsi que les méthodologies expérimentales adoptées au laboratoire de haute tension pour mener à bien les essais expérimentaux.

Nous nous intéressons dans le quatrième chapitre à la caractérisation des décharges sous pollution non uniforme en utilisant la technique de la transformée en ondelettes. Nous étudions en premier lieu le comportement diélectrique du modèle plan comportant une seule bande propre. Nous présentons les résultats relatifs à l'évolution du processus de contournement, du courant de fuite ainsi que de la charge électrique en fonction de la configuration et la sévérité de pollution. Par ailleurs, nous procédons à la détection de la présence ou bien l'absence d'arcs partiels à travers la bande propre en utilisant la transformée en ondelettes discrète. Ceci a été réalisé en exploitant le signal du courant de fuite. Nous avons prédit également le degré de sévérité de pollution déposé sur la surface du modèle plan en utilisant d'autres techniques à savoir la décomposition en paquet d'ondelettes ainsi que la représentation en scalogrammes. Ces deux nouvelles techniques qui sont toujours basées sur la transformée en ondelettes ont été appliquées sur le signal de la tension appliquée.

Le cinquième chapitre, quant à lui, portera sur la classification de la sévérité de pollution. Nous étudions le comportement diélectrique d'un modèle plan comportant trois bandes propres. Les résultats d'essais obtenus concernant l'évolution de la tension de contournement, du courant de fuite et de la charge cumulée pour différentes conductivités et pour trois concentrations en kaolin distinctes sont présentés. Nous procédons par la suite aux traitements des signaux du courant de fuite afin d'extraire le maximum de paramètres qui permettront l'entraînement des modèles classificateurs (SVM, Naive bayésienne). Enfin, nous présentons les résultats de classification obtenus et nous comparons les performances de ces classificateurs afin d'en tirer le plus efficace pour le diagnostic de l'état de surface des isolateurs pollués. Par ailleurs, dans le même chapitre, nous appliquons la technique recurrent plot (RP) sur le signal du courant de fuite pour prédire le comportement des décharges électriques durant le processus de contournement

Dans le sixième et dernier chapitre, nous allons nous baser sur les résultats d'essais expérimentaux effectués sur des chaînes d'isolateurs réelles afin de mettre en évidence le type de pollution ainsi que la configuration de pollution les plus sévères.

Enfin, nous terminons ce manuscrit par des conclusions générales ainsi que des recommandations pour des travaux futurs.

Chapitre I

État de l'art sur le diagnostic des isolateurs pollués

I-1 Introduction

Les isolateurs de type extérieurs sont soumis à diverses contraintes d'exploitations et d'environnement. La contamination de la surface des isolateurs constitue l'un des facteurs majeurs qui augmente la probabilité du contournement. Au cours des deux dernières décennies, une variété de techniques se basant sur le traitement du signal du courant de fuite a été proposée afin de suivre le comportement de l'isolateur pollué en temps réel. Parmi ces techniques, nous citons la transformée de Fourier, la transformée en ondelette, la technique récurrent plot et d'autres. Des méthodes d'apprentissage supervisé ont été également exploitées par plusieurs chercheurs dans le but de prédire le degré de sévérité de la pollution déposée sur la surface des isolateurs. Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des plus récents travaux portant sur la pollution ainsi que le diagnostic des isolateurs pollués. Ces investigations sont basées pour la plupart des chercheurs sur la décomposition du signal du courant de fuite. En effet, ce dernier procure des informations capitales sur l'état de surface des isolateurs pollués.

I-2 Détermination de la probabilité d'occurrence d'un contournement des isolateurs composites en utilisant les composantes harmoniques du signal du courant de fuite

H. H. Kordkheili et al [14] ont proposé une nouvelle méthode pour prédire le contournement des isolateurs type Caoutchouc de Silicium (Silicon Rubber (SIR)) et sa probabilité d'occurrence en analysant les composantes harmoniques du signal du courant de fuite. Les essais ont été effectués sur des échantillons d'isolateurs pollués avec différents profils (Figure I.1-Tableau I.1).

Isolateur N°	1	2	3	4	5
Tension nominale (kV)	33	24	24	24	24
Longueur de la chaîne d'isolateurs (mm)	720	520	520	449	449
Ligne de fuite (mm)	1070	770	590	674	630

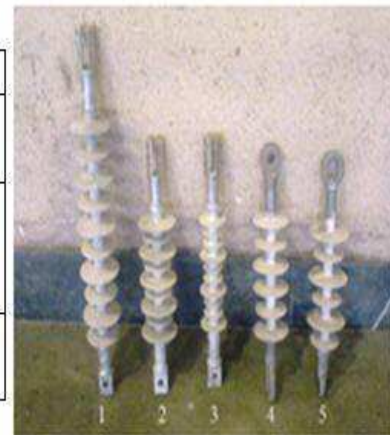


Tableau I.1 : Caractéristiques des isolateurs

Figure I.1 : Isolateurs testés

Afin de valider leur nouvelle méthode, ces chercheurs ont mesuré le courant de fuite sur les différents isolateurs, pour différents taux d'humidités et pour des niveaux de contamination distincts. Les résultats obtenus pour l'isolateur N°1 sont représentés sur la figure I.2.

H. H. Kordkheili et al [14] ont montré que lorsque l'amplitude de la composante harmonique d'ordre 5 est plus importante que celle d'ordre 3, cela signifie que l'isolateur est propre ou bien très légèrement pollué. Les chercheurs ont aussi observé que si le contournement ne se produit pas au début de l'humidification, alors celui-ci ne se produira pas avec la saturation en humidité. Dans le même travail, les chercheurs ont prouvé que la variation du rapport entre les amplitudes de l'harmonique 5 et 3 est un excellent critère pour juger l'état de surface d'un isolateur donné.

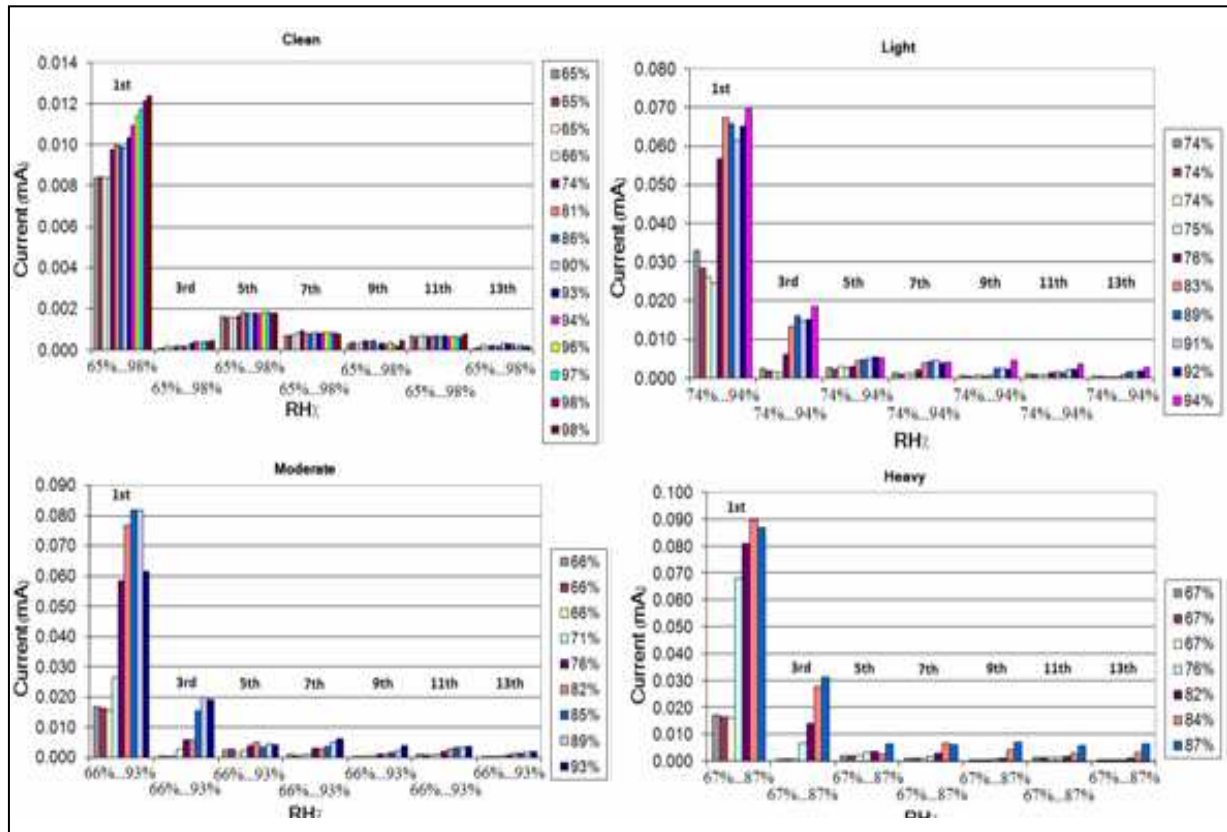


Figure I.2 : Variation de l'amplitude des harmoniques du courant de fuite pour différents taux d'humidités et différents niveaux de contaminations

$$K_{5/3} = \frac{\text{Amplitude de l'harmonique 5}}{\text{Amplitude de l'harmonique 3}} \tag{I.1}$$

D'après les tests effectués dans le même laboratoire, les chercheurs ont remarqué que dans les conditions normales de service, l'index $K_{5/3}$ est supérieur à 100%. Donc, ils concluent que si cette condition est vérifiée, alors le contournement est très lointain. Par ailleurs, ils ont aussi remarqué que pour tous les cas où le contournement se produit, l'index $K_{5/3}$ est inférieur à 30%, alors, ils déduisent que pour reconnaître qu'un isolateur est fortement pollué, la condition $K_{5/3}$ est inférieur à 30%, est une condition nécessaire mais pas suffisante. Ils démontrent que la probabilité d'occurrence du contournement dans ce dernier cas est de 90% [14].

I-3 Evaluation des conditions de sureté des isolateurs en porcelaine en utilisant les caractéristiques temps/fréquence du signal du courant de fuite (LC)

X. Jiang et al [15] ont proposé une nouvelle méthode pour évaluer l'état de surface d'un isolateur de suspension. Dans le cadre de leur étude, ils ont effectué dans un premier temps, un nombre important de tests sur différents isolateurs sous différents taux d'humidité relative de l'air (HR), et différents dépôts de sels équivalents (ESDD). En suite, en se basant sur la banque de donnée, ils ont analysé le signal du courant de fuite (LC) dans les deux domaines temporel et fréquentiel. Ils ont observé que la valeur crête (I_h) du courant de fuite (LC) n'avait aucun rapport avec le ESDD quand l'humidité relative de l'air (HR) est basse,

mais quand HR est importante, I_h augmente avec l'augmentation de l'ESDD. Par ailleurs, l'angle (θ) correspondant au déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée décroît avec la croissance de RH. Enfin, un réseau de neurone artificiel a été développé afin d'évaluer l'état de l'isolateur en se basant sur trois paramètres d'entrés I_h , θ et THD (distorsion harmonique totale).

L'évolution des trois paramètres étudiés par les chercheurs à savoir I_h , θ et THD sont représentés sur les figures ci-dessous.

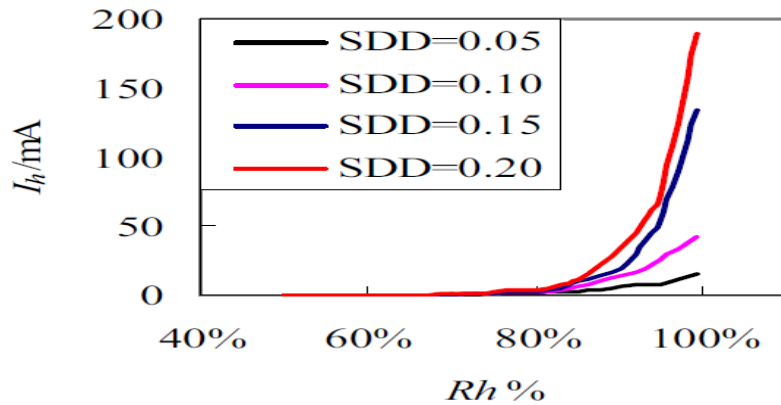


Figure I.3 : Caractéristiques du courant de fuite en fonction de RH et SDD

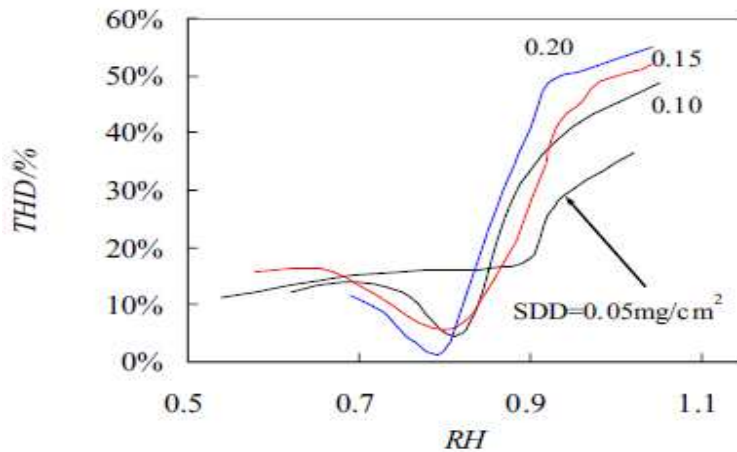


Figure I.4 : Evolution du THD en fonction de l'humidité relative RH pour différentes SDD

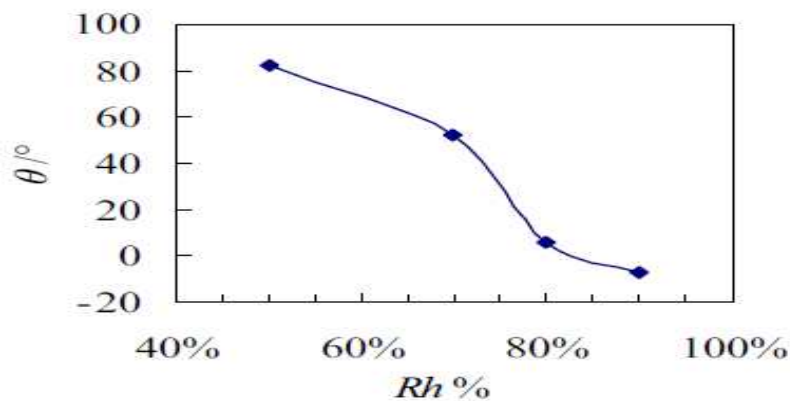


Figure I.5 : Relation entre le déphasage et l'humidité relative

Dans le but de développer un RNA qui évalue l'état de surface d'un isolateur, les auteurs ont utilisé l'ensemble de données obtenues dans leur travail (68 paires entrées-sorties). Ils ont divisé cet ensemble de données en deux groupes, un qui sert d'apprentissage pour le RNA utilisé (60 paires) et l'autre qui sert à valider le modèle du RNA proposé (8 paires). Après entraînement du réseau de neurone par les 60 paires, les auteurs ont appliqué leur modèle sur les 8 paires restantes. Les résultats obtenus concordent et sont en accord à 87% avec les résultats souhaités et concluent que leur méthode peut aisément être appliquée pour le diagnostic des isolateurs de haute tension.

I-4 Analyse des décharges partielles pour le diagnostic de l'état de surface des isolateurs en polymères

Afin d'estimer la sévérité de pollution des isolateurs de ligne, S. Chandrasekar et al [16] ont analysé les décharges partielles sur les isolateurs SIR (Silicon Rubber). Dès lors, des tests sur plusieurs échantillons (figure I.6) sous tension alternative avec différents niveaux de pollution et différentes humidités relatives de l'air (RH) ont été effectués.

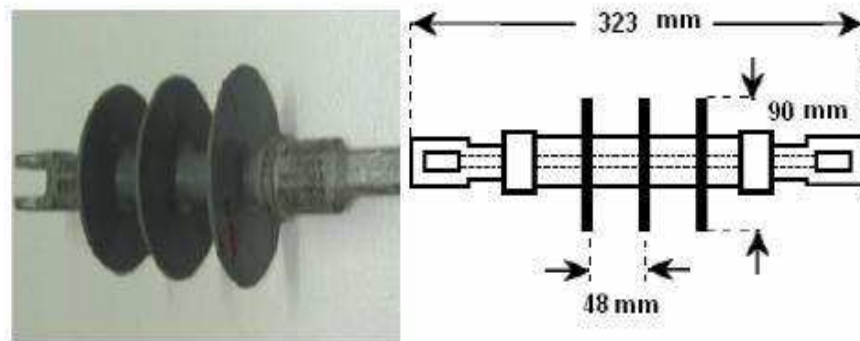


Figure I.6 : Photographie et schéma d'un échantillon SIR 11 kV

Les isolateurs sont suspendus dans une chambre ($1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$) où le brouillard (NaCl) est injecté afin de varier le ESDD en mg/cm^2 de 0.06 à 0.25. Pour cette expérience, le montage utilisé est celui de la figure I.7.

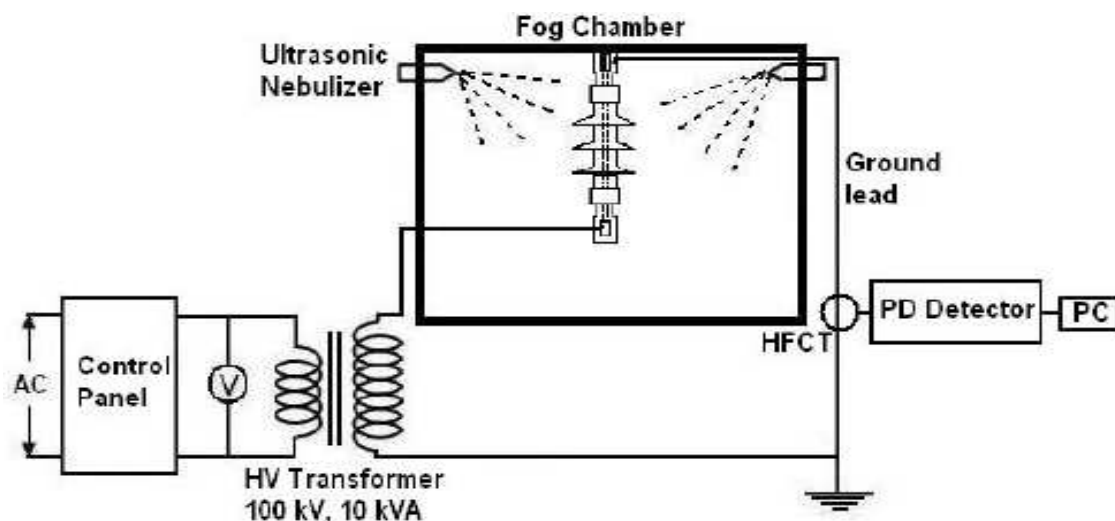


Figure I.7 : Montage expérimental

Plusieurs essais ont été effectués :

- essais sur un isolateur SIR propre, sous différents taux d'humidité relative de l'air (30 à 40%) ;
- essais sur un isolateur SIR (ESDD = 0.08 mg/cm^2 , RH=60 à 100%) ;
- essais sur un isolateur (SIR) à RH=100%, (ESDD varie de 0.06 à 0.25 mg/cm^2).

Pour les isolateurs propres, les auteurs ont noté l'absence de décharges partielles.

Pour un niveau de pollution de 0.08 ESDD , et un taux d'humidité relative allant de 60 à 100% (figure I.8), les auteurs ont observé que :

- l'amplitude des DP augmente avec l'augmentation du RH ;
- pour de faibles RH (60% à 80%), les composantes fréquentielles dominantes du signal DP sont comprises dans la bande 6-25 MHz ;
- pour des valeurs élevées de RH (au-dessus de 90%), les composantes fréquentielles sont comprises dans la bande 2-6 MHz.

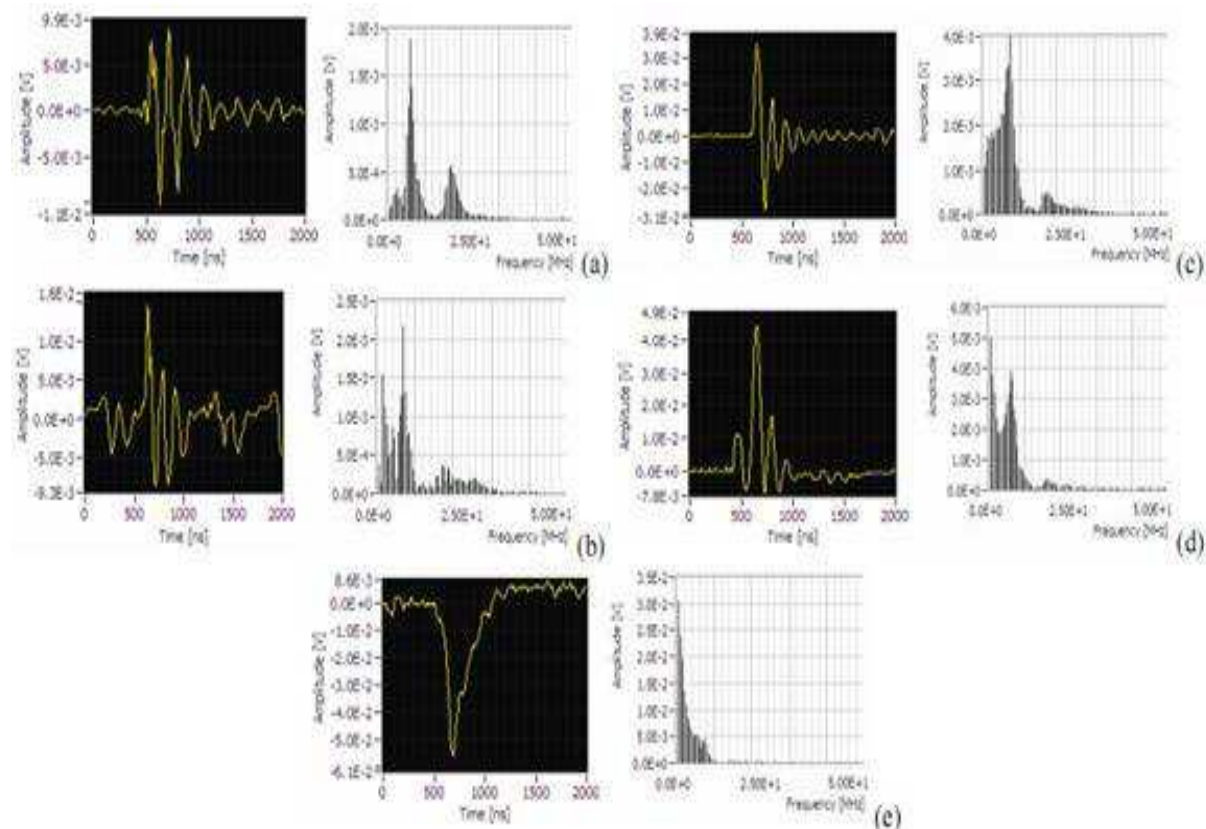


Figure I.8 : Signaux obtenus (représentations temporelles et fréquentielles) des DP à 0.08 ESDD : (a) 60%RH, (b) 70%RH, (c) 80%RH, (d) 90%RH, (e) 100%RH.

Pour un niveau de pollution variant de 0.06 ESDD à 0.25 ESDD avec un RH=100% (figure I.9), les auteurs ont conclu que quand le niveau de pollution augmente :

- les amplitudes des DP augmentent;
- le taux de répétition (apparition de la totalité des DP dans un délai spécifique) diminue ;
- les amplitudes des composantes fréquentielles augmentent dans la bande 1-6 MHz.

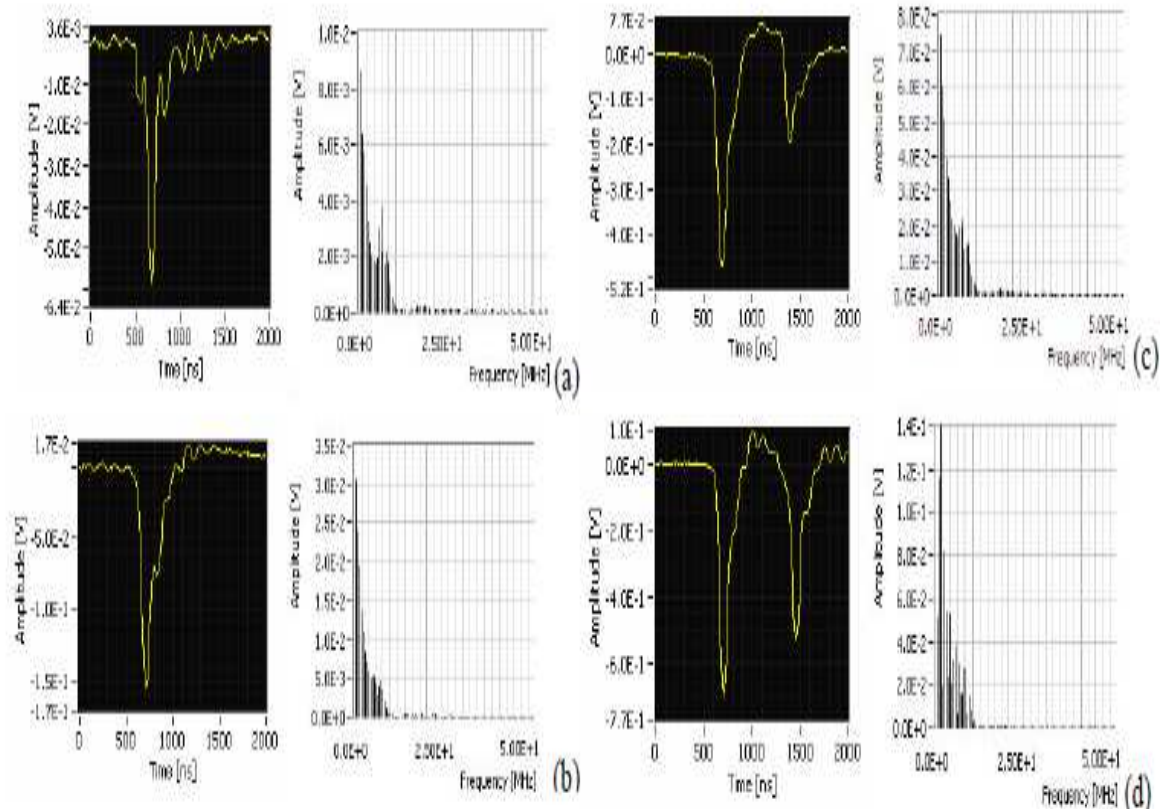


Figure I.9 : Signaux obtenus (représentations temporelles et fréquentielles) des DP pour RH=100% : (a) 0.06 ESDD, (b) 0.08 ESDD, (c) 0.12 ESDD, (d) 0.25 ESDD.

En se basant sur les résultats et les figures obtenues, les auteurs ont conclu qu'à des pollutions élevées, la valeur de l'assymétrie du signal des DP diminue considérablement avec l'augmentation de la pollution. Cependant, ils pensent que l'utilisation de ce paramètre à lui seul ne suffit pas pour le diagnostic de l'état de l'isolateur. Cette étude fut achevée par une analyse statistique, dont les paramètres sont : le paramètre de forme β et la phase moyenne du signal DP, et cela pour différents ESDD et RH. La variation du paramètre β et de la phase moyenne s'avère comme un bon outil pour le diagnostic de la sévérité de la pollution.

I-5 Investigations sur les caractéristiques du signal du courant de fuite des isolateurs en porcelaine et en polymère sous les conditions de pollution

A. Cavallini et al [11] ont consacré leur étude à l'analyse des caractéristiques du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée ainsi que la décomposition du signal du courant de fuite. Leur objectif est de développer un outil très efficace permettant l'identification de la sévérité de pollution des isolateurs de types extérieurs sous tension alternative. La décomposition du signal (LC) en multi résolution (MRSD) ; en utilisant la transformation en ondelettes discrète (DWT), est utilisée pour comprendre les caractéristiques temps- fréquence du signal de courant de fuite. L'analyse spectrale (FFT) de la transformée de Fourier rapide est adoptée pour calculer les valeurs d'angle de phase des signaux de la tension appliquée et du courant de fuite. 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 obtenus par la DWT, STD-MRA (Standard Déviation d'analyse multi résolution) des signaux du courant de fuite.

Le dispositif expérimental est donné par la figure I.10.

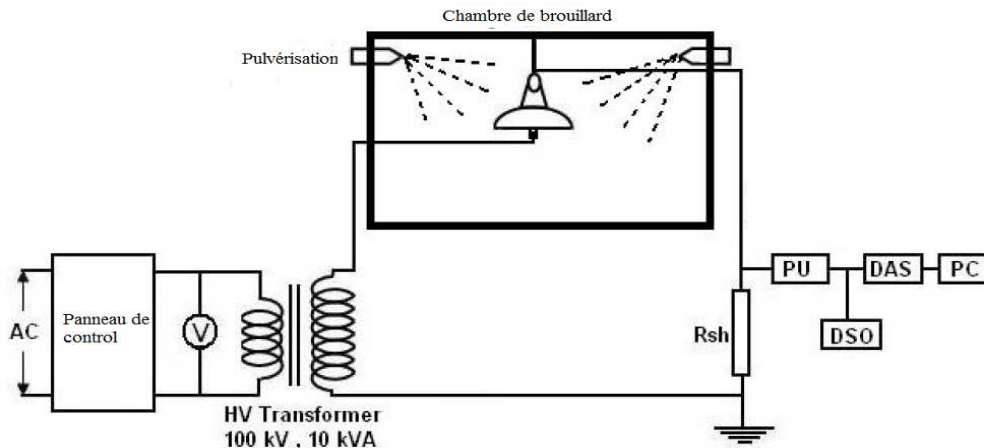


Figure I.10 : Circuit d'essai de l'installation expérimentale

La figure I.11.a montre le signal du courant de fuite obtenu à l'état sec et propre de la surface de l'isolateur et les autres figures I.11.b - I.11.f montrent les signaux du courant de fuite obtenus pour les différents niveaux de pollution utilisés.

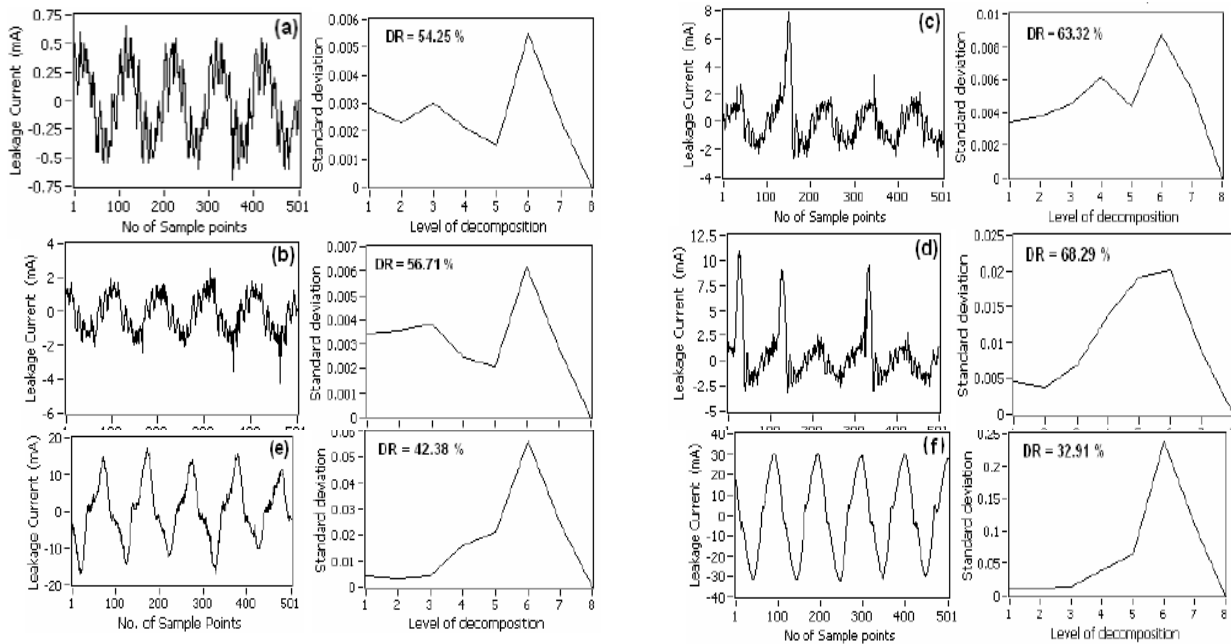


Figure I.11 : Modèles typiques du courant de fuite obtenus pendant la pollution (a) LC pour surface sèche et propre (b) LC pour surface polluée et humidifiée (c, d) décharges de courte durée (e, f) arcs longs et leurs DWT STD-MRA correspondantes.

En présence des décharges, nous constatons que l'amplitude de la composante D5 augmente par rapport aux autres composants de hautes fréquences (figure I.11.d). Ceci confirme que quand la fréquence d'apparition des décharges de courte durée augmente, le composant du troisième harmonique augmente [17, 18]. Par ailleurs, quand il y a formation d'un arc long sur la surface isolante, dû à l'augmentation de la pollution et au taux

d'humidité, une augmentation du composant fondamental du courant de fuite et une réduction des composants de haute fréquence sont observés (figures I.11.e, et I.11.f). La forme du signal du courant de fuite devient presque sinusoïdale avec une amplitude très élevée quand l'isolateur s'approche du contournement (figure I.11.f). Dans ce cas, la plupart des composants de haute fréquence s'annulent. Par conséquent, l'évolution des composants haute fréquence joue un rôle primordial dans la prédiction des phénomènes de contournement imminents.

Le déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite semble être d'une importance capitale car il peut fournir des informations sur l'état de surface de l'isolateur pollué. W. Que et al ont proposé une méthodologie basée sur des mesures du déphasage tension-courant pour estimer la dégradation et le vieillissement de la surface des isolateurs en polymère. D'après l'analyse du graphe ci-dessous (figure I.12), nous pouvons conclure que le déphasage peut clairement distinguer entre les différents niveaux de pollution appliqués à l'isolateur.

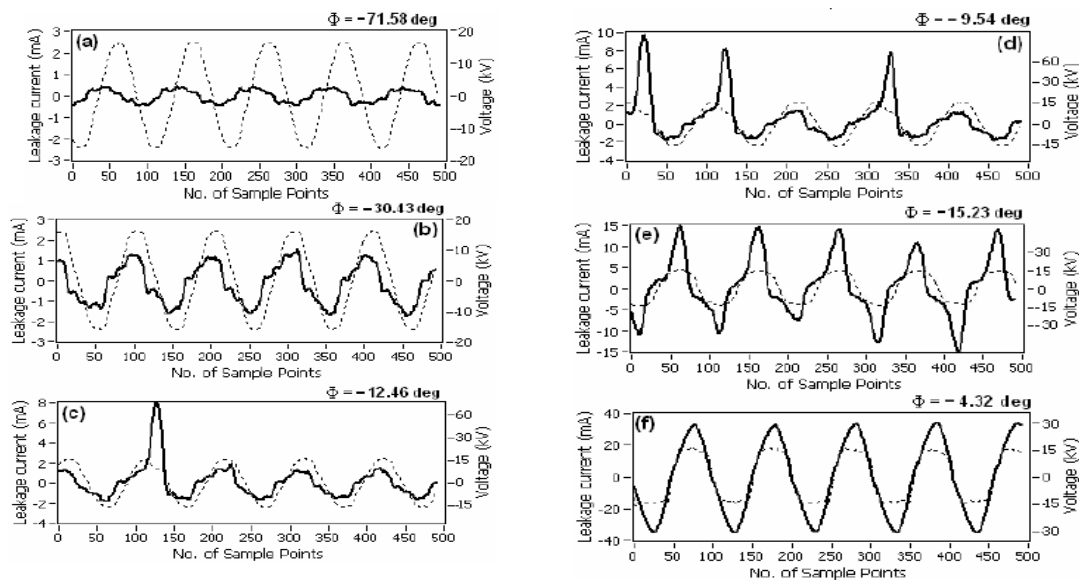


Figure I.12 : Le déphasage entre la tension appliquée (ligne en pointillée) et le courant de fuite (en trait plein) obtenu pendant les expériences sous pollution (a) surface sèche et propre (b) surface polluée et humide (c, d) décharges de courte durée (e, f) longs arcs.

I-6 Analyse du courant de fuite sur un isolateur en porcelaine 20 kV contaminé avec de la poussière de ciment et de la vapeur saline

Aulia et al [19] ont consacré toute une recherche sur les isolateurs en porcelaine pour prédire la sévérité de la pollution. Ils se sont principalement basés sur les informations fournies par le courant de fuite pour calculer le THD du signal. Ces isolateurs sont pour la plupart exposés aux dépôts de sel en milieu marin et aux dépôts de poussières et de suies évacuées des cheminées dans les zones industrielles ; ces deux types de pollutions contribuent à la diminution des propriétés diélectriques et à l'augmentation de l'amplitude du courant de fuite à la surface des isolateurs.

Leur expérience consiste à placer l'isolateur en porcelaine dans une chambre de pollution. La contamination de la surface de l'isolateur est réalisée avec une solution contenant 40 g de NaCl, 40 g de Kaolin et 1000 g d'eau distillée.

La pulvérisation a lieu 8 fois à l'aide d'une pompe avec des durées de 4 s et 20 s pour faire varier les niveaux d'ESDD. En deuxième lieu, la contamination de l'isolateur est accomplie manuellement avec de la poussière de ciment suivant les techniques de mesure basées sur la NSDD. Le courant de fuite et la tension sont enregistrés 30 s après la fin des pulvérisations, à l'aide d'une résistance $R = 375 \Omega$ et d'un oscilloscope relié à un PC. La détermination du THD s'est faite par le calcul de la FFT.

Les résultats obtenus pour les différents niveaux de contaminations sont montrés au tableau I.2.

Without contaminant		With contaminant			
Dry	Wet	Salt Moisture Contaminant		Cement dust Contaminant	
		Time spraying		Dry	Wet
		4s	20s		
T = 25°C I _f = 0.183 mA THD=46.86 % RH = 76.9 %	T = 24.5°C I _f = 0.55 mA THD = 21.2 % RH = 86.4 % δ=0.163 mS/cm	T = 25.5°C I _f = 0.89 mA THD=19.96 % RH = 82.5 % ESDD=0.0018 mg/cm ²	T = 26°C I _f = 23.3 mA THD=34.5 % RH = 88.7 % ESDD=0.08 mg/cm ²	T = 25°C I _f = 0.181 mA THD=51.14 % RH = 72.7 % NSDD=6.67 mg/cm ²	T = 25°C I _f = 0.91 mA THD=25.89 % RH = 77.8 % NSDD=6.67 mg/cm ²

Tableau I.2 : Résultats pour les différents niveaux de contamination.

Les résultats montrent que pour la solution saline et pour un temps de pulvérisation de 4s (Figure I.13), l'amplitude du courant de fuite augmente et le THD diminue comparativement au cas propre et humide, à cause de la faible valeur de la résistance de la couche polluée.

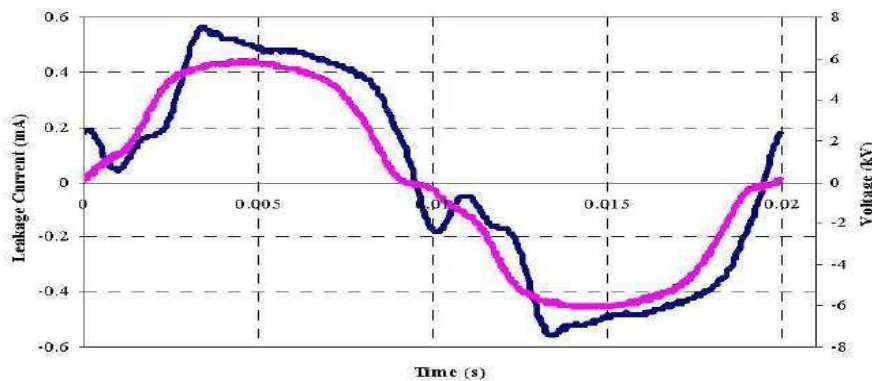


Figure I.13 : Forme d'ondes du courant de fuite et de la tension pour 4 s de pulvérisation avec la solution saline.

Pour un temps de pulvérisation de 20 s, le courant de fuite et le THD augmentent à cause de l'occurrence d'arcs locaux initiés par l'assèchement de certaines zones.

Pour le cas de la contamination avec de la poussière de ciment, les résultats obtenus pour le cas sec affirment que l'onde du courant de fuite est identique à celle obtenue pour le cas propre et sec mais avec une diminution d'amplitude occasionnée par une résistance assez élevée de la couche de ciment à l'état sec.

Pour le cas humide, l'augmentation du THD et de l'amplitude ainsi que les pics enregistrés sur le signal du courant montrent, d'une part que la résistance de la couche de pollution humidifiée est la plus faible à cause des propriétés hydrophiles du ciment, et d'autre part que des arcs locaux sont bel et bien présents sur la surface de l'isolateur (figure I.14).

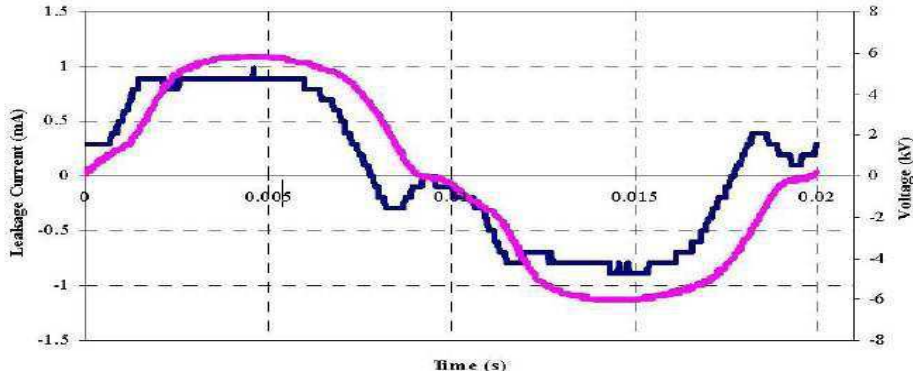


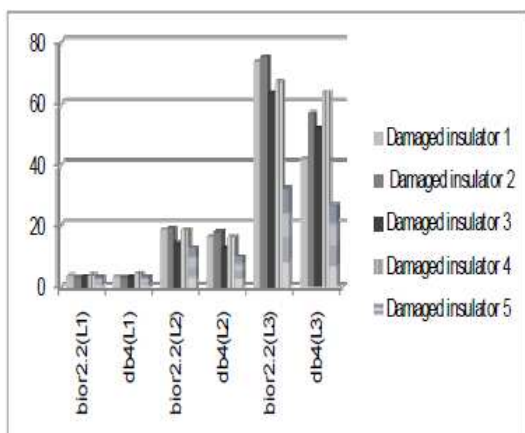
Figure I.14 : Forme d'ondes du courant et de la tension pour la pollution avec de la poussière de ciment

Ces résultats confirment qu'une combinaison des deux types de contaminations pour l'état humide peut accroître de manière significative l'amplitude du courant de fuite et par la suite mener au contournement de la chaîne d'isolateurs.

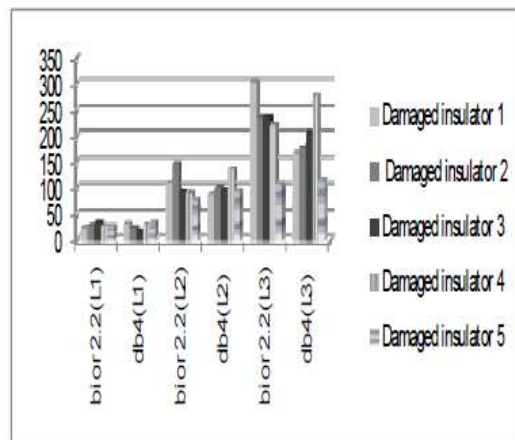
I-7 Analyse de l'état des isolateurs des lignes aériennes de distribution en utilisant une combinaison des supports vecteurs machines (SVM) et la transformée en ondelettes

L'analyse de l'état des isolateurs en utilisant une combinaison des supports vecteurs machines (SVM) et l'analyse multi-résolution (MRA) semble être prometteuse pour un bon diagnostic des lignes aériennes de distribution. En Inde, les recherches réalisées par V.S.Murthy et al [20], se sont concentrées principalement sur l'application de la transformée en ondelettes basée sur l'extraction des caractéristiques d'images numériques et la SVM pour l'analyse de l'état de surface des isolateurs.

Les caractéristiques des coefficients d'ondelettes pour les isolateurs sains et endommagés sont présentées sous forme d'histogramme comme le montre les figures suivantes.



a) Ecart type



b) Maximum

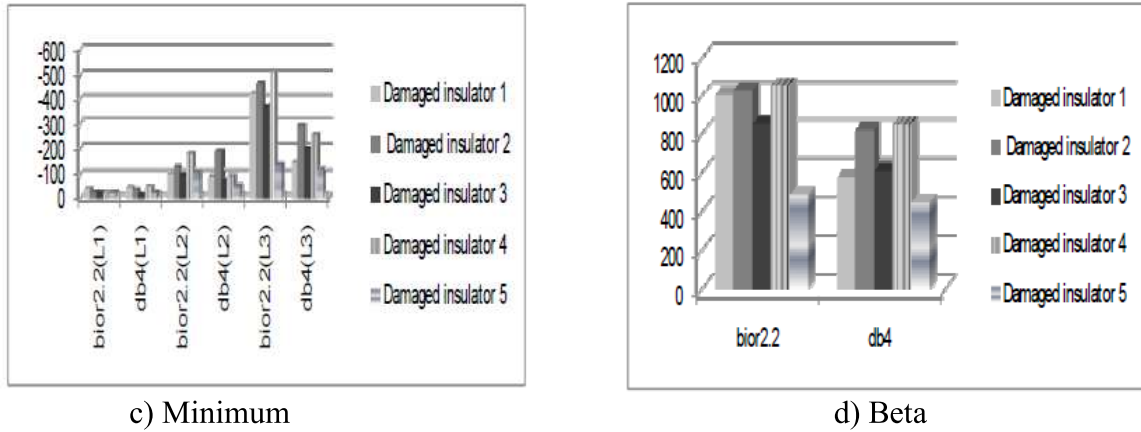


Figure I.15 : Caractéristiques d'ondelettes pour les isolateurs endommagés

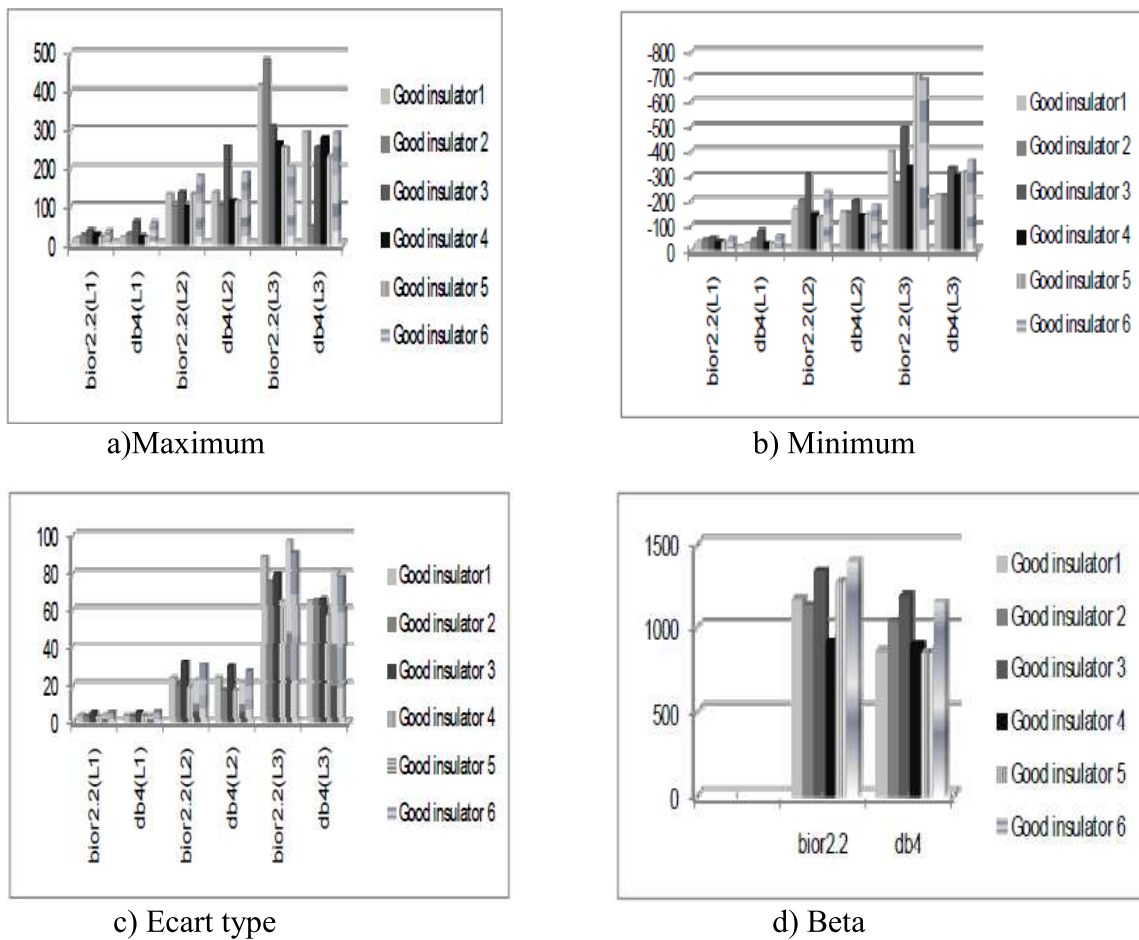


Figure I.16 : Caractéristiques d'ondelettes pour les isolateurs sains

Le diagnostic des isolateurs d'une ligne de distribution de haute tension en utilisant la technique des ondelettes en combinaison avec les SVM a démontré son efficacité pour des applications en temps réel.

Good	SD1	SD2	SD3	BETA (β)	Actual Health of insulator(I) = (β /1200)*100	Condition Indices	SVM Output	Predicted Class
	3.825	23.63	88.7	1166.55	97.2	Healthy	Healthy	Yes
	3.407	20.86	74.87	1125.07	93.8	Healthy	Healthy	Yes
	6.575	30.7	90.77	1431.78	100	Healthy	Healthy	Yes
	5.663	27.57	86.12	1200.37	100	Healthy	Healthy	Yes
	5.094	31.6	80.01	1343.47	100	Healthy	Healthy	Yes
	3.851	22.54	96.92	1280.33	100	Healthy	Healthy	Yes
	3.878	24.12	86.97	1235.75	100	Healthy	Healthy	Yes
	5.541	30.8	91	1398.59	100	Healthy	Healthy	Yes
	5.941	29.8	87.9	1454.62	100	Healthy	Healthy	Yes
	5.1	30.12	91.25	1640	100	Healthy	Healthy	Yes
Damaged	3.083	17.8	57.12	823.74	68.6	Marginal	Marginal	Yes
	4.173	16.07	64	847.85	70.7	Marginal	Marginal	Yes
	3.409	14.017	63.44	853.3	71.1	Marginal	Marginal	Yes
	3.528	18.48	73.67	1008.31	84	Marginal	Marginal	Yes
	4.673	21.41	55.16	918.3	76.5	Marginal	Marginal	Yes
	3.293	9.837	27	450.68	37.6	Risky	Risky	Yes
	3.306	9.497	31	517.52	43.1	Risky	Risky	Yes
	4.97	16.75	41.12	678.18	56.5	Risky	Risky	Yes
	3.313	16.12	41.73	576.44	48	Risky	Risky	Yes
	3.229	12.55	51.68	611.22	50.9	Risky	Risky	Yes

Tableau I.3 : Indices de l'état des isolateurs en utilisant les SVM

I-8 Diagnostic de l'état de surface d'un isolateur en utilisant la transformée en ondelettes et les réseaux de neurones

R.Sarathi et al [21] ont étudié le contournement des isolateurs en polymère sous une tension alternative. Les phénomènes observés au niveau de la surface des isolateurs, tels que les décharges partielles et le contournement, ont été évalués par la mesure du courant de fuite. Dans ce travail, les essais de contournement ont été effectués selon la norme IEC-587 [22]. La distance entre les deux électrodes était de 50 mm et l'agent contaminant était le NH₄Cl qui était pulvérisé par une pompe. La figure I.17 présente le dispositif utilisé ainsi que la configuration des électrodes.

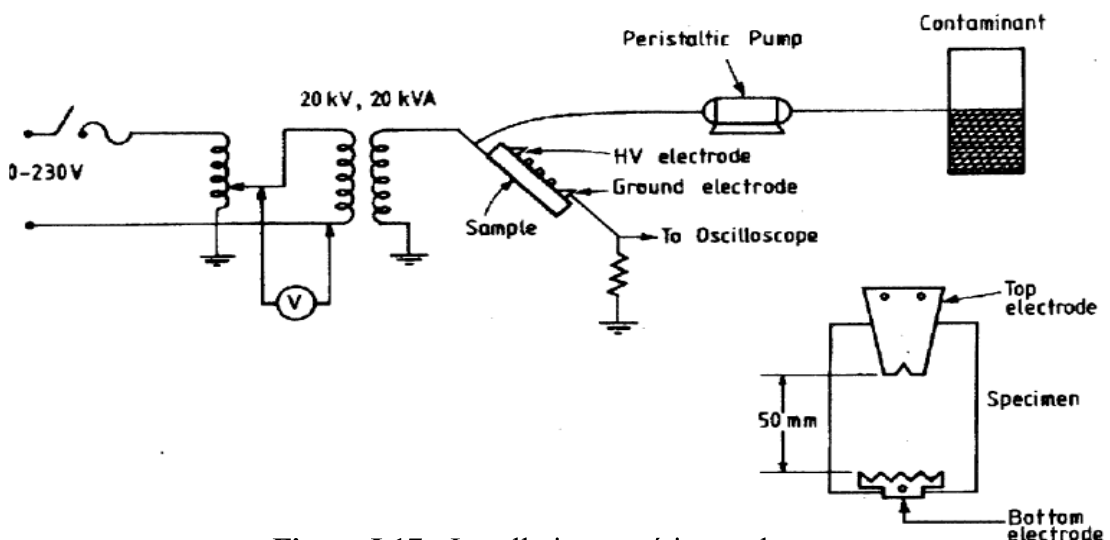


Figure I.17 : Installation expérimentale

Pour bien analyser l'amplitude et la fréquence du signal du courant de fuite, la transformée en ondelettes a été appliquée sur 2000 points en utilisant l'ondelette de db 4 comme ondelette analysante. La représentation STD_MRA plot (figure I.18) va identifier le signal approprié pour le diagnostic de la sévérité de la pollution.

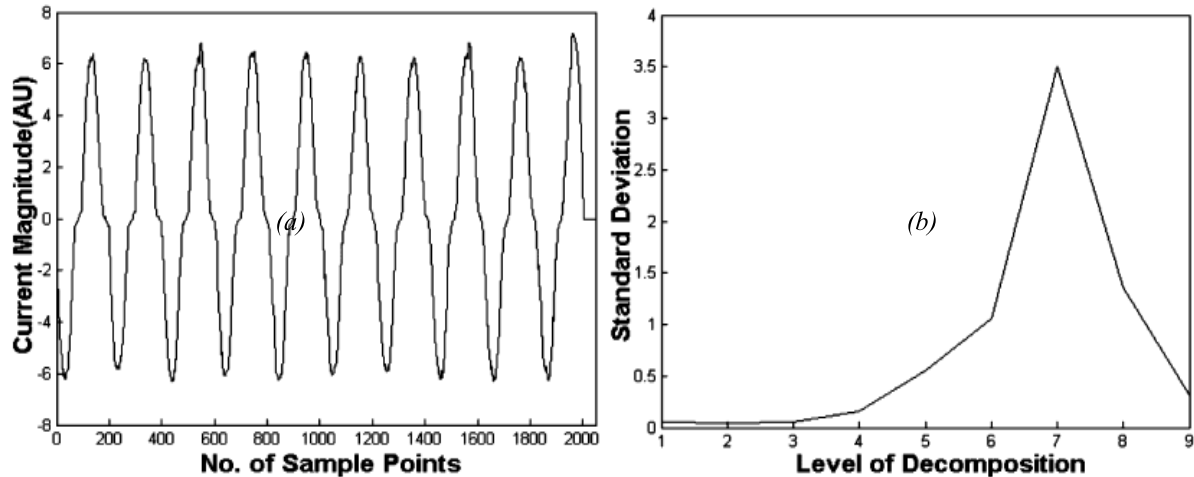


Figure I.18 : (a) Forme d'onde du signal du courant de fuite au moment du contournement et (b) STD_MRA plot correspondant

Pour automatiser le processus d'identification de l'état de surface, l'appel aux ANN (Artificial Neural Networks) semblait être très pratique. Les valeurs des STD_MRA correspondantes aux 9 niveaux ont été utilisées comme entrées du réseau de neurone. Ce dernier va permettre une classification de l'état de surface de l'isolateur comme suit (état normal, présence de décharges partielles, contournement). Dans ce travail, 70 données du courant de fuite ont été utilisées pour la phase d'entraînement. Puis, 60 données additionnelles (25 formes avec décharges partielles, 25 formes avec contournement et 10 formes du courant de fuite normal) ont servi pour la phase d'identification. Les résultats obtenus convergeaient dans 85% des cas. Cela indique que les réseaux de neurones peuvent évaluer et surveiller l'état de surface de l'isolateur en service.

I-9 Utilisation de la SGWT pour le filtrage des signaux de décharges partielles

Actuellement, les matériaux isolants utilisés dans les réseaux électriques subissent des dommages et des dégradations progressives dus à l'activité des décharges partielles ce qui rend leur détection et leur caractérisation d'une importance capitale dans le diagnostic et la surveillance "On-line"[23].

L'un des outils utilisé pour le diagnostic est la transformée de Fourier qui permet de fournir toutes les composantes fréquentielles d'un signal donné. Elle n'est malheureusement pas d'une grande utilité pour dénombrer les décharges partielles à cause du bruit qui accompagne le signal.

X.Song et al [24] utilisent la SGWT pour le filtrage des données concernant les décharges partielles. Pour cela, ils effectuent une comparaison entre la DWT et la SGWT ; ils déduisent qu'à cause de son extrême sensibilité, la SGWT procure de meilleures performances par rapport à la DWT bien que celle-ci suscite un grand intérêt ces dernières années [25,26] mais se révèle quand même apte à reproduire la forme des décharges partielles. La différence entre les deux méthodes réside dans l'algorithme de décomposition et de reconstruction du signal d'entrée.

Leurs travaux de simulation par ordinateur consistent à reproduire 10 impulsions de décharges et le signal de décharge est pollué à l'aide d'un bruit blanc Gaussien de rapport Signal/bruit = -15 dB (figure I.19).

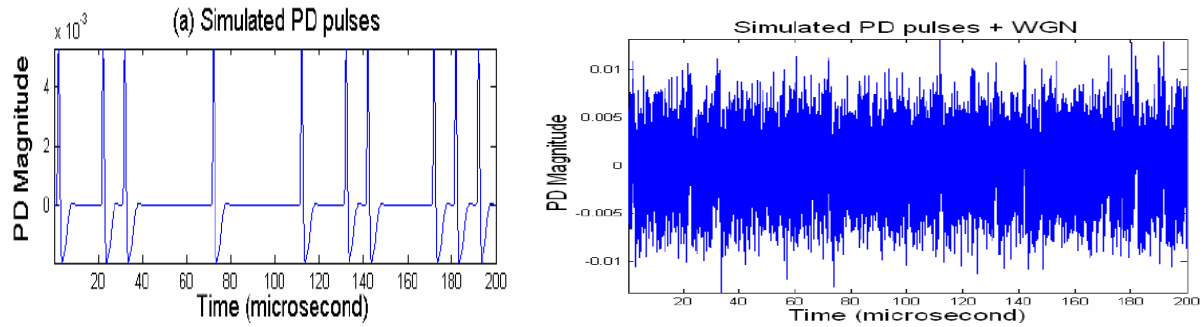


Figure I.19 : Forme d'onde du signal des décharges partielles sans bruit (à gauche) et avec bruit (à droite).

Les erreurs commises lors des calculs sont moins importantes pour la SGWT que pour la DWT ; cependant leurs précisions de calcul se détériorent progressivement avec l'augmentation du niveau de bruit. Les travaux expérimentaux concernent l'application de la SGWT et de la DWT sur un signal de décharge réel récupéré du réseau EDF 11 kV. L'équipe conclut encore une fois que la SGWT est meilleure que la DWT pour déterminer l'amplitude et le nombre de décharges partielles et ce pour un temps de calcul très appréciable [27].

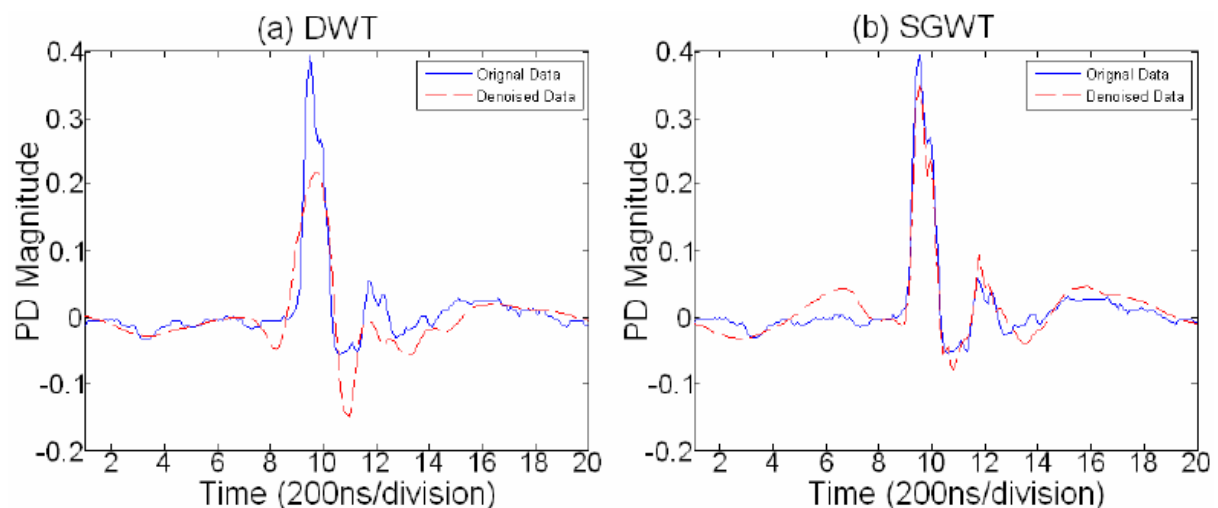


Figure I.20 : Impulsion de décharge partielle reconstruite avec la DWT et la SGWT (l'impulsion réelle est en bleu et l'impulsion reconstruite est en rouge).

I-10 Évaluation de l'état de pollution de l'isolateur en se basant sur le signal du courant de fuite

X.Jiang et al [28] ont proposé une méthode basée sur les supports vecteur machine (SVM) pour l'évaluation de l'état de sûreté des isolateurs pollués. Des essais sous pollution artificielle ont été réalisés sous différentes humidités relatives (RH) et différentes densités de dépôt de sel (SDD). En premier lieu, le signal du LC a été décomposé pour extraire l'amplitude I_h , la phase θ et la distorsion harmonique totale THD. Ces trois derniers paramètres sont utilisés comme paramètres caractéristiques pour l'entraînement du modèle SVM. Par la suite, les paramètres de sortie de SVM sont classés dans quatre sous-ensembles pour l'évaluation de la sûreté des isolateurs pollués [A, B, C et D].

D'après leurs investigations sur l'évolution du comportement de la décharge sur une chaîne d'isolateurs de 5 éléments, les chercheurs ont constaté qu'il ya sept étapes typiques avant la rupture totale de la chaîne. Ces étapes sont indiquées sur le tableau I.4. Ceci coïncide fortement avec d'autres travaux de recherches [29].

Stage	phénomène typique de décharge.
1	Aucune décharge évidente
2	étincelle faible (move)
3	décharge move sous forme de brosses
4	décharge locale courte
5	petit arc dense
6	décharge principale lumineuse
7	décharge principale rouge intense

Tableau I.4 : Phénomènes de décharge typique

Selon l'analyse du phénomène de décharge électrique des isolateurs, quatre sous-ensembles sont définis (quatre états de sûreté) qui sont: A= [sûr], B= [alarme légère], C= [alarme modérée] et D= [alarme sérieuse]. Où A ne se rapporte à aucune décharge ou seulement à une faible décharge sur la surface des isolateurs, dans ce cas, les isolateurs peuvent fonctionner sans risque, ainsi l'état de sûreté est sûr. B se rapporte à la partie fragmentaire du petit arc électrique sur la surface des isolateurs, l'exploitation sûre de l'isolateur ne serait pas accordée, ainsi l'état de sûreté correspond à une alarme légère. C se rapporte à l'arc court et continu sur la surface des isolateurs, dans cette condition, si la pollution s'aggrave, la rupture peut se produire, les systèmes d'alimentation doivent être examinés immédiatement, ainsi l'état de sûreté correspond à une alarme modérée. D se rapporte à l'arc principal intense sur la surface de l'isolateur, il s'agit d'un état critique, et dans ce cas le dispositif protecteur devrait agir instantanément, ainsi l'état de sûreté correspond à une alarme sérieuse.

La performance du SVM a été vérifié sur 8 échantillons, l'état de sureté évalué a été comparé aux résultats d'essais et mentionné dans le Tableau I.5.

Test No.	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>SDD</i> (mg/cm ²)	0.05	0.05	0.10	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20
<i>RH</i> %	49%	97%	83%	99%	62%	98%	64%	99%
θ °	82°	-5.6°	4.3°	-8.9°	69°	-9.8°	68°	-13°
<i>I_h</i> /mA	0.41	0.17	11.31	35.12	0.38	121.05	0.42	190.21
<i>THD</i> %	11.2%	30.3%	29.1%	48.8%	15.8%	42.9%	11.5%	56.7%
<i>A/B/C/D</i>	1.00/0.03/ 0.01/0.00	0.03/0.9/ 0.01/0.00	0.20/0.64/ 0.02/0.00	0.01/0.98/ 0.02/0.00	0.97/0.04/ 0.00/0.00	0.00/0.00/ 0.95/0.97	0.99/0.0/ 0.00/0.00	0.00/0.00/ 0.06/1.00
Verified results	Accord	Accord	Accord	Accord	Accord	Accord	Accord	Accord

Note: Group of string of insulator of 7 unit($t=26\pm 2$ °C)

Tableau I.5 : Vérification des 8 échantillons évalués avec les résultats d'essais

En conclusion, l'amplitude I_h , la déformation harmonique totale THD et la phase θ du courant de fuite ont été déterminées comme des paramètres caractéristiques d'entrées pour le modèle SVM et comme sortie, le modèle utilisé fournit quatre sous-ensembles A, B, C et D évaluant l'état de sûreté des isolateurs pollués.

I-11 Distribution du courant de fuite sur la surface d'isolateurs en polymère

Yong Zhu et al [30] ont exploité les informations procurées par le signal du courant de fuite pour caractériser l'état de surface d'un isolateur SIR et pour comparer les résultats obtenus avec ceux d'un modèle proposé. Le diagnostic à partir du signal du courant de fuite a été pris en considération.

Cette étude a également tenu compte du comportement des décharges électriques qui ont lieu à la surface des polymères :

- Les arcs locaux qui surviennent dans les bandes sèches.
- Les décharges partielles qui sont provoquées par la triple jonction entre les gouttelettes d'eau, le polymère et l'air à cause de la différence de la permittivité de chacun d'entre eux [31, 32].

Le modèle expérimental a pris en considération la pollution par humidification vu qu'elle est largement utilisée dans les recherches pour l'étude des performances électriques des polymères sous haute tension [33, 34].

La pollution des isolateurs réels et leur modèle (figure I.21) est faite avec une solution de 3l d'eau distillée qui contient 12 g/l de NaCl ; les mesures effectuées avec l'ESDD indiquent 0.03 mg/cm² pour cette solution. La pollution des surfaces est effectuée par pulvérisation. Une camera sert à suivre le phénomène de décharge et un oscilloscope relié à un PC permet l'acquisition des signaux du courant de fuite. L'évaluation du champ électrique en utilisant la méthode des éléments finis, indique les zones de fortes intensités.

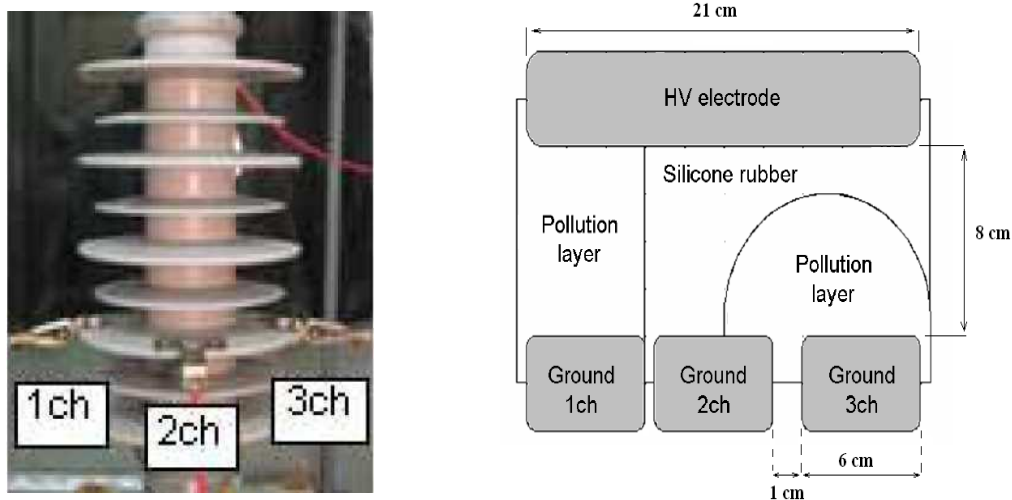


Figure I.21 : Isolateur réel (à gauche) et son modèle (à droite)

Les résultats obtenus lors de l'analyse des courants 1ch, 2ch et 3ch montrent que 1ch a une forme parfaitement sinusoïdale due à l'uniformité de la couche de pollution (caractère parfaitement résistif) ; 2ch et 3ch ont une forme distordue due d'une part à l'activité intense des décharges et d'autre part à la non-uniformité de la couche de pollution (figure I.21). Ces décharges sont le résultat d'une valeur du champ électrique qui dépasse celle de la rigidité diélectrique du système ainsi formé.

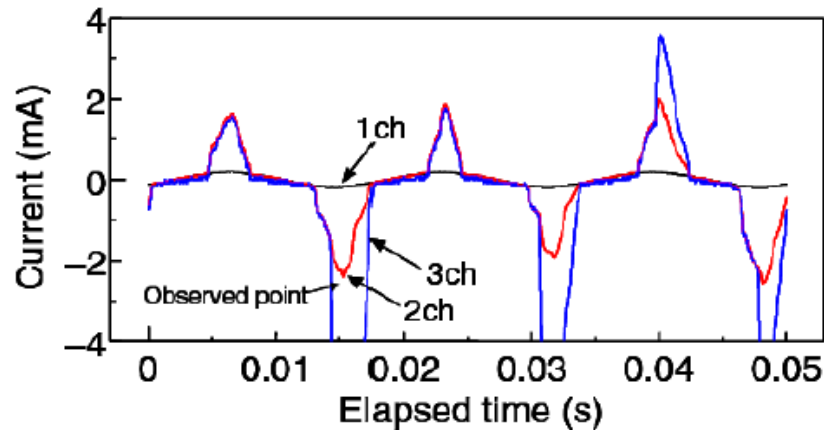


Figure I.22 : Formes d'ondes des courants de fuite du modèle

Pour l'isolateur réel, les trois signaux du courant de fuite présentent des formes distordues; ce phénomène est le résultat de l'irrégularité du profil de l'isolateur. L'apparition d'arcs locaux est causée par l'assèchement de certaines zones, due à la distribution non-uniforme du courant de fuite.

La surveillance par caméra de l'activité des décharges a permis de détecter la position de celles-ci en fonction de la variation d'amplitude de 1ch, 2ch et 3ch :

- Une décharge apparaît à 37 ms sur 1ch.
- Le déplacement de cette décharge de 1ch à 2ch à 38ms est caractérisé par une augmentation de l'amplitude des courant 2ch.
- L'apparition de la décharge entre 2ch et 3ch après 1ms augmente les amplitudes des courants 2ch et 3ch.

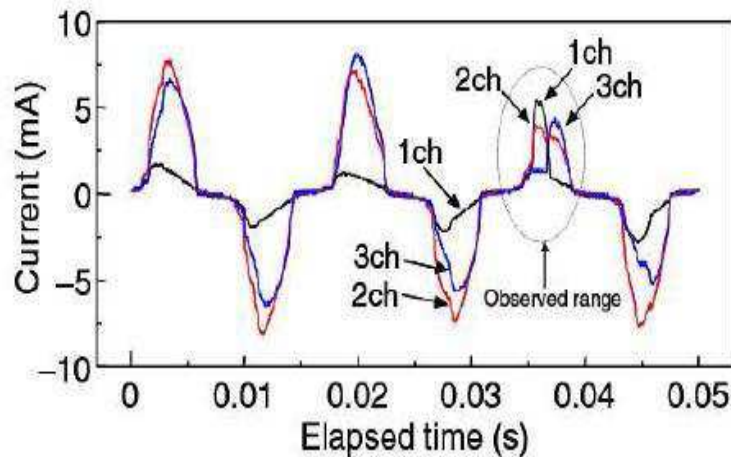


Figure I.23 : formes d'ondes des courants de fuite de l'isolateur réel

Cette étude permet de conclure que le courant de fuite peut être utilisé comme moyen de détection des positions des décharges partielles et qu'il identifie l'état de surface de l'isolateur.

I-12 Caractérisation du procédé d'érosion par les méthodes d'analyse temps-fréquence

S.W.Jee et al [35] se sont intéressés à l'étude du phénomène d'érosion en utilisant les méthodes d'analyse temps-fréquence ainsi que le calcul de la distribution d'énergie du signal de la tension appliquée. L'étude du phénomène d'érosion était faite suivant la norme CEI

60112 [36]. Deux électrodes, alimentées en tension alternative sinusoïdale de fréquence 60 Hz et d'amplitude 380V, sont disposées sur une plaque en PVC de dimensions (60 mm x 60 mm x 3 mm) (figure I.24). Un électrolyte est pulvérisé sur la plaque toutes les 30 secondes car il favorise l'apparition des décharges électriques. Il est constitué de NH_4Cl de concentration 0.1% dans un volume d'eau de 20 mm³. L'acquisition des signaux de la tension et du courant de fuite (figure I.25) est faite grâce à un oscilloscope digital.

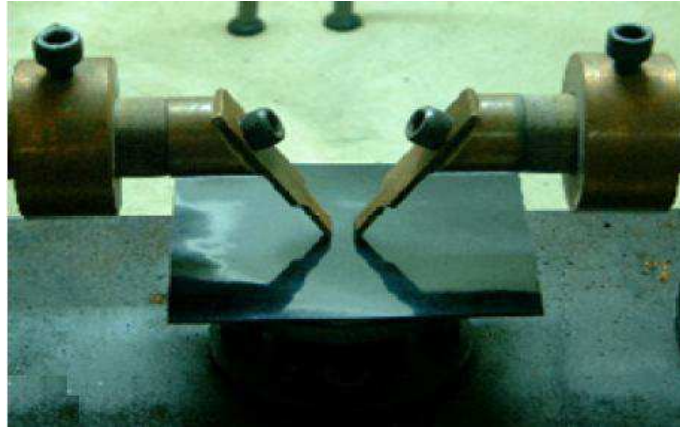


Figure I.24 : Disposition des électrodes sur la plaque

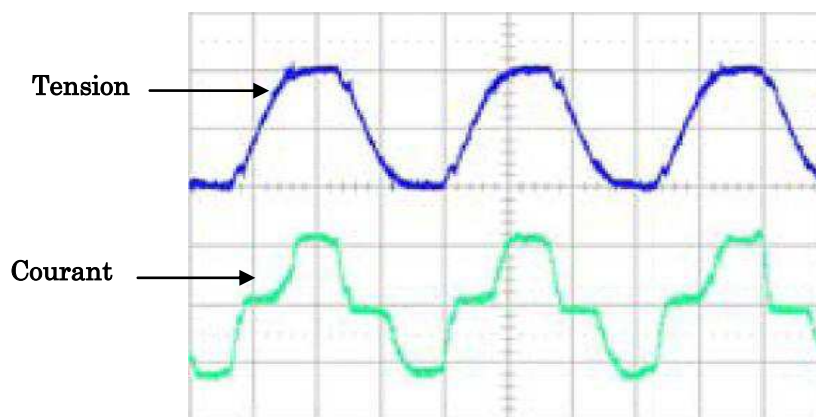


Figure I.25 : Forme d'ondes du courant de fuite et de la tension appliquée pendant la progression de la décharge

L'analyse des ondes de tension appliquée se fait par deux méthodes : l'analyse temps-fréquence [37] et l'analyse temps-énergie [38]. Elles montrent que le procédé d'érosion se décompose en cinq étapes :

- état statique pour une faible tension appliquée ;
- apparition des décharges partielles ;
- progression de la décharge ;
- formation du carbone sur la surface des électrodes ;
- érosion de la plaque après la décharge disruptive.

L'analyse temps-fréquence de la tension permet de voir que des pics descendants apparaissent et que l'amplitude de ces pics augmente avec la progression de la décharge partielle jusqu'à atteindre une valeur critique pour laquelle a lieu le contournement.

L'analyse temps-énergie du signal de la tension appliquée permet de caractériser les étapes d'érosion suivant la variation de ses harmoniques. Ainsi, la variation de l'amplitude du quatrième jusqu'au dixième harmonique varie pour de faibles perturbations, alors que du onzième jusqu'au vingt-cinquième harmonique, elle varie pour de grandes perturbations. Ces dernières nous informent sur le déroulement des cinq étapes d'érosion. Ainsi, la distribution d'énergie de la tension appliquée (figure I.26) permet d'expliquer la nature pulsatoire du courant de fuite.

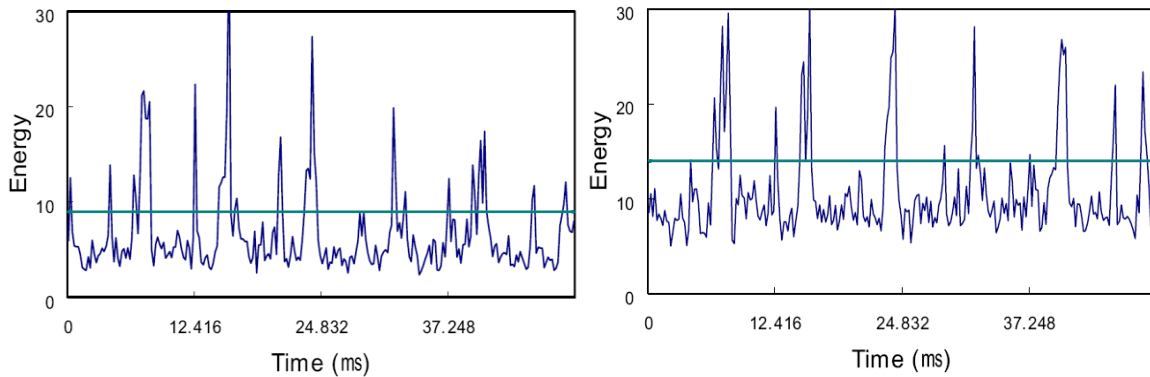


Figure I.26 : Distribution de l'énergie de la tension appliquée pour la gamme des harmoniques 4 jusqu'à 10 (à gauche) et pour la gamme 11 jusqu'à 25 (à droite) juste avant le contournement

Les calculs statistiques de la moyenne m et de la déviation standard σ pour chaque niveau d'énergie indiquent que ces valeurs augmentent avec l'évolution du processus d'érosion. La probabilité $P(0 < E < m + 3\sigma)$ est égale à **0.99** pour l'état statique et décroît suivant la progression de la décharge sur la surface du matériau. Ainsi, les harmoniques ayant une énergie comprise entre 0 et $m + 3\sigma$ sont ceux qui peuvent le mieux nous renseigner sur une éventuelle initiation des décharges partielles.

I-13 Calcul de l'impédance de défaut due aux décharges électriques par la modélisation et l'expérimentation

De nos jours, les défauts électriques sur les réseaux de distribution moyenne tension sont très fréquents [39]. De nombreux algorithmes sont développés pour la protection et la détection des défauts sur les lignes de transmissions d'énergie électrique [40]. Dans ce cadre, N.I Elkalachy et al [41] ont présenté un travail basé sur la détection et la modélisation d'un arc électrique et la mesure de l'impédance de défaut par la simulation sur logiciel et l'expérimentation sur un circuit d'essai.

Le travail expérimental consiste à reproduire la phase d'une ligne de distribution 20 kV et à incliner un arbre sur celle-ci jusqu'à ce que la distance entre la ligne et l'arbre soit comprise entre 2 et 3 cm ; la tension est ensuite augmentée progressivement jusqu'à l'apparition de l'arc. Les observations indiquent que l'arc électrique apparaît à partir de 11.5 kV, qu'il se propage dans toutes les parties de l'arbre (feuillage, branches et le tronc) et qu'il s'éteint par la suite ; son activité demeure permanente lorsque la distance entre l'arbre et la ligne augmente.



Figure I.27 : Mode expérimental pour initier l'arc

Les mesures de l'impédance de défaut indiquent une valeur de $201\text{ k}\Omega$; la variation de celle-ci dépend des conditions atmosphériques du lieu de mesure. La modélisation par simulation est faite à l'aide d'un algorithme et d'un circuit réalisés avec un logiciel. Les résultats de calcul de l'impédance montrent une variation de sa valeur pour les deux alternances de la tension car, pendant l'alternance positive, la décharge se propage le long du feuillage, puis elle se dirige vers le tronc d'arbre pendant l'alternance négative.

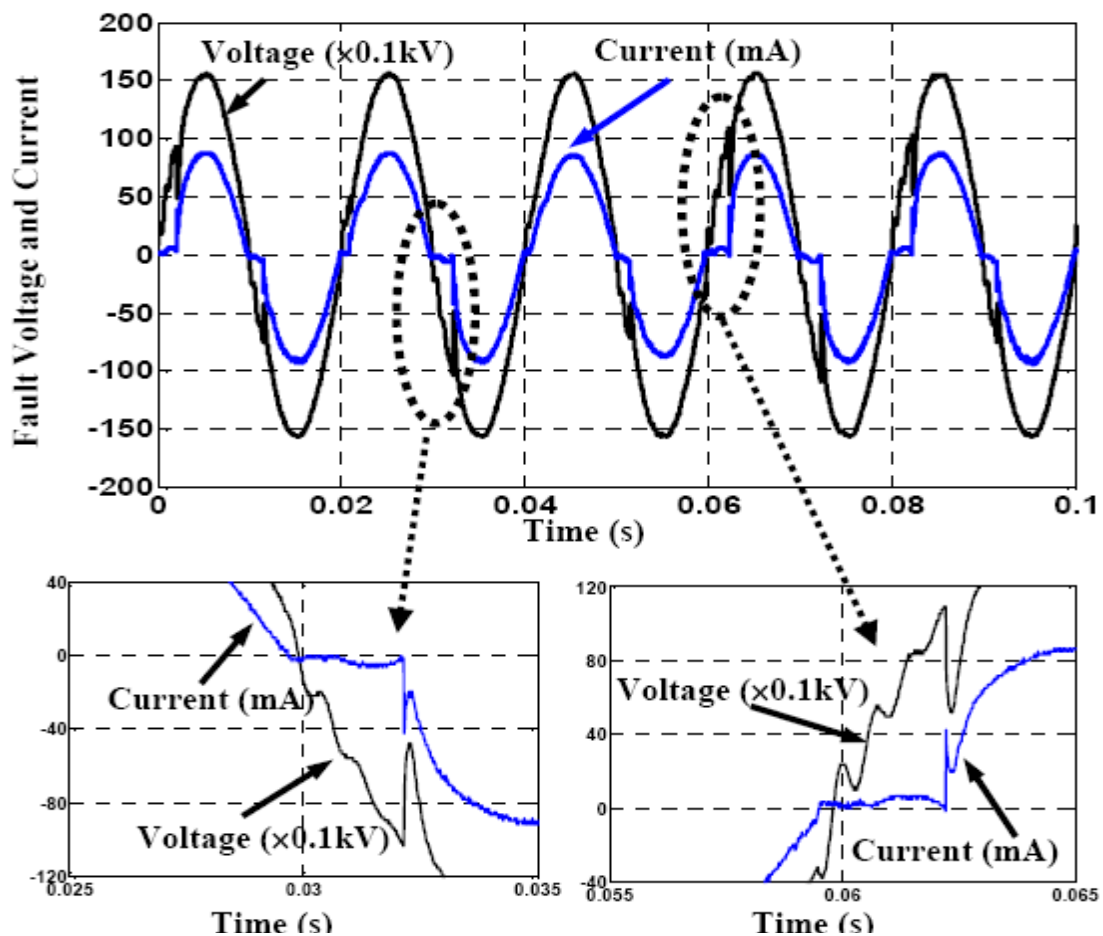


Figure I.28 : Courant de fuite et tension pour une propagation de l'arc sur le feuillage

La détection de la nature du défaut a été faite grâce à la DWT [42] en utilisant l'ondelette de Daubechies 14 sur le courant de fuite pour le calcul des composantes fréquentielles d3 et d4.

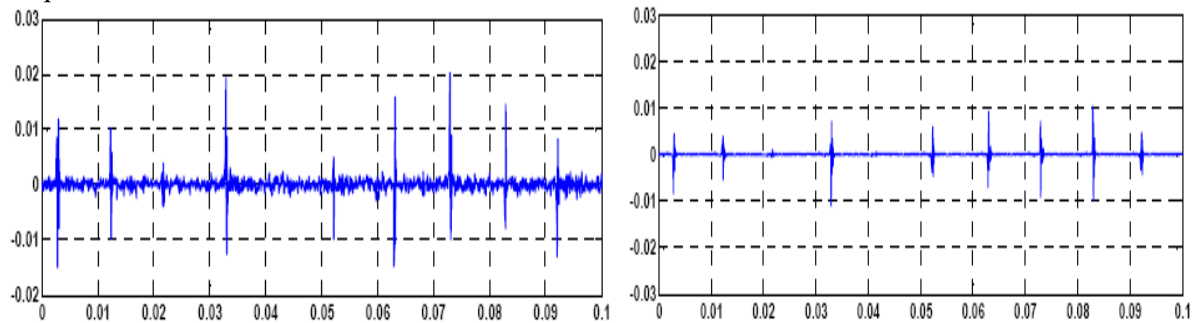


Figure I.29 : Composante fréquentielle d3 du courant de fuite expérimentale (à droite) et du modèle simulé (à gauche)

Les résultats du modèle expérimental et de simulation présentent une certaine similitude qui a eu pour conséquence la validation du modèle d'arc proposé. Toutefois, Il a été constaté que la détection du lieu de défaut par l'analyse de la tension et du courant de fuite d'une phase peut induire en erreur, lorsque plusieurs défauts de courant ont lieu simultanément.

I-14 Etude de la pollution des isolateurs en céramique par la détection des décharges partielles

A. Cavallini et al [43] ont analysé la corrélation qui peut exister entre les décharges partielles et le niveau de pollution des isolateurs en céramique. Pour cela, ils se sont basés sur une expertise des données du courant de fuite pour la détection des décharges partielles [44,45]. L'expérience dont le dispositif expérimental est donné par la figure I.30 est effectuée sur des isolateurs en céramique « capot et tige » en commençant par tester un seul (longueur axiale : 50mm, distance de fuite : 350mm) puis sur une chaîne de trois isolateurs (longueur axiale : 380 mm, distance de fuite : 350 mm). Les essais sont réalisés pour différentes concentrations de la solution polluante (de 20 g/l jusqu'à 100 g/l de NaCl) avec une humidification par pulvérisation. La détection des décharges partielles est assurée avec un HFCT. Des caméras infra-rouge et ultra-violettes suivent l'évolution des décharges et de la température sur la surface des isolateurs.

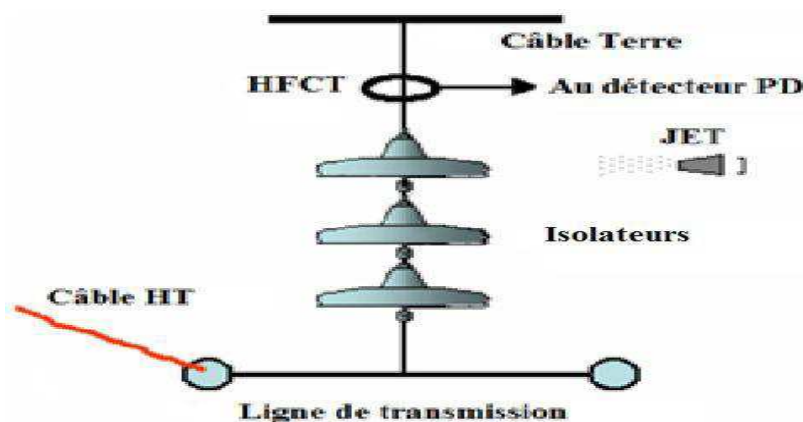


Figure I.30 : Schéma du dispositif expérimental

La tension d'apparition des décharges partielles diminue avec l'augmentation de la concentration de la solution polluante. Ces décharges se propagent entre 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 (figure I.31) ; ceci est concrétisé par l'élongation progressive des DP à travers les zones sèches.

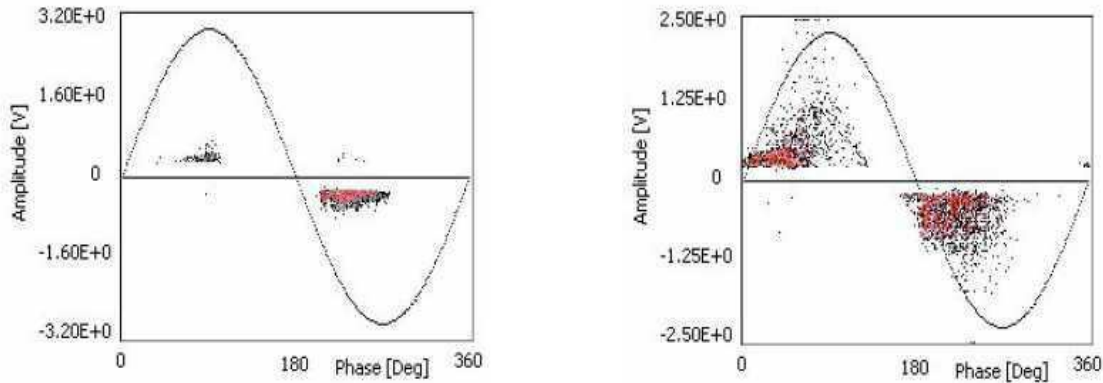
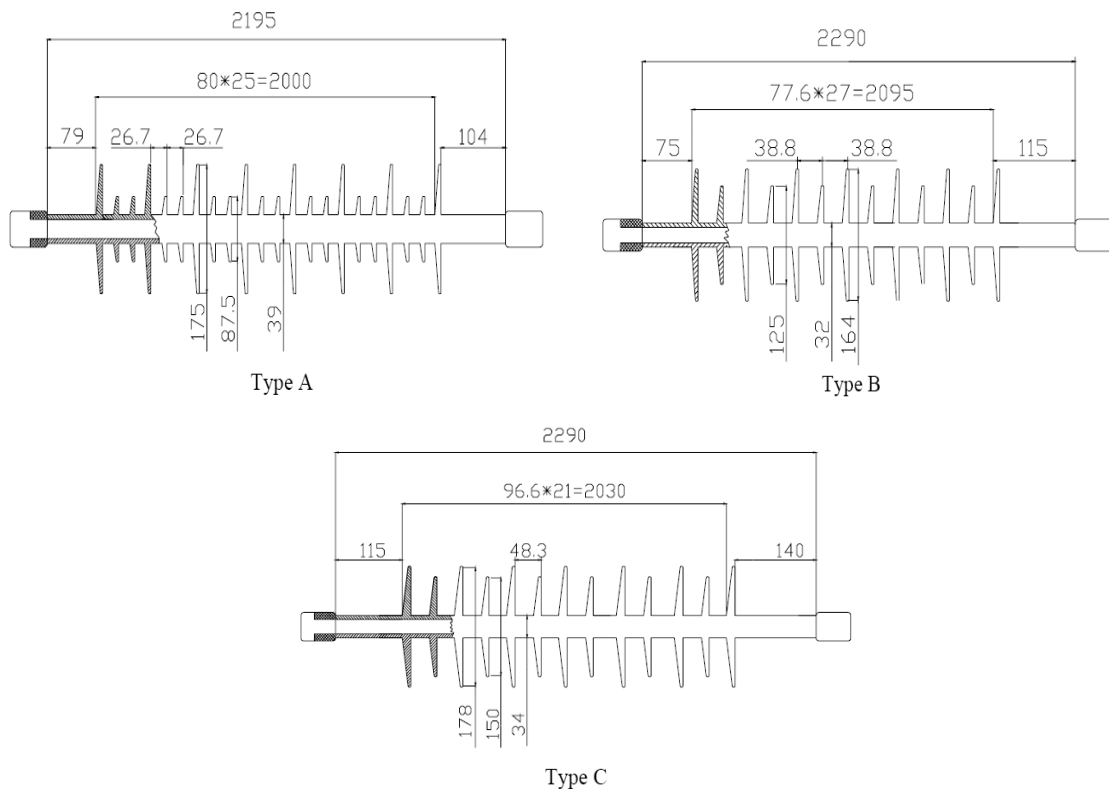


Figure I.31 : Evolution de l'amplitude des décharges partielles pour l'état sec et Propre (à gauche) et pour l'état pollué (à droite).

I-15 Décharges électriques sur un isolateur composite pollué sous 800 kV continue

X.Jiang et al [46] se sont intéressés à l'étude de la pollution artificielle sous tension continue de quatre types d'isolateurs FXBW 500/160 DC SIR (Silicon Rubber) nommés A, B, C et D et d'un isolateur FXBW 800/400 DC SIR appelé E (figure I.32).



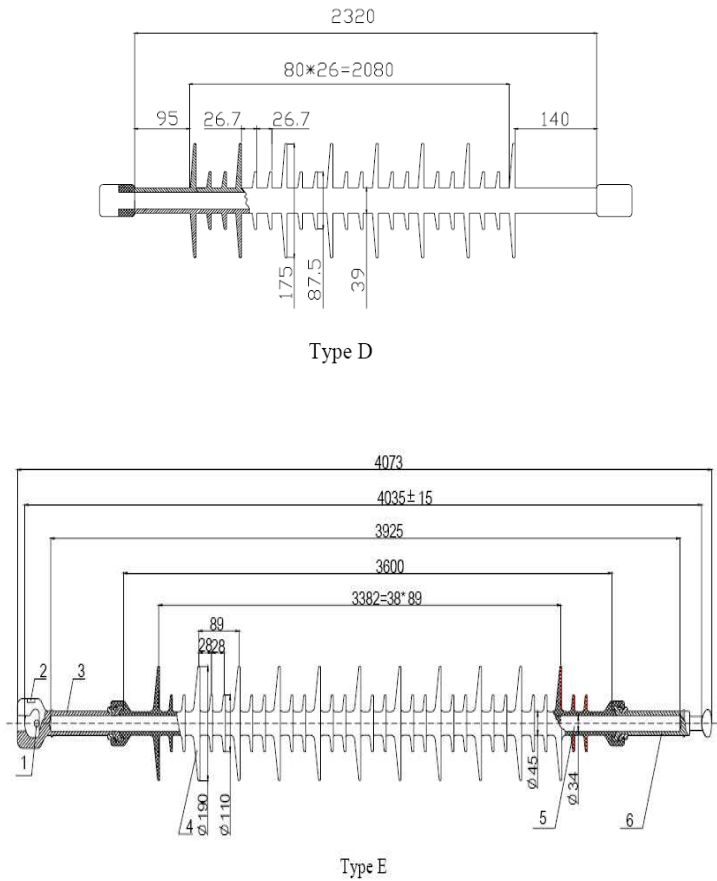


Figure I.32 : Différents profils d'isolateurs

La SLM (Solid Layer Method) est appliquée pour la pollution de ces isolateurs qui sont placés dans une chambre de pollution. Cette dernière est pressurisée à $P_1=98.7$ kPa et $P_2=76.4$ kPa afin de simuler les altitudes : 232m et 2500m.

Ces chercheurs ont mis en évidence le fait que le profil, le matériau de l'isolateur et la pression de l'air ont une influence directe sur l'exposant "a" qui caractérise l'ESDD. Ce paramètre a manifestement un effet remarquable sur la tension de décharge disruptive. La relation donnant la tension de décharge en fonction de " a " est donnée par :

$$U_f = A * (ESDD)^{-a} \tag{I.2}$$

A : constante qui dépend du profil de l'isolateur et de la pression de l'air.

Un deuxième paramètre qui est également un autre exposant nommé "n" qui caractérise la pression de l'air est aussi influencé par le profil et le matériau de l'isolateur. D'après les résultats obtenus, l'expression donnant la tension de décharge disruptive en fonction de la pression " P " et du nombre "n" est donnée par :

$$U_f = U_0 * \left(\frac{P}{P_0}\right)^n \tag{I.3}$$

U_0 : tension de décharge disruptive à pression standard $P_0 = 101.3$ kPa.

Ces chercheurs ont déduit également que pour une tension continue de 800 kV, la distance parcourue par l'arc électrique ne doit pas être supérieure à 8.16 m et la distance de fuite ne doit pas être inférieure à 30.2 m afin d'éviter le contournement en basses altitudes. Pour les hautes altitudes (1000 et 2000 m) et sous le même niveau de tension, ces deux derniers paramètres ne doivent pas être inférieurs à 30.6 m (distances de fuite) et supérieur à 8.40 m (distance parcourue par l'arc).

Un rapport optimal de 3.35 entre la distance de fuite et la distance parcourue par l'arc dans l'air correspond à la plus faible probabilité d'occurrence du contournement sous pollution.

I-16 Comparaison des performances sous pollution d'un isolateur à long fut et d'un isolateur à disque utilisés en HVDC

J.M.Seifert et al [47] ont pu déterminer à travers leur étude menée au laboratoire selon la norme IEC 61245 [48], que pour des conditions de pollution identiques, les deux isolateurs (a long fut et de type disque) possèdent les mêmes caractéristiques sous tension continue ; ils constatent que l'intensité du champ électrique calculée pour la distance de contournement sous pollution est inversement proportionnelle à la densité d'impuretés présente sur la surface des isolateurs (figure I.33). La pollution artificielle est effectuée par la méthode SLM en utilisant les méthodes de mesures basées sur l'ESDD.

Pour cette expérience, 3 chaînes d'isolateurs sont utilisées ; deux d'entre elles sont constituées de 32 éléments avec les modèles « capot et tige » :

- E 160 PZ/170 HVAC (figure I.34.a)
- F16 P13/160 DR HVDC (figure I.34.b)

La troisième est de type long fut, composée de quatre unités en porcelaine de type 75/16 + 15/1395 (figure I.34.c). Les seuils de pollution varient entre 0.02 et 0.07 mg/cm² et l'humidification des isolateurs est faite en position horizontale pour plusieurs angles. La plage de variation de la tension continue est entre 300 et 600 kV.

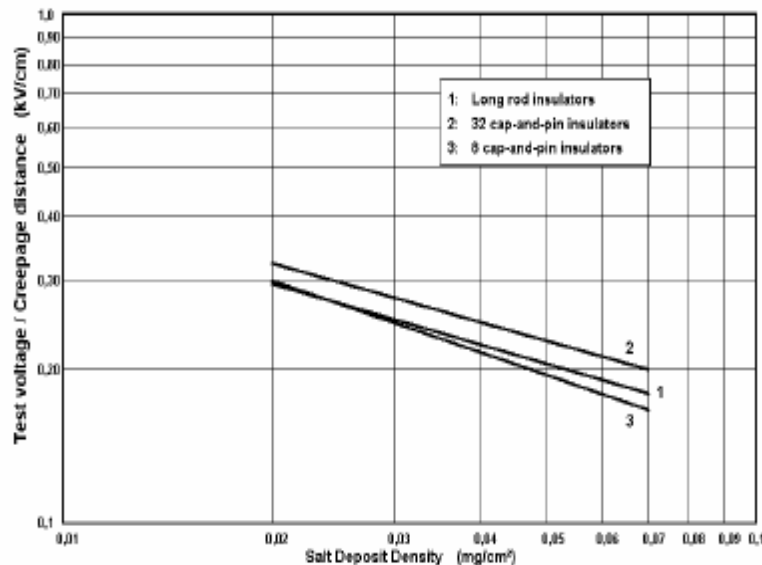


Figure I.33 : Variation de l'intensité du champ électrique en fonction de l'ESDD pour les trois chaînes d'isolateurs.

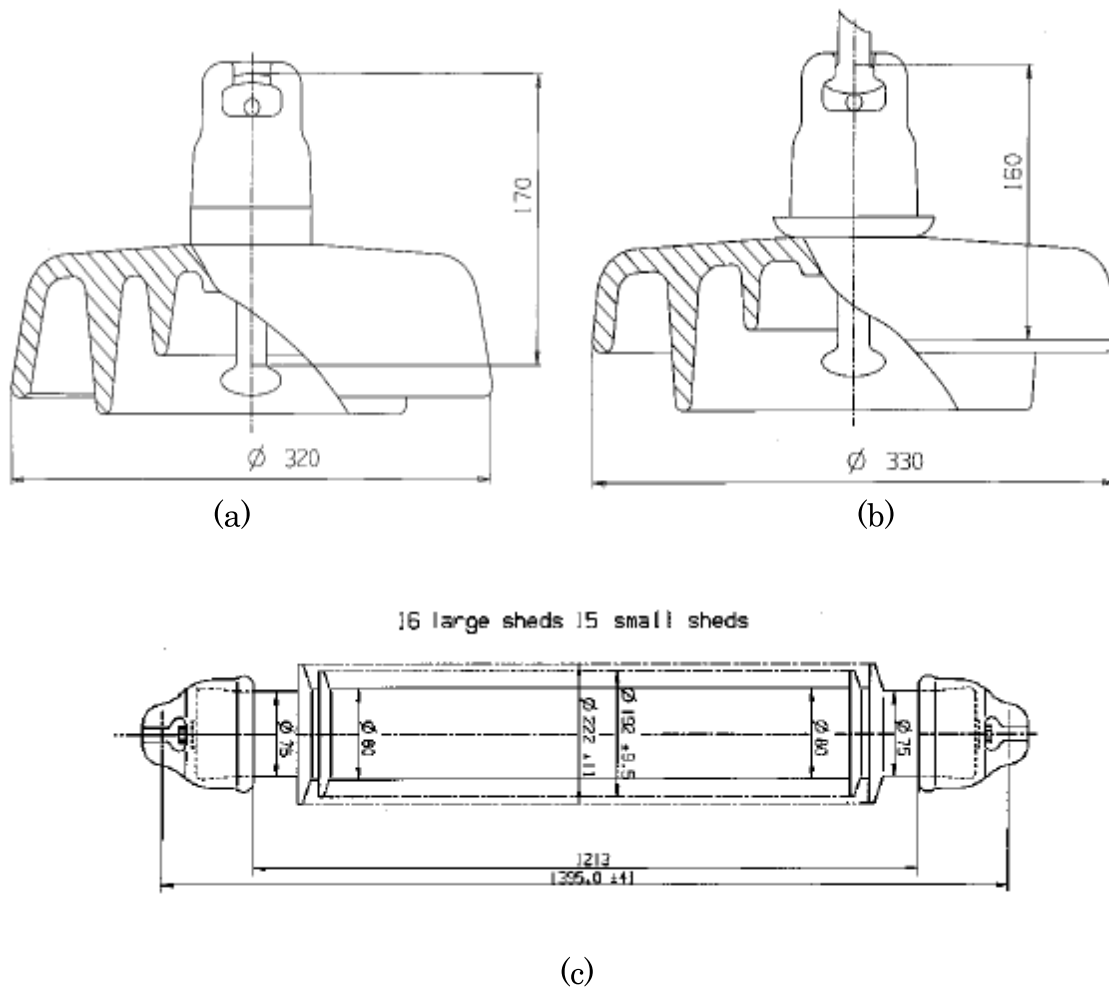


Figure I.34 : Différents types d'isolateurs testés : (a) E 160 PZ/170 HVAC, (b) F16 P13/160 DR HVDC, (c) type long fut 75/16 + 15/1395.

I-17 Analyse temporelle et fréquentielle du signal du courant de fuite d'un isolateur recouvert de glace

F. Meghnefi et al [49] se sont intéressés à l'analyse du 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. Les tests effectués au laboratoire ont démontré que le taux de gel peut être estimé à travers l'analyse du signal du courant de fuite. Ceci est possible en étudiant dans le temps l'évolution des harmoniques d'ordres 1, 3 et 5 ainsi que par le déphasage entre les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite. La simulation du gel a été faite artificiellement dans une chambre froide de 6m×6m×9m spécialement conçue pour ce genre de recherches. La glace a été formée à partir de gouttelettes en surfusion produites par un système de buses, comme le montre la figure I.35.

L'approvisionnement en haute tension est assuré par un transformateur d'essais THT (350 kV). Le signal du courant de fuite est enregistré à travers un shunt de 5 Ω .

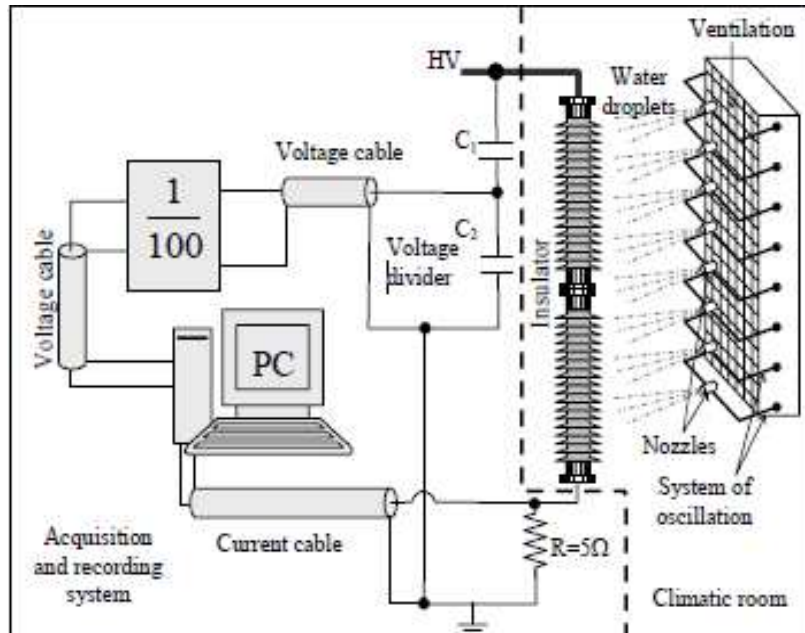


Figure I.35 : Dispositif expérimental

Afin de suivre l'état de surface de l'isolateur sous l'effet de glace, les auteurs ont étudié les variations des harmoniques du signal du courant de fuite et ceci en se limitant à ceux d'ordre 1, 3 et 5 (60Hz, 180Hz et 300Hz). Pour une meilleure représentation, les amplitudes des harmoniques d'ordres 3 et 5 sont représentés par rapport à celle du fondamental (Figure I.36).

Les auteurs ont déduit qu'initialement (faible dépôts de glace) les amplitudes des deux harmoniques sont faibles par rapport à celle du fondamental, ce qui confirme que le courant de fuite est sinusoïdal durant cette période. Par ailleurs, les mêmes chercheurs ont pu conclure que l'étude du déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite est d'une importance capitale car elle permet d'estimer l'accumulation de la glace sur les isolateurs. Ce déphasage augmente avec l'accumulation de la glace [49].

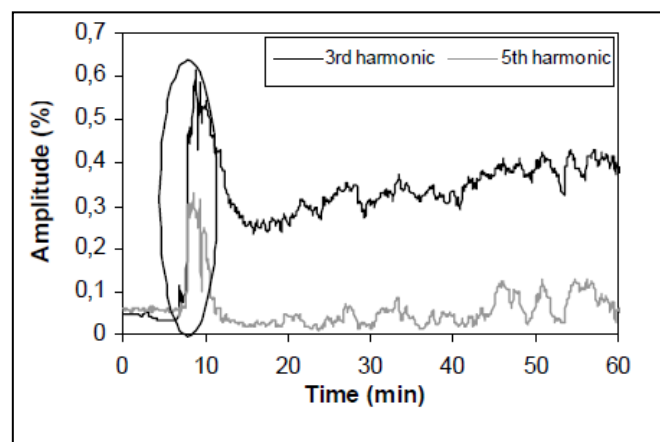


Figure I.36 : Evolution du rapport des harmoniques d'ordres 3 et 5 par rapport à celui du fondamental du signal du courant de fuite

I-18 Conclusion

Évalué en termes de risque d'occurrence du contournement des isolateurs haute tension, la nécessité de surveiller l'état de surface de ces isolateurs en service est d'une importance capitale. Les techniques actuelles les plus performantes pour évaluer le degré de sévérité de la pollution des isolateurs sont fondées pratiquement sur l'application des méthodes de traitement de signal sur l'onde du courant de fuite. La synthèse bibliographique des différents travaux antérieurs effectuée dans le présent chapitre nous permet de nous inspirer sur l'application de ces méthodes dans le domaine de la haute tension et spécialement dans celui de la pollution des isolateurs.

Signalons qu'il existe des méthodes, couramment employées, comme la transformée de Fourier, la transformée en ondelette et la technique Récurrent Plot. L'application de ces méthodes se fait généralement sur les signaux du courant de fuite et sur ceux des décharges partielles qui constituent un outil très efficace pour la prédiction du comportement de l'isolateur en service sous les contraintes de pollution. Rappelons aussi que ces méthodes peuvent être combinées avec des méthodes d'apprentissage supervisé afin de prédire également le degré de sévérité de pollution.

Chapitre II

Théories sur le traitement de signal
et les méthodes de classifications

II.1 Théories sur la transformée en ondelettes

II.1.1 Introduction

Il est bien connu que la transformée de Fourier donnée comme étant une généralisation de la série de Fourier caractérisant les signaux périodiques a l'inconvénient majeure d'ignorer complètement la contribution temporelle exacte d'une fréquence dans un signal. En pensant à résoudre ce problème, GABOR en 1946 a introduit la transformée de Fourier à court terme. Cette dernière se base sur le fenêtrage (Windowing). Il s'agit de segmenter en tranche de temps fixes le signal à analyser pour appliquer par la suite la TF à chaque tranche. Cette manière d'analyse à mener à un compromis difficile à satisfaire. Ce critère a mené aux constatations suivantes [50]:

- Fenêtre de temps longue \implies une bonne résolution fréquentielle contre une résolution temporelle pauvre.
- Dans le cas inverse, une fenêtre de temps courte \implies une résolution fréquentielle pauvre contre une résolution temporelle plus ou moins précise.

La suite logique qui devrait résoudre ce problème a été l'élaboration d'un outil puissant dénommé transformée en ondelettes (wavelets).

Les domaines d'applications qui ne cessent de s'accroître, depuis la télécommunication à la médecine en passant par l'analyse des divers phénomènes physiques tels que : les signaux sismiques, l'océanographie, la prospection géologique, démontrent d'une manière concluante la puissance de cet outil.

Dans ce qui suit, des définitions mathématiques essentielles seront présentées.

II.1.2 Intérêt du diagnostic par la transformée en ondelettes

Pour des signaux de nature non-stationnaire, la transformée de Fourier semble inapte à fournir une représentation fréquentielle locale satisfaisante à cause du compromis temps-fréquence (Figure II.1) imposé par le principe d'incertitude de Heisenberg. L'analyse par la technique des ondelettes fournit de meilleurs résultats pour le traitement local qui a pour objectif de détecter les points de discontinuités ou les zones déformées du signal, qui sont souvent de hautes fréquences [51].

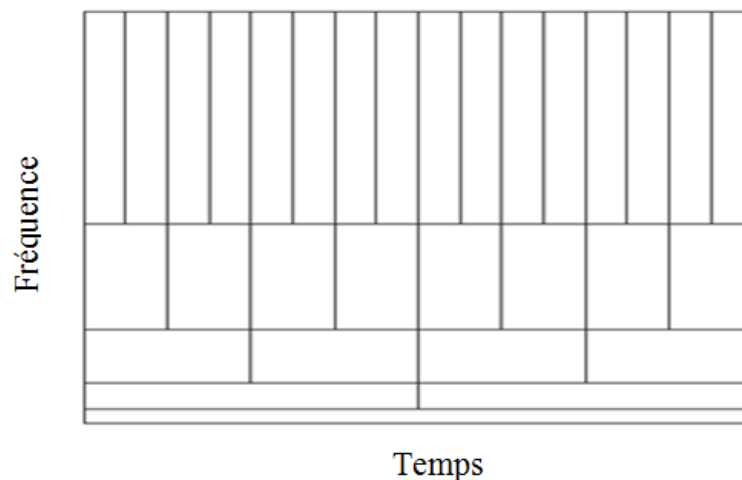


Figure II.1: Représentation de la multi-résolution temps-fréquence pour la transformée de Fourier Rapide

On constate d'après la représentation temps-fréquence (Figure II.1) que les composantes de faibles fréquences (en bas) ont une longue évolution temporelle alors que celles de hautes fréquences apparaissent pendant un très court instant; cela signifie que la résolution fréquentielle d'un signal de grande durée est meilleure pour les faibles fréquences. Par contre, si la durée du signal est relativement courte, la résolution fréquentielle sera affectée, ce qui constitue un compromis temps-fréquence.

Le traitement du signal par la technique d'ondelettes permet d'élargir les intervalles de temps lorsque l'on recherche plus de précision sur les composantes de basses fréquences. Il permet également de rétrécir les zones pour l'extraction d'informations sur les hautes fréquences. Cela démontre la capacité des ondelettes à garder une bonne résolution temporelle et fréquentielle. L'analyse par la méthode des ondelettes nous permet aussi de partitionner l'énergie du signal en différentes bandes de fréquences pour séparer toutes ses composantes.

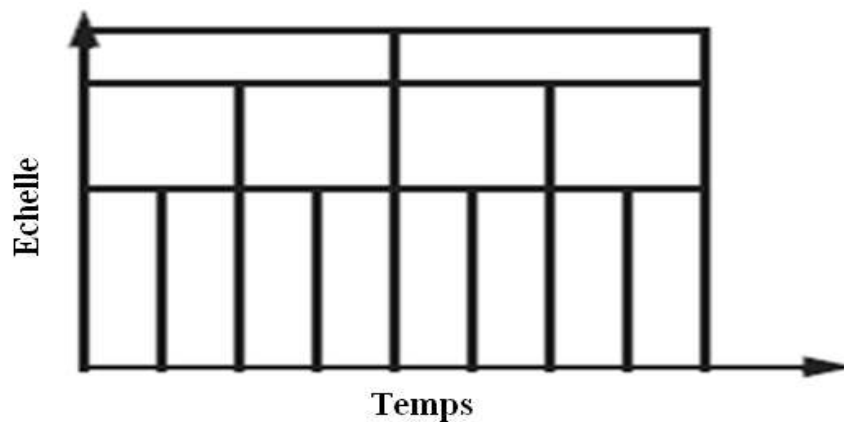


Figure II.2: Représentation de la multi-résolution temps-échelle pour l'analyse par les ondelettes

II.1.3 Transformée en ondelette continue

II.1.3.1 Définition

Les ondelettes (wavelets) sont issues de ce qu'on appelle onde mère (mother wave). On aboutira à représenter n'importe quel signal par une base d'ondelettes qui ne sont que des versions dilatées et translatées de l'onde mère. La représentation d'un signal continu $x(t)$ par une base d'ondelettes est donnée par [52, 53] :

$$X(t) = \sum W(a, b) \cdot \psi_{a,b}(t) \quad \text{II.1}$$

Où $W(a, b)$ est la pondération (le poids) de la contribution de l'ondelette $\psi_{a,b}$ liée à l'onde mère par :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \text{II.2}$$

ψ représente l'ondelette mère et les paramètres a et b désignent respectivement l'échelle et la translation de l'ondelette. La pondération de chaque ondelette est décrite par :

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi_{a,b}^*(t) dt \quad \text{II.3}$$

II.1.3.2 Illustration du changement d'échelle et de la translation

Le changement d'échelle sert à compresser ou dilater l'onde mère, ce qui mène à analyser les hautes fréquences ou les basses respectivement contenues dans un signal [50].

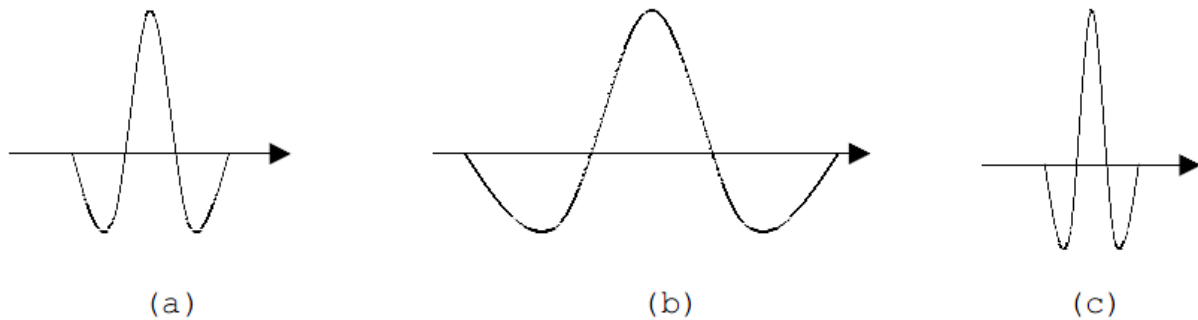


Figure II.3: Illustration de la variation du facteur d'échelle. (a) l'onde mère ; (b) l'ondelette pour $a > 1$; (c) l'ondelette pour $0 < a < 1$.

Le facteur d'échelle est lié à la fenêtre analysante de l'ondelette. Une longue fenêtre veut dire une vue globale tandis qu'une courte veut dire une vue de détails.

La translation est l'opération de glissement de l'ondelette tout au long du signal.

II.1.3.3 Calcul des coefficients de la CWT

La procédure de calcul des coefficients s'effectue en multipliant le signal par l'ondelette analysante puis en calculant l'intégrale du produit. Ce processus est accompli en quatre étapes [54].

- Dès le départ, on compare l'ondelette à une portion du signal (en débutant par le premier segment du signal).

- On calcule le coefficient $W(a, b)$ qui étudie le degré de similitude entre la portion du signal et l'ondelette analysante ; celles-ci sont similaires lorsque la valeur numérique du coefficient W est élevée. Plus précisément, lorsque l'énergie du signal et celle de l'ondelette sont relativement proches, le coefficient W peut être interprété comme un facteur de corrélation.

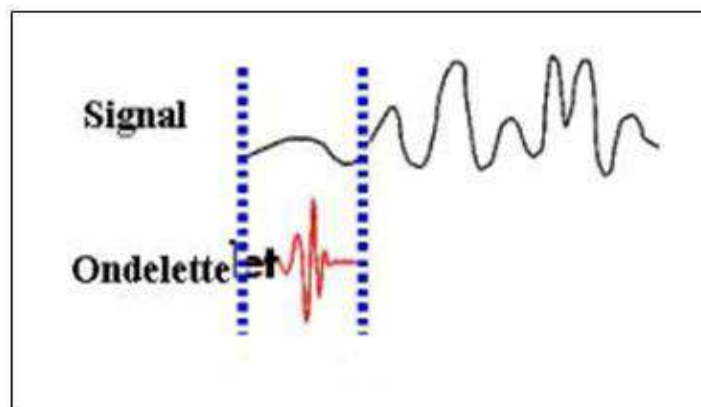


Figure II.4: Comparaison de l'ondelette à une portion du signal.

- On translate l'ondelette vers la droite jusqu'au balayage total du signal.

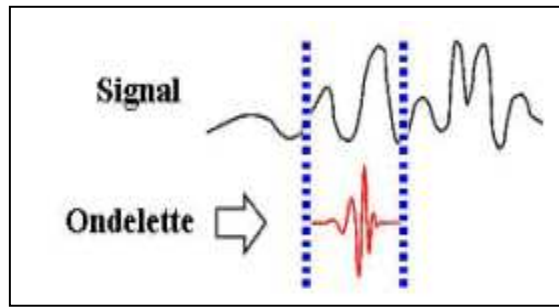


Figure II.5: Balayage du signal par l'ondelette.

- On passe ensuite à une échelle plus élevée qui induit une dilatation temporelle de l'ondelette analysante. Cela a pour effet d'augmenter la portion de comparaison.

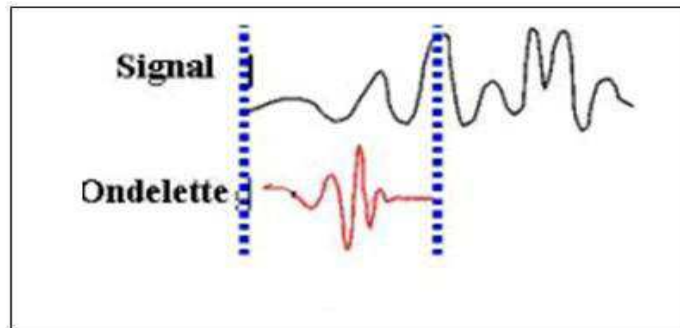


Figure II.6: Dilatation de l'ondelette et balayage du signal.

Cette opération est répétée pour chaque échelle jusqu'au calcul des coefficients pour toutes les échelles et pour différentes portions du signal. Les coefficients constituent le résultat d'une régression effectuée sur le signal original.

II.1.4 Transformée en ondelette discrète (DWT)

II.1.4.1 Définition

La transformée en ondelette discrète est basée sur la décomposition d'un signal en sous-bandes de fréquences ; elle permet un gain de calcul et une facilité d'implémentation grâce à l'analyse multi-résolution [55, 56].

II.1.4.2 Expression mathématique

La transformée en ondelette discrète a pour expression mathématique :

$$\text{DWT}_\Psi f(\mathbf{m}, \mathbf{k}) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n \mathbf{x}(\mathbf{n}) \Psi \left(\frac{\mathbf{k} - n\mathbf{b}_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (\text{II.4})$$

Ψ est l'ondelette mère dilatée par le paramètre a_0^m et translatée via le paramètre $n, \mathbf{b}_0, a_0^m, a_0$ et \mathbf{b}_0 sont des valeurs fixées tel que $a_0 > 1$ et $\mathbf{b}_0 > 0$; m et n sont des entiers naturels.

II.1.4.3 Algorithme de décomposition pyramidale

La structure pyramidale constitue une propriété intéressante à exploiter pour la transformée en ondelette discrète qui est plus connue sous le nom de chaîne de filtre logarithmique ; celle-ci est composée d'une paire de filtres, l'un étant passe-bas et l'autre passe-haut. Lorsqu'un signal est décomposé avec la DWT, il passe obligatoirement par ces deux filtres LF et HF en subissant un algorithme de sous échantillonnage ; ceci induit une séparation des composantes de basses fréquences appelées approximations et des composantes de hautes fréquences appelées détails. L'approximation est à son tour décomposée lors de son passage par la paire de filtres LF et HF. La reconstruction du signal s'effectue grâce à l'algorithme de sur-échantillonnage nommé transformée en ondelette inverse (IDWT).

Comme montré dans la figure II.7, le résultat de la DWT est constitué de plusieurs détails et d'une approximation pour un niveau de décomposition donné.

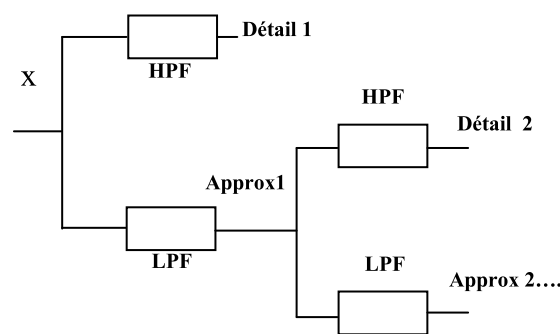


Figure II.7: Principe de l'analyse multi-résolution

II.1.4.4 Choix de l'ondelette analysante

Le choix de l'ondelette analysante joue un rôle primordial pour la compréhension des phénomènes transitoires comme les impulsions dues aux décharges électriques observées sur le signal du courant de fuite durant le phénomène de pollution. Il est cependant connu que l'ondelette Daubechies 4 'db4' est plus appropriée pour la détection des perturbations de haute fréquences [57].

L'ondelette mère complexe de Daubechies 4 à comme expression mathématique :

$$\Psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} * (e^{-j\omega t} - e^{-\frac{\omega^2}{2}}) \quad (\text{II-5})$$

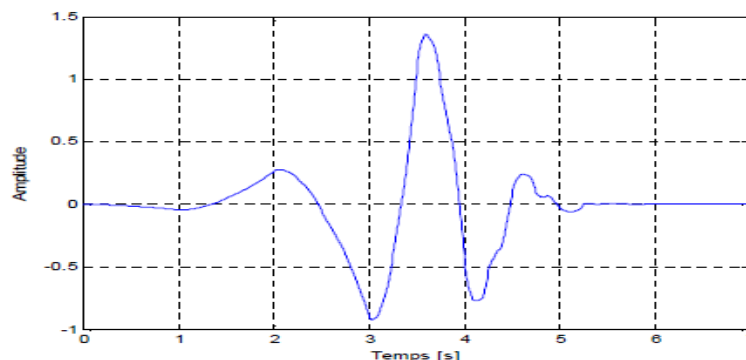


Figure II.8: Représentation de l'ondelette de Daubechies 4

L'ondelette de Daubechies 4 est choisie pour appliquer la DWT sur le signal du courant de fuite qui affiche des pics de hautes fréquences à partir d'un certain niveau de tension. Cette ondelette semble adéquate pour la détermination des bandes fréquentielles qui caractérisent les perturbations de hautes fréquences via l'analyse multi-résolution.

II.1.5 Décomposition en paquets d'ondelettes

La caractéristique principale de la transformée en ondelettes est de permettre une analyse à des résolutions variables selon les échelles d'analyse. Un phénomène lent de longue durée. L'approche par paquets d'ondelettes est différente : elle offre une librairie d'ondelettes organisées en fonction de leurs propriétés d'analyse et de localisation temps-fréquence, et donc de filtrage passe-bande, selon une architecture d'arbre binaire. Cette architecture permet alors de mettre en œuvre des algorithmes de recherche de bases adaptés à la fois aux propriétés temps-fréquence souhaitées et au signal analysé, que l'on dénomme classiquement "meilleures bases".

De plus, cette décomposition présente l'avantage d'être définie et mise en œuvre à partir d'outils théoriques et d'algorithmes développés pour la transformée discrète en ondelettes (DWT).

Les paquets d'ondelettes ont été définis en généralisant la relation entre les approximations multi-résolution et les ondelettes. Un espace V_j d'une approximation multi-résolution se décompose en un espace de résolution plus basse V_{j+1} et un espace de détails W_{j+1} . Alors que la décomposition en ondelettes se contente de décomposer les espaces d'approximations V_j et garde intacts les espaces de détails W_j , la décomposition en paquets d'ondelettes opère encore sur les espaces de détails pour en déduire de nouvelles bases.

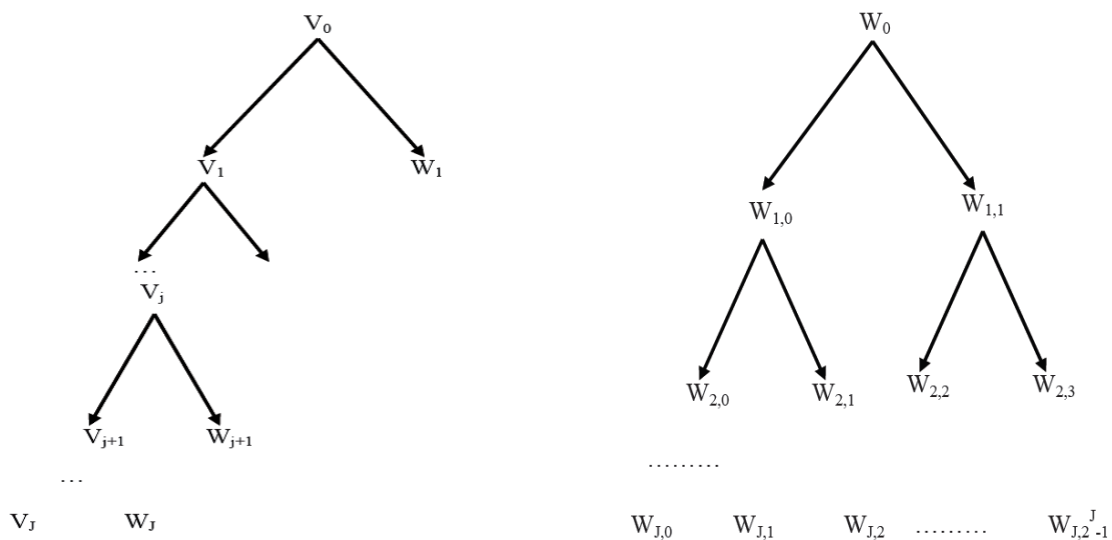


Figure II.9: Décomposition en ondelettes à l'ordre J (à gauche) et en paquets d'ondelettes (à droite).

Les caractéristiques de la figure II.9 décrivent la différence entre la décomposition en ondelettes et celle en paquets d'ondelettes. La première consiste à décomposer V_j en V_{j+1} et W_{j+1} puis à réitérer cette procédure uniquement pour V_{j+1} . Cependant, la deuxième applique

cette décomposition à V_{j+1} et W_{j+1} et redécompose chacun des sous espaces obtenus en utilisant le même banc de filtres associé à l'analyse multi-résolution.

Pour mieux illustrer la décomposition en paquets d'ondelettes associée à la construction des bases, on donne le schéma suivant (figure II.10) : soit $j \in \mathbb{Z}$, caractérisant le niveau de décomposition j . Les valeurs possibles du paramètre n qui numérote les paquets sont : $0, 1, \dots, 2^j - 1$. Dans la suite, l'espace V sera remplacé par W .

Les paquets d'ondelettes sont indexés par trois paramètres : l'échelle, l'index et la position. j peut être interprété comme un paramètre d'échelle, n comme un index de chaque nœud de l'échelle j et k correspond à la bande spectrale. Pour les différentes valeurs de j et n , la décomposition en paquets d'ondelettes est organisée en arbres. L'arbre tracé en figure II.10 est créé pour un niveau de décomposition égal à quatre.

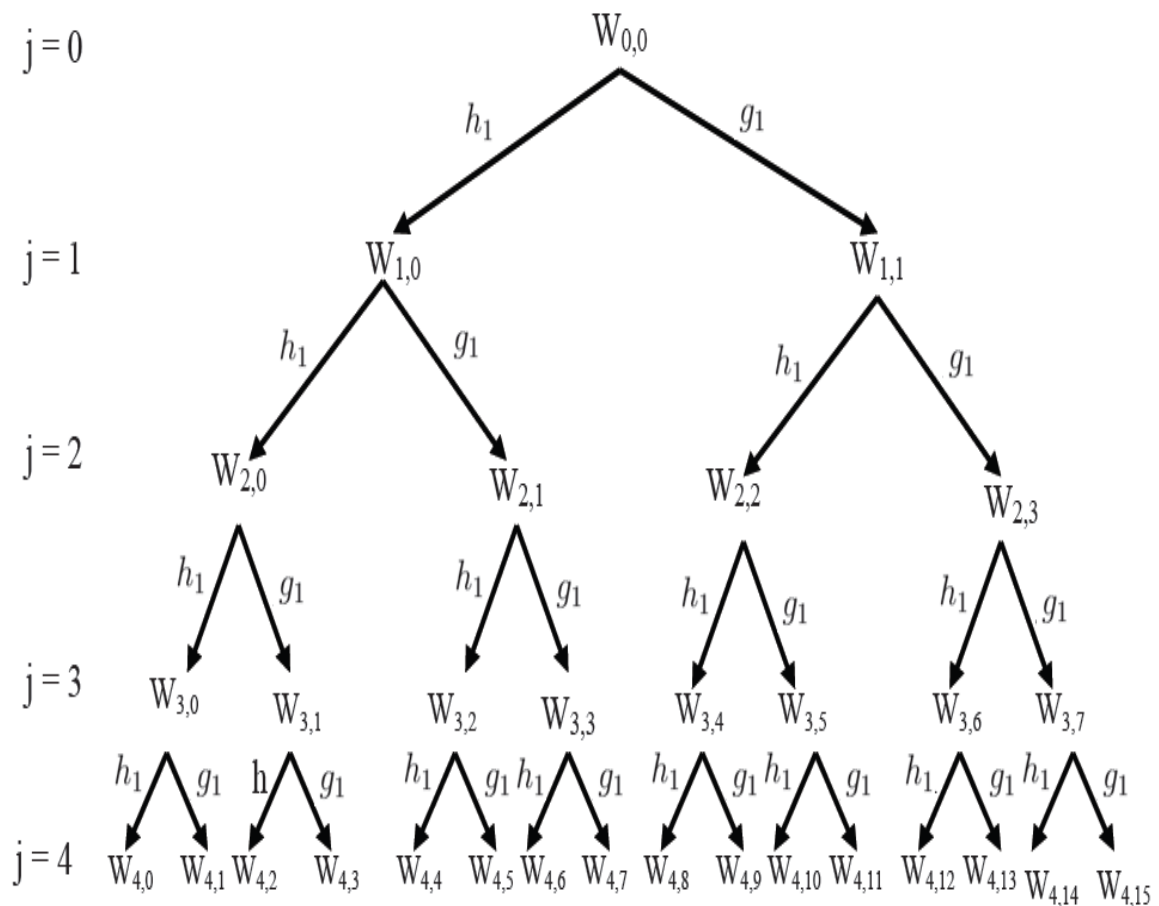


Figure II.10: Arbre obtenu après décomposition en paquets d'ondelettes.

L'arbre obtenu après décomposition en paquets d'ondelettes peut être présenté en introduisant le niveau d'échelle et le numéro de paquet pour chaque niveau de décomposition (figure II.10). Une autre façon de représenter l'arbre est de numéroter les paquets par ordre croissant (figure II.11).

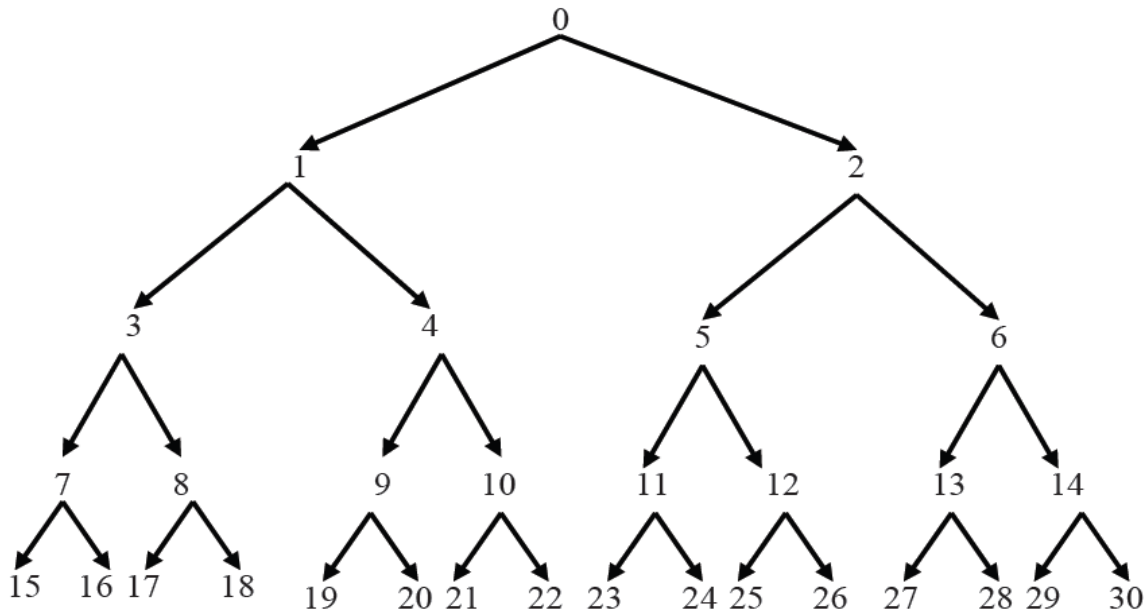


Figure II.11: Arbre obtenu après décomposition en paquets d'ondelettes, paquets numérotés

II.2 Théories sur la technique Récurrent plot (RP)

II.2.1 Introduction

Le diagramme de récurrence, ou Recurrent Plot (RP) concerne l'aspect qualitatif de la théorie du chaos. En se basant sur l'étude de la récurrence d'états d'un système dynamique, cette méthode permet une reconstruction sans pertes des données, et donne un aperçu immédiat de l'état du processus étudié. Par ailleurs, l'analyse quantitative de récurrence (RQA), permet de quantifier le comportement d'un système dynamique dans un espace de phase bien défini, en décrivant ces récurrences à l'aide de différentes mesures plus ou moins complexes. Mais en réduisant le signal sur un certain nombre de points, il perd un nombre plus ou moins important d'informations.

Ainsi, avant de décrire la structure des RP, il va de soi qu'un bref aperçu soit donné sur la théorie du chaos, quelques définitions et généralités concernant les systèmes dynamiques, pour décrire les différentes structures du RP. La structure RP sera appliquée aux composantes fréquentielles du signal du courant de fuite issues de sa décomposition en DWT.

II.2.2 Théorie du chaos

II.2.2.1 Origine et définition

La théorie du chaos est l'étude des systèmes qui ont une évolution extrêmement complexe et qui paraissent désordonnés. Cette théorie fut développée à partir des années soixante, lorsque Edward Lorenz, professeur de mathématique au MIT (Massachusetts Institut of Technologie) et père de la théorie du chaos [58], montra le caractère chaotique de l'atmosphère terrestre. Ce météorologue avait construit un modèle mathématique simple de douze variables pour prédire le déplacement des grandes masses d'air dans l'atmosphère. En faisant des simulations sur son ordinateur, il s'aperçut qu'une modification infime des données initiales pouvait changer radicalement l'évolution météorologique. Ainsi, en 1961, Lorenz venait de mettre en évidence l'une des principales caractéristiques du chaos : l'extrême sensibilité aux conditions initiales [59].

La théorie du chaos peut être définie comme étant la théorie qui traite des systèmes dynamiques rigoureusement déterministes, mais qui présentent un phénomène fondamental d'instabilité appelé « sensibilité aux conditions initiales » qui, modulant une propriété supplémentaire de récurrence, les rend non prédictibles en pratique à « long » terme [60]. La théorie du chaos est donc la théorie qui cherche de l'ordre dans le désordre.

II.2.2.1 L'attracteur de Lorenz

En 1963, à la suite de sa découverte, Lorenz entreprit alors de réaliser un nouveau modèle météorologique en réduisant le nombre de variable à trois au lieu de douze. De ce fait, Lorenz décida de représenter graphiquement la solution de son système à trois dimensions. Il obtint alors des figures géométriques dans l'espace (y_1, y_2, y_3) , qu'il appellera : les attracteurs [61] (figure II.12). Ainsi, en apportant d'infimes changements aux conditions initiales de son système, il obtient des résultats différents. Ces derniers, décrivent une courbe ressemblant fortement à des ailes de papillon. C'est pourquoi le chaos a souvent été explicité par ce qu'on appelle « l'effet papillon ».

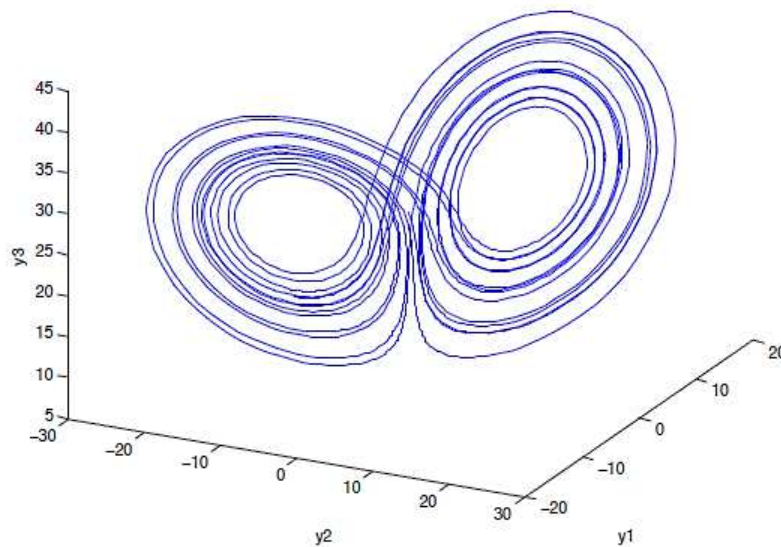


Figure II.12 : Attracteur étrange de Lorenz.

II.2.3 Systèmes dynamiques

Un système dynamique est un système physique qui évolue soit dans le temps soit par rapport à une autre variable suivant l'espace de phases considéré. La trajectoire d'un objet en mouvement dans le temps est donc un système dynamique, ainsi que le nombre d'individus d'une population quelconque dans le temps, ou encore les valeurs d'une fonction (par exemple : $y = 2x$) par rapport à la valeur de x .

II.2.3.1 Modèle déterministe, modèle stochastique et modèle chaotique

On peut citer trois sortes de systèmes dynamiques : les systèmes aléatoires (aussi appelés systèmes stochastiques), les systèmes déterministes et les systèmes chaotiques.

Les systèmes aléatoires évoluent comme leur nom l'indique au hasard dans tout l'espace sans qu'aucune équation ne les régissent, sans qu'aucune prévision exacte ne soit possible dans le temps.

Les systèmes déterministes sont des systèmes régis par des lois mathématiques bien connues. On peut donc prévoir exactement leur évolution dans le temps.

Les systèmes chaotiques, quant à eux, ont un comportement infiniment complexe. La trajectoire qu'ils décrivent se rapproche d'une figure géométrique de structure également infiniment complexe sur laquelle ils semblent errer au hasard, mais sans jamais la quitter, ni repasser deux fois par le même point. Les attracteurs qui caractérisent ces systèmes semblent inclure à la fois des lois déterministes et des lois aléatoires, ce qui rend impossible toute prévision à long terme.

II.2.3.2 Espace des phases

Pour suivre l'évolution de l'état d'un système dynamique, préalablement décrit avec des lois physiques, on définira à un instant donné un point dans un repère. Ce point caractérise l'état du système dans l'espace à cet instant. Cet espace est appelé « l'espace des phases » de dimension N . Lorsque la variable d'évolution change de valeur (quand le temps s'écoule, par exemple), le point figurant à l'état du système décrit en général une courbe dans cet espace.

II.2.3.2.1 Construction de Ruelle-Takens (méthode des délais)

En pratique, il n'est pas possible de mesurer toutes les composantes d'un vecteur \vec{x} décrit dans un espace de phases à N dimensions. Ainsi, en 1981, Ruelle et Takens [62] prouvent qu'il est possible de reconstruire l'attracteur d'une série temporelle. Dès lors, l'espace de phase est reconstruit en un « espace d'immersion » (ou espace de plongement) de dimensions m inférieur à N en utilisant les « vecteurs d'immersion » [63] décrit comme suit :

$$\vec{x}(t_i) = [x(t_i), x(t_i - \tau), \dots, x(t_i - (m - 1) \cdot \tau)] \quad (\text{II.6})$$

où m représente la dimension d'immersion, τ est le retard (ou le pas) et $x(t_i)$ est la valeur de la série temporelle à l'instant t_i .

Ce théorème permet donc de se renseigner sur le comportement d'un système non linéaire, en l'étudiant sur un espace d'immersion reconstruit à partir d'une seule série temporelle, pourvu que les paramètres m et τ de cette dernière soit connus [64].

Pour l'estimation de ces deux paramètres, différentes méthodes sont adoptées [65-70]. En ce qui concerne la dimension m , nous citons:

- False Nearest Neighbours ;
- Bad Prediction Method ;
- Fractal and Correlation Dimensions.

Pour le calcul de τ , nous pouvons utiliser les méthodes suivantes :

- Autocorrelation and Power Spectrum Functions ;
- Average Mutual Information (AMI) Function ;
- Degree of Separation Function ;
- les exposants de Lyapunov.

Ces méthodes sont des méthodes analytiques. Cependant, il existe des méthodes empiriques, nous citons : « les réseaux de neurones » et les algorithmes génétiques. Tout de même, il existe une nouvelle méthode reconnue pour son efficacité, elle permet de déterminer à la fois ces deux paramètres, elle est appelée la « C-C Method » [71].

II.2.4 Le diagramme de récurrence (RP)

II.2.4.1 Définition

Le premier concept de récurrence fut introduit par Henry Poincaré en 1890, qui non seulement, a introduit le premier concept de point récurrent [72], mais a aussi introduit un phénomène fondamental d'instabilité appelé « sensibilité aux conditions initiales » qui, modulant une propriété supplémentaire de récurrence, rend les systèmes dynamiques non prédictibles en pratique à « long terme ». Cette théorie, n'a pu être exploitée qu'après 70 ans, et ce en attendant le développement des ordinateurs et machines de calcul.

En 1987, Eckmann et al [73] ont introduit la méthode des RP pour visualiser les récurrences des systèmes dynamiques. Supposons qu'on ait une trajectoire $\{\vec{x}_i\}_{i=1}^N$ d'un système dans son espace de phase [74]. Ainsi, le RP correspondant est construit comme suit : chaque point de l'espace de phase $\{\vec{x}_i\}_{i=1}^N$ est testé s'il est proche ou non d'un autre point x_j . Ainsi, si la distance entre ces deux points est inférieur à un seuil ε prédéfini, les points sont dits récurrents et sont associés à un point noir. Dans le cas contraire, ils sont non récurrents et sont associés à un point blanc. Cela se traduit par une matrice $N \times N$, telle que :

$$R_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } \vec{x}_i \approx \vec{x}_j, \\ 0 & \text{si } \vec{x}_i \not\approx \vec{x}_j, \end{cases} \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (\text{II.7})$$

où N est le nombre d'états considérés et $\vec{x}_i \approx \vec{x}_j$ indique l'égalité avec une certaine erreur ε .

Ainsi, l'équation II.7 peut être réécrite sous sa forme matricielle :

$$R_{i,j}(\varepsilon) = \theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (\text{II.8})$$

où N est le nombre de points \vec{x}_i mesurés, ε est le seuil, $\theta(\cdot)$ est la fonction échelon ($\theta(x) = 0$ si $x < 0$, et $\theta(x) = 1$ autrement) et $\|\cdot\|$ est une norme.

Pour un ε fixé (pour les états voisins de ε), on introduit la notion suivante :

$$\vec{x}_i \approx \vec{x}_i \Leftrightarrow R_{i,i} = 1 \quad (\text{II.9})$$

Puisque $R_{i,i} = 1$ par définition, le diagramme de récurrence se caractérise par une ligne noire diagonale, appelé « la ligne d'identité » (Line Of Identity, (LOI)), avec un angle de $\pi/4$.

Le paramètre ε est crucial lors d'un diagramme de récurrence. Ainsi, une attention spéciale doit lui être accordée. Si la valeur de ε est trop grande, la plupart des points seront voisins d'autres points, ce qui produira un diagramme condensé, et donc des points non pertinents. D'autre part, si la valeur de ε choisie est trop petite, on peut perdre la plupart des points récurrents, et donc aucune information utile ne sera tirée. Par ailleurs, il n'existe pas de méthode standard pour choisir la valeur de ε . La plupart des chercheurs la choisissent comme étant égale à 0.25σ , σ représente la déviation standard du signal étudié [75].

II.2.4.2 Les structures dans les diagrammes de récurrence

Il existe 4 types de diagramme de récurrence (figure II.13), et cela dépendamment de leurs structures :

- diagramme homogène ;
- diagramme périodique et quasi-périodique ;

- diagramme dévié : une déviation est causée par des systèmes à faible variations des paramètres (systèmes non stationnaires) ;
- diagramme interrompu : les changements abrupts causent des surfaces blanches sur le diagramme [76-78].

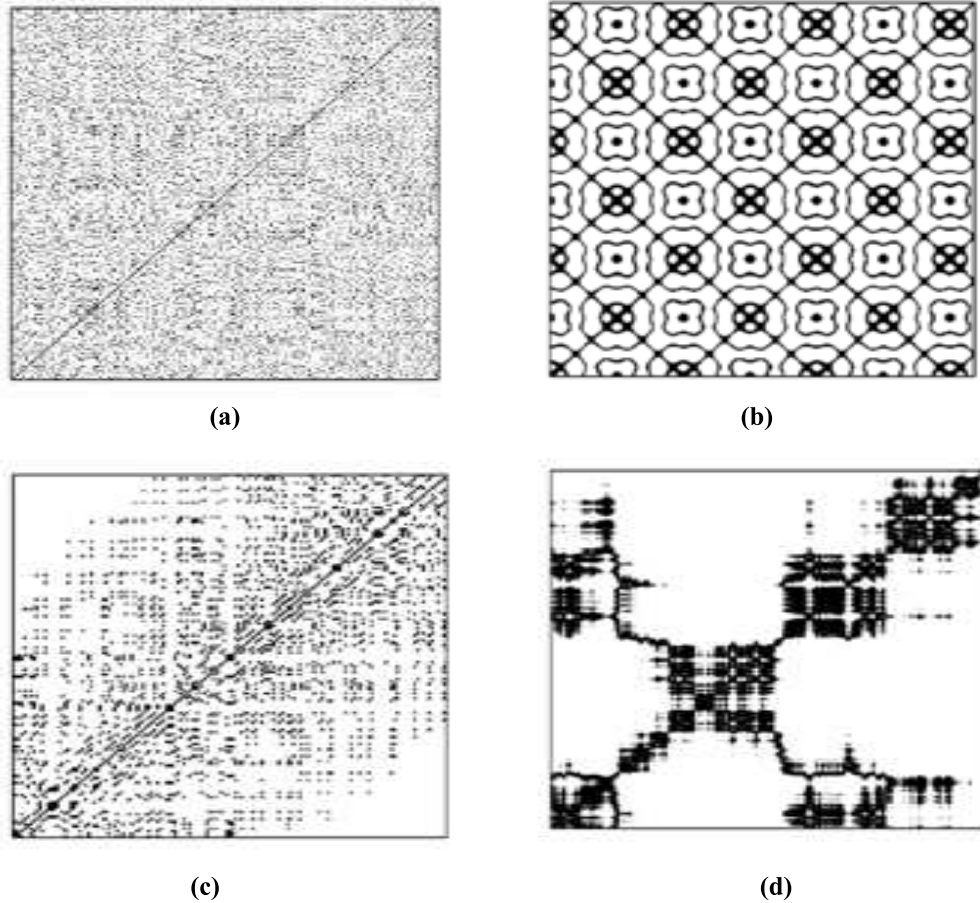


Figure II.13 : Topologie caractéristique des diagrammes de récurrence
 (a) Homogène, (b) périodique, (c) dévié et (d) interrompu.

La technique RP consiste donc en points isolés, points joints dans des segments de lignes et espaces blancs. Les points denses et les segments blancs reflètent dans notre cas la caractéristique non linéaire du signal du courant de fuite. Un « point récurrent » signifie que la distance entre deux vecteurs voisins dans l'espace de phase est inférieure ou égale à la valeur du seuil ε . La diagonale principale existe dans toutes les structures, ce qui correspond au fait que la distance entre le vecteur et la diagonale elle-même est nulle. Le point à la plus haute densité indique que la distance entre les vecteurs reconstruits dans l'espace de phase change légèrement. Il indique que les vecteurs incrustés sont très similaires aux vecteurs voisins dans m -dimensions d'espace de phase [79].

Les points à faible densité représentent un dispersément évident dans le processus. Alors que les espaces blancs indiquent un changement rapide d'amplitude. Nous résumons les significations à propos de la topologie des structures du diagramme de récurrence dans le tableau suivant.

Exemples	Signification
(1) Homogénéité	Le processus est stationnaire.
(2) Eclaircissement des coins haut gauche et bas droit	Données non stationnaires ; le processus contient un mouvement ou un décalage.
(3) Disruptions (bandes blanches)	Données non stationnaires ; certains états sont rares ; présence de transitions.
(4) Modèle périodique/ quasi-périodique	Processus cyclique ; la période correspond à la distance entre les lignes ; différentes distances entre les lignes diagonales révèlent un processus quasi-périodique.
(5) Points isolés	Forte fluctuation du processus ; si seuls les points isolés sont présents, le processus étudié est faiblement ou non corrélé.
(6) Points denses	La densité des points indique l'intensité du processus étudié. Si les points gagnent en densité, l'activité du processus étudié s'intensifie.
(7) Lignes diagonales (parallèles à la LOI)	L'évolution est similaire à d'autres périodes ; le processus peut être déterministe. Si ces lignes diagonales sont présentes à côté des points isolés, le processus peut être chaotique.
(8) Lignes diagonales (orthogonale à la LOI)	L'évolution est similaire à d'autres périodes mais en temps inverse ; parfois, cela indique une dimension d'immersion m insuffisante.
(9) Lignes verticales et horizontales	Certains états présentent des changements peu nombreux ou lents ; indiquant des états laminaires.
(10) Lignes longues arquées	L'évolution est similaire à d'autres périodes mais à une vitesse différente ; la dynamique du système peut être variable.

Tableau II.1 : Exemples typiques de diagramme de récurrence et leurs significations.

II.3 Théories sur les supports vecteurs machines

II.3.1 Introduction

L'apprentissage supervisé (machine-learning) est une technique d'apprentissage automatique où l'on cherche à extraire automatiquement des règles de classification à partir d'une base de données d'apprentissage contenant des « *exemples* » (en général des cas déjà traités et validés) [80].

La plupart des algorithmes d'apprentissage supervisé tentent de trouver un modèle -une fonction mathématique- qui explique le lien entre les données d'entrée et les classes de sortie. Dans le cas de la classification de l'état de surface d'un isolateur de haute tension, on fournit donc à la machine des exemples sous la forme (échantillon, Classe). Cette méthode de raisonnement est appelée inductive car on induit de la connaissance (le modèle) à partir des données d'entrée (les échantillons) et de sorties (leurs Catégories). Grâce à ce modèle, on peut alors déduire les classes de nouvelles données. Le modèle est utilisé pour prédire l'état de surface d'un isolateur. Le modèle est bon s'il permet de bien prédire [81].

Les machines à vecteurs de support ou séparateurs à vaste marge (*Support Vector Machine*, SVM) sont un ensemble de techniques d'apprentissage supervisé destinées à résoudre des problèmes de discrimination (décider à quelle classe appartient un échantillon), ou de régression (prédire la valeur numérique d'une variable). Les SVM ont été développés dans les années 1990 à partir des considérations théoriques de Vladimir Vapnik. Les SVM ont rapidement été adoptés pour leur capacité à travailler avec des données de grandes dimensions, et donnent de bons résultats en pratique. Les SVM ont été appliqués dans de nombreux domaines (bio-informatique, recherche d'information, vision par ordinateur, haute tension...etc.).

Les séparateurs à vastes marges sont des classifieurs qui reposent sur deux idées clés, qui permettent de traiter des problèmes de discrimination non-linéaire, et de reformuler le problème de classement comme un problème d'optimisation quadratique. La première idée clé est la notion de *marge maximale*. La marge est la distance entre la frontière de séparation et les échantillons les plus proches. Ces derniers sont appelés *vecteurs supports*. Dans les SVM, la frontière de séparation est choisie comme celle qui maximise la marge. Afin de pouvoir traiter des cas où les données ne sont pas linéairement séparables, la deuxième idée clé des SVM est de transformer l'espace de représentation des données d'entrées en un espace de plus grande dimension (possiblement de dimension infinie), dans lequel il est probable qu'il existe un séparateur linéaire. Ceci est réalisé grâce à une fonction noyau. Les fonctions noyau permettent de transformer un produit scalaire dans un espace de grande dimension. Cette technique est connue sous le nom de kernel-trick.

II.3.2 Principe général [82]

Les SVM peuvent être utilisés pour résoudre des problèmes de discrimination, c'est-à-dire décider à quelle classe appartient un échantillon, ou de régression, c'est-à-dire prédire la valeur numérique d'une variable. La résolution de ces deux problèmes passe par la construction d'une fonction h qui à un vecteur d'entrée x fait correspondre une sortie y :

$$y = h(x) \quad (\text{II. 10})$$

On se limite pour l'instant à un problème de discrimination à deux classes (discrimination binaire), c'est-à-dire $y \in \{-1, 1\}$, le vecteur d'entrée x étant dans un espace X muni d'un produit scalaire. On peut prendre par exemple $X = \mathbb{R}^N$.

II.3.2.1 Discrimination linéaire et hyperplan séparateur [83, 84]

Pour rappel, le cas simple est le cas d'une fonction discriminante linéaire, obtenue par combinaison linéaire du vecteur d'entrée $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, avec un vecteur de poids $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_N)$:

$$y_k = (\omega \cdot x_k + b) \quad (\text{II. 11})$$

Il est alors décidé que x est de classe 1 si $h(x) \geq 1$ et de classe -1 sinon. C'est un classifieur linéaire. La frontière de décision $h(x) = 1$ est un hyperplan, appelé *hyperplan séparateur*, ou *séparatrice*. Rappelons que le but d'un algorithme d'apprentissage supervisé est d'apprendre la fonction $h(x)$ par le biais d'un ensemble d'apprentissage :

$$\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\} \in \mathbb{R}^N \times \{-1, 1\}$$

Où

- les y_k sont les classes assignées ;
- p : est la taille de l'ensemble d'apprentissage ;
- N : la dimension des vecteurs d'entrée.

II.3.2.2 Exemple [82]

Prenons un exemple pour bien comprendre le concept. Imaginons un plan (espace à deux dimensions) dans lequel sont répartis deux groupes de points. Ces points sont associés à un groupe : les points (+) pour $y > x$ et les points (-) pour $y < x$. On peut trouver un séparateur linéaire évident dans cet exemple, la droite d'équation $y = x$. Le problème est dit linéairement séparable [Figure II-14].

Pour des problèmes plus compliqués, il n'existe en général pas de séparateur linéaire. Imaginons par exemple un plan dans lequel les points (-) sont regroupés à l'intérieur d'un cercle, avec des points (+) tout autour : aucun séparateur linéaire ne peut correctement séparer les groupes : le problème n'est pas linéairement séparable. Il n'existe pas d'hyperplan séparateur.

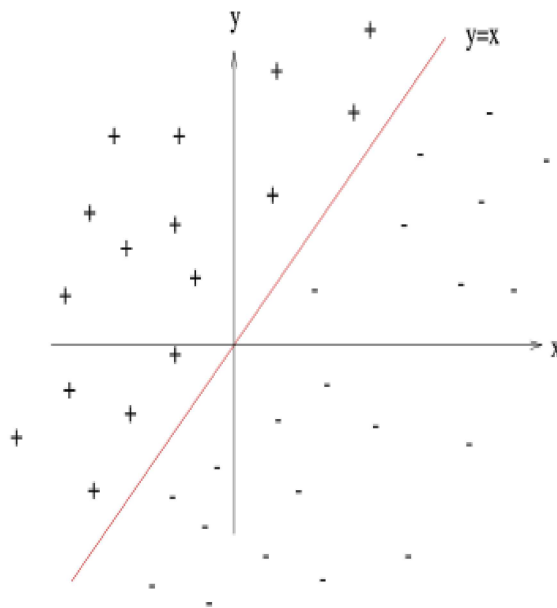


Figure II.14: séparateur linéaire

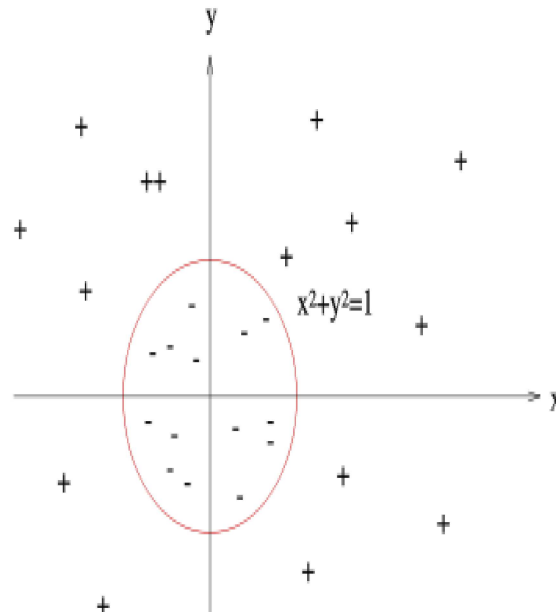


Figure II.15: séparateur non-linéaire

II.3.2.3 Construction de l'hyperplan optimal

Pour bien décrire la technique de construction de l'hyperplan optimal séparant des données appartenant à deux classes différentes dans deux cas différents : Le cas des données linéairement séparables et le cas des données non-linéairement séparables. Nous considérons le formalisme suivant :

$$D = \{(x_i, x_i) \in \mathbb{R}^N \times \{-1, 1\} \text{ pour } i = 1, 2, \dots, m\} \quad (\text{II. 12})$$

II.3.2.3.1 Cas des données linéairement séparables

Dans ce paragraphe nous présentons la méthode générale de construction de l'Hyperplan Optimal (HO) qui sépare des données appartenant à deux classes différentes linéairement séparables. La figure II-16 donne une représentation visuelle de l'HO dans le cas des données linéairement séparables [83, 84].

Soit $H : (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + \mathbf{b}$ l'hyperplan qui satisfait les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + \mathbf{b} \geq 1 & \text{si } y_i = 1 \\ \mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + \mathbf{b} \leq -1 & \text{si } y_i = -1 \end{cases} \quad (\text{II. 13})$$

Ce qui est équivalent à :

$$y_i(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + \mathbf{b}) \geq 1 \text{ pour } i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{II. 14})$$

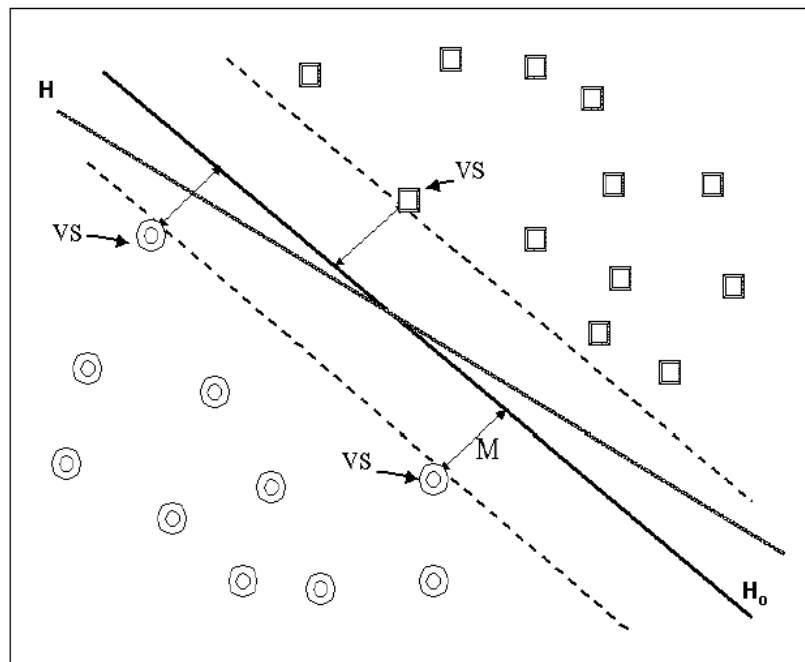


Figure II.16: Hyperplans séparateurs : H est un hyperplan quelconque, H_0 est l'hyperplan optimal, M est la marge qui représente la distance entre les différentes classes et H_0 (VS sont les Vecteurs Supports).

Comme nous l'avons déjà mentionné, un HO est un hyperplan qui maximise la marge M qui représente la plus petite distance entre les différentes données des deux classes et l'hyperplan. Maximiser la marge M est équivalent à maximiser la somme des distances des deux classes par rapport à l'hyperplan. Ainsi, la marge a l'expression mathématique suivante :

$$\begin{cases} M = \min_{x_i|y_i=1} \frac{\mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b}}{\|\mathbf{w}\|} - \max_{x_i|y_i=-1} \frac{\mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b}}{\|\mathbf{w}\|} \\ = \frac{1}{\|\mathbf{w}\|} - \frac{-1}{\|\mathbf{w}\|} \\ = \frac{2}{\|\mathbf{w}\|} \end{cases} \quad (\text{II. 15})$$

Trouver l'hyperplan optimal revient donc à maximiser $\frac{2}{\|w\|}$. Ce qui est équivalent à minimiser $\frac{\|w\|^2}{2}$ sous la contrainte. Ceci est un problème de minimisation quadratique.

- **Principe de Lagrange (1788)** [82]

Pour résoudre un problème d'optimisation sous contrainte, il suffit de rechercher un point stationnaire z_0 du lagrangien $L(z, \alpha)$ de la fonction g à optimiser et les fonctions C_i^g exprimant les contraintes

$$L(z, \alpha) = g(z) + \sum_{i=1}^m \alpha_i C_i^g(z) \quad (\text{II. 16})$$

Où les $\alpha_i = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ sont des constantes appelées *coefficient de Lagrange*

- **Principe de Kuhn-Tucker (1951)** [84]

Avec des fonctions g, C_i^g convexes, il est toujours possible de trouver un point-selle (z_0, α^*) qui vérifie :

$$\min_z L(z, \alpha^*) = L(z_0, \alpha^*) = \max_{\alpha \geq 0} L(z, \alpha) \quad (\text{II. 17})$$

En appliquant le principe de Kuhn-Tucker, on est amené à rechercher un point-selle (w_0, b_0, α^0) . Le lagrangien correspondant à notre problème est :

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} w \cdot w - \sum_{i=1}^m \alpha_i [y_i [(x_i \cdot w) + b] - 1] \quad (\text{II. 18})$$

Le lagrangien doit être minimal par rapport à w et b et maximal par rapport à $\alpha \geq 0$.
 $L(w, b, \alpha)$ est minimal par rapport à b :

$$\frac{\partial L(w, b, \alpha)}{\partial b} = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i = 0 \quad (\text{II. 19})$$

$L(w, b, \alpha)$ est minimal par rapport à w :

$$\frac{\partial L(w, b, \alpha)}{\partial w} = 0 \Leftrightarrow w - \sum_{i=1}^m \alpha_i x_i y_i = 0 \quad (\text{II. 20})$$

$L(w, b, \alpha)$ est maximal par rapport à $\alpha \geq 0$:

En remplaçant (II-19) et (II-20) dans le lagrangien (II-18) on aura

$$L(w, b, \alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \quad (\text{II. 21})$$

Soit la solution $\alpha^0 = (\alpha_1^0, \alpha_2^0, \dots, \alpha_m^0)$. D'après le théorème de Kuhn-Tucker une condition nécessaire et suffisante pour que α^0 soit optimal est :

$$\alpha_i^0 [y_i [(x_i \cdot w) + b] - 1] = 0 \text{ pour } i = 1, \dots, m \quad (\text{II. 22})$$

Ce qui veut dire : $\alpha_i^0 = 0$ ou $y_i [(x_i \cdot w) + b] = 1$

On définit les *vecteurs supports* VS tout vecteur x_i tel que $y_i[(x_i \cdot w) + b] = 1$. Ce qui est équivalent à :

$$VS = \{x_i | \alpha_i > 0\} \text{ pour } i = 1, \dots, m \quad (\text{II. 23})$$

Ainsi, on peut facilement calculer w_0, b_0 :

$$w_0 = \sum_{VS} \alpha_i^0 y_i x_i \quad (\text{II. 24})$$

$$b_0 = -\frac{1}{2} [(w_0 \cdot x^*(1))] + [(w_0 \cdot x^*(-1))] \quad (\text{II. 25})$$

La fonction de classement $class(x)$ est définie par :

$$\begin{cases} class(x) = sign[(w_0 \cdot x) + b_0] \\ = sign \left[\sum_{x_i \in VS} \alpha_i^0 y_i (x_i \cdot x) + b_0 \right] \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

Si $class(x)$ est inférieure à 0 , x est de la classe -1 sinon il est de la classe 1 .

II.3.2.3.2 Cas des données non-linéairement séparables [84]

La notion de marge maximale et la procédure de recherche de l'hyperplan séparateur telles que présentées pour l'instant ne permettent de résoudre que des problèmes de discrimination séparables linéairement. C'est une limitation sévère qui condamne à ne pouvoir résoudre que des problèmes particuliers. Afin de remédier au problème de l'absence de séparateur linéaire, l'idée des SVM est de reconsidérer le problème dans un espace de dimension supérieure. Dans ce nouvel espace, il est alors probable qu'il existe un séparateur linéaire.

Plus formellement, on applique aux vecteurs d'entrée x une transformation non-linéaire φ . L'espace d'arrivée $\varphi(x)$ est appelé espace de redescription. Dans cet espace, on cherche alors l'hyperplan qui vérifie

$$(x) = w \cdot \varphi(x) + b_0 \quad (\text{II. 27})$$

$y_i h(x) \geq 1$, pour tous les points x_k de l'ensemble d'apprentissage, c'est-à-dire l'hyperplan séparateur dans l'espace de redescription.

En utilisant la même procédure que dans le cas sans transformation, on aboutit au problème d'optimisation suivant :

$$\text{Maximiser } L(w, b, \alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m \alpha_i \alpha_j y_i y_j \varphi(x_i) \cdot \varphi(x_j) \quad (\text{II. 28})$$

Sous les contraintes $\alpha_i \geq 0$, et $\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i = 0$

Le problème de cette formulation est qu'elle implique un produit scalaire entre vecteurs dans l'espace de redescription, de dimension élevée, ce qui est coûteux en termes de calculs. Pour

résoudre ce problème, on utilise une astuce connue sous le nom de Kernel trick, qui consiste à utiliser une fonction noyau, qui vérifie :

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_i) \cdot \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_j) \quad (\text{II. 29})$$

D'où l'expression de la fonction de classement en fonction de la fonction noyau:

$$\text{class}(x) = \text{sign} \left[\sum_{\mathbf{x}_i \in \mathcal{V}_S} \alpha_i^0 y_i (K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)) + b_0 \right] \quad (\text{II. 30})$$

- **Choix de la fonction noyau** [81, 84]

En pratique, on ne connaît pas la transformation $\boldsymbol{\varphi}$, on construit plutôt directement une fonction noyau. Celle-ci doit respecter certaines conditions, elle doit correspondre à un produit scalaire dans un espace de grande dimension.

L'exemple le plus simple de fonction noyau est le noyau linéaire :

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j \quad (\text{II. 31})$$

On se ramène donc au cas d'un classifieur linéaire, sans changement d'espace. L'approche par Kernel trick généralise ainsi l'approche linéaire. Le noyau linéaire est parfois employé pour évaluer la difficulté d'un problème.

Des noyaux usuels employés avec les SVM sont:

- le noyau polynomial $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j + \mathbf{1})^d$
- le noyau gaussien $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = e^{-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2}{2\sigma^2}}$

Pour les problèmes de discriminations à plus de deux classes, plusieurs méthodes sont exposées dans la littérature. Nous citons la plus connue d'entre elles, la méthode **one-versus-all** (appelée parfois **one-versus-the-rest**) qui consiste à construire M classifieurs binaires en attribuant la classe 1 aux échantillons de l'une des classes et la classe -1 à toutes les autres. En phase de test, la classe est assignée au classifieur donnant la valeur de confiance la plus élevée remporte le vote.

II.4 Théories sur la méthode Naïve Bayésienne

Le modèle probabiliste pour un classifieur est le modèle conditionnel [85-90]

$$P(C | F_1, \dots, F_n) \quad (\text{II. 32})$$

Où C est une variable de classe dépendante dont les instances ou *classes* sont peu nombreuses, conditionnée par plusieurs variables caractéristiques F_1, \dots, F_n .

Lorsque le nombre de caractéristiques n est grand, ou lorsque ces caractéristiques peuvent prendre un grand nombre de valeurs, baser ce modèle sur des tableaux de probabilités devient impossible. Par conséquent, nous le dérivons pour qu'il soit plus facilement soluble.

A l'aide du théorème de Bayes, nous écrivons

$$P(C | F_1, \dots, F_n) = \frac{P(C)P(F_1, \dots, F_n | C)}{P(F_1, \dots, F_n)} \quad (\text{II. 33})$$

En pratique, seul le numérateur nous intéresse, puisque le dénominateur ne dépend pas de C et les valeurs des caractéristiques F_i sont données. Le dénominateur est donc en réalité constant.

Le numérateur est soumis à la loi de probabilité à plusieurs variables

$$P(C, F_1, \dots, F_n) \quad (\text{II. 34})$$

et peut être factorisé de la façon suivante, en utilisant plusieurs fois la définition de la probabilité conditionnelle :

$$\begin{aligned} P(C, F_1, \dots, F_n) &= P(C)P(F_1, \dots, F_n | C) = P(C)P(F_1 | C)P(F_2, \dots, F_n | C, F_1) \\ &= P(C)P(F_1 | C)P(F_2 | C, F_1)P(F_3, \dots, F_n | C, F_1, F_2) \\ &= P(C)P(F_1 | C)P(F_2 | C, F_1)P(F_3 | C, F_1, F_2) \dots P(F_n | C, F_1, F_2, F_3, \dots, F_{n-1}) \end{aligned}$$

C'est là que nous faisons intervenir l'hypothèse naïve : si chaque F_i est indépendant des autres caractéristiques $F_{j \neq i}$, alors.

$$P(F_i | C, F_j) = P(F_i | C) \quad (\text{II. 35})$$

Pour tout $j \neq i$, par conséquent la probabilité conditionnelle peut s'écrire

$$\left\{ \begin{aligned} P(C, F_1, \dots, F_n) &= P(C)P(F_1 | C)P(F_2 | C)P(F_3 | C) \dots \\ &= P(C) \prod_{i=1}^n P(F_i | C) \end{aligned} \right. \quad (\text{II. 36})$$

Par conséquent, en tenant compte de l'hypothèse d'indépendance ci-dessus, la probabilité conditionnelle de la variable de classe C peut être exprimée par

$$P(C | F_1, \dots, F_n) = \frac{1}{Z} P(C) \prod_{i=1}^n P(F_i | C) \quad (\text{II. 37})$$

Où Z (appelé "évidence") est un facteur d'échelle qui dépend uniquement de F_1, \dots, F_n , à savoir une constante dans la mesure où les valeurs des variables caractéristiques sont connues.

$$Z = P(F_1, F_1, \dots, F_1) \quad (\text{II. 38})$$

Les modèles probabilistes ainsi décrits sont plus faciles à manipuler, puisqu'ils peuvent être factorisés par l'antérieure $p(\mathbf{C})$ (probabilité à priori de \mathbf{C}) et les lois de probabilité indépendantes.

II.4.1 Construction d'un classifieur à partir du modèle de probabilités

Jusqu'à présent nous avons établi le modèle à caractéristiques indépendantes, à savoir le modèle de probabilités naïf bayésien. Le classifieur naïf bayésien couple ce modèle avec une règle de décision. Une règle couramment employée consiste à choisir l'hypothèse la plus probable. Il s'agit de la règle du maximum à posteriori ou *MAP*. Le classifieur correspondant à cette règle est la fonction classifieur suivante [91-93]:

$$\text{classifieur}(f_1, \dots, f_n) = \underset{c}{\operatorname{argmax}} P(\mathbf{C} = c) \prod_{i=1}^n P(F_i = f_i | \mathbf{C} = c) \quad (\text{II. 39})$$

Tel que :

L'argument du maximum, noté *argmax*, est l'ensemble des points en lesquels une expression atteint sa valeur maximale.

$$\underset{c}{\operatorname{argmax}}(f(x)) \Leftrightarrow \{x \mid \forall y: f(y) \leq f(x)\} \quad (\text{II. 40})$$

II.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré essentiellement à faire un tour d'horizon sur les méthodes de traitement de signal. Il donne un aperçu sur l'intérêt du diagnostic par la transformée en ondelettes. Les notions échelle et translation ont été illustrées également. Nous étalons nos présentations sur les stipulations théoriques de recurrent plot. En outre, les théories correspondantes aux deux méthodes de classifications distinctes ont été traitées dans ce chapitre.

Chapitre III

Équipements et méthodologies expérimentales

III-1 Introduction

Le comportement diélectrique des chaînes d'isolateurs haute tension est fortement corrélé aux conditions climatiques des régions dont lesquelles ces chaînes sont placées. Cela pose un problème assez complexe si on veut étudier, d'une façon générale, le comportement des isolateurs soumis à une tension électrique. Pour simplifier le problème, les chercheurs ont identifié les contraintes les plus sévères tout en gardant à l'esprit les possibilités offertes par les laboratoires d'essais. En effet, pour tester en laboratoire une chaîne d'isolateurs, un transformateur THT dont la puissance est adaptée en conséquence est alors nécessaire, ce qui demande aussi une infrastructure très spécialisée et peu répandue. Par ailleurs, ces essais peuvent aussi être réalisés sur des sites naturels, mais cela requiert des essais longs et fastidieux puisqu'ils deviennent tributaires des conditions climatiques qui ne sont plus contrôlables. Ainsi, les différentes méthodes d'essais proposées dans les laboratoires sont indispensables afin que les chercheurs soient capables de contrôler plusieurs contraintes électriques.

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes procédures expérimentales adoptées durant nos essais ainsi que l'équipement du laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger où nous avons effectué tous nos essais.

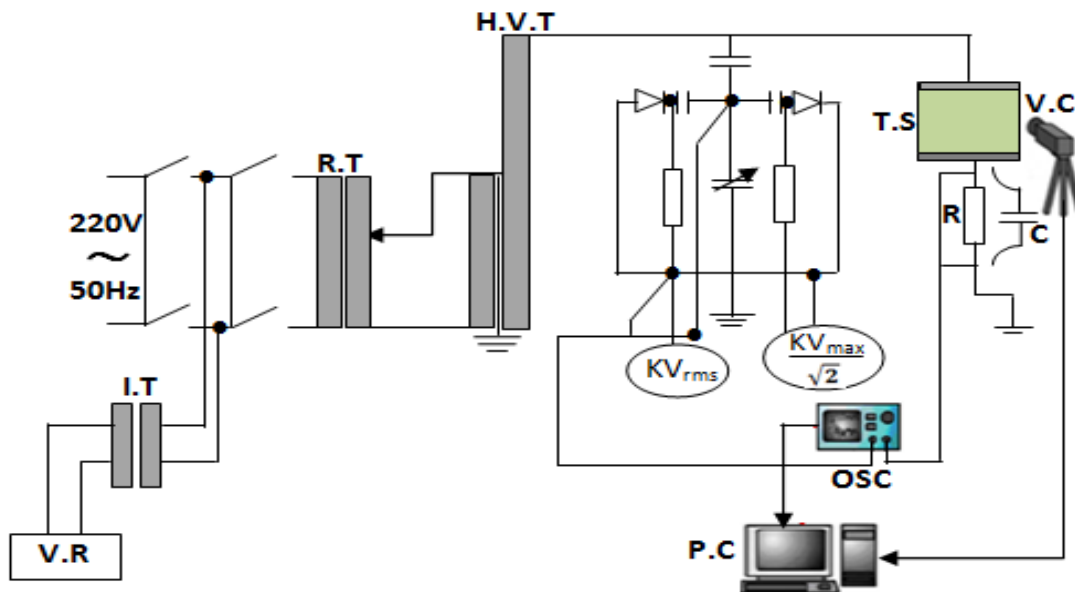
III-2 Equipements

III-2-1 Dispositif expérimental

Le laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger est muni d'une station d'essai à fréquence industrielle (50 Hz) de marque HEAFELY composée par les équipements suivants :

- Un transformateur d'essai : 500V/300kV, 50kVA, 50Hz.
- Un transformateur de réglage : 0/220V à 500V, 50kVA, 50Hz.
- Un diviseur de tension capacitif qui est relié au secondaire du transformateur d'essai pour réduire la tension aux bornes du voltmètre, situé près du pupitre de commande. Il est composé d'une capacité $C_1=400 \mu\text{F}$ et d'une capacité variable qui permet de régler la tension de sortie.
- Des appareils de mesures et de protection.
- Un oscilloscope numérique « TEKTRONIX » de bande passante 500 MHz.
- Une caméra numérique SONY DCR-SR45 pour suivre l'évolution des décharges électriques en fonction de la tension appliquée et de la distribution de la pollution sur l'isolateur étudié.
- Un ordinateur pour l'acquisition des données des signaux du courant de fuite, de la tension appliquée ainsi que la charge cumulée.

Le circuit d'essai ainsi que le dispositif expérimental sont donnés dans la figure (III.1).



**H.V.T: High Voltage Transformer - R.T: Regulating Transformer -
I.T: Isolating Transformer - V.R: Voltage Regulator- V.C: Video
Camera - T.S: Test Sample**

Figure III.1 : Dispositif d'essais et de mesure

III-2-2 Isolateurs testés

Deux types d'isolateurs ont été utilisés : l'U 120 B et un modèle plan qui pourrait représenter l'isolateur standard PSV 120 B.

- a) l'U 120 B caractérisé par une résistance mécanique de 120 kN, un diamètre de 25.5 cm et une ligne de fuite de 30 cm par élément. Les tensions de tenue à fréquence industrielle à sec et sous pluie sont respectivement 60 et 45 kV. Le choix de cet isolateur est justifié par la forme qu'il présente. Cette dernière nous permet aisément d'appliquer les deux types de pollution à savoir uniforme et non uniforme. La chaîne d'isolateurs réels U120B sur laquelle les expériences ont été effectuées est montrée sur la figure (III.2).



Figure III.2 : Chaîne d'isolateurs U120B étudiée

b) l'isolateur standard PSV 120B caractérisé par une résistance mécanique de 120 kN, un diamètre de 29 cm et une ligne de fuite de 44 cm par élément. Vu la forme inadéquate que présente cet isolateur pour l'application de la pollution non uniforme, nous avons proposé un modèle plan de laboratoire pour simuler le comportement de cet isolateur. Le modèle ainsi proposé permet une bonne reproduction de la pollution non-uniforme et une meilleure visualisation du comportement des décharges électriques. Tous les essais sont effectués sur ce modèle en verre de forme carrée de côté $L = 500$ mm et d'épaisseur $e = 5$ mm (figure III-4). Deux électrodes sont posées sur deux bandes conductrices en aluminium qui sont découpées (500×30 mm²) de manière à ne pas avoir de pointes à leurs extrémités. A l'aide du gessoil, celles-ci sont parfaitement collées contre la paroi du modèle plan pour éviter les couches d'air qui ont tendance à se former sous ces bandes, pouvant engendrer l'apparition de micro-décharges qui risquent de nuire à la qualité des mesures pendant les expériences. Le modèle est surélevé à une hauteur de 192 cm. l'isolateur standard PSV 120B ainsi que le modèle proposé sont montrés sur les figures suivantes (III.3, III.4 et III.5).

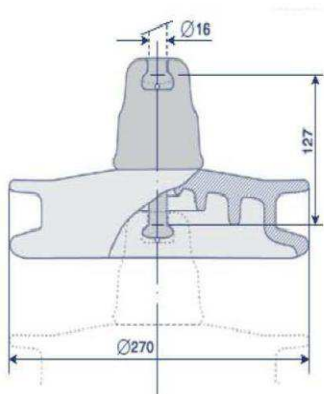


Figure III.3 : Profil de l'isolateur réel



Figure III.4 : Modèle plan étudié (vue de haut)



Figure III.5 : Dispositif général du model étudié

III-3 Procédures de test

III-3-1 Préparation des chaînes d'isolateurs et des modèles plans étudiés

Le nettoyage des chaînes d'isolateurs ainsi que des modèles plans étudiés a été effectué après chaque essai. En premier lieu, l'eau de robinet est utilisée pour éliminer le maximum d'impuretés, puis l'isolateur est séché avec des serviettes en papier. Un deuxième nettoyage est effectué à l'aide d'un bout de coton imbibé d'alcool chirurgical à 70° afin d'assurer une propreté quasi-totale de l'isolateur. Ce dernier est laissé sécher naturellement dans le laboratoire.

III-3-2 Préparation des solutions polluantes

Les solutions polluantes ont été préparées au laboratoire du Génie de l'Environnement. Celles-ci sont composées de différentes quantités de kaolin et NaCl diluées dans un litre d'eau distillée. La préparation des solutions polluantes ainsi que le choix de leurs conductivités volumiques sont fait en se basant sur les recommandations de la CEI 60060-1[94].

Selon le profil de l'isolateur étudié (chaîne réelle ou bien modèle plan), les solutions polluantes ainsi que le choix de leurs conductivités volumiques sont représentés sur les tableaux ci-après :

III-3-2-1 Modèle plan : dans ce cas, nous avons étudié seulement la pollution non uniforme avec une et trois bandes sèches :

- **Pour le cas de la pollution non uniforme avec une seule bande sèche,** trois solutions polluantes ont été adoptées : ces solutions comportent respectivement 0, 10 et 40 g de kaolin dilués dans un litre d'eau distillée. Des quantités distinctes de NaCl sont rajoutées à ces solutions pour obtenir la même conductivité volumique égale à 1.2 mS/cm. Les solutions polluantes étudiées sont résumées dans le tableau suivant:

Solutions	Concentration en Kaolin (g/l)	Conductivité (mS/cm)
1 ^{ère} solution	0 g /l	1.2
2 ^{ème} solution	10 g /l	1.2
3 ^{ème} solution	40 g /l	1.2

Tableau III.1 : Propriétés des solutions polluantes

- **Pour le cas de la pollution non uniforme avec trois bandes sèches,** les solutions polluantes étudiées sont présentées sur le tableau ci-dessous (tableau III.2). Elles sont composées de différentes quantités de Kaolin (40, 100 et 200 g/l) diluées dans un litre d'eau distillée auxquelles nous rajoutons des quantités différentes de NaCl. Six conductivités distinctes ont été obtenues pour chaque concentration en kaolin.

Solutions	Concentration en Kaolin (g/l)	Conductivité (mS/cm)
1 ^{ère} solution	40 g /l	(1.2, 3.5, 6, 10, 15 et 20)
2 ^{ème} solution	100 g /l	(1.2, 3.5, 6, 10, 15 et 20)
3 ^{ème} solution	200 g /l	(1.2, 3.5, 6, 10, 15 et 20)

Tableau III.2 : Propriétés des solutions polluantes

III-3-2-2 Chaîne d'isolateurs réelle : dans ce cas, nous avons étudié les deux types de pollution à savoir uniforme et non uniforme. Les solutions polluantes sont composées de 100 g de kaolin dilué dans un litre d'eau distillée ou bien seulement d'un litre d'eau distillée pour lesquelles, nous rajoutons les mêmes quantités pesées de NaCl. Les quantités de NaCl rajoutées sont 5, 10, 20, 30 et 40 g et ont été pesées à l'aide d'une balance dont la précision est de 10^{-4} g. Les propriétés des solutions polluantes étudiées sont données dans le tableau III.3.

	1 litre H ₂ O + NaCl	1 litre H ₂ O + NaCl + 100g Kaolin
Concentrations en NaCl [g/l]	Conductivités volumiques à 20°C [mS\cm]	Conductivités volumiques à 20°C [mS\cm]
5	3.3	2.6
10	5.9	4.9
20	14.7	8.5
30	19.6	15.8
40	20.6	19.6

Tableau III.3 : Propriétés des solutions polluantes étudiées

III-3-3 Méthode d'application de la pollution

III-3-3-1 Modèle plan : la méthode de pulvérisation a été choisie pour la pollution artificielle de la surface du modèle plan. Ce dernier est humidifié avec une solution donnée en gardant l'ouverture du pulvérisateur fixe. La pollution de la surface plane est obtenue après vingt cinq pulvérisations de chaque côté du modèle à une distance de 0.5 m qui est gardée constante durant toute l'opération. Dans l'intention de déterminer l'influence de la pollution non-uniforme sur le comportement diélectrique du modèle plan du laboratoire, de nombreux essais sont effectués sous deux types de pollution non uniforme.

- **Pollution non uniforme avec une seule bande propre:** la surface isolante a été pulvérisée partiellement en couvrant la bande qu'on veut garder propre et sèche, dans le but d'obtenir une bande propre du côté de l'électrode HT ou bien du côté de l'électrode terre (figures III.6 et III.7). Nos investigations se sont déroulées sur l'étude des bandes propres et sèches ayant les largeurs suivantes 2, 4, 6, 8, 10, 12 and 14 cm :
- **Pollution non uniforme avec trois bandes propres :** la surface isolante été pulvérisée partiellement dans le but de créer trois bandes propres comme montré sur la figure III.8 ($d_1 = 2$ cm, $d_2 = 3$ cm, $d_3 = 16$ cm et $d_4 = 19$ cm). Cette distribution de pollution n'est pas choisie d'une manière arbitraire. Elle sert à reproduire et à simuler la distribution de pollution d'une chaîne d'isolateurs réelle sur un modèle de laboratoire.

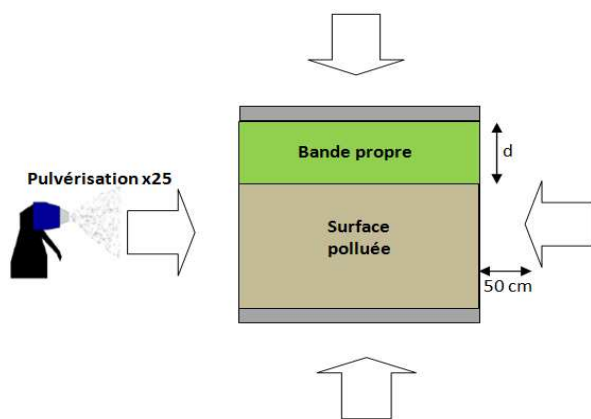


Figure III.6 : Méthode de pulvérisation

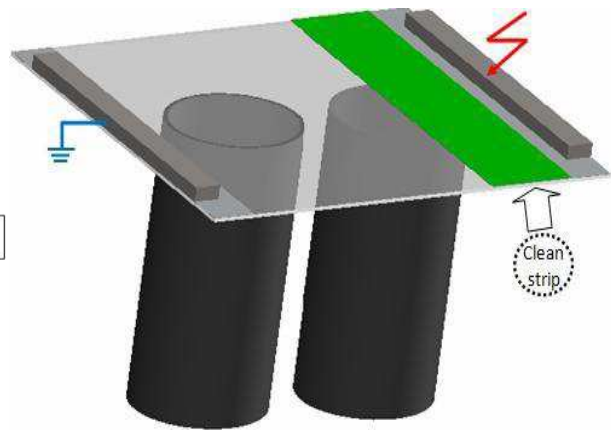


Figure III.7 : Objet d'essai

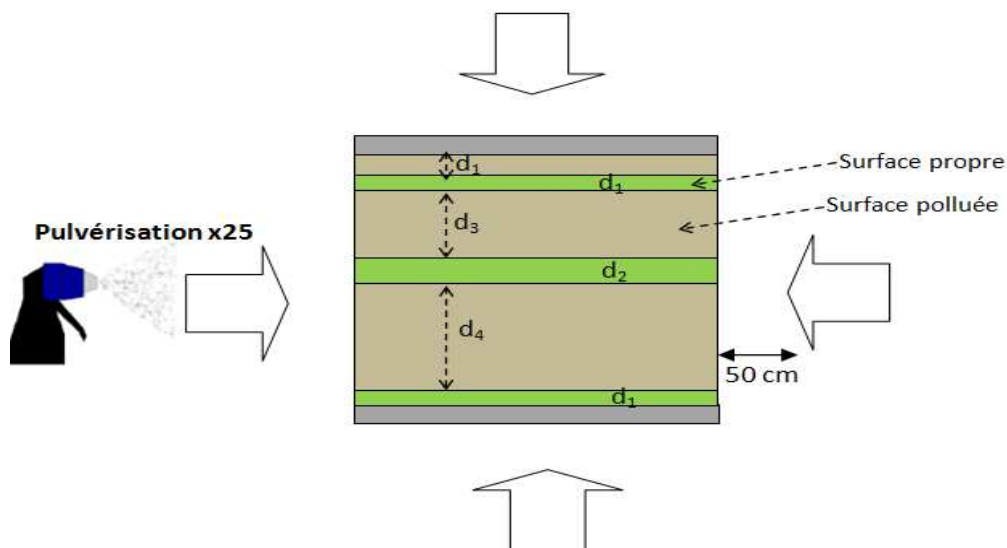


Figure III.8 : Méthode de pulvérisation

III-3-3-2 Chaîne d'isolateurs réelle : La couche de pollution est déposée sur la surface de l'isolateur réel par le procédé de pollution liquide pré-déposée. Pour cela nous avons utilisé un pinceau de largeur égale à 8 cm afin que la couche de pollution soit déposée le plus uniformément possible sur la surface de l'isolateur.

Pour simuler la distribution non uniforme de la pollution, nous avons pré-déposé la couche de pollution sur les deux surfaces à savoir interne et externe de la chaîne d'isolateur.

Afin de simuler la distribution non-uniforme de la pollution, nous avons pré-déposé la couche de pollution sur la surface interne seulement de la chaîne d'isolateur. La surface externe de cette dernière est laissée propre. La figure (III.9) montre les deux surfaces interne et externe d'un élément de la chaîne d'isolateur.



Figure III.9 : Surfaces interne et externe d'un élément de la chaîne d'isolateur.

III-4 Circuits de mesures

III-4-1 Mesure de la tension de contournement

La mesure de la tension de contournement a été effectuée pour chaque configuration de pollution à l'aide du voltmètre électrostatique, donnant la valeur de la tension en kilovolts efficace. Cette mesure permet non seulement de déterminer l'impact de la configuration de la pollution sur la tension de contournement, mais aussi de déterminer les paliers des tensions à appliquer, pour l'enregistrement du courant de fuite ainsi que la charge électrique.

III-4-2 Mesure du courant de fuite et de la charge électrique

Pour toutes les configurations de pollution étudiées, les mesures du courant de fuite et de la charge électrique ont été réalisées via un oscilloscope numérique. Pour évaluer le courant de fuite, nous récupérons le signal de la tension aux bornes d'une résistance insérée en série entre l'objet d'essai et le retour de la terre. Le signal ainsi récupéré représente l'image du courant de fuite. La mesure de la charge électrique a été effectuée également en utilisant le même circuit de mesure sauf que cette fois-ci, la résistance est remplacée par une capacité. Tous les signaux ont été enregistrés avec une fréquence d'échantillonnage de 100 kHz et les données sont stockées dans un ordinateur pour une exploitation ultérieure. Chaque test est répété entre six et dix fois pour vérifier la reproductibilité des conditions initiales.

Chapitre IV

Caractérisation des décharges sous pollution non uniforme en utilisant la technique de la transformée en ondelettes

IV.1/ Introduction

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la caractérisation des décharges sous pollution non uniforme en utilisant la technique de la transformée en ondelette. Pour cela, nous avons réalisé un nombre important d'essais expérimentaux au niveau du laboratoire. Nos investigations se sont portées sur la mise en évidence de l'influence de la largeur et de la position d'une bande sèche et propre, intégrée sur la surface polluée du modèle, sur l'évolution de plusieurs paramètres électriques. Ces derniers sont le courant de fuite, la charge électrique et le comportement d'arcs partiels. La bande propre est placée soit du côté de l'électrode haute tension, soit du côté de l'électrode terre. Les différentes largeurs de la bande propre étudiées sont 2, 4, 6, 8, 10, 12 et 14 cm. Par ailleurs, nous avons procédé à la détection de la présence ou bien de l'absence d'arcs partiels à travers les bandes propres en utilisant l'approche Discret Wavelets Transform- Standard Deviation- Multi Resolution Analysis (DWT-STD-MRA). Cette dernière est appliquée sur le signal du courant de fuite. Dans ce chapitre, nous nous sommes également intéressés à la prédiction du degré de sévérité de la pollution déposée sur la surface du modèle plan en utilisant d'autres techniques à savoir la décomposition en paquet d'ondelettes ainsi que la représentation en scalogrammes. Ces deux techniques sont toujours basées sur la transformée en ondelettes.

IV.2/ Résultats expérimentaux et discussions

IV.2.1/ Processus du contournement

Dans cette section, nous examinons l'évolution du processus du contournement sous tension alternative 50 Hz. Nous étudions l'influence de la largeur d'une bande propre placée du côté de l'électrode HT ou bien du côté de l'électrode terre sur l'activité des arcs partiels. Un caméscope numérique est utilisé pour suivre l'évolution de ces arcs depuis l'application de la tension jusqu'au contournement. Une analyse attentive de ces vidéos nous a permis une bonne examination visuelle du développement des arcs en fonction de la tension appliquée. La tension de contournement est un paramètre primordial pour définir la rigidité diélectrique du modèle de l'isolateur. Il est donc nécessaire de connaître celle-ci pour éviter qu'il y ait risque de contournement durant nos essais de mesure de courant de fuite et de la charge électrique. La mesure de la tension de contournement a été effectuée pour chaque cas de configuration de la pollution. Cette mesure permet non seulement de déterminer l'impact de la configuration du modèle sur la rigidité diélectrique de celui-ci, mais aussi de déterminer les paliers des tensions à appliquer pour l'enregistrement du courant de fuite ainsi que la charge cumulée.

Durant tous nos essais effectués au niveau du laboratoire, nous avons constaté deux modes de contournement. Le contournement direct dont le saut final apparaît directement sans aucune manifestation lumineuse visible au préalable. Le contournement indirect dont plusieurs phases peuvent être distinguées, leur existence et leurs caractéristiques dépendent notamment du niveau de la tension appliquée et de la configuration de la pollution (position et largeur de la bande propre). Nous allons nous étaler dans cette section sur le comportement des arcs partiels en fonction de cette configuration de pollution :

IV.2.1.1/ largeurs de bandes propres de 2 et 4 cm :

Pour les deux positions de la bande propre ayant 2 et 4cm de largeur, les arcs électriques présentent le même comportement. A titre d'illustration, dans le cas de la bande propre de 2 cm

située du côté de l'électrode HT, avec une concentration en kaolin de 40 g/l, le contournement passe par les étapes suivantes :

- i) Apparition d'un nombre important d'arcs partiels à travers la bande propre. Ces arcs sont caractérisés par une faible intensité (Figure IV.1). Nous notons également que ces arcs disparaissent et réapparaissent rapidement d'une manière continue le long de la couche propre.
- ii) Intensification et augmentation du nombre d'arcs à travers la bande propre (figure IV. 2). De faibles décharges situées du côté de l'électrode haute tension sont également notées. Celles-ci sont dues probablement à l'intensité du champ électrique élevée à l'interface entre l'électrode et la surface du modèle.



Figure IV.1: Occurrence d'un nombre important d'arcs partiels

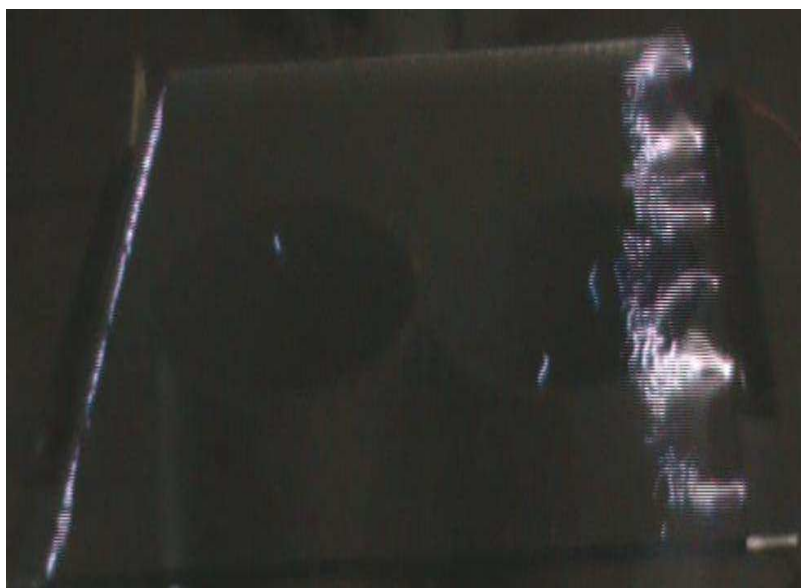


Figure IV.2: Intensification et augmentation du nombre d'arcs partiels

- iii) Forte intensification et unification d'un certain nombre d'arcs partiels et extinction d'autres (figure IV.3). Par conséquent, une réduction du nombre total d'arcs est observée.



Figure IV.3: Forte intensification d'un certain nombre d'arcs et extinction d'autres

- iv) Développement d'un seul arc partiel sur la surface du modèle. Cet arc plus rigoureux et lumineux a tendance à se propager vers l'électrode terre (figure IV4). Par ailleurs, nous constatons également une intensification et augmentation du nombre de décharges sur la surface polluée.

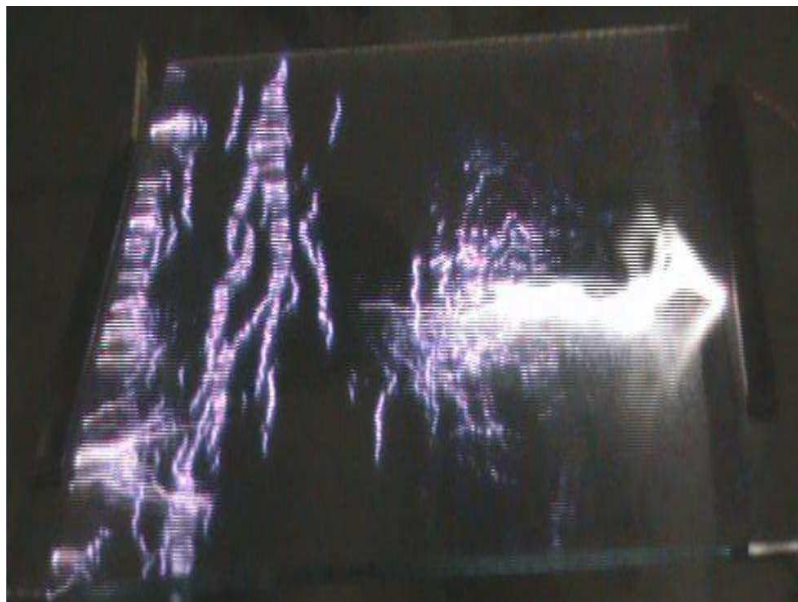


Figure IV.4: Développement d'un seul arc partiel

- v) Les premiers filaments situés à la tête de l'arc partiel principal se connectent avec ces décharges concentrées du côté de l'électrode terre (figure IV.5). Par conséquent, un contournement partiel apparaît accompagné d'un train de sons.



Figure IV.5: contournement partiel

- vi) Peu après la connexion, à partir de l'instant où le saut final débutera, la décharge devient certaine et un arc électrique correspondant au contournement se forme entre les deux électrodes (figure IV.6).



Figure IV.6: contournement entre les électrodes

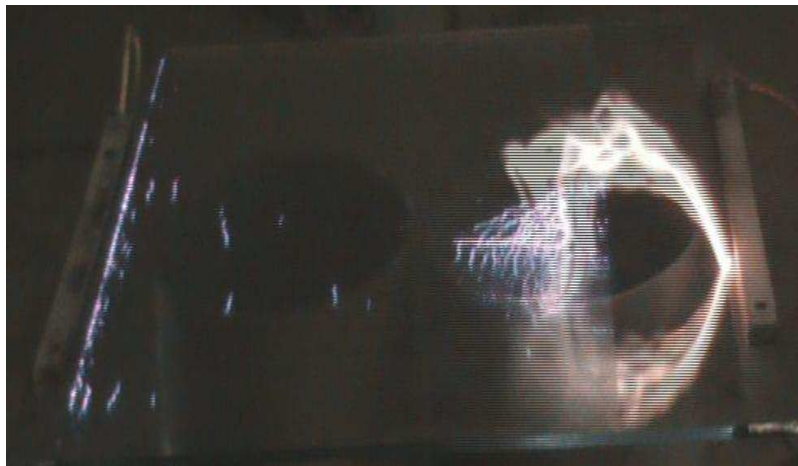
IV.2.1.2/ largeurs de bandes propres allant de 6 à 12 cm

Pour des largeurs de la bande propre allant de 6cm jusqu'à 12cm, l'arc partiel principal qui court-circuite la bande propre apparaît directement comme montré sur la figure IV.7 (voir exemples pour 6, 10 cm bande propre côté électrode terre et 8, 12 cm bande propre côté électrode HT). Les phases initiales caractérisées par l'apparition et l'intensification puis l'unification d'arcs partiels ne sont plus observées pour ces largeurs. Similairement au cas précédent, l'arc partiel principal se propage et s'oriente vers l'électrode terre jusqu'à se connecter avec les décharges concentrées du côté de l'électrode terre. Nous notons également que le comportement de l'arc principal est identique pour les deux cas de position de la bande propre. Pour cette raison, nous nous contentons de montrer l'occurrence de l'arc partiel

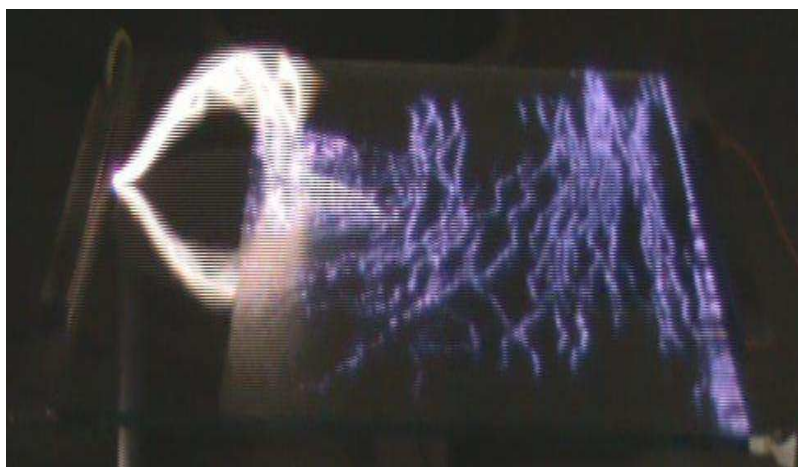
principal tantôt du côté de l'électrode HT, tantôt du côté de l'électrode terre pour chaque largeur de la bande propre.



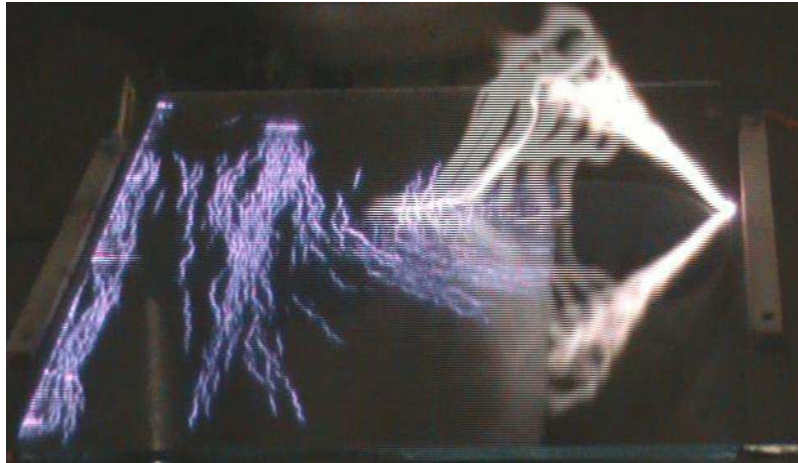
(A) ($d=6$ cm, bande propre côté électrode terre)



(B) ($d=8$ cm, bande propre côté électrode HT)



(C) ($d=10$ cm, bande propre côté électrode terre)



(D) ($d=12$ cm, bande propre côté électrode HT)

Figure IV.7: Occurrence de l'arc partiel principal

IV.2.1.3/ largeurs de bandes propres de 14 cm:

Pour une largeur de bande propre de 14 cm, le contournement apparaît d'une manière directe sans aucune manifestation lumineuse visible au préalable qui correspond à l'activité des décharges électriques (figure IV.8).



Figure IV.8: Contournement entre les électrodes

IV.2.1.4 Discussions

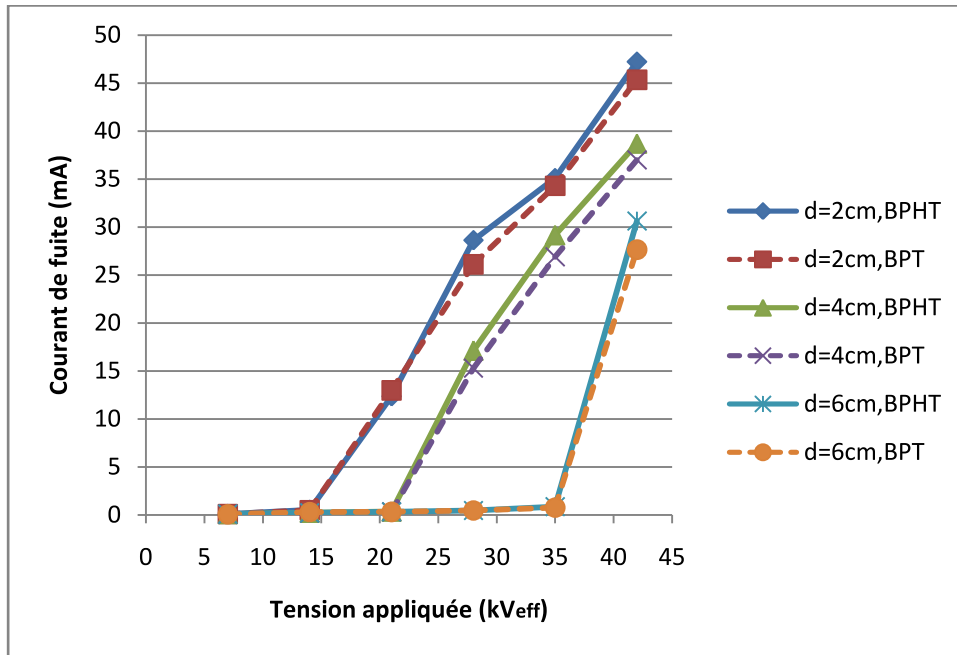
D'après toutes les constatations ci-dessus, nous pouvons conclure ceci :

- i) La largeur de la bande propre a un impact majeur sur le comportement diélectrique du modèle pollué.
- ii) Les différentes étapes conduisant au contournement sont identiques pour les deux cas quand la bande propre est située du côté de l'électrode HT ou bien du côté de l'électrode terre. Ceci montre que le modèle possède la même rigidité diélectrique pour les deux cas de positions étudiées.

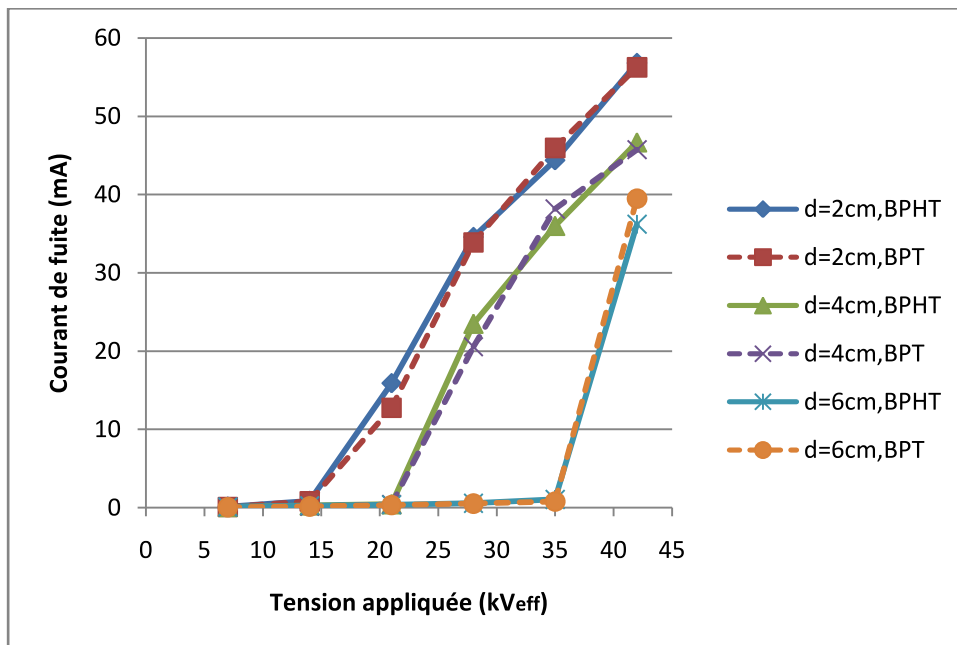
IV.2.2/ Etude du courant de fuite :

La variation de l'amplitude du courant de fuite, qui est un excellent indicateur de l'état de surface isolante, est quantifiée pour plusieurs niveaux de tensions appliquées ainsi que pour les largeurs de bandes propres distinctes. Les différents niveaux de tensions appliquées sont 7, 14, 21, 28, 35 et 42 kV_{eff}.

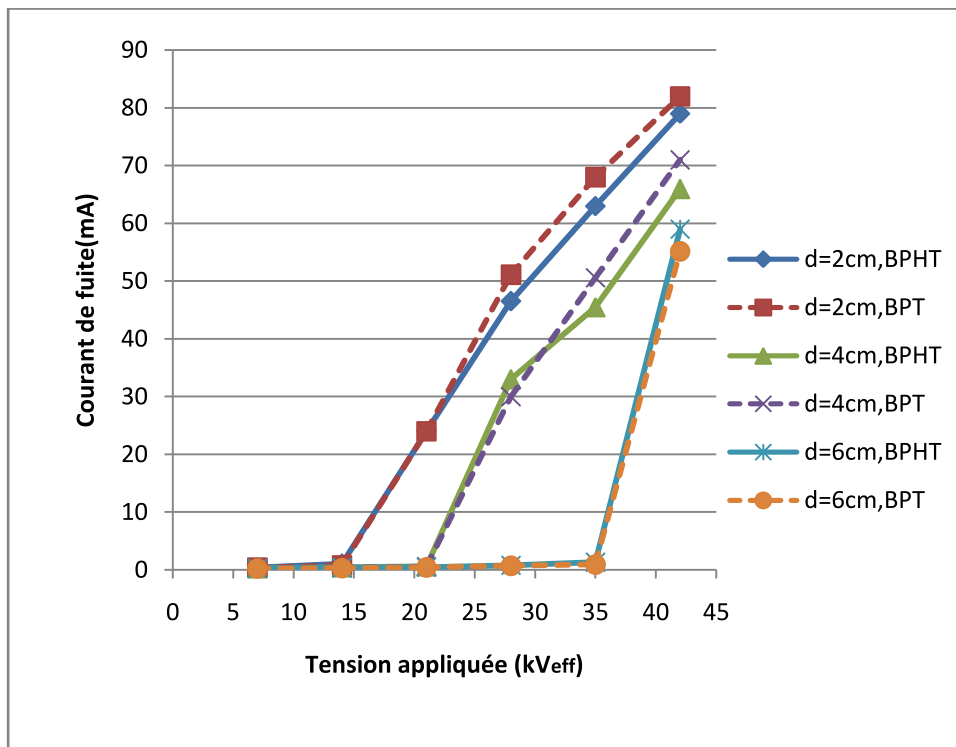
La figure IV.9 montre une telle variation du courant de fuite pour trois concentrations en kaolin et pour les largeurs de la bande propre suivantes : d= 2, 4 et 6 cm.



(A) Concentration en kaolin (0g/l)



(B) Concentration en kaolin (10g/l)

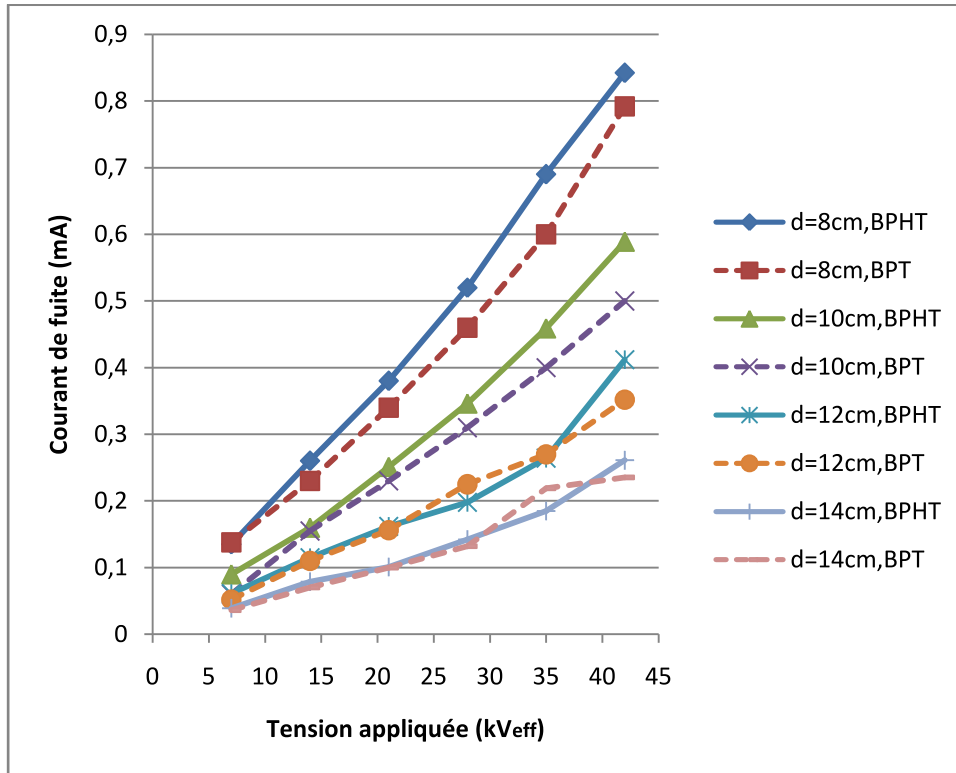


(C) Concentration en kaolin (40g/l)

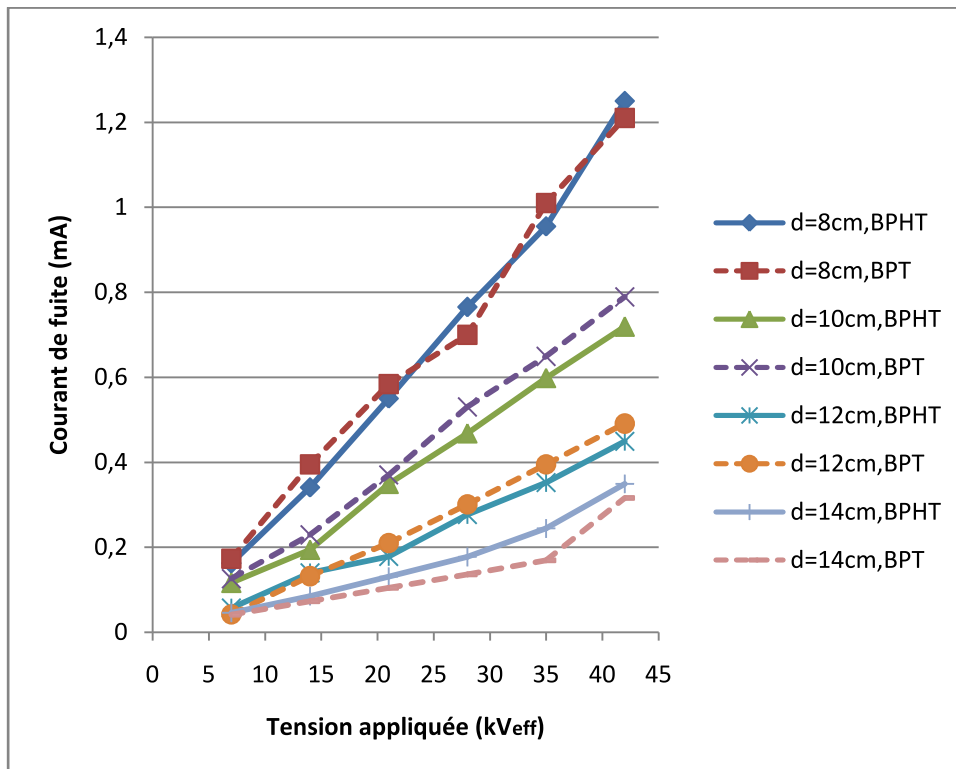
Figure IV.9: Variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour les différentes largeurs de la bande propre (d) et pour trois concentrations en kaolin. $d=2-6$ cm (BPHT : Bande Propre du côté de l'électrode Haute Tension – BPT : Bande Propre du côté de l'électrode Terre).

Les résultats d'essais montrent que, pour une configuration de pollution et un niveau de tension donnés, l'amplitude du courant de fuite est d'autant plus importante que la concentration en kaolin est élevée. En outre, le courant de fuite augmente d'une façon non linéaire en fonction de la tension appliquée pour toutes les configurations de pollution étudiées. Nous constatons également pour ces largeurs (2, 4 et 6 cm) que l'augmentation de l'amplitude du courant de fuite est accentuée (le courant passe de l'ordre de μA à l'ordre de mA). Le niveau de tension appliqué pour lequel cet accroissement brusque du courant apparaît est proportionnel à la largeur de la bande propre. L'augmentation brusque du courant de fuite est due certainement à l'occurrence d'arcs partiels à travers la bande propre. Ces arcs apparaissent car une partie importante de la tension appliquée se trouve reportée aux bornes de cette bande propre engendrant ainsi une augmentation du champ électrique à travers celle-ci.

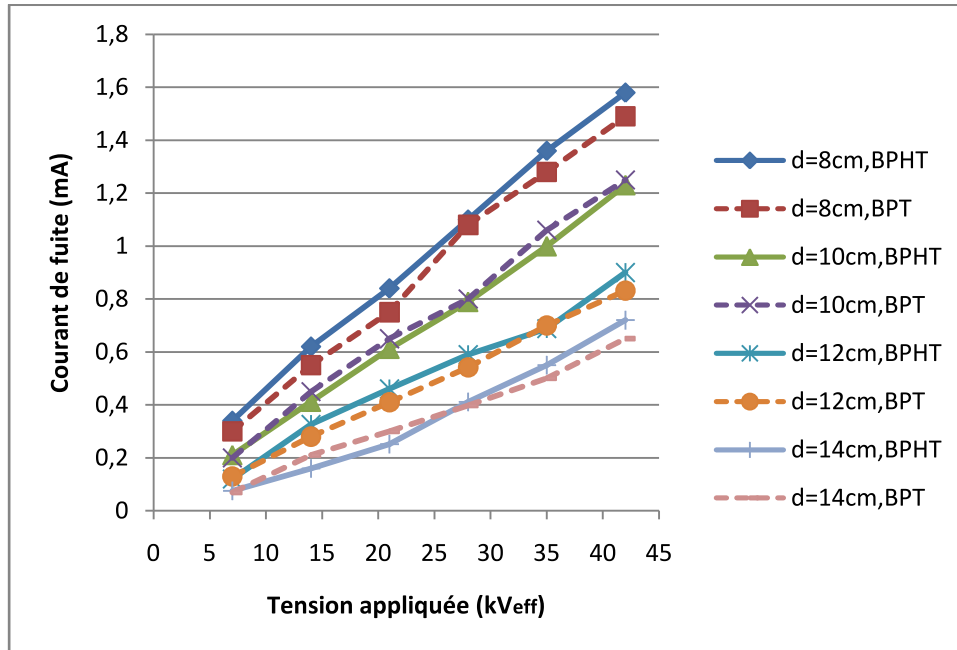
Pour les grandes largeurs ($d=8-14\text{cm}$), l'amplitude du courant de fuite augmente légèrement en fonction de la tension appliquée (figure IV.10). En outre, cette amplitude est très faible par rapport au cas précédent (voir figure IV.9). Une absence totale d'arcs partiels est constatée pour ces largeurs. Vu la largeur importante de ces bandes propres, l'intensité du champ électrique local appliqué aux bornes de ces bandes est insuffisante pour faire initier des arcs partiels pour des tensions inférieures à $42\text{ kV}_{\text{eff}}$.



(A) Concentration en kaolin (0g/l)



(B) Concentration en kaolin (10g/l)



(C) Concentration en kaolin (40g/l)

Figure IV.10: Variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour les différentes largeurs de la bande propre (d) et pour trois concentrations en kaolin. $d=8-14$ cm (BPHT : Bande Propre du côté de l'électrode Haute Tension – BPT : Bande Propre du côté de l'électrode Terre).

Par ailleurs, nous constatons que pour les différents paliers de tensions appliquées et quelque soit la largeur de la bande propre, les amplitudes du courant de fuite sont pratiquement identiques pour les deux cas de la position de la bande propre. Ceci peut s'expliquer par la distribution du champ électrique qui se répartit de la même façon dans le cas où cette bande propre est située du côté de l'électrode HT ou bien du côté de l'électrode terre.

Les différentes configurations de pollutions étudiées nous permettent de comprendre le comportement des arcs partiels sous des conditions de pollution non-uniforme. L'étude réalisée met en évidence l'impact de la largeur d'une bande propre et sèche insérée au milieu d'une surface polluée. Les résultats obtenus montrent :

- i) La présence d'arcs partiels pour les largeurs de la bande propre de 2, 4 et 6 cm sous des tensions appliquées inférieures à 42 kV_{eff}.
- ii) L'absence d'arcs partiels pour les largeurs de la bande propre de 8, 10, 12 et 14 cm sous des tensions appliquées inférieures à 42 kV_{eff}.

IV.2.3/ Etude de la Charge électrique

La connaissance de la charge est d'une importance capitale. En effet, elle nous informe sur le niveau énergétique mis en jeu lors de l'application de la tension.

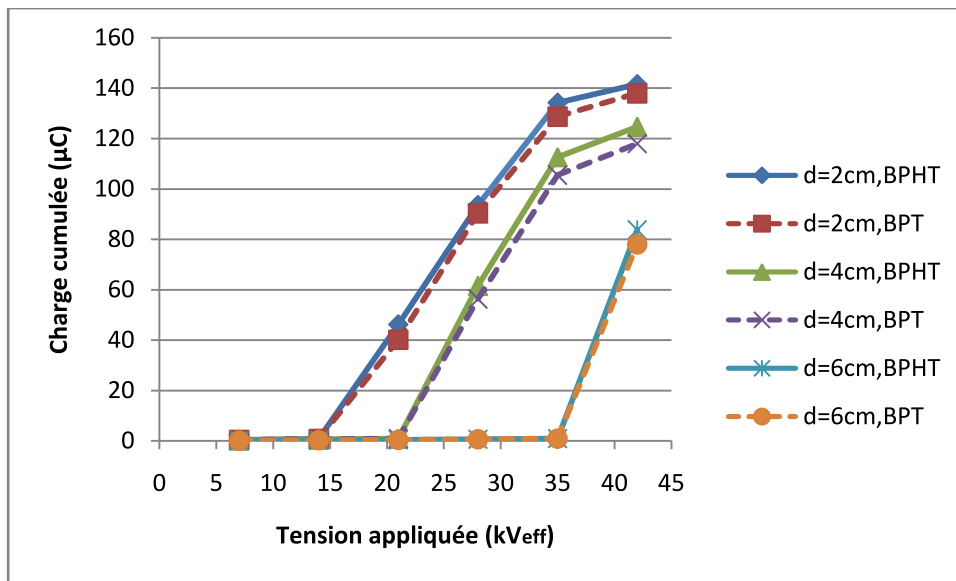
Pour une configuration de pollution donnée, l'influence de la tension appliquée sur l'amplitude de la charge cumulée est fortement observée pour les largeurs de bande propre de 2, 4 et 6cm. L'occurrence des arcs partiels qui court-circuitent la bande propre et leur développement sur la surface polluée engendrent l'accroissement de la charge cumulée d'une manière accentuée.

Une analyse attentive des différentes caractéristiques représentant l'évolution de la charge cumulée en fonction de la tension appliquée (figure IV.11) nous permet de distinguer trois zones différentes pour les largeurs de la bande propre de 2, 4 et 6 cm :

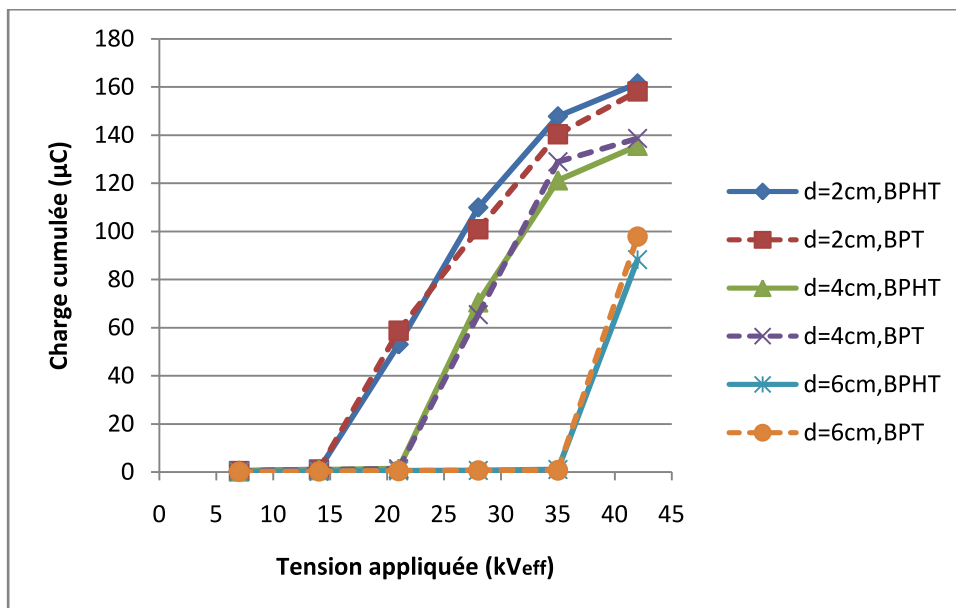
Zone 1 : la charge cumulée est de l'ordre du nC, cette zone est caractérisée par l'absence totale d'arcs partiels. Par conséquent, la valeur de la charge cumulée reste faible.

Zone 2 : cette zone représente la période de transition pour l'activité électrique sur la surface du modèle plan ; l'amplitude de la charge cumulée passe de l'ordre du nC à l'ordre du μC . Cette transition se traduit par l'activité intense d'arcs partiels au niveau de la bande propre.

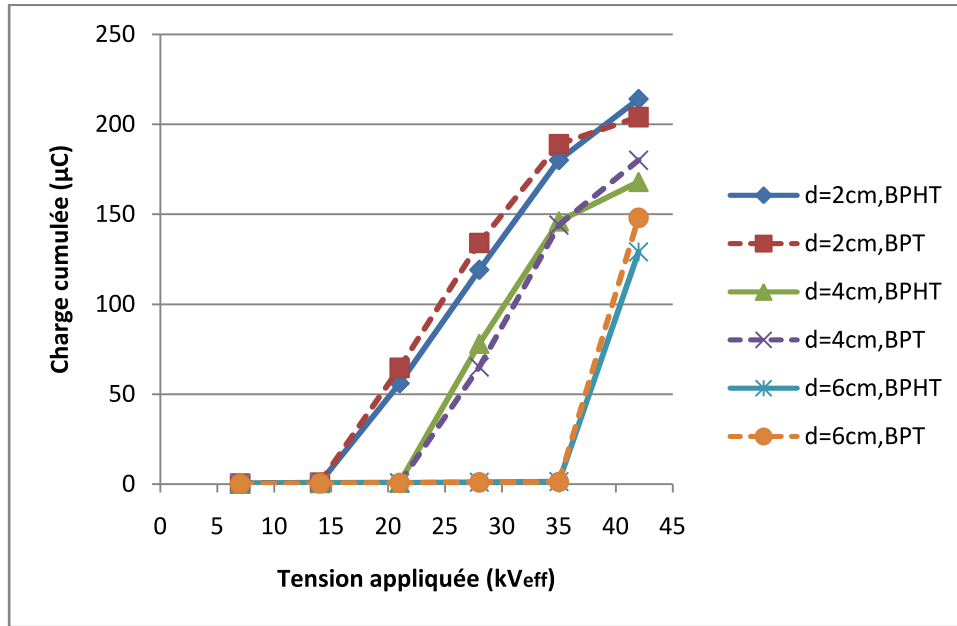
Zone 3 : celle-ci est caractérisée par la propagation et la progression d'arcs partiels qui ont pris naissance dans l'étape précédente. La charge cumulée évolue dans l'ordre du μC .



(A) Concentration en kaolin (0g/l)



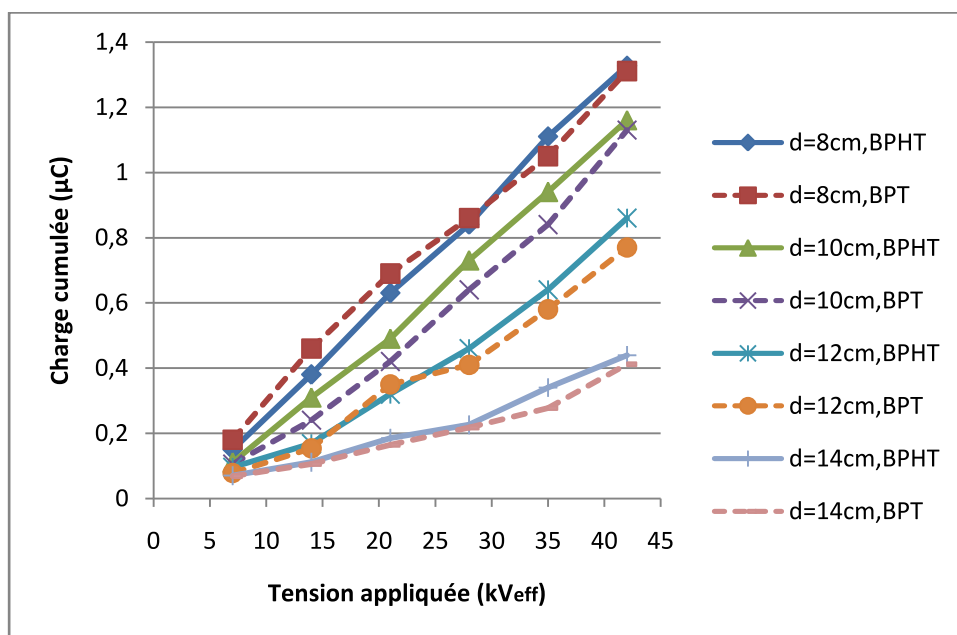
(B) Concentration en kaolin (10g/l)



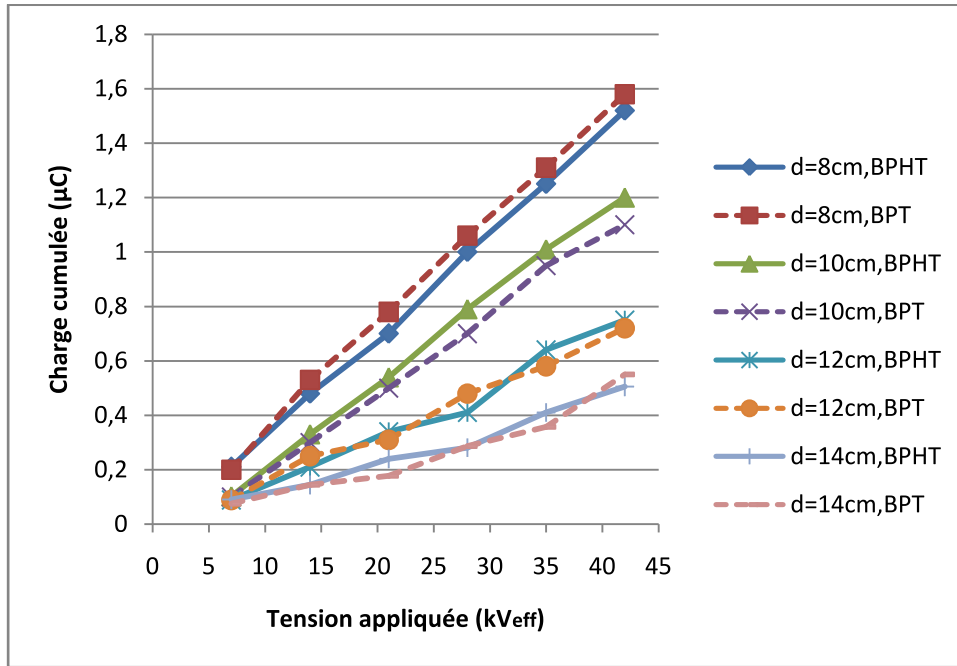
(C) Concentration en kaolin (40g/l)

Figure IV.11: Variation de la charge cumulée en fonction de la tension appliquée pour les différentes largeurs de la bande propre (d) et pour trois concentrations en kaolin. d=2-6 cm (BPHT : Bande Propre du côté de l'électrode Haute Tension – BPT : Bande Propre du côté de l'électrode Terre).

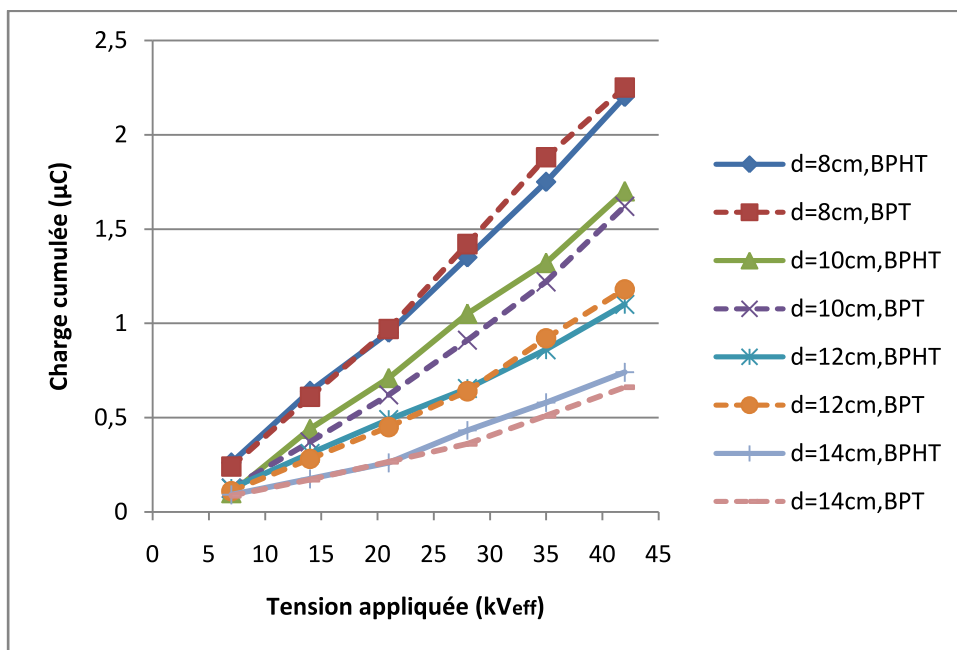
Comme il a été observé pour le courant, la charge cumulée augmente faiblement avec l'accroissement de la tension appliquée pour les largeurs de la bande propre de 8, 10, 12 et 14 cm (Figure IV.12). Notons aussi que pour les différents paliers de tensions appliquées et quelque soit la largeur de la bande propre, la charge cumulée reste pratiquement identique pour les deux cas de la position de la bande propre. Ceci peut s'expliquer par la distribution du champ électrique qui se répartit de la même façon pour les deux cas de position de la bande propre.



(A) Concentration en kaolin (0g/l)



(B) Concentration en kaolin (10g/l)



(C) Concentration en kaolin (40g/l)

Figure IV.12: Variation de la charge cumulée en fonction de la tension appliquée pour les différentes largeurs de la bande propre (d) et pour trois concentrations en kaolin. d=8-14 cm (BPHT : Bande Propre du côté de l'électrode Haute Tension – BPT : Bande Propre du côté de l'électrode Terre).

Les amplitudes du courant de fuite et de la charge cumulée sont d'autant beaucoup plus importantes que la largeur de la bande propre est réduite ; ceci peut s'expliquer par l'augmentation de l'intensité du champ électrique appliqué aux bornes de cette bande.

IV.3/ Caractérisation des décharges électriques par l'approche (DWT-STD-MRA) appliquée sur le signal du courant de fuite

Cette section est consacrée à la décomposition du signal du courant de fuite par la méthode DWT-STD-MRA. Notre objectif est de pouvoir détecter la présence ou bien l'absence des arcs partiels à travers les bandes propres en exploitant l'évolution des composantes fréquentielles résultant de cette décomposition. Les signaux analysés sont ceux enregistrés pour les différentes largeurs de la bande propre à 42 kV_{eff} avec les trois concentrations en kaolin étudiées. La bande propre est située dans ce cas du côté de l'électrode haute tension. Une caméra vidéo est utilisée pour suivre de près le comportement des arcs partiels en fonction de la configuration de la pollution. Ces vidéos indiquent (i) présence d'arcs partiels pour les largeurs des bandes propres de 2,4 et 6 cm, et (ii) absence d'arcs partiels pour les largeurs de bandes propres de 8, 10, 12 et 14 cm.

Les signaux du courant de fuite correspondants à toutes les configurations de la pollution étudiées sont décomposés par l'ondelette de Daubechies 4 jusqu'au niveau 10. Les bandes de fréquences correspondantes à chaque détail sont montrées au tableau IV.1.

Détails	Bandes fréquentielles (Hz)
D1	25000 - 50000
D2	12500 - 25000
D3	6250 - 12500
D4	3125 - 6250
D5	1562.5 - 3125
D6	781.25 - 1562.5
D7	390.625 - 781.25
D8	195.3125 - 390.625
D9	97.65625 - 195.3125
D10	48.828125 - 97.65625

Tableau IV.1 : Bandes fréquentielles correspondantes aux différent détails du signal du courant de fuite

La déviation standard peut être considérée comme une mesure de la quantité d'énergie présente dans un signal. Les valeurs de la déviation standard sont calculées pour les détails correspondants afin d'identifier les transitions d'énergie présentes dans le signal du courant de fuite pour chaque configuration de pollution. Elle est donnée par l'expression suivante:

$$std = \sqrt{\frac{1}{N_n - 1} \sum_{j=1}^{N_n} [d_n(j) - \mu_n]^2} \quad (IV.1)$$

μ_n est la moyenne du vecteur d_n et N_n correspond à la taille du vecteur d_n .

IV.3.1/ Illustration de la décomposition d'un signal par l'analyse multi-résolution (DWT-MRA)

La figure IV.14 montre l'évolution des composants fréquentiels (détails D1 jusqu'à D10) résultant de la décomposition du signal de la figure IV.13 par la technique DWT-MRA. Des décompositions similaires sont effectuées pour tous les signaux correspondants aux différentes largeurs de bandes propres ainsi que pour les différentes concentrations en kaolin.

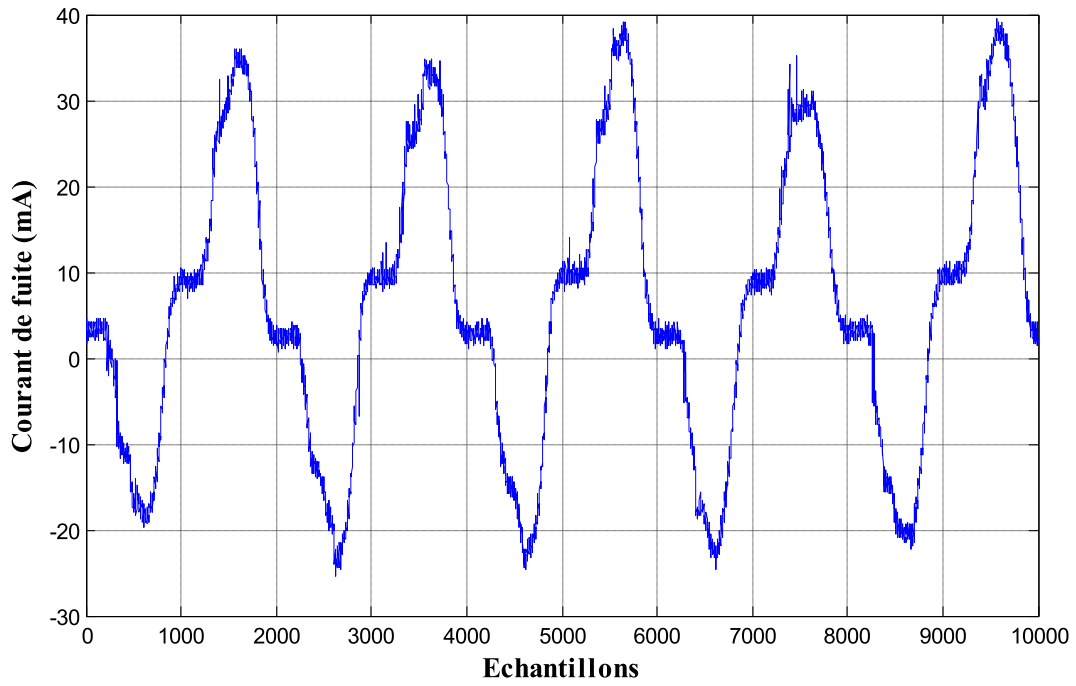
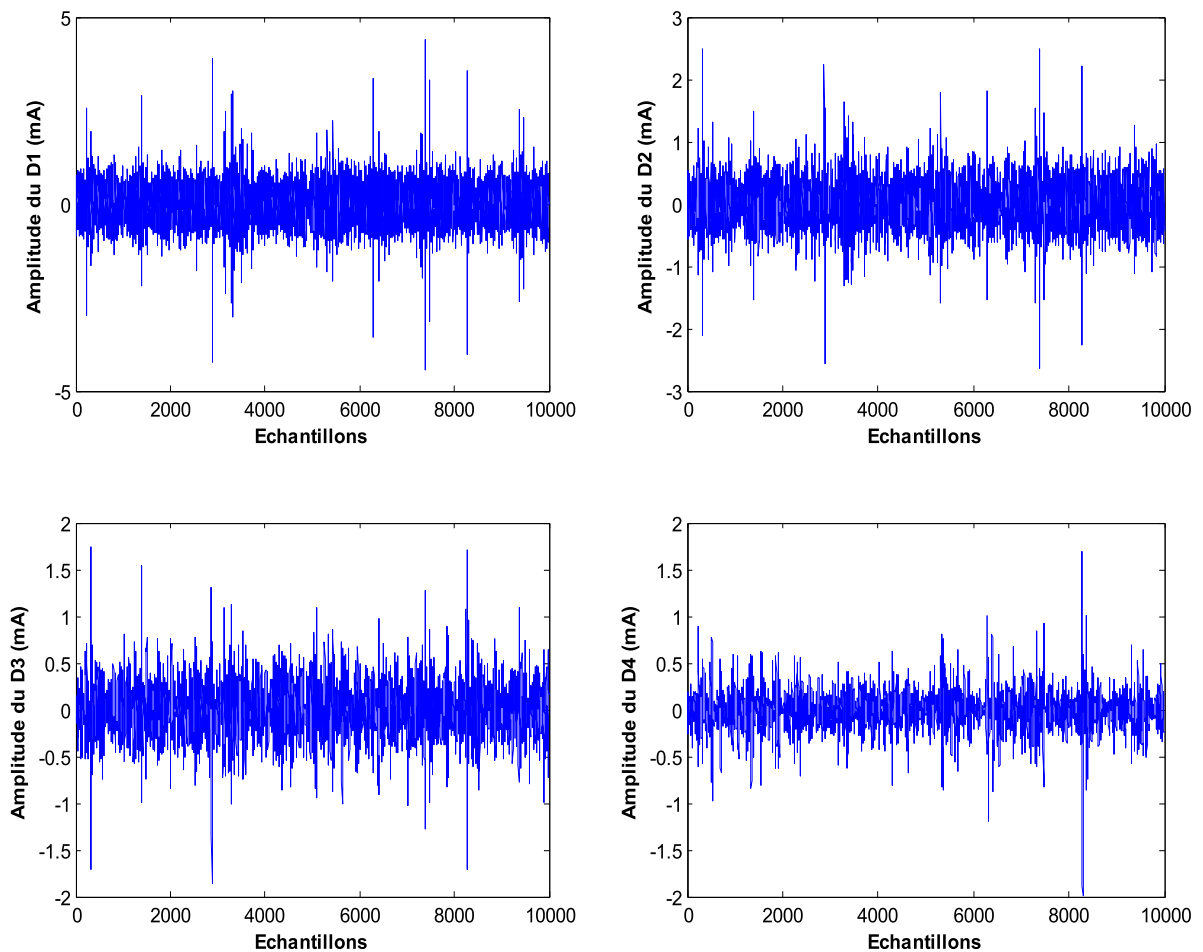


Figure IV.13: Forme d’onde du courant de fuite enregistrée pour une bande propre située du côté de l’électrode terre à 42 kV_{eff} (concentration en kaolin 10 g/l et d = 6 cm)



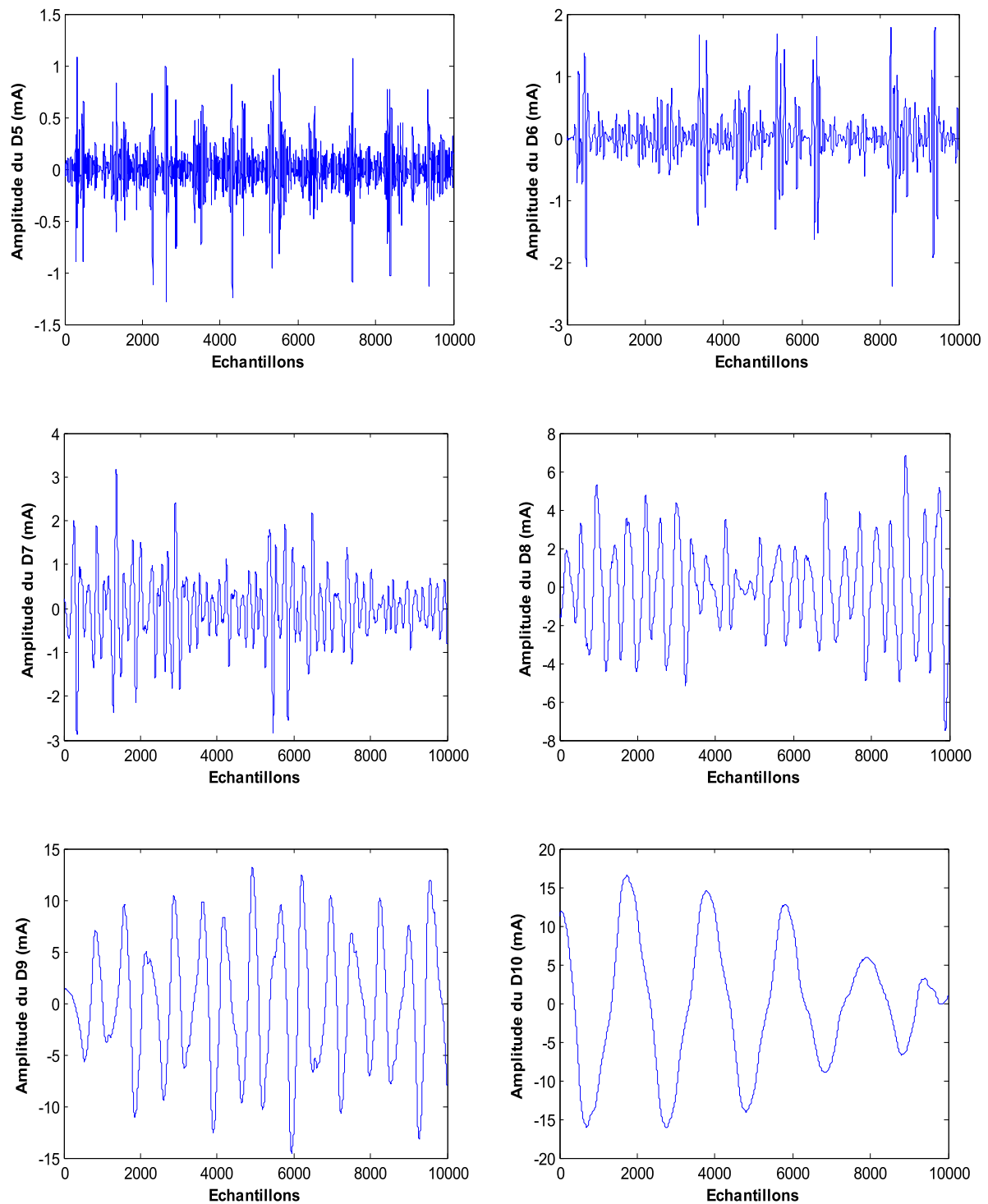
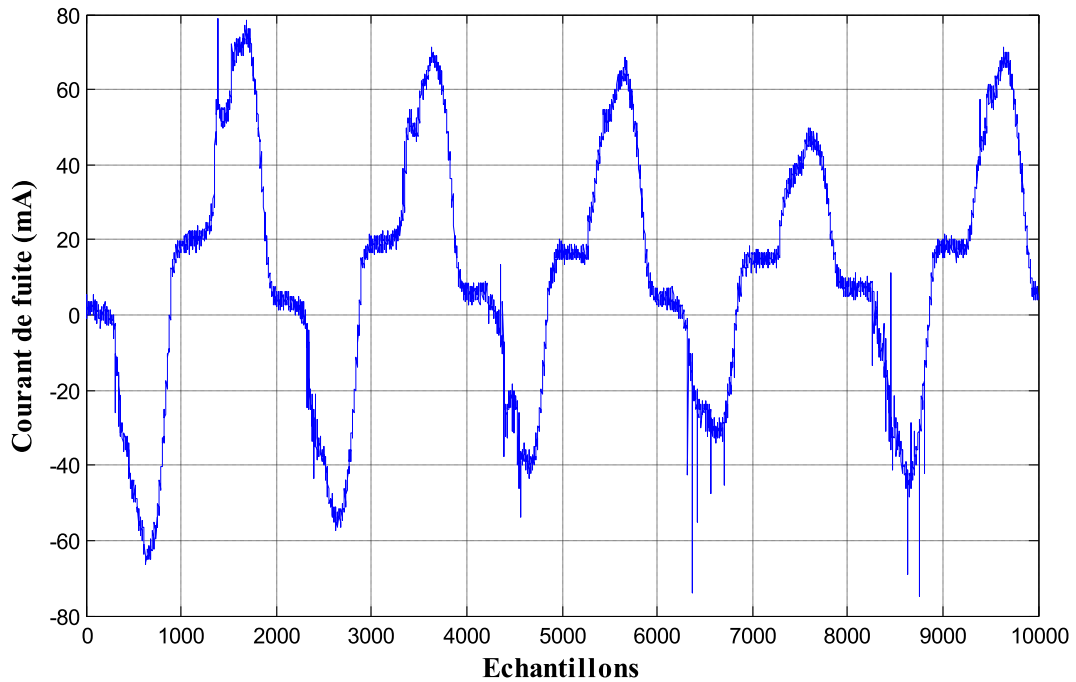
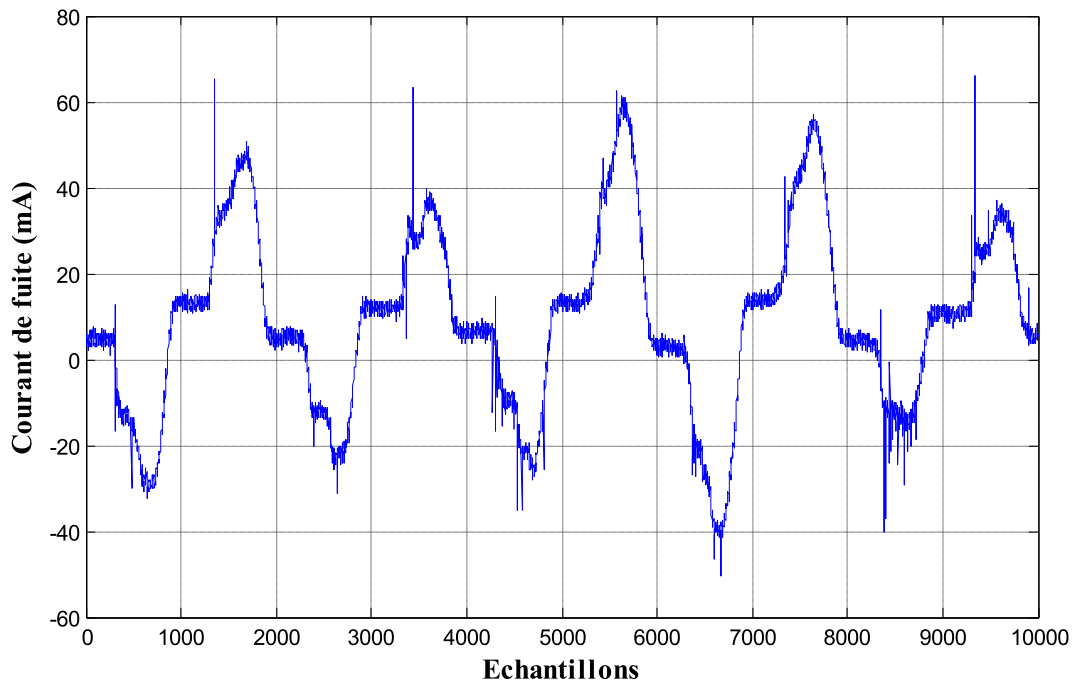


Figure IV.14: Variation des amplitudes des dix détails (D1 jusqu’au D10) du signal du courant de fuite montré à la figure IV.13.

IV.3.2/ En présence de l’effet d’arcs partiels

La figure IV.15 montre les différentes formes d’onde du courant de fuite obtenues pour les largeurs de la bande propre de 2, 4 et 6 cm avec la concentration en kaolin de 40g/l. Les

signaux enregistrés dans ce cas de figure présentent des distorsions sur les deux alternances positive et négative. Nous constatons également un rétrécissement de ces alternances puis une extension aux niveaux de leurs bases. Durant cette extension, l'amplitude du courant de fuite prend une valeur constante durant un laps de temps. Les distorsions observées sont dues à la présence d'arcs partiels qui court-circuitent les bandes propres.

(A) : $d = 2$ cm(B) : $d = 4$ cm

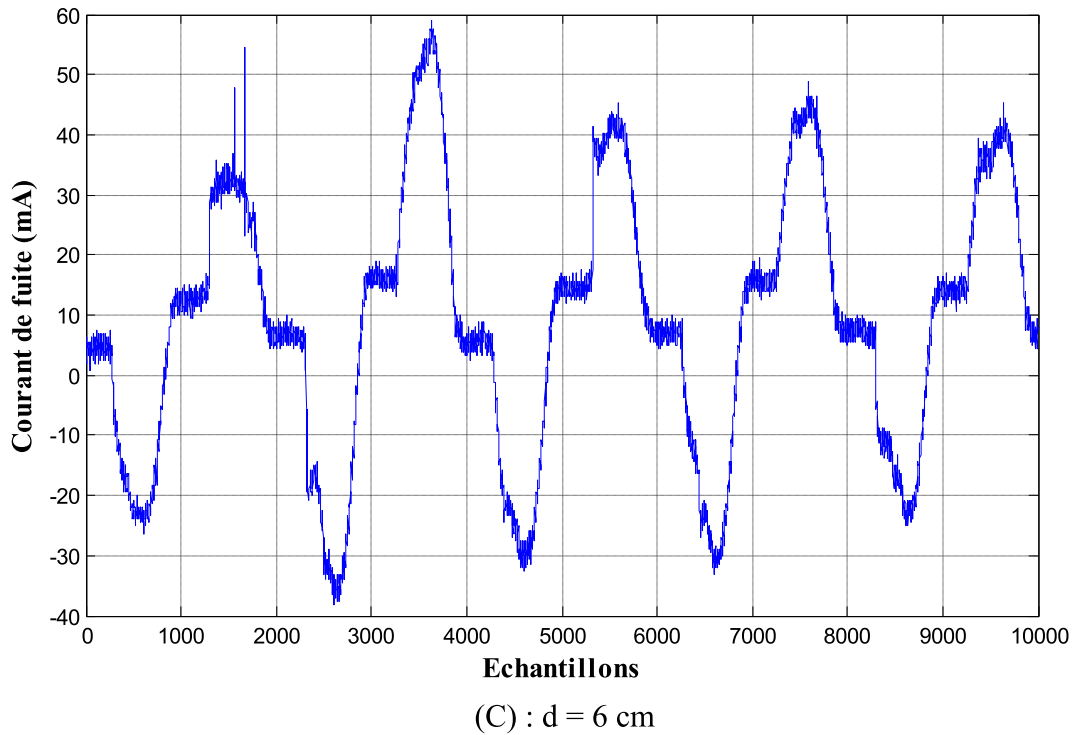
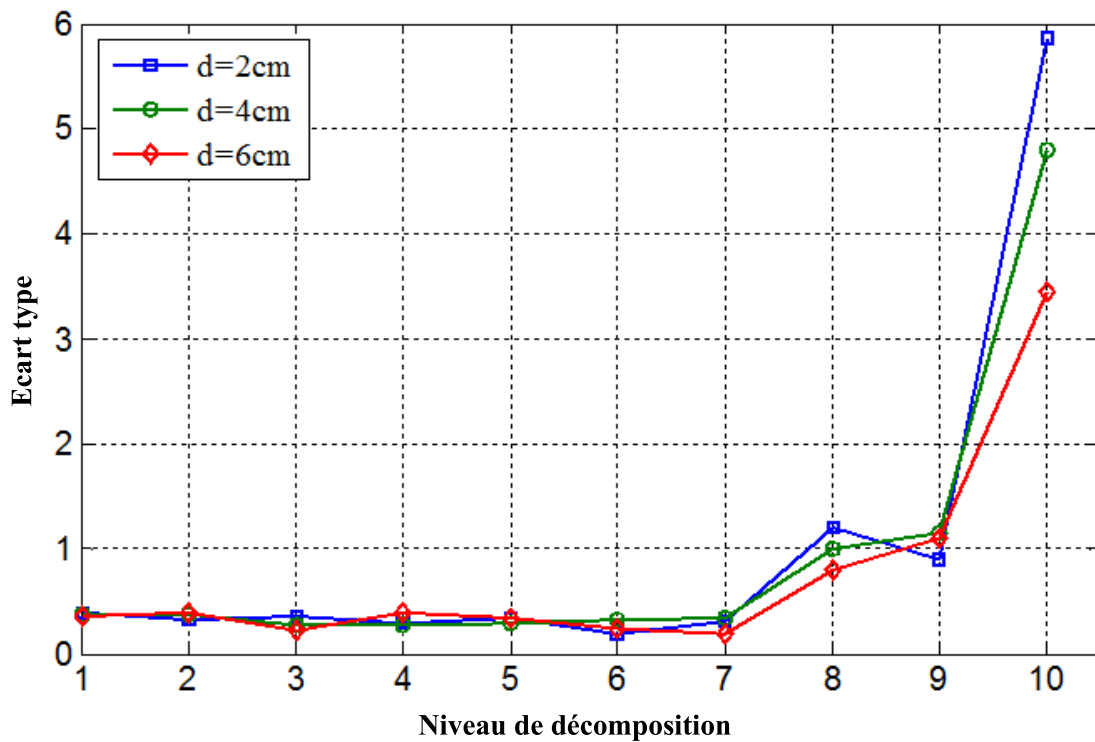
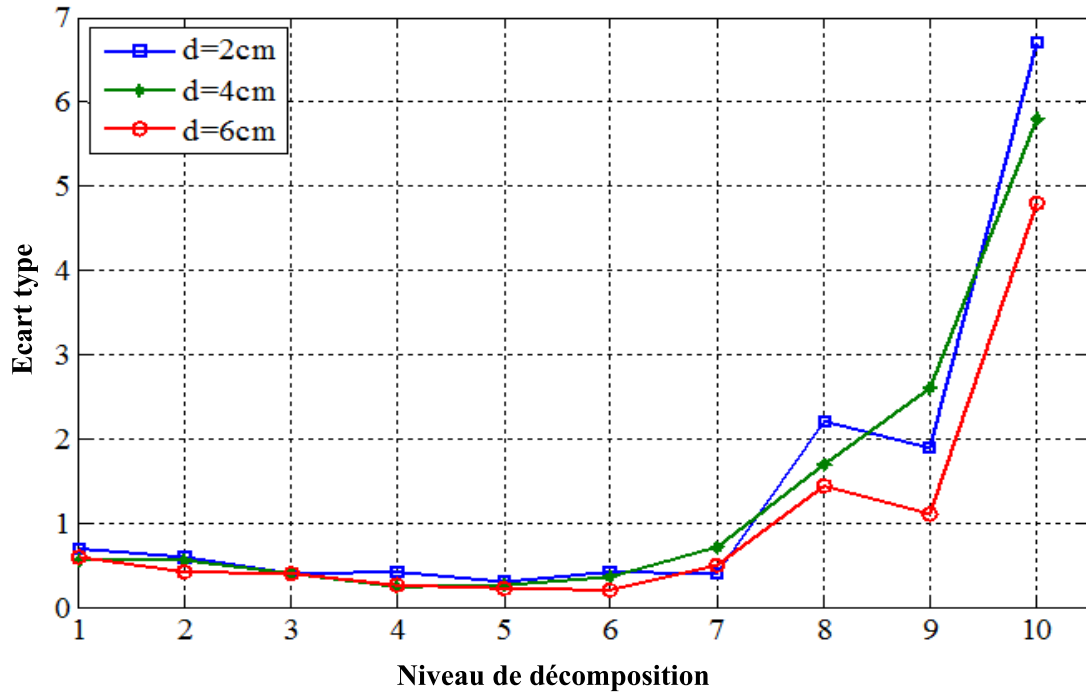


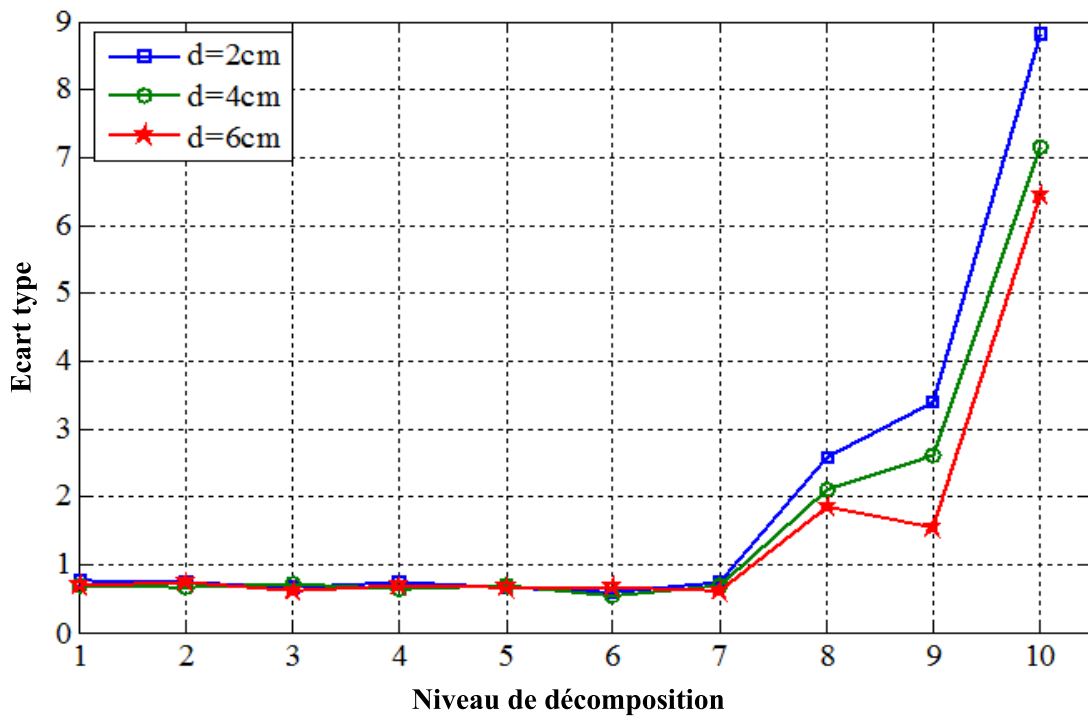
Figure IV.15: Formes d’ondes du courant de fuite obtenues à 42 kV_{eff} pour une bande propre située du côté de l’électrode haute tension (concentration en kaolin = 40 g/l, (A) : d = 2cm, (B) : d = 4cm, (C) : d = 6 cm).



(A) Concentration en kaolin (0g/l)



(B) Concentration en kaolin (10g/l)



(C) Concentration en kaolin (40g/l)

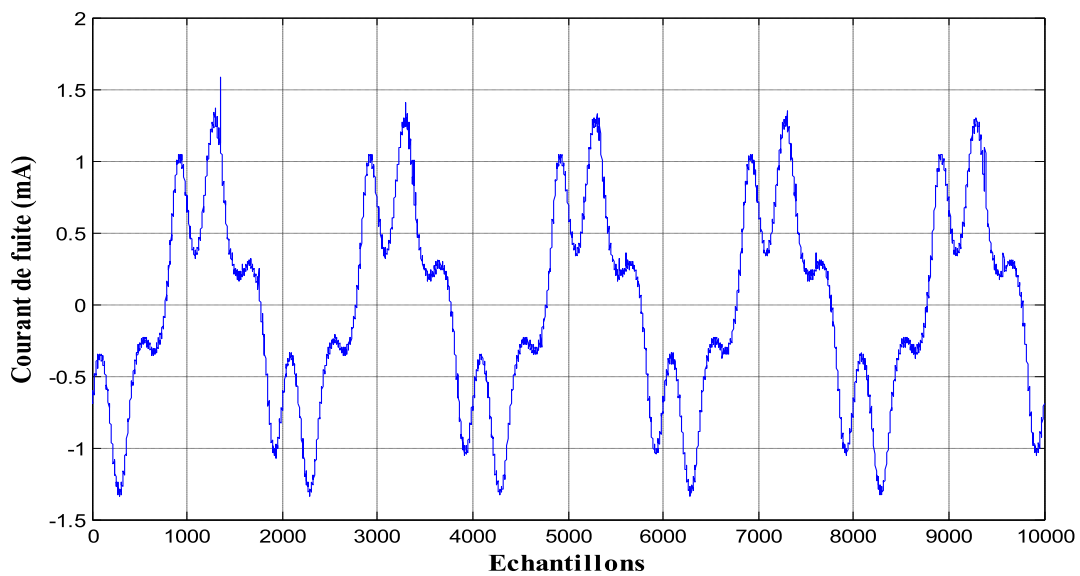
Figure IV.16: Evolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition ($d= 2, 4$ et 6 cm – 42 kV_{eff}).

La figure IV.16 représente la DWT STD-MRA correspondantes aux signaux du courant de fuite obtenus pour les largeurs de la bande propre de 2, 4 et 6cm et pour les différentes concentrations en kaolin. Cette représentation montre pour les différentes configurations de pollution que les déviations standard (STD) des deux détails D8 et D10 augmentent quelque

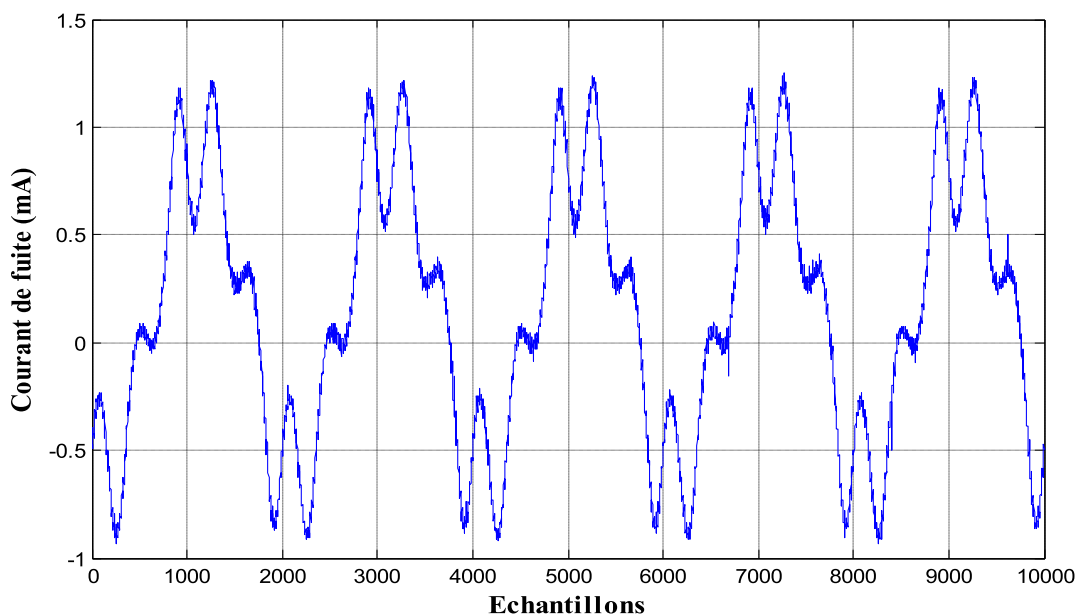
soit la largeur de la bande propre. Par ailleurs, nous constatons que la déviation standard du détail D10 est beaucoup plus significative par rapport à celles des autres composants fréquentiels. En effet, à partir de nos essais expérimentaux, nous avons constaté que l'occurrence des arcs partiels engendre une augmentation importante de la STD du composant fondamental et une réduction dans les composants de haute fréquence.

IV.3.3/ En l'absence de l'effet d'arcs partiels

Les formes d'ondes du courant de fuite enregistrées pour les largeurs de la bande propre de 8, 10, 12 et 14 cm sont présentées sur la figure IV.17. Les signaux du courant de fuite enregistrés dans ce cas sont très similaires à ceux enregistrés quand le modèle de l'isolateur est propre et sec. Cette similitude peut se justifier par la largeur de la bande propre qui est relativement importante par rapport à celle polluée.



(A) : $d = 8$ cm



(B) : $d = 10$ cm

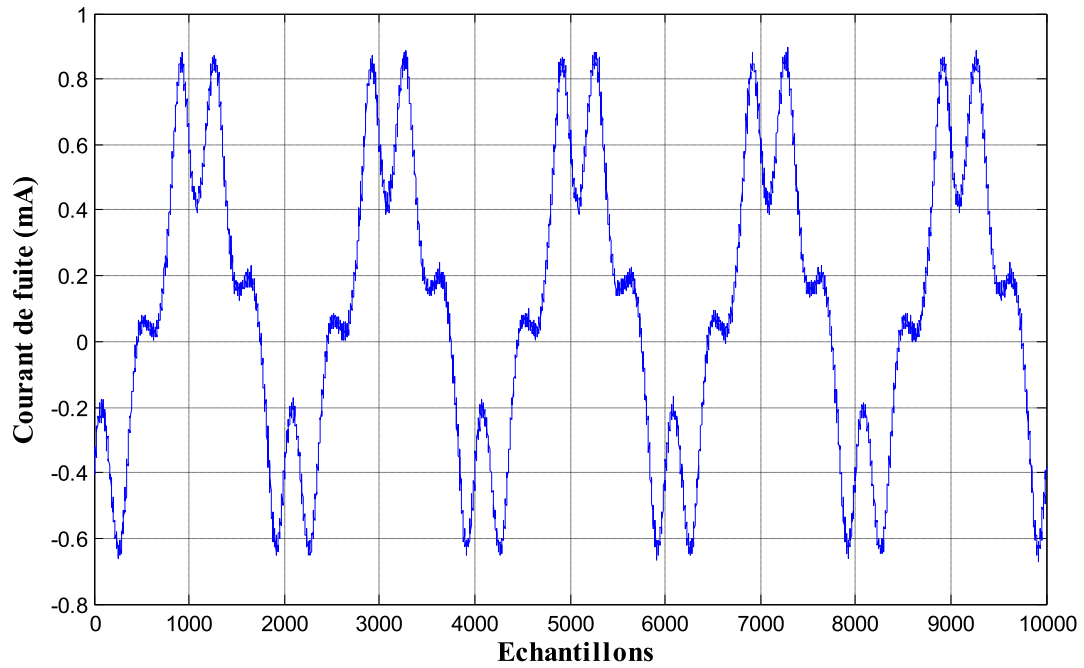
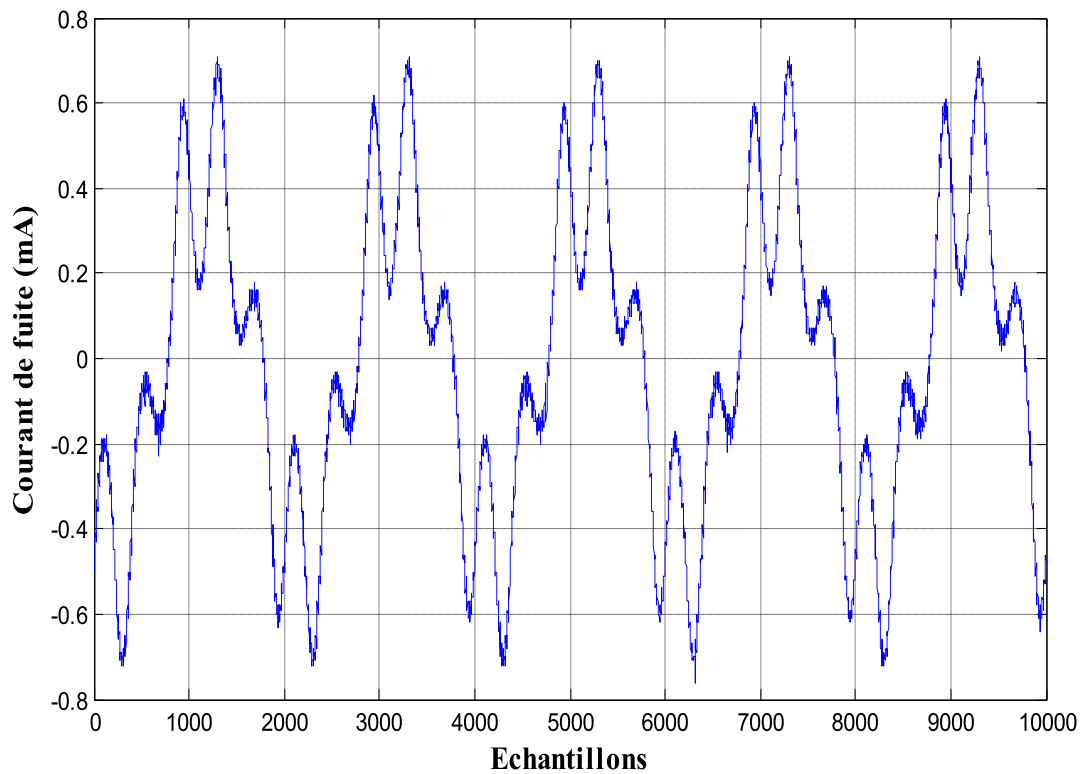
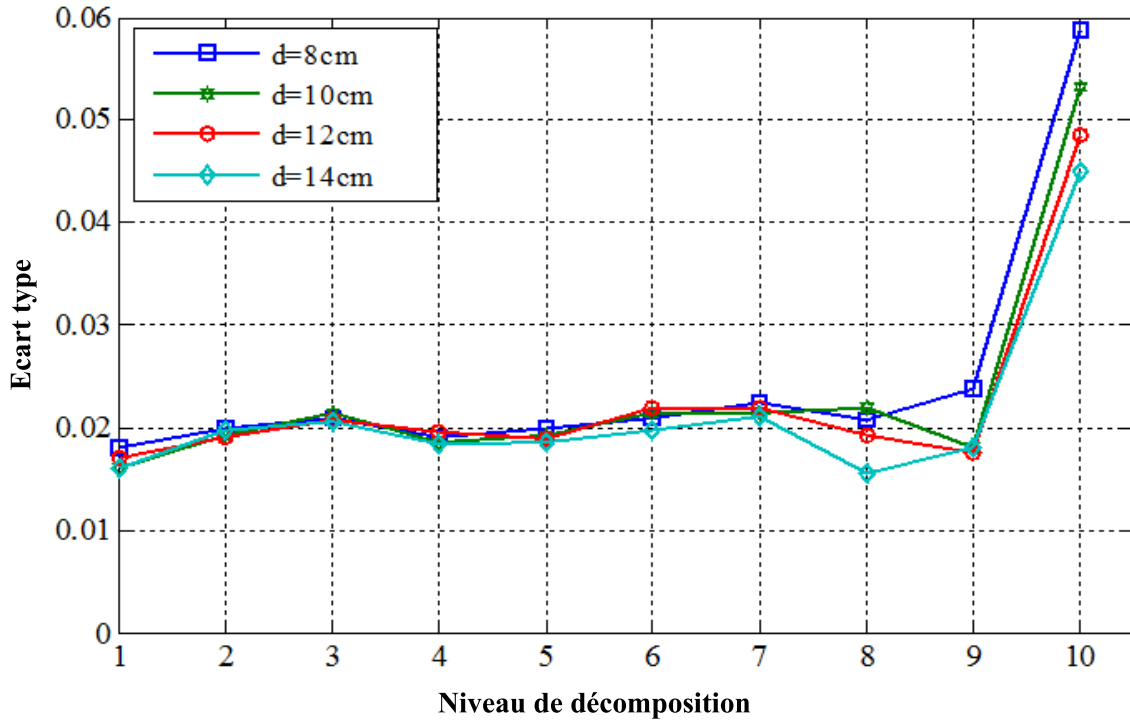
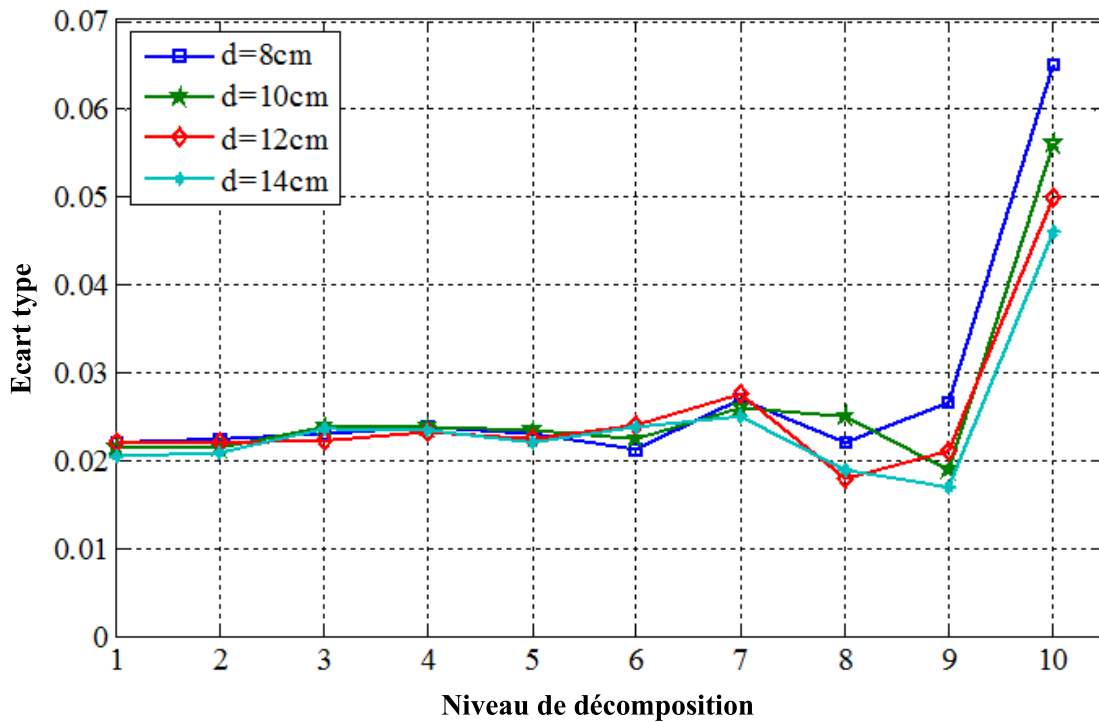
(C) : $d = 12$ cm(D) : $d = 14$ cm

Figure IV.17: Formes d'ondes du courant de fuite obtenues à $42 \text{ kV}_{\text{eff}}$ pour une bande propre située du côté de l'électrode haute tension (concentration en kaolin = 40 g/l , (A) : $d = 8 \text{ cm}$, (B) : $d = 10 \text{ cm}$, (C) : $d = 12 \text{ cm}$, (D) : $d = 14 \text{ cm}$).

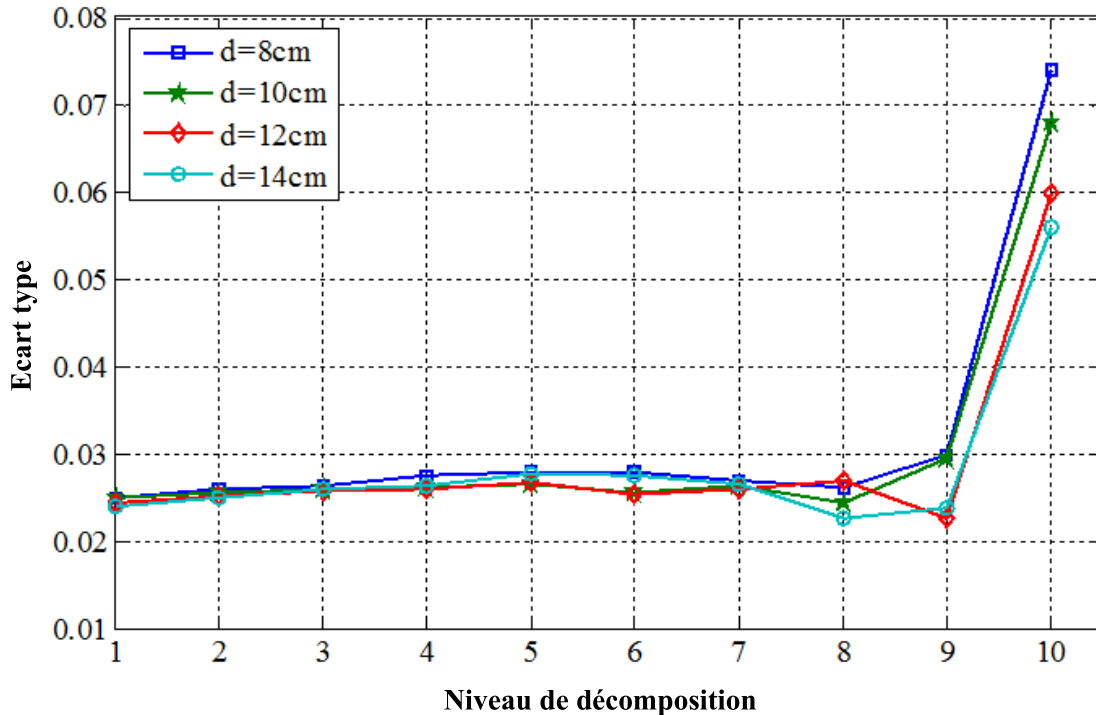
Les résultats obtenus concernant l'évolution de la STD-MRA montrent pour les largeurs de la bande propre de 8, 10, 12 et 14 cm que seule la déviation standard du détail D10 augmente avec la diminution de la largeur de la bande propre (figure IV.8). Nous constatons également pour ces configurations caractérisées par l'absence totale d'arcs partiels que la STD du D10 augmente légèrement par rapport à celles des autres composants de haute fréquence.



(A) Concentration en kaolin (0g/l)



(B) Concentration en kaolin (10g/l)



(C) Concentration en kaolin (40g/l)

Figure IV.18: Evolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition ($d= 8, 10, 12$ et 14 cm – 42 kV_{eff})

IV.3.4/ Discussions

Les résultats montrés ci-dessus montrent l'application de l'approche STD-MRA sur l'onde du signal du courant de fuite. Ces résultats permettent de détecter les bandes fréquentielles qui peuvent servir, comme un outil très satisfaisant, pour diagnostiquer l'état de surface du modèle de l'isolateur.

À partir de toutes ces observations, nous pouvons déduire que l'augmentation simultanée des STD correspondant aux deux détails D8 et D10 indique une activité intense des arcs partiels (cas de 2, 4 et 6 cm). Ces arcs partiels, qui se trouvent dans un état très développé, peuvent nous informer sur un contournement imminent. Si l'augmentation est observée seulement au niveau de la STD du détail D10, ceci indique que l'état de surface du modèle de l'isolateur est caractérisé par l'absence totale d'arcs partiels, comme il a été constaté pour les largeurs de la bande propre de 8, 10, 12 et 14 cm.

IV.4/ Application de la transformée en ondelette continue et la décomposition en paquet d'ondelette pour la prédiction de la sévérité de pollution

Nous nous intéressons dans cette section à la prédiction de l'évolution de l'état de surface du modèle en se basant toujours sur la transformée en ondelette. Nous rappelons que dans ce cas, d'autres approches ont été développées. Nous appliquons en premier lieu la transformée en ondelette continue sur les signaux de la tension appliquée enregistrés à 42 kV_{eff} pour les trois concentrations en kaolin étudiées. Cette technique basée sur la représentation en scalogrammes étudie la nature fractale de l'onde de la tension appliquée en fonction de la sévérité de pollution. En deuxième lieu, nous décomposons les mêmes signaux en paquet

d'ondelettes. Cette dernière met en relief les bandes fréquentielles les plus adéquates pour le diagnostic de l'état de surface du modèle de l'isolateur.

IV.4.1/ Prédiction de la sévérité de pollution par la transformée en ondelette continue

Afin de mettre en évidence l'influence de la concentration en kaolin sur le comportement diélectrique du modèle de l'isolateur, nous avons appliqué la transformée en ondelette continue sur deux signaux de la tension appliquée enregistrés pour deux concentrations en kaolin distinctes (10 et 40 g/l). Ces signaux sont enregistrés pour un niveau de tension appliquée fixe égale à $42 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

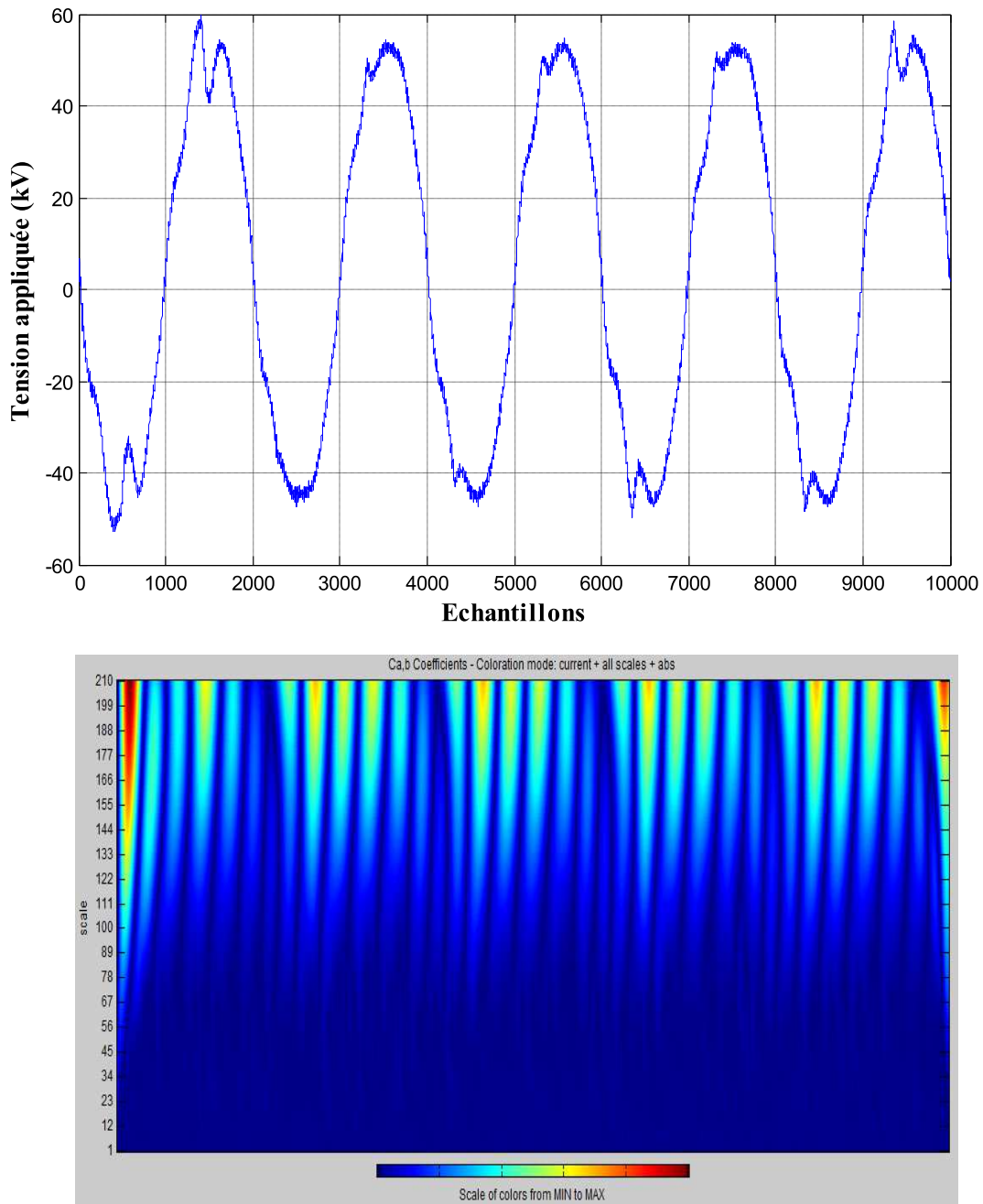


Figure IV.19: Forme d'onde de la tension appliquée à $42 \text{ kV}_{\text{eff}}$ et son scalogramme (concentration en kaolin = 10 g/l et $d=4\text{cm}$).

Pour une concentration en kaolin de 10 g/l, nous notons l'occurrence des distorsions sur l'onde de la tension appliquée. Ces distorsions sont beaucoup plus localisées sur les sommets des deux alternances (figure IV.19). Ces distorsions sont dues à l'activité des décharges sur la surface du modèle plan. Le scalogramme correspondant à cette tension montre que les perturbations causées par ces décharges sont de faibles fréquences à cause de la forte corrélation entre la transformée en ondelette du signal de la tension et l'ondelette analysante pour les grandes échelles.

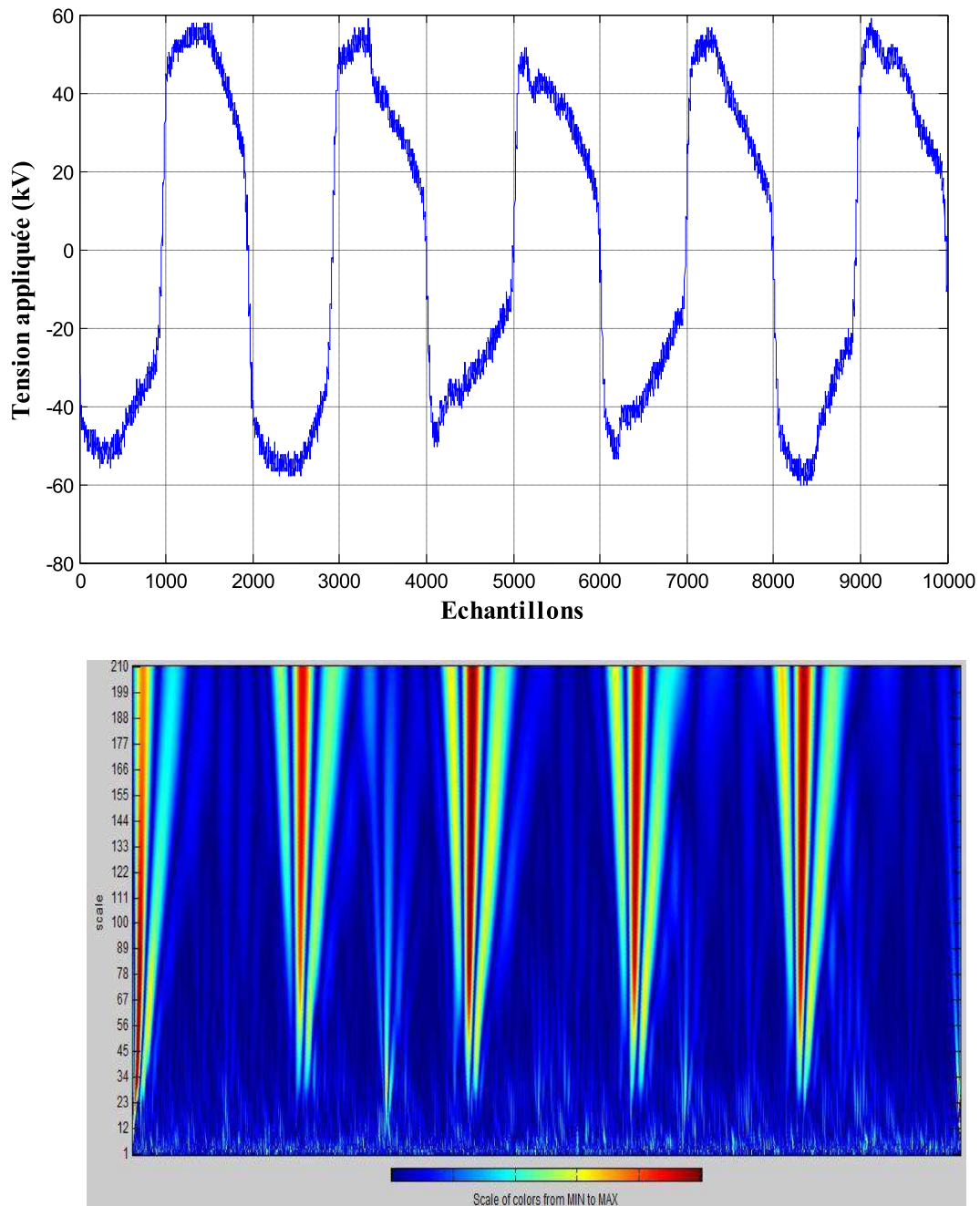


Figure IV.20: Forme d'onde de la tension appliquée à 42 kV_{eff} et son scalogramme (concentration en kaolin = 40 g/l et d=4cm).

Le signal enregistré pour la concentration de 40 g/l comporte pratiquement des distorsions sur la totalité de l'onde. Dans ce cas, caractérisé par une activité intense des arcs partiels (intensification et propagation), le signal de la tension appliquée ne possède plus sa forme sinusoïdale (figure IV.20). Le scalogramme correspondant indique que des perturbations de hautes fréquences, dues à l'activité des arcs partiels, apparaissent en plus de celles à faibles fréquences. D'après l'analyse faite par la CWT sur l'onde de la tension appliquée, la prédiction de la sévérité de pollution peut se faire par l'intermédiaire du scalogramme.

IV.4.2/ Prédiction de la sévérité de pollution par la décomposition en paquet d'ondelettes

Dans cette section, nous nous intéressons à l'étude de l'influence de la concentration en kaolin sur le comportement diélectrique de notre modèle. Pour cela nous fixons respectivement la tension appliquée et la conductivité volumique à 42 kV_{eff} et 1.2 mS/cm. Par ailleurs, nous étudions le comportement du modèle pour les deux concentrations en kaolin à savoir 10 et 40g/l. Les signaux de la tension appliquée, présentés dans la section précédente, subissent une décomposition en paquet d'ondelettes jusqu'au niveau 10 en utilisant l'ondelette db4 comme ondelette analysante. La décomposition en paquet d'ondelette présente une analyse multi-résolution très fine du signal original. Cette résolution nous permet d'avoir dans la bande fréquentielle [0- 100 kHz] le comportement des différents nœuds correspondants soit au détail ou bien à l'approximation. Le passage par ces opérations va nous permettre d'obtenir le nœud (approximation ou détail) qui représente le mieux notre signal sans pertes d'informations et qui pourra servir au diagnostic de l'état de surface du modèle de l'isolateur. Dans notre cas, le niveau 3 est observé comme étant le niveau optimal de décomposition (figure VI.21).

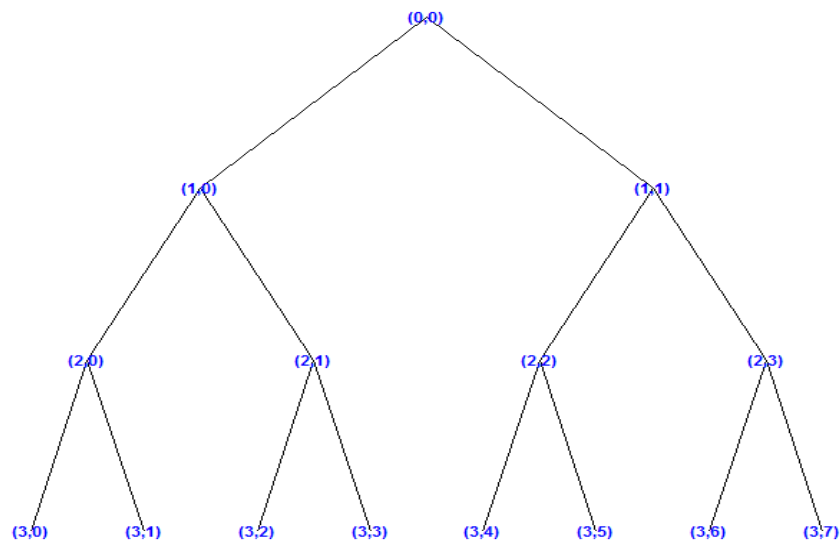
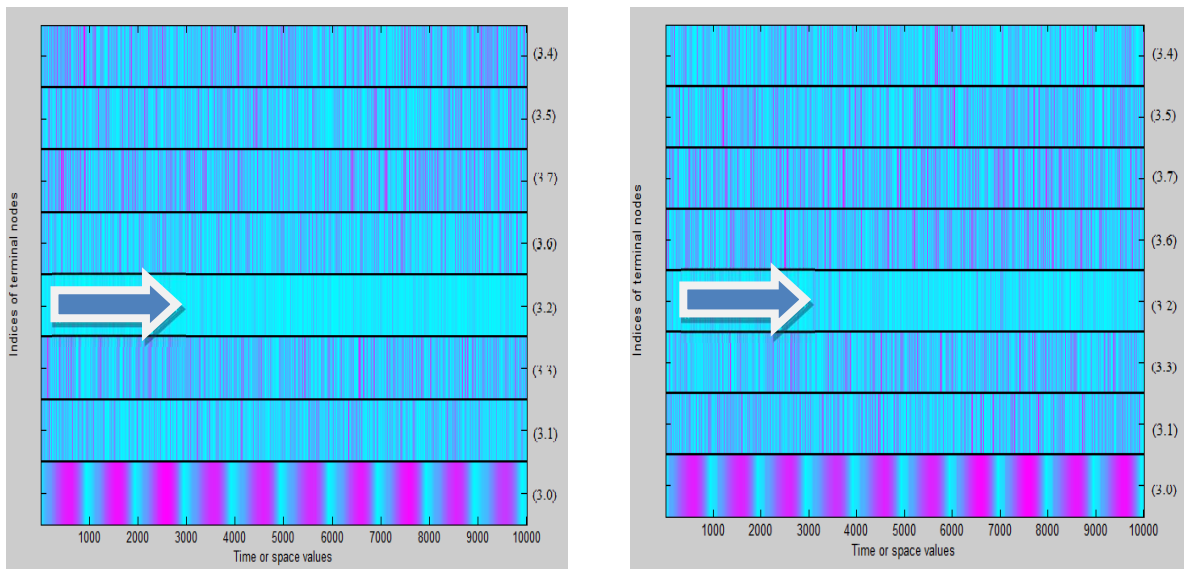


Figure IV.21: Meilleur niveau de décomposition en paquets d'ondelettes obtenu

La figure IV.22 montre les représentations fréquentielles des coefficients des nœuds correspondants au niveau 3 obtenus via la décomposition en paquets d'ondelettes. Les représentations suivantes serviront pour cibler le nœud intéressant qui nous permettra une éventuelle différenciation.



(A) Concentration en kaolin (10g/l)

(B) Concentration en kaolin (40g/l)

Figure IV.22: Représentation fréquentielle des nœuds du niveau 3 obtenus par la décomposition en paquets d'ondelettes des signaux de la tension appliquée (A) 10 g/l de kaolin, (B) 40 g/l de kaolin.

D'après la représentation de la figure IV.22, nous constatons une variation au niveau du nœud (3.2) correspondant dans ce cas à un détail. Cette variation est caractérisée par un changement de couleur pour les deux concentrations en kaolin étudiées. Les résultats obtenus montrent que pour la plus grande concentration en kaolin à savoir 40 g/l, la couleur du nœud (3.2) était en bleu hachurée en violet. En diminuant la concentration du kaolin à 10g/l, le nombre d'hachures constaté précédemment diminue. Par conséquent, nous pouvons conclure que le nœud (3,2) est susceptible de prédire la sévérité de pollution déposée sur la surface du modèle plan.

- **Discussions**

La décomposition du signal de la tension appliquée en paquets d'ondelettes a permis d'identifier la totalité de ses composants fréquentiels et d'étudier l'attitude de ces derniers vis-à-vis du degré de sévérité de pollution.

L'analyse faite sur le signal de la tension appliquée par la technique des paquets d'ondelettes permet d'effectuer un diagnostic de la sévérité de pollution déposée sur le modèle de l'isolateur.

IV.5/ Conclusion

- Les résultats expérimentaux obtenus sont exploités afin de comprendre la corrélation existante entre la sévérité de pollution et l'activité des arcs partiels. Les tests effectués pour les différentes configurations de la pollution ainsi que les différentes concentrations en kaolin ont montré ceci :

- Les différentes étapes conduisant au contournement du modèle plan de l'isolateur sont fortement influencés par la largeur de la bande propre. Toutefois, la position de cette dernière n'a aucun effet si celle-ci est placée du côté de l'électrode haute tension ou bien du côté de l'électrode terre. Il a été démontré expérimentalement que le modèle plan a la même rigidité diélectrique pour les deux configurations de la bande propre.
- La largeur de la bande propre a un impact majeur sur les amplitudes du courant de fuite et de la charge cumulée. Les résultats trouvés montrent que le comportement du modèle plan avec les largeurs de 2, 4 et 6 cm est complètement différent de celui qui correspond aux largeurs de la bande propre de 8, 10, 12 et 14 cm.
- L'activité des arcs partiels, pour les largeurs de la bande propre de 2, 4 et 6 cm, est corrélée au niveau de la tension appliquée.
- Les amplitudes du courant de fuite et de la charge cumulée sont pratiquement égales pour les deux cas de position de la bande propre. Ces deux paramètres sont d'autant plus importants que la concentration en kaolin est élevée.
- Le courant de fuite et la charge cumulée augmentent d'une manière similaire avec l'augmentation de la tension appliquée et la largeur de la bande propre.
- Les résultats expérimentaux obtenus ont été exploités afin de prédire le degré de sévérité de pollution en se basant sur l'évolution des composants fréquentiels des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée.
- La STD-MRA plot est une représentation de la déviation standard en fonction du niveau de décomposition. Celle-ci permet d'identifier les bandes fréquentielles qui peuvent servir comme un excellent diagnostic pour évaluer le degré de sévérité de pollution déposé sur le modèle de l'isolateur.
- Les résultats obtenus montrent que l'évolution de la déviation standard en fonction du niveau de décomposition permet de déduire la présence ou bien l'absence des arcs partiels sur le modèle de l'isolateur. L'augmentation simultanée des STD correspondant aux deux détails D8 et D10 indique l'activité intense des arcs partiels. Si cette augmentation est observée seulement au niveau de la STD du détail D10, ceci indique que l'état de surface du modèle de l'isolateur est caractérisé par l'absence totale d'arcs partiels.
- D'après l'analyse faite par la CWT sur l'onde de la tension appliquée, le diagnostic de sévérité de pollution peut se faire par l'intermédiaire du scalogramme. Ce dernier qui est une projection des coefficients d'ondelettes calculés pour des échelles données sur un plan orthogonal peut nous fournir des informations capitales sur l'onde du signal et ainsi sur le degré de sévérité de pollution.
- Le diagnostic réalisé via la décomposition en paquets d'ondelettes a donné des résultats très satisfaisants. Cette décomposition a montré dans notre cas que l'évolution fréquentielle du nœud (3.2) permet un excellent diagnostic de l'état de surface pollué.

Chapitre V

Classification de la sévérité de pollution en utilisant les signaux du courant de fuite

V.1 Introduction

Le présent chapitre sera consacré à la classification de la sévérité de pollution en se basant sur le traitement du signal du courant de fuite. Le modèle plan étudié comporte trois bandes propres et trois autres polluées distribuées d'une façon alternée. Nous nous proposons dans la partie expérimentale de mesurer les différents paramètres électriques à savoir, la tension de contournement, le courant de fuite et la charge cumulée pour différentes conductivités et pour trois concentrations en kaolin distinctes. Par ailleurs, une base de données importante des signaux du courant de fuite correspondante aux trois classes de pollution (classes 1, 2 et 3) étudiées a été enregistrée. Notre objectif est d'exploiter cette base de données afin de prédire la classe de pollution assignée à chaque signal. Pour se faire, nous avons utilisé des méthodes hybrides basées sur deux techniques de traitement de signal (FFT et ondelettes) et deux méthodes d'apprentissage supervisé (SVM, Naive Bayésienne). Les méthodes de traitement de signal servent à l'extraction des paramètres caractéristiques des signaux du courant de fuite. Les méthodes d'apprentissage supervisé, après leur entraînement par ces paramètres, servent à déterminer la classe de pollution d'un échantillon quelconque. En dernier lieu, nous appliquons la technique recurrent plot (RP) sur le signal du courant de fuite pour prédire le comportement des décharges électriques durant le processus du contournement.

V.2 Résultats expérimentaux et discussions

V.2.1 Etude de la tension de contournement

Nous analysons dans cette section l'influence de la conductivité de la couche polluante sur la tension de contournement du modèle pollué. Les résultats d'essais obtenus pour les trois concentrations en kaolin étudiées sont représentés sur la figure V.1.

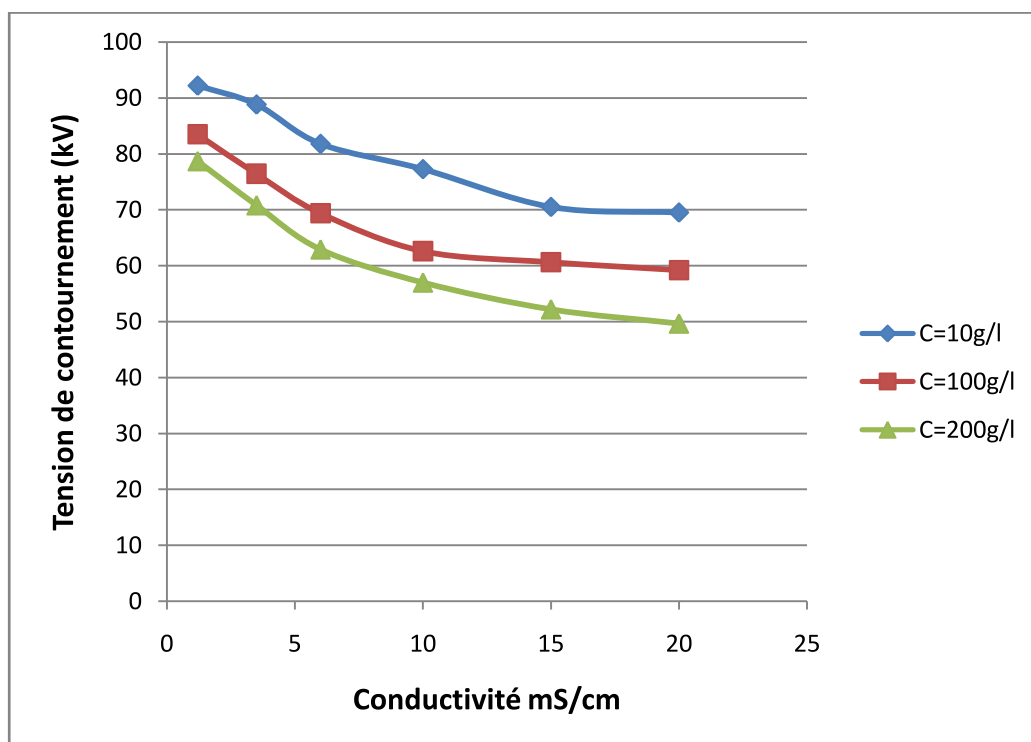


Figure V.1: Evolution de la tension de contournement en fonction de la conductivité pour les trois concentrations en kaolin

D'après la figure (V.1), nous remarquons que la tension de contournement diminue d'une manière non-linéaire en fonction de la conductivité. Notons également que cette tension est d'autant plus importante que la concentration en kaolin est faible. La tension de contournement décroît fortement pour les conductivités comprises entre 1.2 et 15 mS/cm. Celle-ci a tendance à se stabiliser à partir de 15 mS/cm. La réduction de la tension de contournement pourrait s'expliquer par la diminution de l'impédance équivalente du modèle de l'isolateur suite à l'augmentation de l'ESDD et de la concentration en kaolin. Par ailleurs, la stabilité de la tension de contournement observée pour les conductivités supérieures à 15 mS/cm est la conséquence de la saturation.

Les constatations visuelles durant nos essais au laboratoire et les vidéos enregistrées ont montré que le contournement du modèle plan passe par plusieurs étapes. Ces dernières qui peuvent être distinguées selon le niveau de tension appliquée sont résumées comme suit :

- i) Apparitions d'arcs partiels aux niveaux des trois bandes propres (figure V.2). Ces dernières sont court-circuitées car la majorité de la tension appliquée se trouve reportée aux bornes de ces zones sèches engendrant ainsi l'augmentation du champ électrique local.
- ii) Intensification des arcs observés dans l'étape précédente (figure V.3).
- iii) Unification des arcs et extinction d'autres. Ces arcs, plus énergétiques et lumineux, se propagent sur la surface polluée (figure V.4). Leur propagation engendre l'évaporation de la couche de pollution à cause de la chaleur dégagée par effet Joule. Cette étape est accompagnée par une création de zones sèches sur la surface polluée et par conséquent, des décharges superficielles vont naître au niveau de ces zones.
- iv) La première connexion simultanée des trois arcs partiels provoque le contournement entre les électrodes (figure V.5).

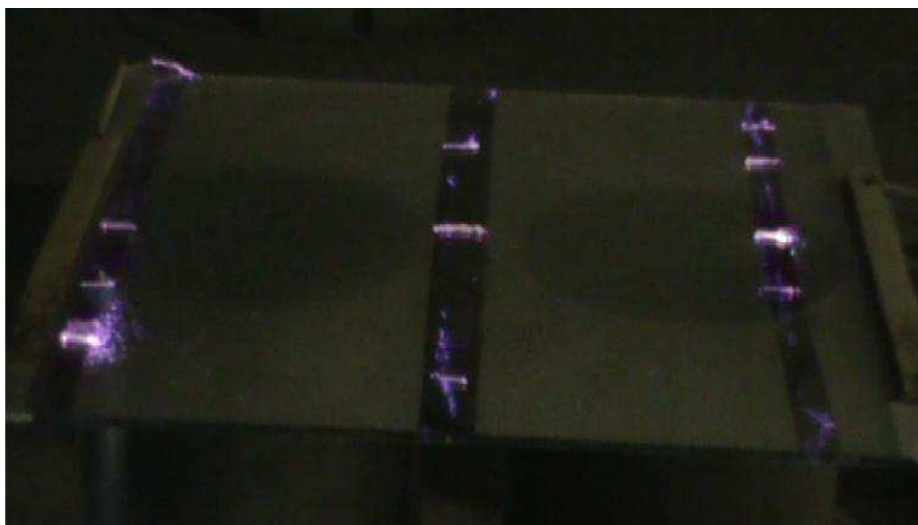


Figure V.2: Occurrences d'arcs partiels aux niveaux des bandes propres

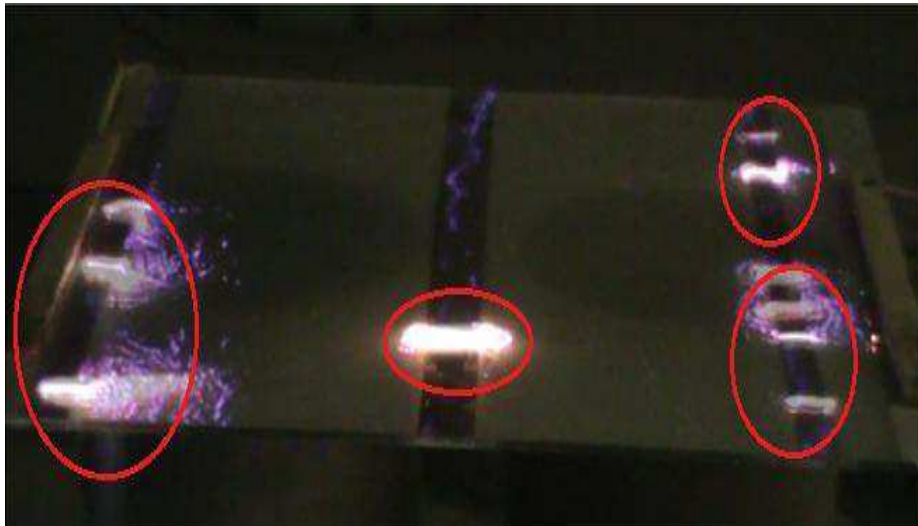


Figure V.3: Intensification des arcs partiels

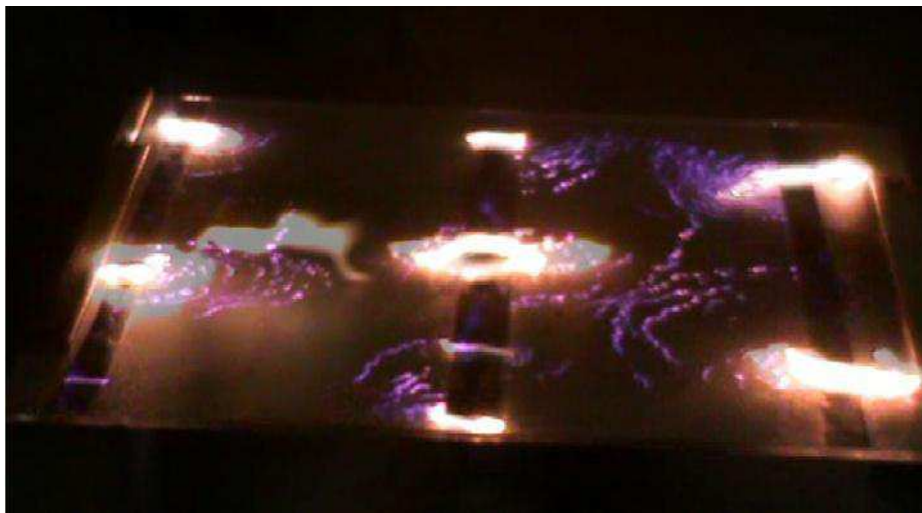


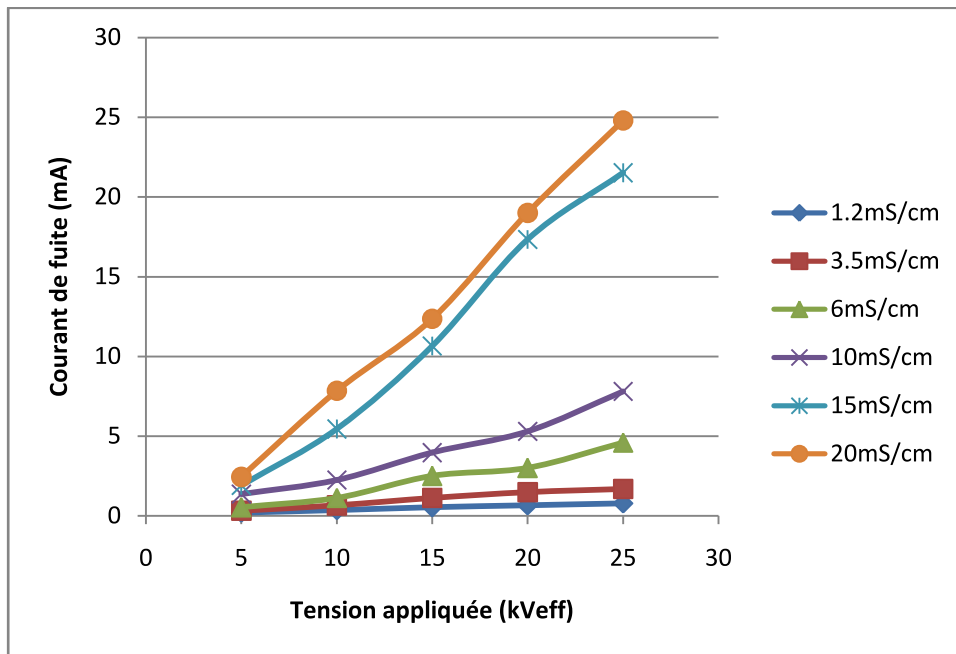
Figure V.4: Unification des arcs partiels et extinction d'autres



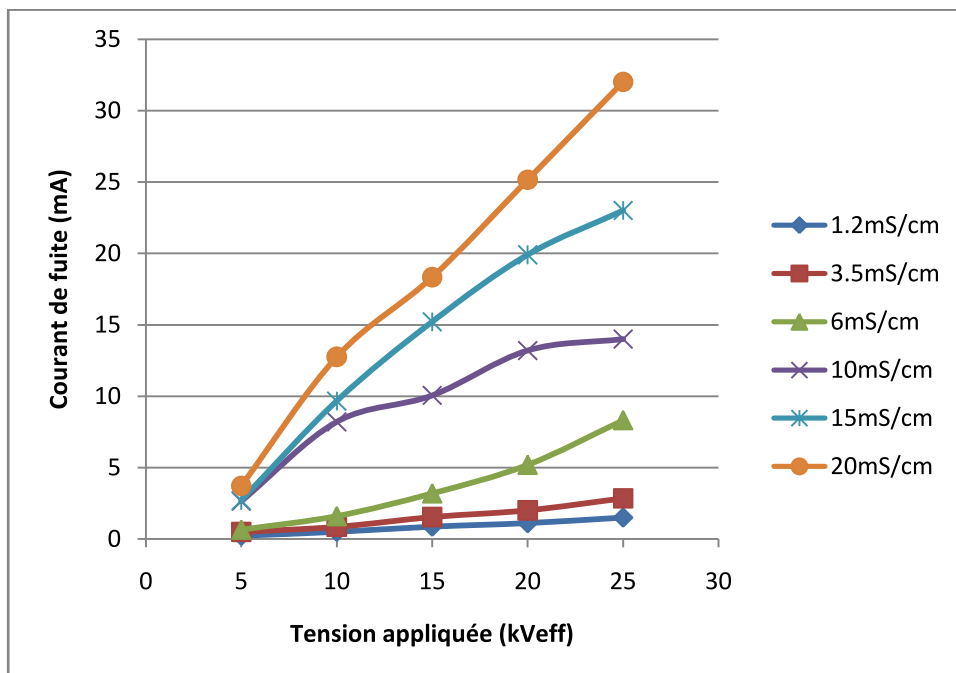
Figure V.5: Contournement entre les électrodes

V.2.2 Etude du courant de fuite

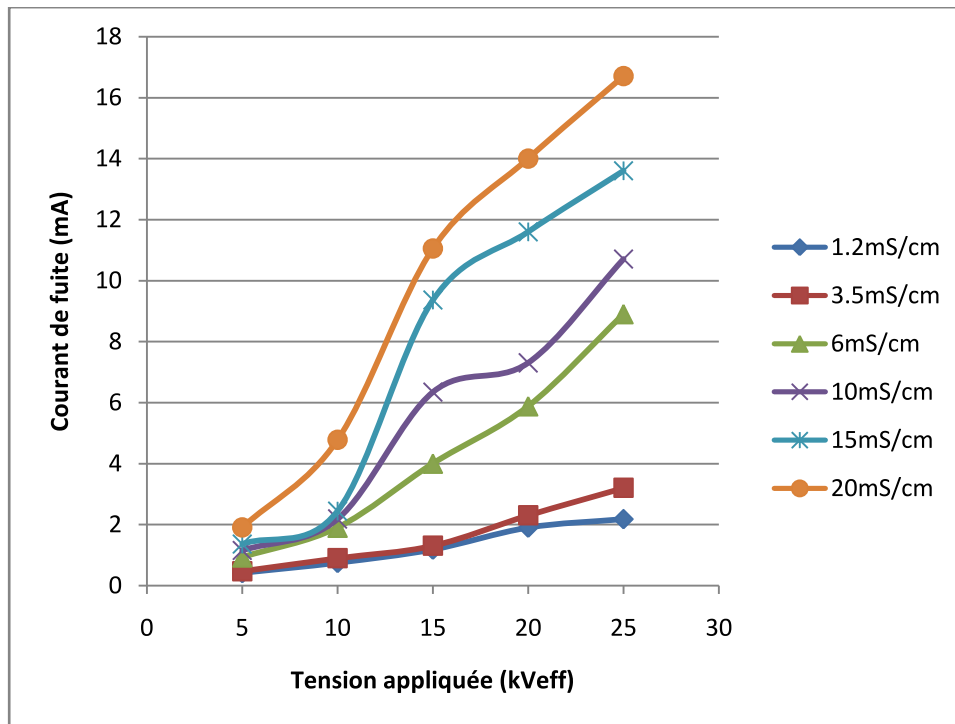
Pour cette configuration de pollution où la distribution de celle-ci est réalisée d'une manière alternée, nous avons mesuré l'intensité du courant de fuite pour différents niveaux de tension appliquée (5, 10, 15, 20 et 25 kV_{eff}), pour plusieurs conductivités et pour trois concentrations en kaolin. Les résultats d'essais sont représentés sur la figure V.6.



(A)



(B)



(C)

Figure V.6: Evolution de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée et de la conductivité pour les trois concentrations en kaolin (A) : Concentration en kaolin 40g/l, (B) : Concentration en kaolin 100g/l, (C) : Concentration en kaolin 200g/l.

La figure V.6 représentant la variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée montre que cette amplitude est d'autant plus importante que la tension appliquée et de la conductivité sont élevées. Ces constatations sont vérifiées quelque soit la concentration en kaolin étudiée.

Une analyse attentive de ces trois caractéristiques montre que le courant de fuite augmente faiblement pour les conductivités (1.2, 3.5, 6 et 10 mS/cm), toutefois cette augmentation est accentuée pour les deux conductivités les plus importantes (15 et 20 mS/cm).

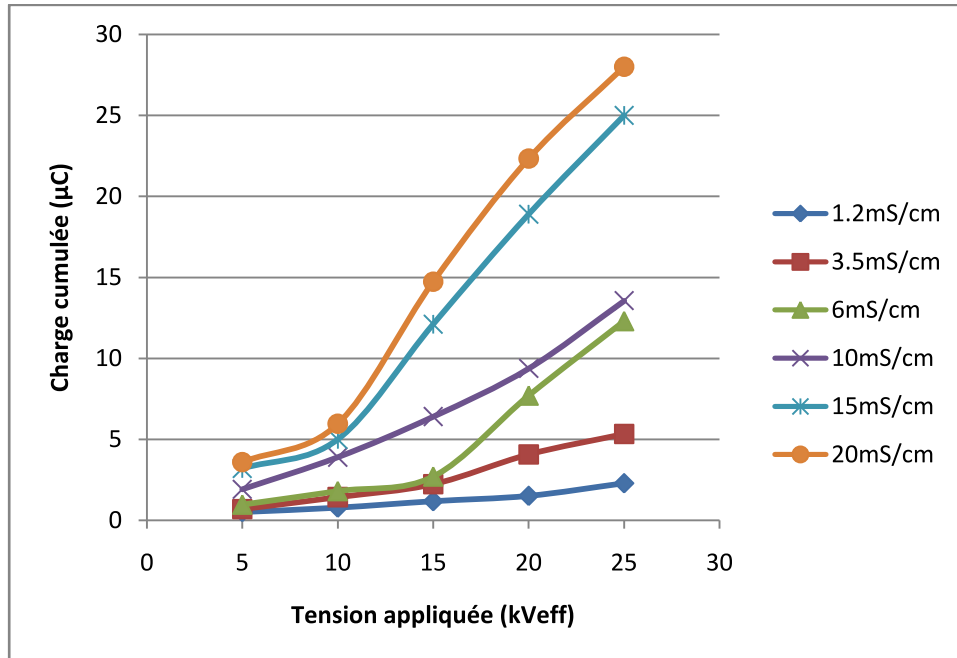
L'augmentation de l'amplitude du courant de fuite peut s'expliquer par l'augmentation de l'ESDD ainsi que la concentration en kaolin. Ces deux dernières engendrent la diminution de l'impédance équivalente vue des électrodes, ce qui favorise la circulation du courant de fuite. Par ailleurs, l'augmentation accentuée constatée pour les conductivités élevées est justifiée par l'occurrence des arcs partiels aux niveaux des bandes propres pour des paliers de tensions inférieurs.

V.2.3 Etude de la charge cumulée

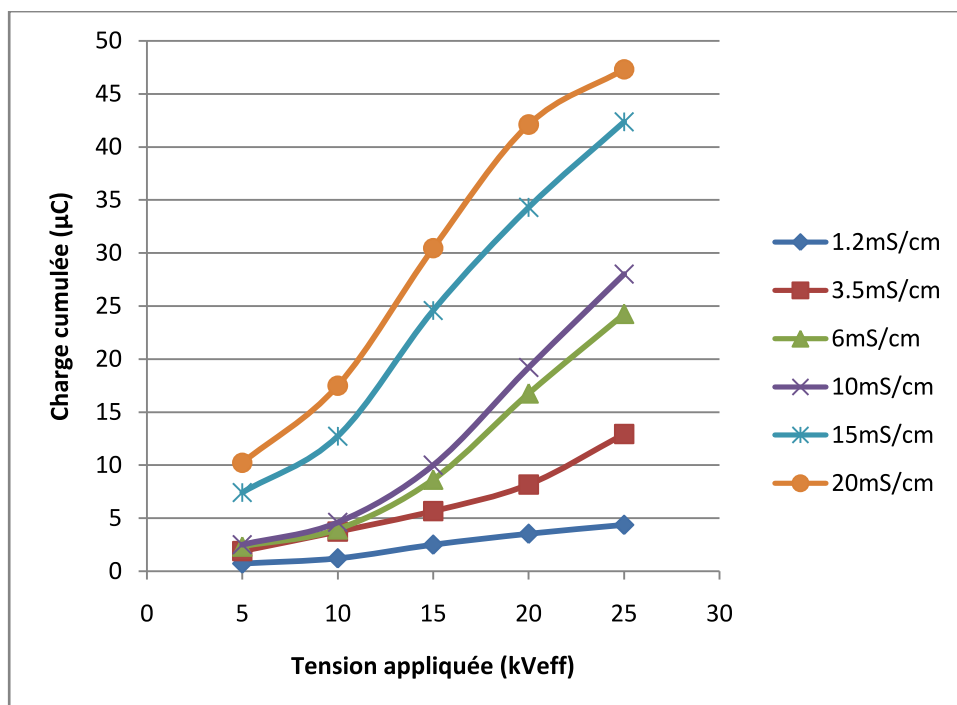
Afin de mettre en évidence l'influence de la conductivité et de la concentration en kaolin sur l'amplitude de la charge cumulée, plusieurs essais ont été effectués pour plusieurs niveaux de tensions. Les résultats obtenus sont montrés sur la figure V.7.

Une comparaison entre la figure représentant l'évolution de l'amplitude du courant de fuite (V.6) et celle montrant la variation de l'amplitude de la charge cumulée (V.7) montre que ces deux paramètres présentent des comportements très similaires. En effet, pour les

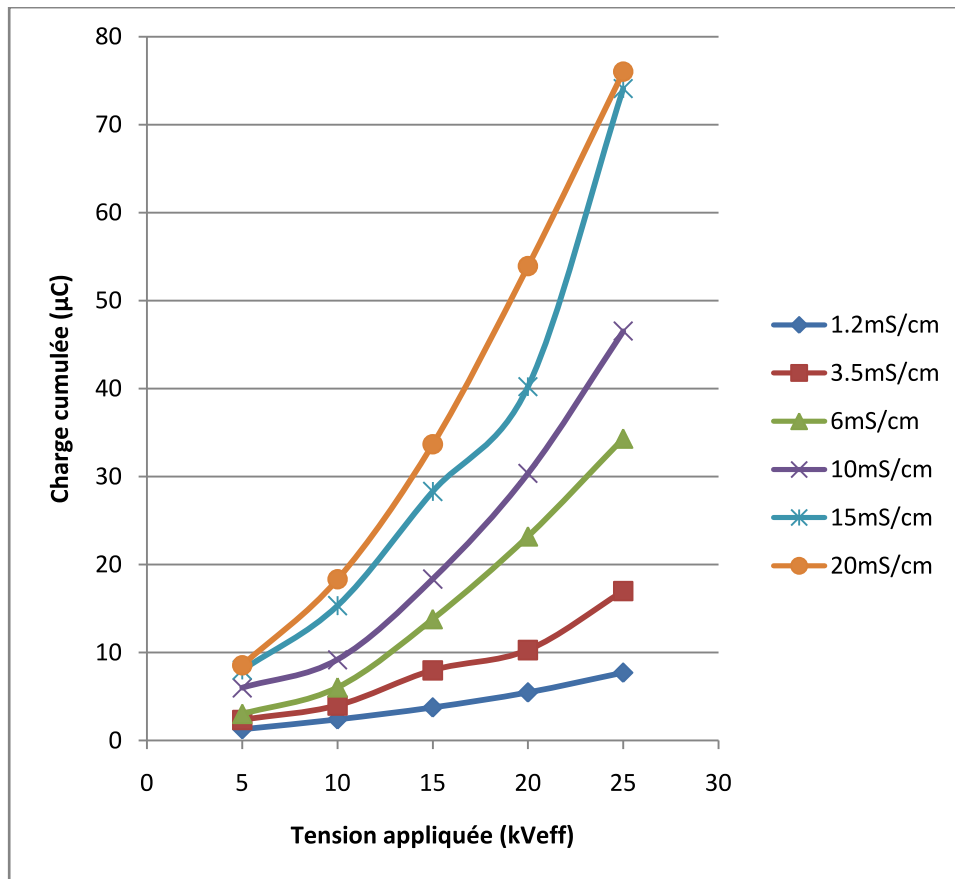
conductivités comprises entre 1,2 et 10 mS/cm, l'amplitude de la charge cumulée augmente faiblement. Par ailleurs, pour les fortes conductivités à savoir 15 et 20 mS/cm, une variation remarquable a été constatée au niveau de l'amplitude de la charge cumulée. Ces constatations ont été bel et bien établies au niveau de l'évolution de l'amplitude du courant de fuite.



(A)



(B)



(C)

Figure V.7: Evolution de la charge cumulée en fonction de la tension appliquée et de la conductivité pour les trois concentrations en kaolin (A) : Concentration en kaolin 40g/l, (B) : Concentration en kaolin 100g/l, (C) : Concentration en kaolin 200g/l.

V.3 Détermination de la classe de pollution en se basant sur le signal du courant de fuite

Nous nous intéressons dans cette section à la prédiction de la classe de pollution. Pour se faire nous avons utilisé des méthodes hybrides basées sur deux techniques de traitement de signal (FFT et ondelettes) et deux méthodes d'apprentissage supervisé (SVM, Naïve Bayésienne). Les méthodes de traitement de signal servent à l'extraction des paramètres caractéristiques des signaux du courant de fuite. Les méthodes d'apprentissage supervisé, après leur entraînement par ces paramètres, servent à déterminer la classe de pollution. La base de données des signaux du courant de fuite exploitée est celle récupérée à partir des résultats d'essais effectués au niveau du laboratoire, celle-ci simule les trois classes de pollution (classes 1, 2 et 3). La transformée de fourrier rapide (FFT) nous procure le spectre d'amplitude du signal étudié. En effet, nous nous intéressons aux rapports des amplitudes des harmoniques les plus significatifs (3, 5 et 7) pour obtenir un certain nombre de paramètres. La décomposition du signal en multi niveaux via la technique d'ondelettes nous permet de visualiser les maximums, les minimums des différents détails et approximations et de calculer leur standard déviation.

Après l'acquisition d'une base de données des signaux du courant de fuite correspondante aux trois classes de pollution, chaque signal est soumis à une décomposition via les deux techniques de traitement de signal (FFT, ondelette) afin d'extraire 62 critères caractérisant le signal. Cette décomposition nous permet d'associer pour chaque signal deux

tableaux. Ce processus est appliqué sur 115 signaux afin de parcourir tous les signaux correspondants aux différentes classes de pollutions étudiées expérimentalement. Le traitement de 90 signaux est indispensable afin d'obtenir deux matrices d'entraînement des modèles classifieurs. Cette opération nous permet d'avoir deux matrices de (90x32). La première matrice comporte (vecteur N° 1 x 90) et la seconde matrice comporte (vecteur N° 2 x 90). Les deux matrices serviront pour l'entraînement de ces modèles classifieurs. Par ailleurs, nous associons pour chaque vecteur la valeur 1, 2 ou 3 qui signifie les classes de pollution assignées à ces échantillons. Le traitement de 25 signaux supplémentaires servira comme validation des modèles classifieurs. La figure V.8 résume les étapes mentionnées précédemment.

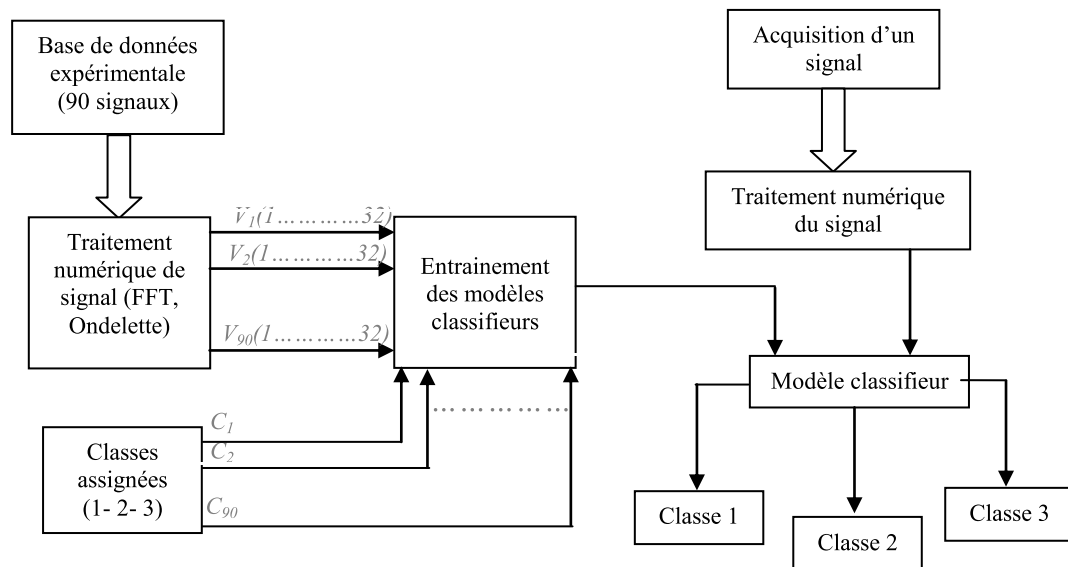


Figure V.8: Algorithme permettant la prédiction de la classe de pollution

La détermination de la classe de pollution d'un isolateur en service constitue l'une des problématiques les plus importantes à prendre en charge afin de limiter les défaillances dues aux contournements des isolateurs. Cette classification nous informe sur le degré de sévérité de pollution déposée sur la surface de l'isolateur. La sévérité de pollution est évaluée par l'intensité de précipitation ainsi que par la conductivité des dépôts polluants. La sévérité considérée est alors exprimée en termes de salinité équivalente. En effet, nous pouvons faire correspondre à chaque site, soumis indifféremment à une pollution naturelle ou industrielle, une solution saline équivalente. La CEI 60-1 classe la sévérité de pollution en quatre classes différentes qui sont les suivantes :

Classe 1: La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium de concentration 2.5 g/l.

Classe 2: La concentration de la salinité équivalente maximale retenue pour cette classe est de 10 g/l.

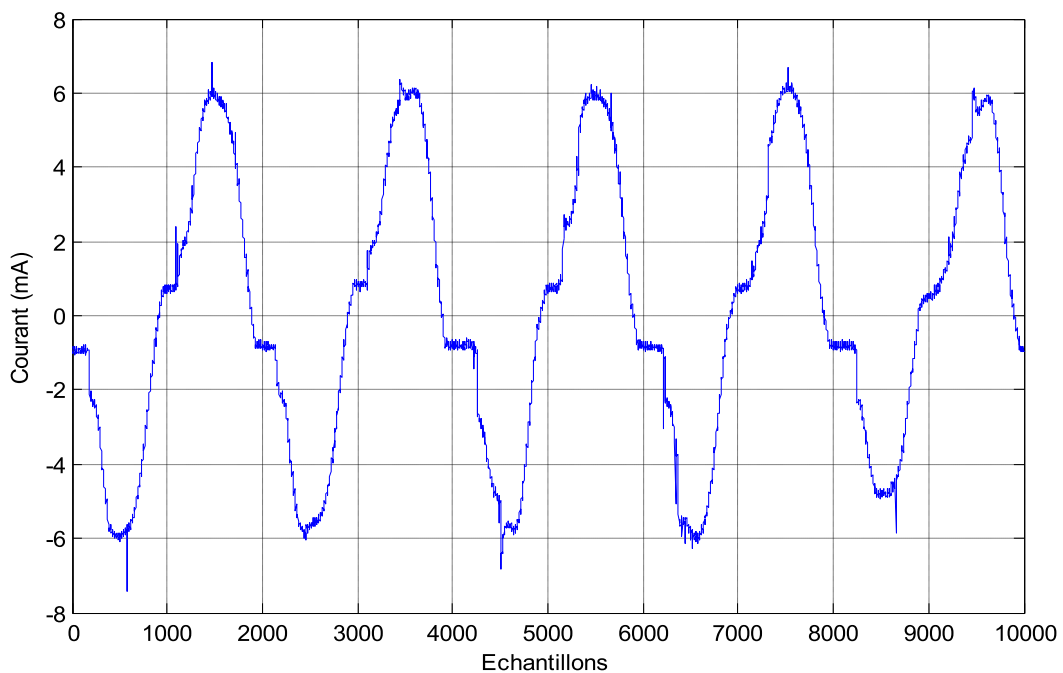
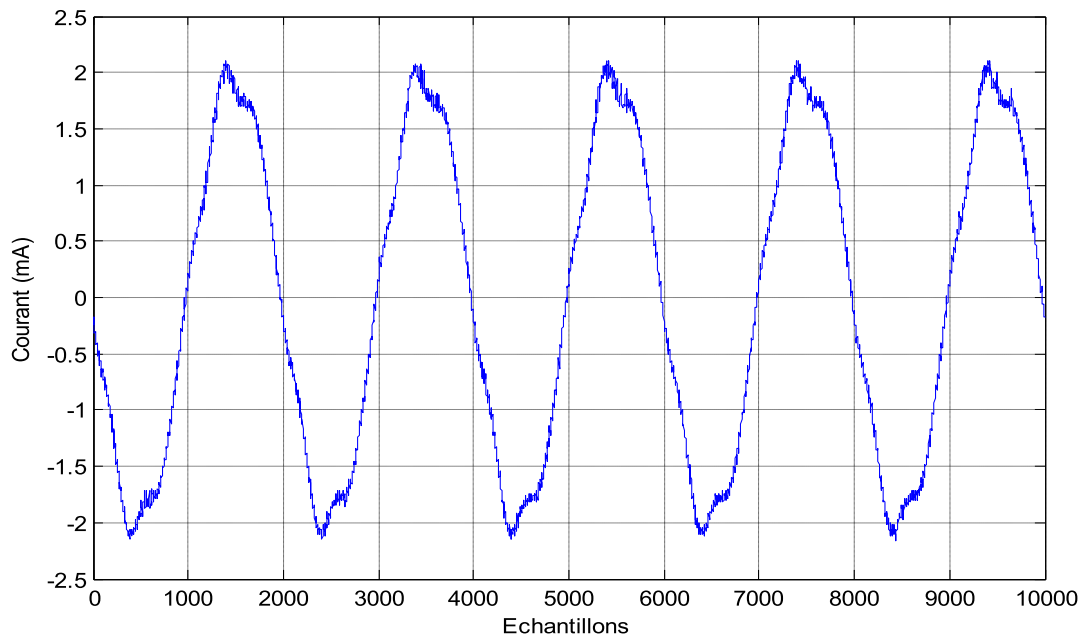
Classe 3: La concentration de la salinité équivalente maximale correspondante à cette classe est de 80 g/l.

Classe 4: La concentration de la salinité équivalente maximale retenue pour cette classe est de 160 g/l.

L'équipement de la station du laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique nous permet de réaliser des essais expérimentaux pour simuler les trois premières classes seulement. La salinité équivalente maximale étudiée est de 80 g/l.

V.3.1 Traitement des signaux du courant de fuite pour la classification de la sévérité de pollution

Nous présentons dans cette section les formes d'ondes des signaux du courant de fuite correspondantes aux trois classes de pollution. Nous allons nous étaler en suite sur la description des vecteurs d'état ainsi que l'évolution des différents critères qui les constituent. En deuxième lieu, nous présentons les résultats de classifications obtenus par les deux méthodes.



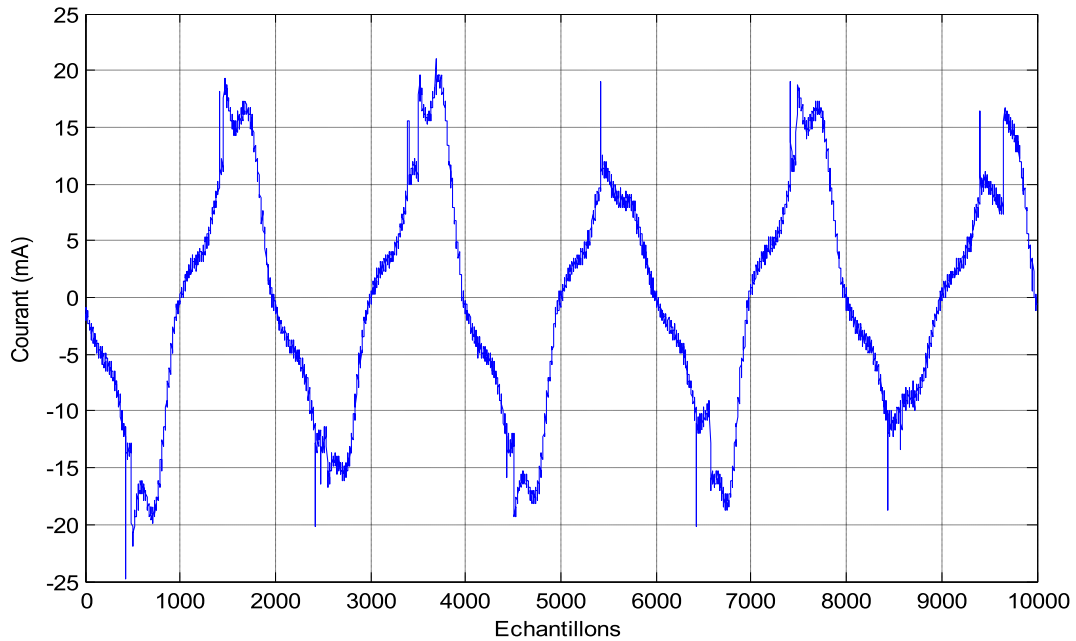


Figure V.9: Formes d’ondes des signaux du courant de fuite correspondantes aux trois classes de pollution à 25 kV_{eff}.

V.3.1.1 Description des vecteurs d’états

Les vecteurs correspondants aux trois classes de pollution comportent des coefficients extraits par la FFT et des coefficients liés aux détails d’ondelettes (STD, Max, Min) ou bien des coefficients extraits par la FFT et des coefficients liés aux approximations d’ondelettes (STD, Max, Min). Par conséquent, nous définissons deux vecteurs comme suit :

Vecteur lié aux coefficients extrait de la FFT et aux détails

$K_{5/3}$	$K_{7/5}$	$STD1_d, \dots, STD10_d$	$Max1_d, \dots, Max10_d$	$Min1_d, \dots, Min10_d$
-----------	-----------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Tableau V.1 : Vecteur comportant des coefficients extraits de la FFT et des détails

Vecteur lié aux coefficients extrait de la FFT et aux approximations

$K_{5/3}$	$K_{7/5}$	$STD1_a, \dots, STD10_a$	$Max1_a, \dots, Max10_a$	$Min1_a, \dots, Min10_a$
-----------	-----------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Tableau V.2 : Vecteur comportant des coefficients extraits de la FFT et des approximations

V.3.1.2 Représentation de l’évolution des critères constituant les vecteurs d’état

V.3.1.2.1 Représentation de l’évolution des deux critères $K_{5/3}$ et $K_{7/5}$

Dans ce paragraphe, nous définissons et représentons l’évolution des deux critères $K_{m/n}$.

$$\text{Le coefficient } K_{m/n} = \frac{\text{Amplitude de l'harmonique } m}{\text{Amplitude de l'harmonique } n}$$

- **Représentation de l'évolution du critère $K_{5/3}$**

D'après la figure V.10, nous remarquons que pour chaque niveau de tension, le coefficient $K_{5/3}$ a tendance à diminuer avec l'augmentation de la conductivité. Nous constatons également que pour une conductivité constante donnée, le coefficient $K_{5/3}$ est toujours plus important pour une faible tension puis diminue avec l'augmentation de celle-ci. La diminution de la valeur $K_{5/3}$ est due principalement à l'augmentation de l'amplitude de l'harmonique N° 3 qui traduit l'accroissement de la sévérité de pollution.

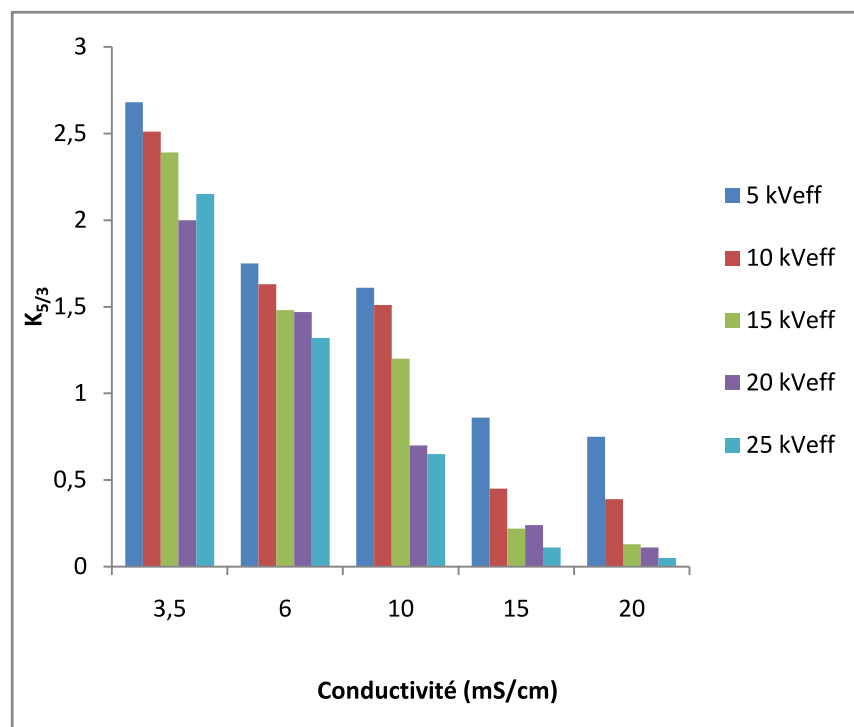


Figure V.10: Variation du critère $K_{5/3}$ en fonction de la conductivité pour les différents paliers de tension.

- **Représentation de l'évolution du critère $K_{7/5}$**

Pour ce cas de figure (V11), nous remarquons qu'à chaque niveau de tension appliquée, le coefficient $K_{7/5}$ augmente avec l'augmentation de la sévérité de pollution. Nous remarquons aussi que pour une conductivité constante, le coefficient $K_{7/5}$ a tendance à augmenter avec l'augmentation de la tension appliquée. L'augmentation du coefficient $K_{7/5}$ nous renseigne que l'amplitude de l'harmonique n° 7 augmente plus rapidement que le n° 5 avec l'augmentation de la sévérité de pollution.

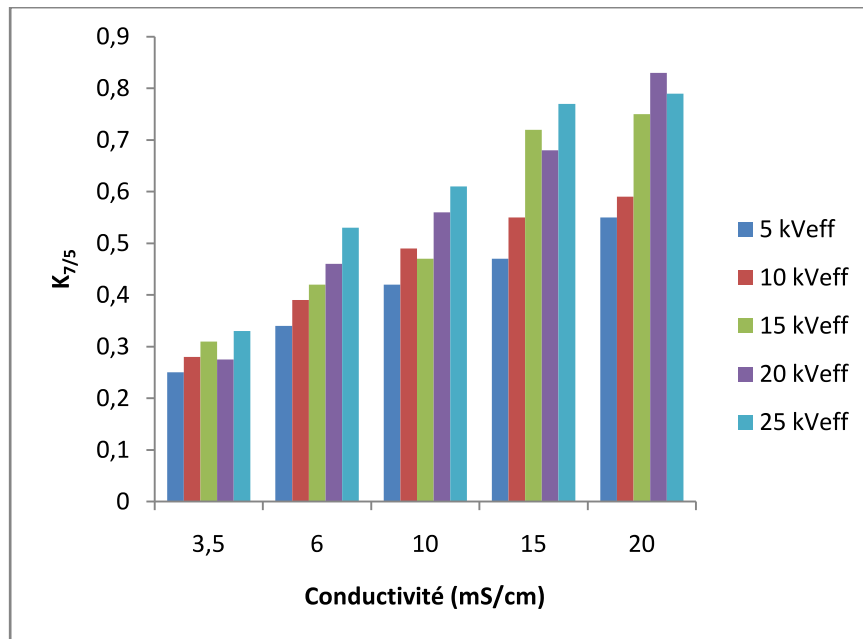


Figure V.11: Variation du critère $K_{7/5}$ en fonction de la conductivité pour les différents paliers de tension.

V.3.1.2.2 Représentation de l'évolution des critères extraits de la décomposition par la transformée en ondelettes

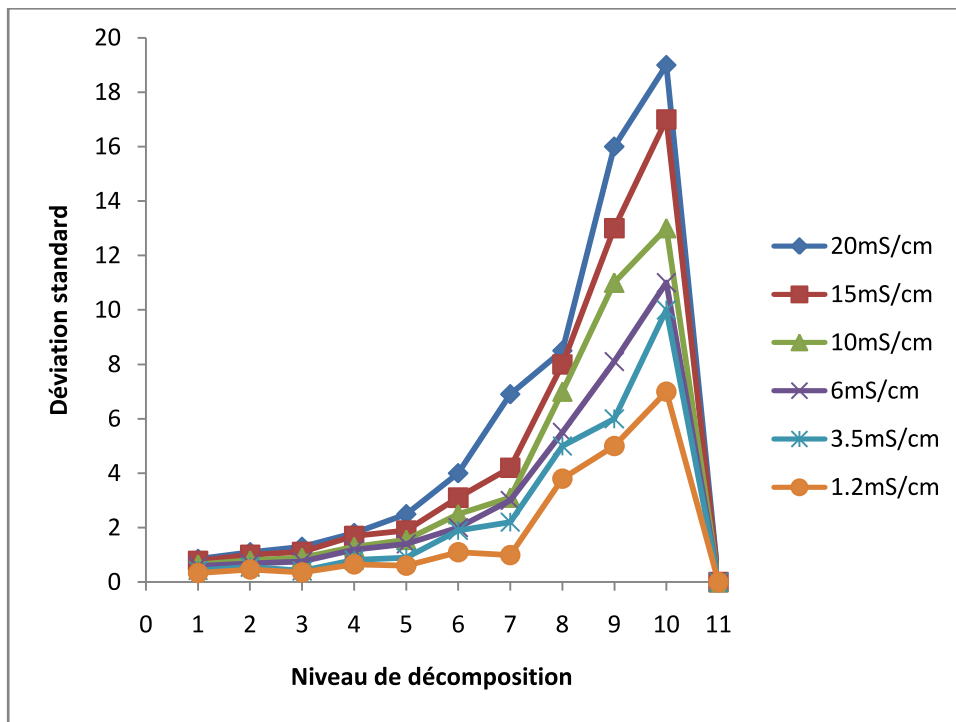
Nous nous intéressons dans cette section à la décomposition du signal du courant de fuite par la DWT. Les signaux correspondants aux trois classes de pollutions étudiées (classes 1, 2 et 3) sont décomposés via l'analyse multi-résolution jusqu'au niveau 10. Chaque niveau possède à la fois les coefficients de détails ainsi que les coefficients d'approximations. Le choix du niveau de décomposition est lié à la taille du signal. Vu la présence de hautes fréquences dans les signaux enregistrés, l'ondelette de Daubechies 4 « db 4 » a été proposée comme ondelette analysante (mère). L'objectif de notre décomposition est de suivre l'évolution des maximums, des minimums et de la standard déviation des dix signaux représentant les dix détails et des dix signaux représentant les dix approximations en fonction de la classe de pollution. Le maximum et le minimum nous donnent une information sur les valeurs crêtes des approximations et des détails à chaque niveau de décomposition. Les standards déviations sont calculées afin d'identifier les transitions d'énergie présentes dans le signal du courant de fuite. Les trois paramètres mentionnés précédemment serviront comme critères de jugement de l'état de surface du modèle pollué.

Vu l'évolution similaire que présente ces critères en fonction de la sévérité de pollution, nous nous limitons à leur représentation pour un niveau de tension appliquée de 25 kV_{eff}.

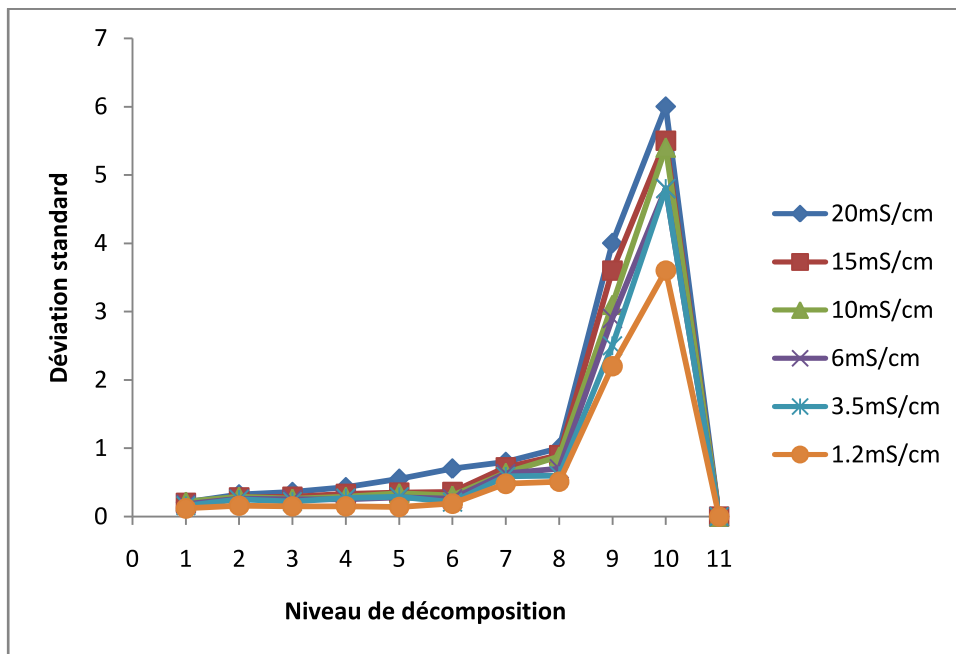
V.3.1.2.2.1 Evolution de la standard déviation des approximations et des détails du signal du courant de fuite

Nous constatons d'après la figure V.12 que les valeurs de la standard déviation augmentent avec le niveau de décomposition. Ceci est vérifié quelque soit la conductivité étudiée. Par ailleurs, nous constatons également que la standard déviation croît d'une façon remarquable avec le niveau de décomposition pour le cas des approximations. Toutefois, dans le cas des détails, nous remarquons que la valeur de la standard déviation croît légèrement entre

les niveaux 1 et 8 et brusquement pour les niveaux 9 et 10. Les standards déviations sont d'autant plus importantes que la conductivité est élevée.



(A)

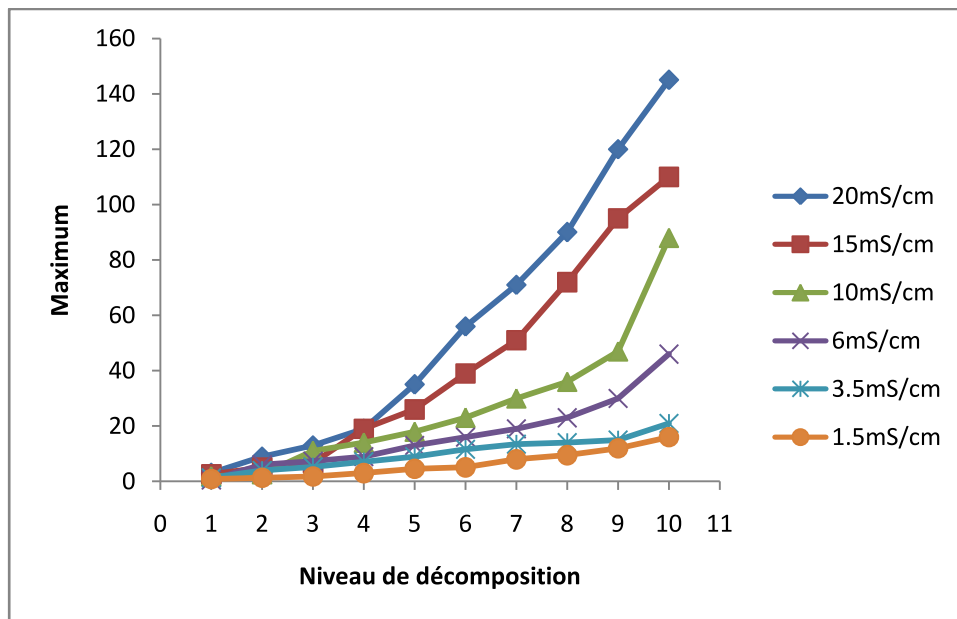


(B)

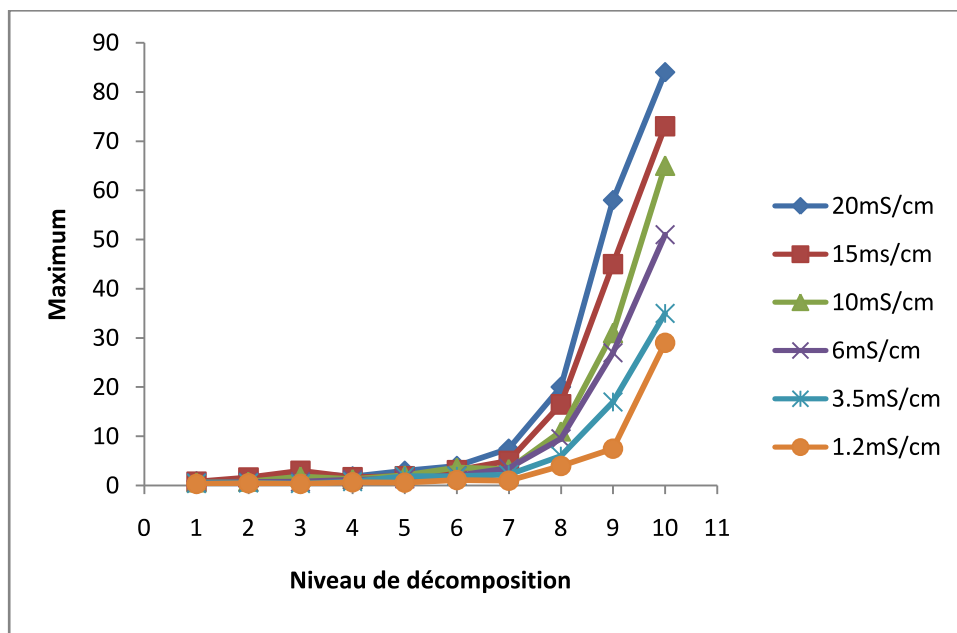
Figure V.12: Evolution de la standard déviation des approximations et des détails du signal du courant de fuite pour un niveau de tension appliqué de 25 kV_{eff} (A) : Approximations, (B) détails

V.3.1.2.2 Evolution des maximums des approximations et des détails du signal du courant de fuite

Quelque soit la conductivité étudiée, nous constatons que les valeurs des maximums augmentent avec le niveau de décomposition. Nous notons également que cette augmentation des maximums, comme il a été observé pour la standard déviation, est visible à partir du premier niveau de décomposition pour le cas des approximations. Cependant, pour les détails, l'augmentation des maximums est observée d'une manière accentuée seulement à partir du huitième niveau.



(A)

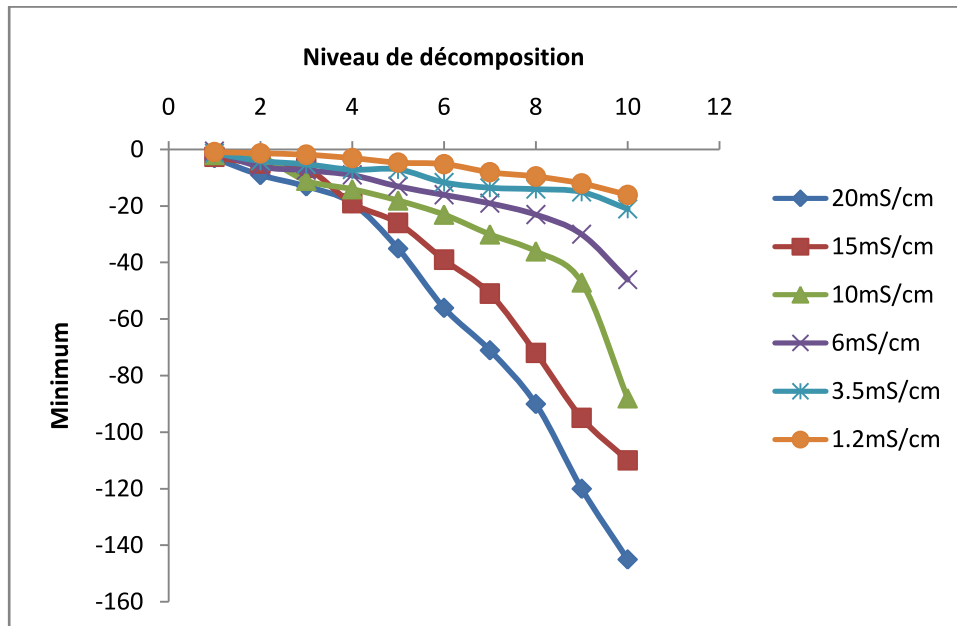


(B)

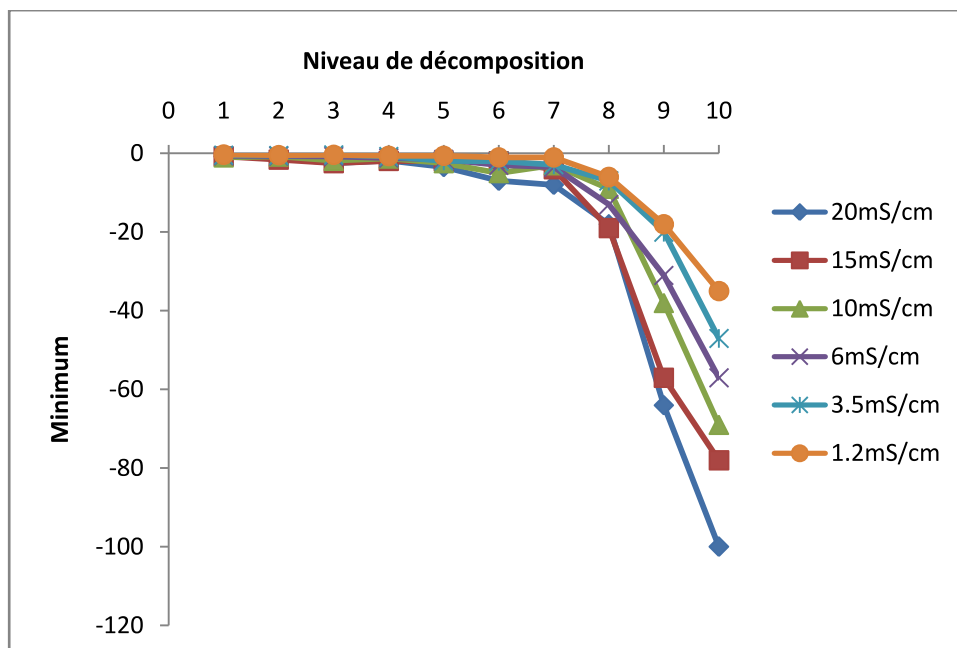
Figure V.13: Evolution des maximums des approximations et des détails du signal du courant de fuite pour un niveau de tension appliqué de 25 kV_{eff} (A) : Approximations, (B) détails.

V.3.1.2.2.3 Evolution des minimums des approximations et des détails du signal du courant de fuite

Pour une conductivité donnée, nous constatons d'après la figure V.14 que les valeurs des minimums diminuent avec l'augmentation du niveau de décomposition. Par ailleurs, nous constatons également que les minimums décroissent d'une façon remarquable avec le niveau de décomposition pour le cas des approximations. Toutefois, dans le cas des détails, nous remarquons que les minimums décroissent légèrement entre les niveaux 1 et 8 et brusquement pour les niveaux 9 et 10. Les minimums sont d'autant plus faibles que la conductivité est élevée.



(A)



(B)

Figure V.14: Evolution des minimums des approximations et des détails du signal du courant de fuite pour un niveau de tension appliqué de 25 kV_{eff} (A) : Approximations, (B) détails

V.3.2 Validation des modèles

V.3.2.1 Validation du modèle Naïve Bayésien

V.3.2.1.1 Avec utilisation des coefficients d'approximations d'ondelettes

Afin de valider notre modèle Bayésien entraîné précédemment en se basant sur les deux critères extraits par la FFT ainsi que sur les approximations extraites par la DWT, nous avons utilisé 15 échantillons (vecteurs). Les résultats obtenus sont illustrés sur le tableau suivant :

Échantillon (N°)	$K_{5/3}$	$K_{7/5}$	STD1.....STD10	Max1.....Max10	Min1.....Min10	Classe assignée	Résultat obtenu
1	3.64	0.11	0.26.....4	0.85.....16	-0.83.....-17	1	2(*)
2	3.23	0.17	0.28.....4.32	0.93.....18.32	-0.89.....-18	1	1
3	2.68	0.21	0.30.....5.36	1.3.....21	-1.29.....-21	1	3(*)
4	2.41	0.26	0.33.....7	1.38.....23.6	-1.36.....-23.6	1	1
5	2.08	0.32	0.37.....10	1.39.....24	-1.38.....-24	1	3(*)
6	1.75	0.38	0.39.....11	1.5.....46	-1.4.....-43	2	2
7	1.31	0.44	0.43.....11.5	1.73.....54.4	-1.6.....-52	2	1(*)
8	1.12	0.50	0.51.....12.45	1.84.....68.2	-1.67.....-16	2	2
9	0.98	0.56	0.58.....12.73	1.9.....88	-1.85.....-87	2	2
10	0.7	0.60	0.65.....13	1.96.....91.6	-1.9.....-90	2	2
11	0.75	0.63	0.78.....17	2.63.....110	-2.61.....-108	3	3
12	0.48	0.71	0.85.....19	2.72.....125	-2.71.....-123	3	3
13	0.23	0.76	0.89.....21	2.80.....145	-2.81.....-146	3	2(*)
14	0.15	0.80	0.98.....22.5	2.86.....151	-2.81.....-153	3	3
15	0.09	0.84	1.11.....23.1	3.12.....165	3.11.....163	3	2(*)

Tableau V.3 : Validation du modèle de classification Bayésien en se basant sur les approximations du signal du courant de fuite

V.3.2.1.2 Avec utilisation des coefficients de détails d'ondelettes

Afin de valider notre modèle Bayésien entraîné précédemment en se basant sur les deux critères extraits par la FFT ainsi que sur les détails extraits par la DWT, nous avons utilisé 15 échantillons (vecteurs). Les résultats obtenus sont illustrés sur le tableau suivant :

Échantillon (N°)	$K_{5/3}$	$K_{7/5}$	STD1...STD10	Max1...Max10	Min1...Min10	Classe assignée	Résultat obtenu
1	3.64	0.11	0.10.....3.8	0.28.....27	-0.27....-35	1	2(*)
2	3.23	0.17	0.10.....3.9	0.29.....28	-0.28.....-38	1	1
3	2.68	0.21	0.11.....4.2	0.30.....31	-0.31.....-39	1	1
4	2.41	0.26	0.12.....4.4	0.30.....34	-0.29....-43	1	1
5	2.08	0.32	0.12.....4.6	0.32.....36	-0.32....-47	1	3(*)
6	1.75	0.38	0.11.....4.6	0.33.....51	-0.31....-56	2	2
7	1.31	0.44	0.12.....4.6	0.34.....52	-0.32....-59	2	1(*)
8	1.12	0.50	0.13.....4.7	0.35.....60	-0.34....-63	2	2
9	0.98	0.56	0.11.....5.1	0.36.....63	-0.33....-68	2	2
10	0.7	0.60	0.12.....5.4	0.34.....68	-0.32....-72	2	2

11	0.75	0.63	0.11.....5.3	0.33.....72	-0.34....-70	3	3
12	0.48	0.71	0.11.....5.4	0.36.....74	-0.36....-80	3	3
13	0.23	0.76	0.3.....5.8	0.38.....75	-0.38....-88	3	2(*)
14	0.15	0.80	0.12.....6.1	0.41.....82	-0.39....-93	3	3
15	0.09	0.84	0.12.....6.6	0.42.....86	-0.44...-100	3	3

Tableau V.4: Validation du modèle de classification Bayésien en se basant sur les détails du signal du courant de fuite

Les résultats de validation Bayésienne obtenus, en utilisant les deux critères extraits par la FFT ainsi que les approximations extraites par la DWT, ont signalé 09 bonnes réponses sur 15. Par ailleurs, nous constatons que la plupart des erreurs commises par ce modèle correspondent à la classe N°1 (60 % de fausses réponses). Ceci pourrait s'expliquer à priori par le manque d'informations accompagnant les approximations du signal du courant de fuite.

Concernant la validation Bayésienne, en utilisant les deux critères extraits par la FFT et les détails extraits par la DWT, les résultats de validation obtenus montrent 11 bonnes réponses sur 15. Nous pensons que ce résultat peut être amélioré en augmentant la base de données d'entraînement.

V.3.2.2 Validation du modèle SVM

V.3.2.2.1 Avec utilisation des coefficients d'approximations d'ondelettes

Les résultats de validation du modèle SVM en utilisant les deux critères extraits par la FFT et les approximations extraites par la DWT sont illustrés sur le tableau suivant :

Échantillon (N°)	$K_{5/3}$	$K_{7/5}$	STD1.....STD10	Max1.....Max10	Min1.....Min10	Classe assignée	Résultat obtenu
1	3.64	0.11	0.26.....4	0.85.....16	-0.83.....-17	1	1
2	3.23	0.17	0.28.....4.32	0.93.....18.32	-0.89.....-18	1	1
3	2.68	0.21	0.30.....5.36	1.3.....21	-1.29.....-21	1	1
4	2.41	0.26	0.33.....7	1.38.....23.6	-1.36.....-23.6	1	1
5	2.08	0.32	0.37.....10	1.39.....24	-1.38.....-24	1	2(*)
6	1.75	0.38	0.39.....11	1.5.....46	-1.4.....-43	2	3(*)
7	1.31	0.44	0.43.....11.5	1.73.....54.4	-1.6.....-52	2	2
8	1.12	0.50	0.51.....12.45	1.84.....68.2	-1.67.....-16	2	2
9	0.98	0.56	0.58.....12.73	1.9.....88	-1.85.....-87	2	2
10	0.7	0.60	0.65.....13	1.96.....91.6	-1.9.....-90	2	2
11	0.75	0.63	0.78.....17	2.63.....110	-2.61.....-108	3	3
12	0.48	0.71	0.85.....19	2.72.....125	-2.71.....-123	3	3
13	0.23	0.76	0.89.....21	2.80.....145	-2.81.....-146	3	3
14	0.15	0.80	0.98.....22.5	2.86.....151	-2.81.....-153	3	3
15	0.09	0.84	1.11.....23.1	3.12.....165	3.11.....163	3	3

Tableau V.5: Validation du modèle de classification SVM en se basant sur les approximations du signal du courant de fuite

V.3.2.2.2 Avec utilisation des coefficients de détails d'ondelettes

Les résultats de validation du modèle SVM en utilisant les deux critères extraits par la FFT et les détails extraits par la DWT sont illustrés sur le tableau suivant :

Échantillon (N°)	$K_{5/3}$	$K_{7/5}$	STD1...STD10	Max1...Max10	Min1...Min10	Classe assignée	Résultat obtenu
1	3.64	0.11	0.10.....3.8	0.28.....27	-0.27....-35	1	1
2	3.23	0.17	0.10.....3.9	0.29.....28	-0.28....-38	1	1
3	2.68	0.21	0.11.....4.2	0.30.....31	-0.31....-39	1	3(*)
4	2.41	0.26	0.12.....4.4	0.30.....34	-0.29....-43	1	1
5	2.08	0.32	0.12.....4.6	0.32.....36	-0.32....-47	1	1
6	1.75	0.38	0.11.....4.6	0.33.....51	-0.31....-56	2	2
7	1.31	0.44	0.12.....4.6	0.34.....52	-0.32....-59	2	2
8	1.12	0.50	0.13.....4.7	0.35.....60	-0.34....-63	2	2
9	0.98	0.56	0.11.....5.1	0.36.....63	-0.33....-68	2	2
10	0.7	0.60	0.12.....5.4	0.34.....68	-0.32....-72	2	2
11	0.75	0.63	0.11.....5.3	0.33.....72	-0.34....-70	3	3
12	0.48	0.71	0.11.....5.4	0.36.....74	-0.36....-80	3	3
13	0.23	0.76	0.3.....5.8	0.38.....75	-0.38....-88	3	3
14	0.15	0.80	0.12.....6.1	0.41.....82	-0.39....-93	3	3
15	0.09	0.84	0.12.....6.6	0.42.....86	-0.44...-100	3	3

Tableau V.6 : Validation du modèle de classification SVM en se basant sur les détails du signal du courant de fuite

D'après les résultats obtenus pour la validation du modèle SVM, nous remarquons que ce dernier nous donne 13 bonnes réponses sur 15. Ce résultat est obtenu en utilisant les deux critères extraits par la FFT ainsi que les approximations extraites par la DWT. Les deux erreurs commises correspondent aux échantillons N° 5 et 6. Ceci pourrait être dû principalement dans les SVM au fait que ces deux échantillons sont situés près de l'hyperplan séparant la classe 1 de 2, donc l'erreur de classification est plus probable au niveau de ces frontières. Concernant la validation du modèle SVM, en se basant sur les deux critères extraits par la FFT ainsi que sur les détails extraits par la DWT, les résultats obtenus montrent 14 bonnes réponses sur 15. Ceci montre bien la fiabilité du modèle SVM en procédant à son entraînement par les détails extraits de la décomposition du signal du courant de fuite par la DWT.

Pour les quatre cas présentés, nous remarquons que le modèle SVM entraîné par les critères extraits de la FFT et des détails extraits de la DWT présente d'excellents résultats de classification. C'est le modèle le plus fiable qui a fournis 93% de bonnes réponses.

V.4 Application de la technique Recurrent Plot à l'étude du phénomène de contournement des isolateurs

Connaissant la caractéristique non-linéaire du courant de fuite durant le processus du contournement, deux choix s'offrent à nous quand il s'agit d'utiliser les RP pour l'étude de ce phénomène. On applique la technique des RP soit directement au signal du courant de fuite, soit à leurs décompositions fréquentielles.

V.4.1 La technique RP appliquée directement au signal du courant de fuite

La figure V.15 montre un exemple de la technique RP appliquée directement à un signal du courant de fuite typique lors du processus de contournement.

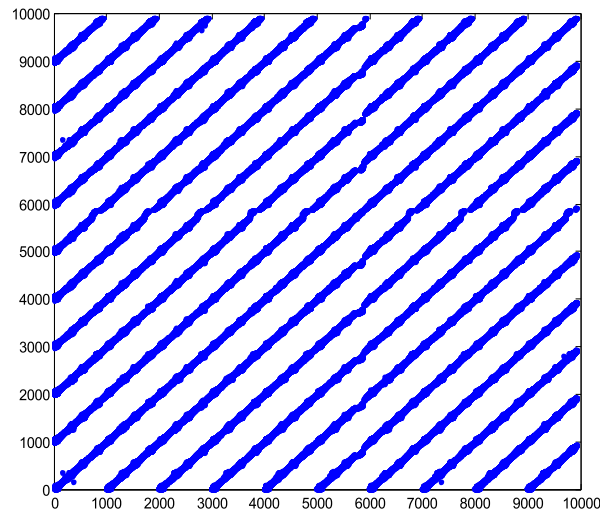


Figure V.15 : Exemple de la technique RP appliquée directement sur le signal du courant de fuite.

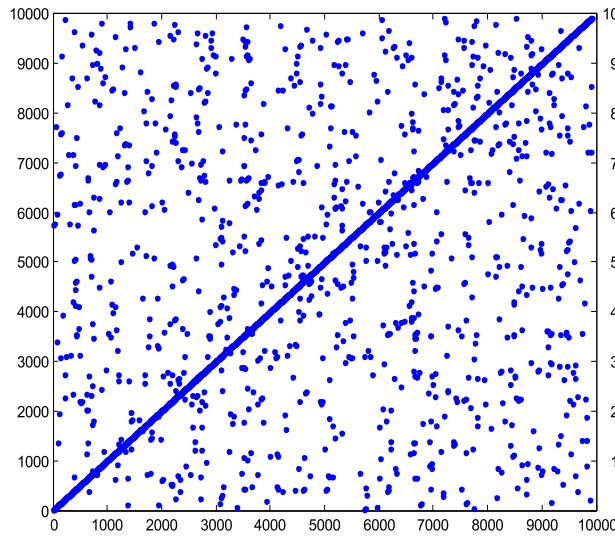
Le résultat correspondant à l'application de RP directement sur le signal du courant de fuite montre l'absence des lignes verticales à la LOI, laissant place uniquement aux lignes parallèles à cette dernière. Une telle structure signifie que le processus étudié est déterministe. Des résultats similaires ont été également trouvés quand la RP est appliquée aux composantes basses et moyennes fréquences.

Ces conclusions ne reflètent pas du tout la réalité du processus de contournement. C'est pourquoi, durant notre étude, on appliquera le diagramme de récurrence à la composante haute fréquence D1 du signal du courant de fuite.

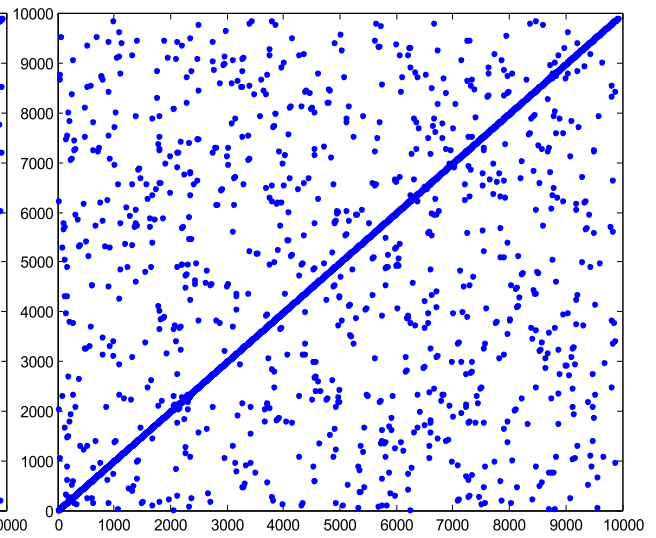
V.4.2 La technique RP appliquée au détail D1 du signal du courant de fuite

On notera que désormais, dans ce paragraphe, la technique RP sera exclusivement appliquée au détail haute fréquence D₁ résultant de la décomposition préalable à l'aide de la DWT du signal de courant de fuite en utilisant l'ondelette de *Daubechies 4*. Par ailleurs, nous exploitons les diagrammes de récurrences afin de suivre le comportement des décharges électriques durant le processus de contournement.

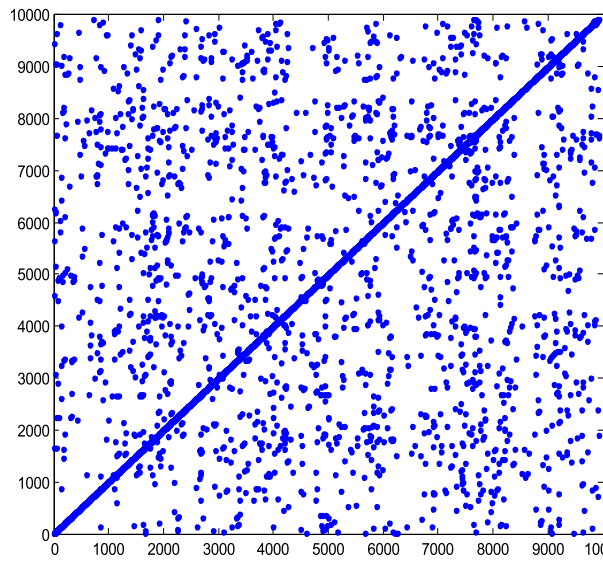
La figure V.15 montre les différents RP de la composante haute fréquence D₁ pour plusieurs niveaux de tension appliquée durant le processus de contournement.



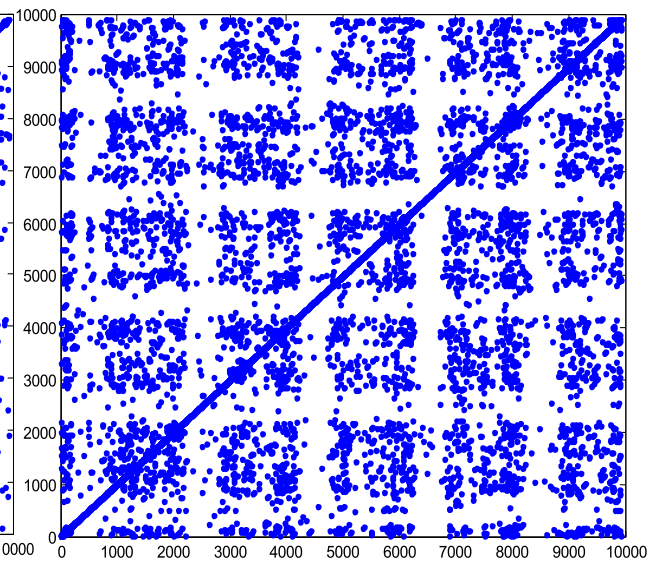
(A)



(B)



(C)



(D)

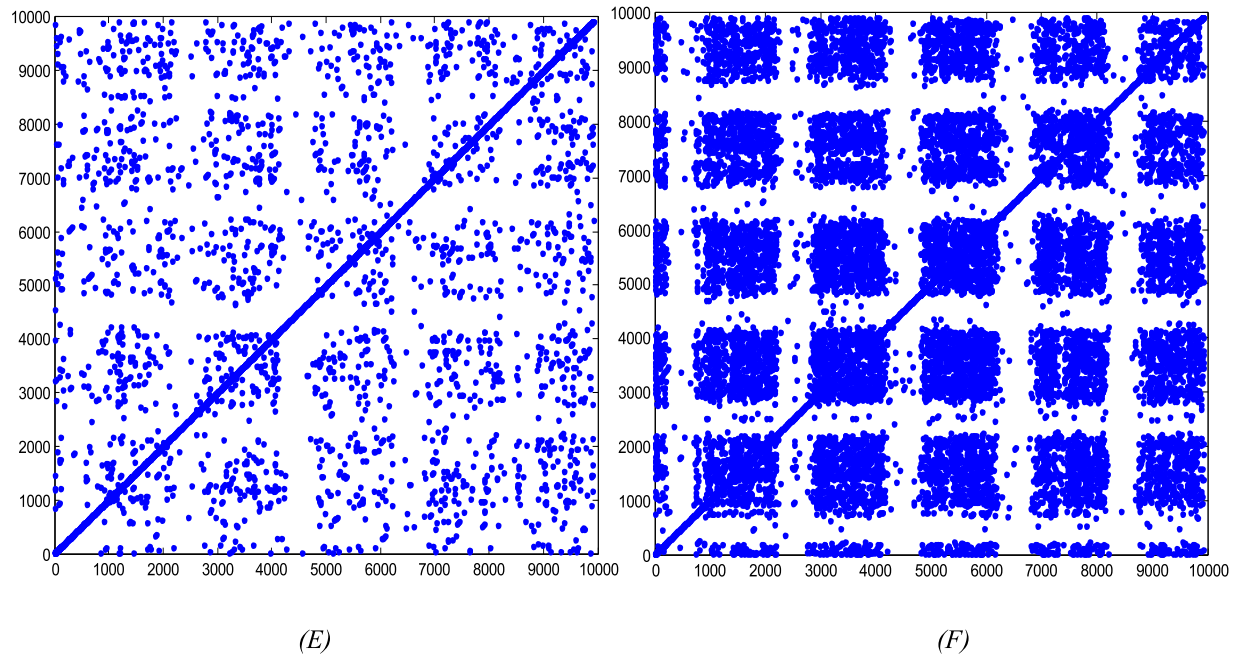


Figure V.16 : RP de la composante haute fréquence (D_1) du signal du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (A) 5 kV_{eff} , (B) 10 kV_{eff} , (C) 15 kV_{eff} , (D) 20 kV_{eff} , (E) 25 kV_{eff} , (F) 30 kV_{eff} .

D'après la figure V.16.A, pour une faible tension de 5 kV_{eff} appliquée au modèle de l'isolateur, on remarque la présence de quelques points épars. Il en est de même pour la figure V.16.B représentant le RP pour une tension appliquée de 10 kV_{eff} . Ainsi, une telle structure indique la présence de rares décharges à la surface de l'isolateur. Ces dernières sont d'une intensité faible. L'analyse visuelle lors des essais permet de vérifier et de confirmer cela, car on remarque que pour de faibles tensions appliquées, des décharges apparaissent dans les zones propres, mais restent toujours faibles et localisées (Figure V.17.a).

Pour une tension supérieure appliquée de 15 kV_{eff} , la figure V.16.C se compose de points denses. Leur présence est plus consistante comparativement aux deux figures précédentes. Leur intensité est elle aussi plus importante. Une telle transition indique une augmentation de l'activité des décharges à la surface du modèle. Ces dernières deviennent donc plus denses et plus importantes, ce qui est en conformité avec notre analyse visuelle (Figure V.17.b).

Par contre, pour une tension appliquée de 20 kV_{eff} , la figure V.16.D se différencie totalement des figures précédentes. On remarque d'une part, des points bien plus denses, plus concentrés, mais aussi une apparition de petites bandes blanches. L'augmentation de la densité des points indique une activité des décharges bien plus importante comparée à la figure précédente. Alors que l'apparition de petites bandes blanches indique l'approche d'un état menant vers une transition certaine. Les décharges se font donc de plus en plus intermittentes. Notre analyse visuelle nous permet de confirmer cela. Ainsi, pour ce niveau de tension, on remarque une saturation complète des bandes propres. La présence des décharges partielles y est très importante (Figure V.17.c).

Ainsi, pour une tension appliquée de 25 kV_{eff} , la figure V.16.E garde relativement la même structure que la figure qui la précède, mais avec une diminution de densité des points qui la composent. Une telle transition peut sembler contradictoire, pourtant, elle explique parfaitement la réalité des décharges à la surface de l'isolateur. En effet, une diminution de densité des points indique une diminution de l'activité des décharges. Cela indique l'apparition d'arcs électriques. Ces conclusions sont en total accord avec l'observation visuelle. Ainsi, on remarque la formation de petits arcs électriques aptes à court-circuiter les zones propres d'une part, mais aussi à commencer une propagation dans les zones polluées (Figure V.17.d). Cela prédit la diminution de l'effet capacitif du courant de fuite, et l'augmentation de son effet résistif.

Enfin, pour une tension appliquée de 30 kV_{eff} , la figure V.16.F se démarque par une structure unique : une forte présence des bandes blanches, ainsi qu'une augmentation évidente de l'intensité des points qui la composent comparativement à la figure qui la précède. Une telle structure indique la présence d'un état fort intermittent qui approche. La combinaison de ces deux éléments prédit l'apparition imminente d'un arc de contournement. Visuellement, on remarque la propagation des arcs électriques sur les zones polluées, ces derniers court-circuitent totalement les zones propres, et tendent se connecter entre eux. Si cela se réalise, on observera l'arc de contournement liant directement la borne HT à la borne terre, indiquant dès lors un comportement quasi-résistif du courant de fuite (Figure V.17.e).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figure V.17. Evolution des décharges électriques durant le processus de contournement (a) 10 kV_{eff}, (b) 15 kV_{eff}, (c) 20 kV_{eff}, (d) 25 kV_{eff}, (e) 30 kV_{eff}.

V.5 Conclusion

La partie expérimentale réalisée dans ce chapitre nous permet de simuler et d'étudier le comportement diélectrique d'une chaîne d'isolateurs polluée sur un modèle plan de laboratoire.

L'utilisation des deux méthodes de classification nous permet de conclure que, malgré l'hypothèse Naïve du modèle Bayésien, ce dernier peut être appliqué pour le diagnostic et la classification de la sévérité de pollution des isolateurs. 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). En dernier, nous pouvons conclure que le modèle SVM est plus performant que celui de Naïf Bayésien quelque soit le type de critères d'entraînements utilisés.

Les structures topologiques du RP semblent être un excellent outil pour prédire l'évolution des décharges électriques durant le processus de contournement.

Chapitre VI

Etude expérimentale sur un
isolateur réel

VI.1 Introduction

Le présent chapitre sera consacré à l'étude du comportement diélectrique d'une chaîne U120B composée de trois isolateurs réels. Nous procédons, dans un premier temps à, la mesure de la tension de contournement, l'amplitude du courant de fuite et l'amplitude de la charge cumulée pour deux natures de pollutions différentes ainsi que pour deux configurations de pollution distinctes (pollution uniforme et non-uniforme).

En deuxième lieu, nous calculons l'impédance équivalente ainsi que l'énergie dissipée sur la surface polluée de la chaîne d'isolateurs. Par ailleurs, nous présentons la variation de tous ces paramètres à savoir : la tension de contournement, le courant de fuite, la charge cumulée, l'impédance équivalente et l'énergie dissipée en fonction de la sévérité de pollution pour les deux distributions de pollution (uniforme et non-uniforme).

En dernier lieu, une étude comparative est établie. Celle-ci sert à mettre en évidence le type ainsi que la configuration de pollutions qui sont les plus néfastes pour le bon fonctionnement du réseau électrique. Cette étude est effectuée en comparant l'évolution ainsi que les amplitudes des différents paramètres mentionnés précédemment. Elle est d'une importance capitale du moment qu'elle est basée sur des essais expérimentaux.

VI.2 Etude de la tension de contournement

Dans cette section, nous analysons l'influence de la concentration en chlorure de sodium (NaCl) ainsi et de l'ajout d'une quantité de 100 g de kaolin sur la variation de la tension de contournement pour les deux cas de configurations de pollution. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure VI.1.

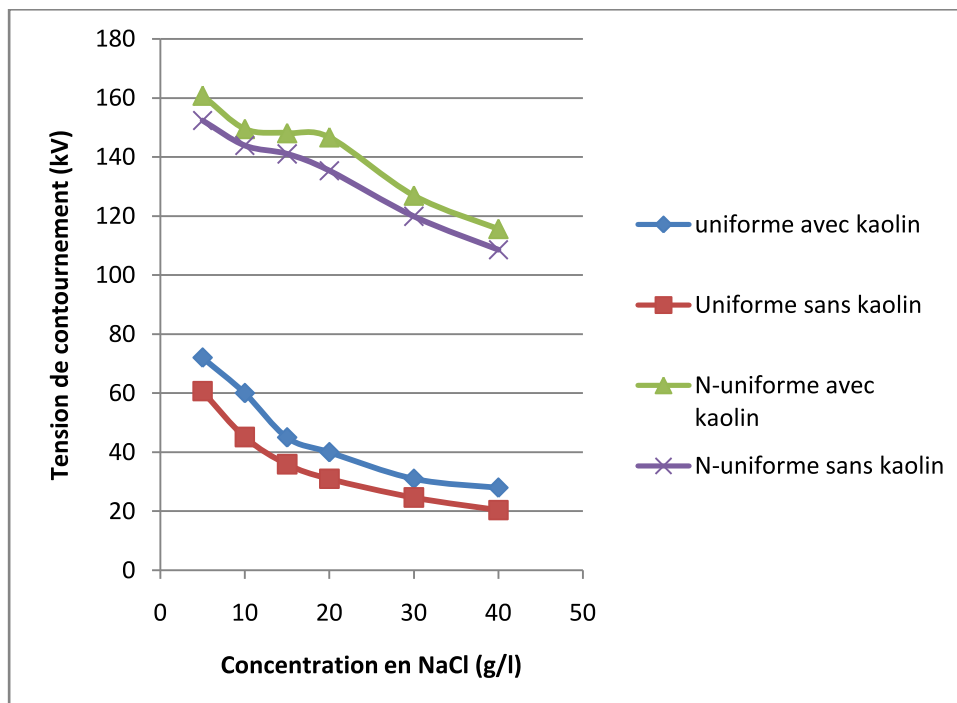


Figure VI.1 : Evolution de la tension de contournement en fonction de la nature et la configuration de pollution

D'après la figure (VI.1), nous remarquons que la tension de contournement varie d'une manière non linéaire et inversement proportionnelle avec l'augmentation de la concentration en NaCl pour les deux natures de pollution étudiées. Nous notons également que ces constatations sont vérifiées pour les deux cas de configurations de la pollution.

Les caractéristiques représentées sur la figure VI.1 montrent que pour les deux cas de pollution de la surface de l'isolateur réel, la pollution la plus sévère est celle simulant la pollution marine par rapport à celle simulant la pollution mixte. En effet, les tensions de contournement obtenues, pour les mêmes concentrations en chlorure de sodium, sont plus basses pour les solutions contenant du sel uniquement. La présence de 100 g/l de kaolin dans les solutions polluantes a pour effet d'augmenter la rigidité diélectrique de la chaîne d'isolateur. Effectivement, pour les mêmes concentrations en NaCl, l'ajout de 100 g/l de Kaolin a pour effet l'augmentation des conductivités des solutions polluantes.

Nous remarquons également d'après les caractéristiques représentées à la figure VI.1 que quelque soit la nature de l'agent polluant, les tensions de contournement sont plus faibles dans le cas où la pollution est uniformément répartie par rapport au cas où celle-ci est appliquée d'une manière non-uniforme. Ce phénomène peut être attribué au comportement des décharges électriques depuis l'application de la tension jusqu'au contournement de la chaîne d'isolateur.

Malgré la difficulté de surveiller de près l'évolution des décharges électriques durant le processus de contournement à cause de la forme géométrique des isolateurs réels, le présent travail nous a aussi permis de tirer les constatations suivantes :

Pour le cas de la pollution uniforme, le phénomène de contournement passe par plusieurs étapes. Nous remarquons d'abord l'apparition de décharges électriques entre le verre et les parties métalliques (Figure VI.2.A). Ce phénomène est accompagné par un bruit qui croît de manière conséquente avec l'augmentation de la tension appliquée jusqu'au contournement de la chaîne d'isolateurs. Ce bruit pourrait être attribué à l'effet couronne qui est une phase initiale du contournement. Ces décharges ont tendance à s'allonger le long de la surface de chaque élément (Figure VI.2.B) causant ainsi une évaporation progressive de la couche de pollution due à la chaleur dégagée par effet Joule. Cette évaporation donne naissance à des zones sèches. Le court-circuit de ces dernières engendre l'apparition d'arcs électriques (VI.2.C). Lorsqu'une connexion entre plusieurs arcs aura lieu, nous observons le contournement total de la chaîne d'isolateurs (Figure VI.2.D).

Pour le cas où la pollution est répartie d'une manière non-uniforme, nous remarquons l'occurrence des décharges électriques dans la zone polluée. Ces décharges se développent généralement du côté terre vers le côté haute tension (Figures VI.3.A, VI.3.B et VI.3.C) accompagnées du même phénomène d'évaporation que pour le cas de la pollution uniforme. L'allongement et la connexion de ces décharges forme l'arc de contournement et provoque le saut final (Figures VI.3, VI.3.D et VI.3.E). Ceci est valable pour les deux natures de pollution étudiées et pour les différentes concentrations en sel utilisées.

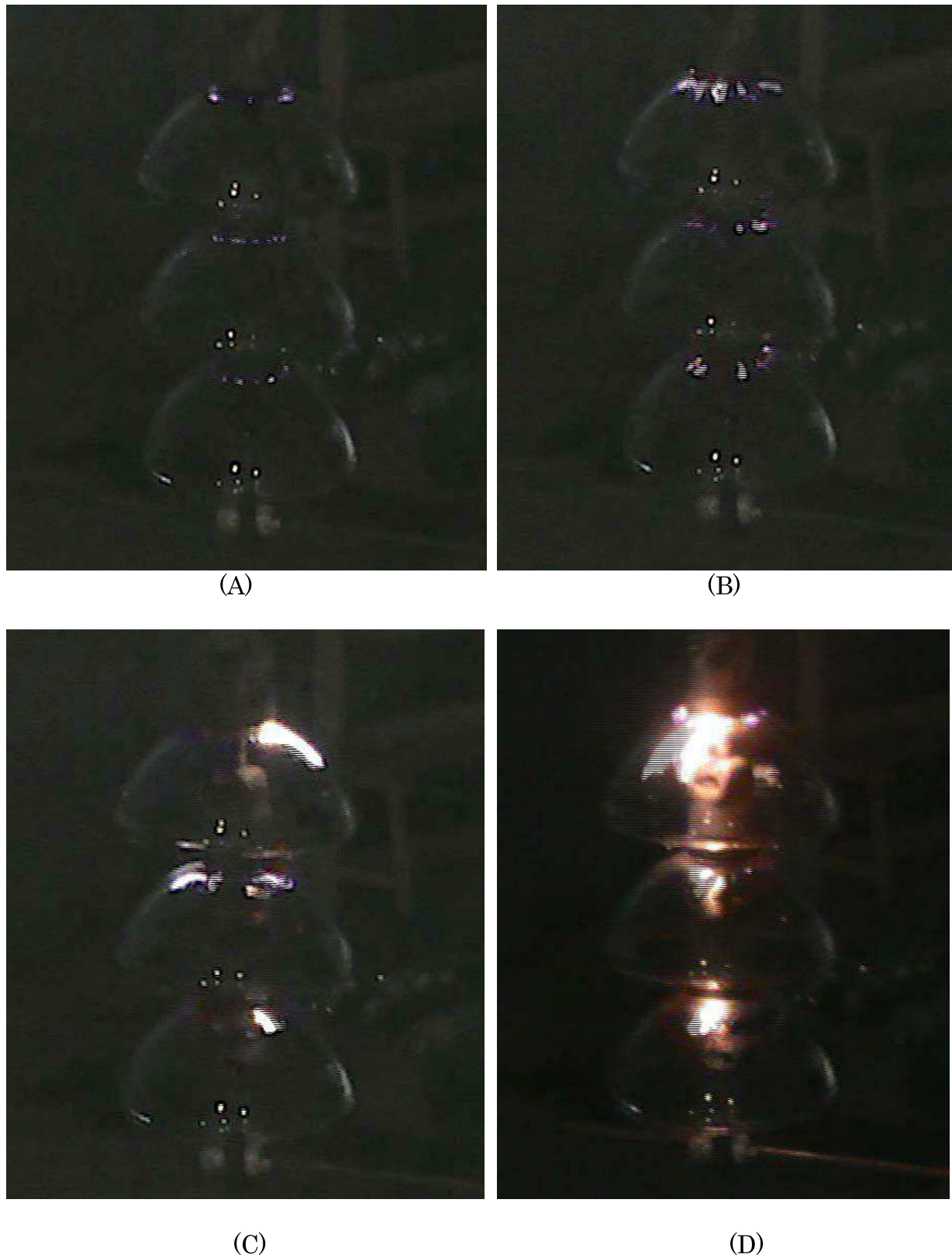


Figure VI.2 : Evolution des étapes correspondantes au contournement de la chaîne d'isolateurs réels pour le cas d'une pollution uniforme.

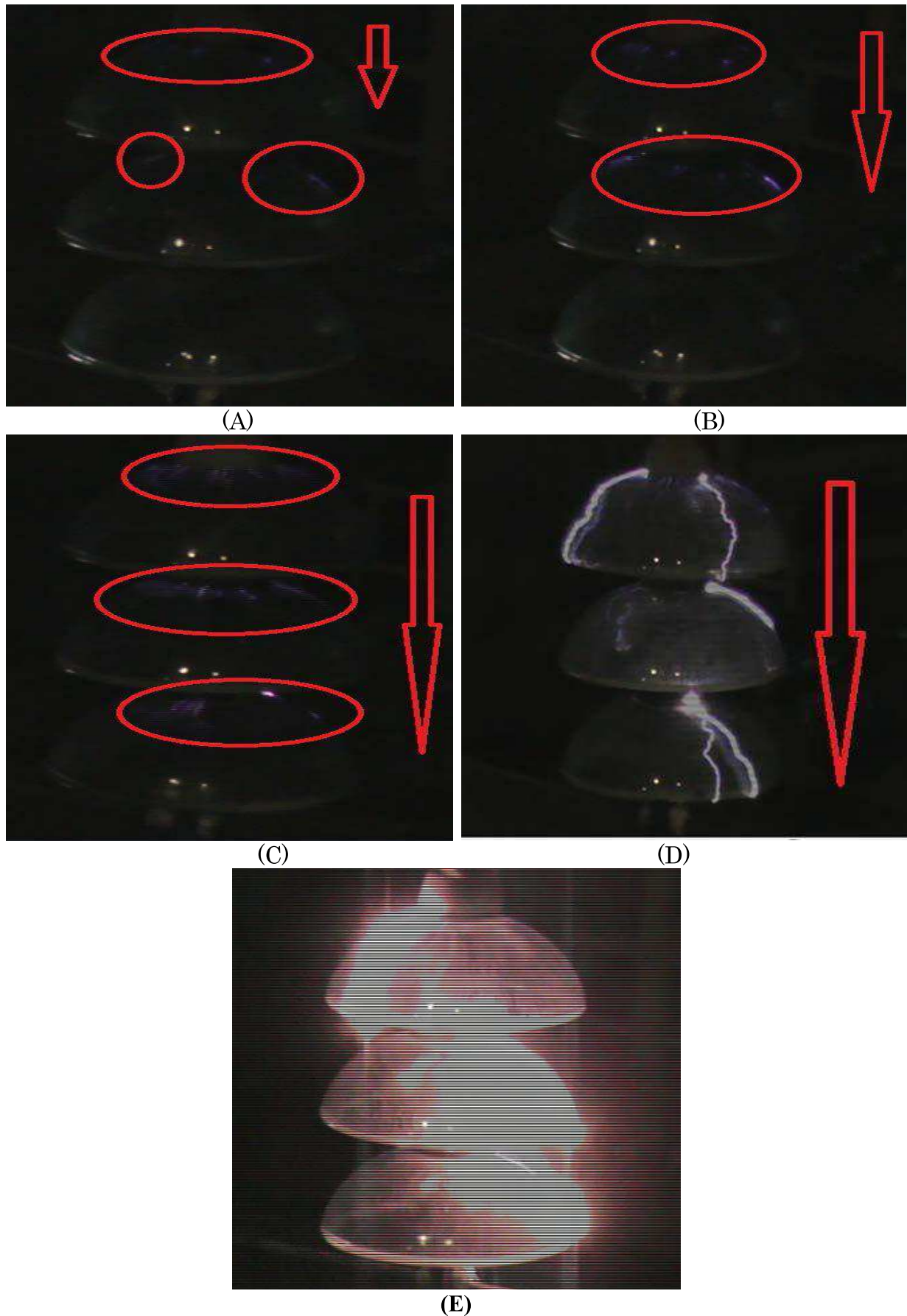


Figure VI.3 : Evolution des étapes correspondantes au contournement de la chaîne d'isolateurs réels pour le cas d'une pollution non-uniforme.

VI.3 Etude du courant de fuite

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'évolution du courant de fuite en fonction des différents paramètres suivants : concentration en NaCl, niveau de la tension appliquée, nature de l'agent polluant et configuration de la pollution.

VI.3.1 Résultats obtenus sous pollution uniforme

Dans le cas où la pollution est uniformément répartie sur la surface de la chaîne d'isolateurs, les résultats d'essais sont représentés sur les figures (VI.4) et (VI.5).

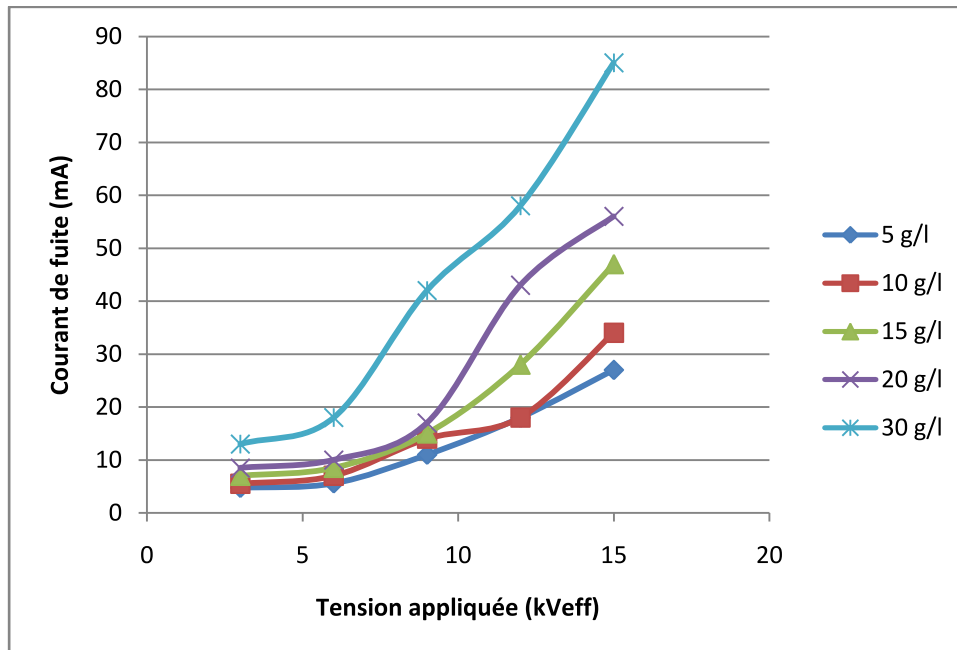


Figure VI.4 : Variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl.

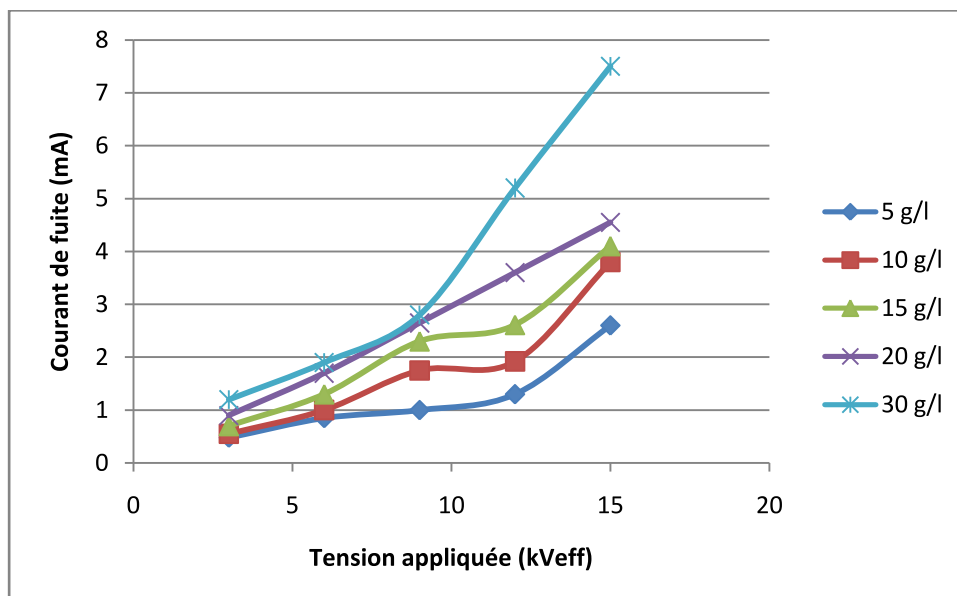


Figure VI.5 : Variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration de 100 g/l de Kaolin.

Les figures (VI.4 et VI.5) montrent que l'amplitude du courant de fuite est d'autant plus importante que le niveau de tension appliqué est élevé. Ces constatations sont valables pour toutes les conductivités étudiées. Nous constatons également, pour les deux natures de pollution, que l'augmentation de l'amplitude du courant de fuite est accentuée pour la concentration en sel de 30 g/l. Par ailleurs, malgré la présence de décharges électriques non localisées observées à partir de 9 kV_{eff} pour les concentrations en sel de 20 et 30 g/l, l'amplitude du courant de fuite continu d'augmenter. Ceci pourrait s'expliquer par l'intensité de ces décharges qui sont incapables de provoquer un assèchement important de la couche polluante.

VI.3.2 Résultats obtenus sous pollution non-uniforme

Les résultats d'essais correspondants à la pollution non-uniforme sont représentés sur les figures (VI.6 et VI.7). Nous remarquons que le courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée. Cette augmentation est pratiquement linéaire pour les deux natures de la pollution. Notons également que ceci est vérifié pour les différentes concentrations en NaCl utilisées. Par ailleurs, nous remarquons que l'amplitude du courant de fuite varie toujours dans l'ordre de micro ampère (μA), même pour les concentrations en sel les plus importantes à savoir 20 et 30 g/l. Ceci pourrait être expliqué par la surface importante de la couche propre qui engendre une augmentation de l'impédance équivalente de la chaîne d'isolateurs.

Une analyse attentive de ces caractéristiques montre aussi, pour un même palier de la tension appliquée, une augmentation restreinte de l'amplitude du courant de fuite pour les différentes concentrations en NaCl étudiées. Cette augmentation reste toujours restreinte quelque soit la nature de la pollution.

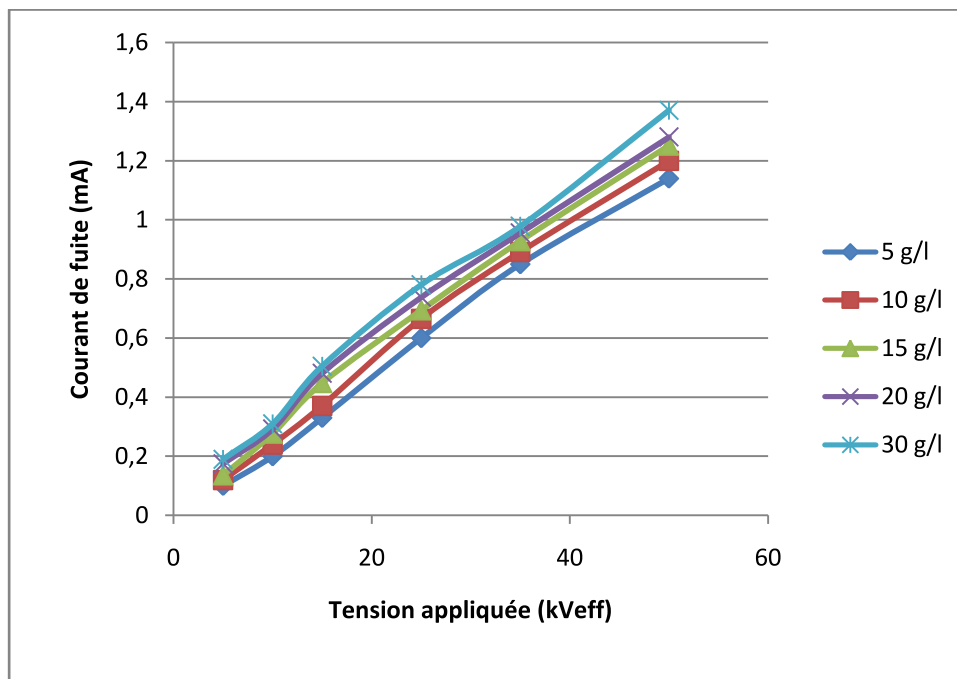


Figure VI.6 : Variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl.

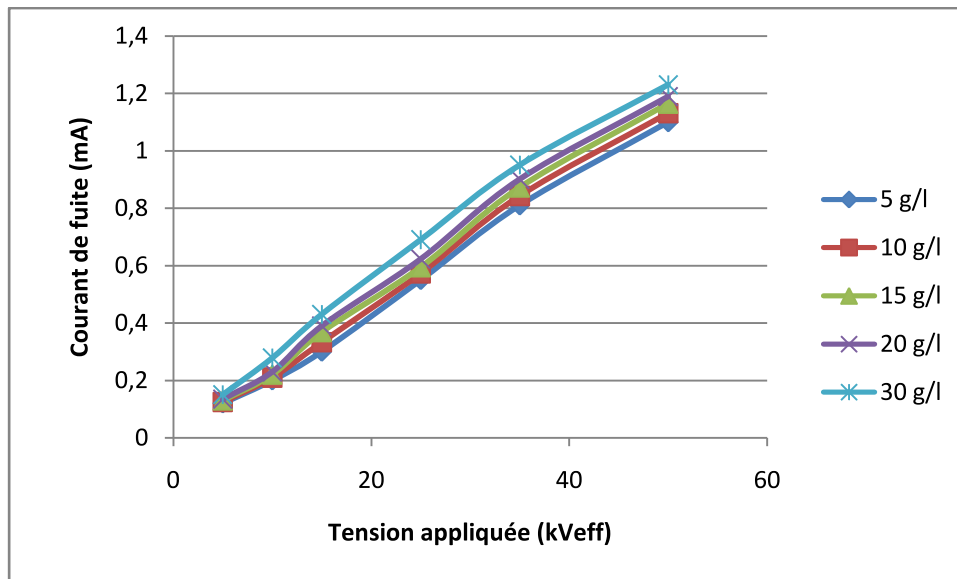


Figure VI.7 : Variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration de 100 g/l de Kaolin.

VI.4 Etude de la charge électrique

La charge électrique est un paramètre important pour connaître l'énergie dissipée au niveau de la surface de la chaîne d'isolateurs. Dans le but d'étudier la variation de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour les deux natures de pollutions et les différentes concentrations en chlorure de sodium, nous mesurons l'amplitude de celle-ci, dans les deux cas de configurations de pollution, uniforme et non-uniforme.

VI.4.1 Résultats obtenus sous pollution uniforme

Les résultats d'investigations sous pollution uniforme sont montrés sur les figures (VI.8 VI.9).

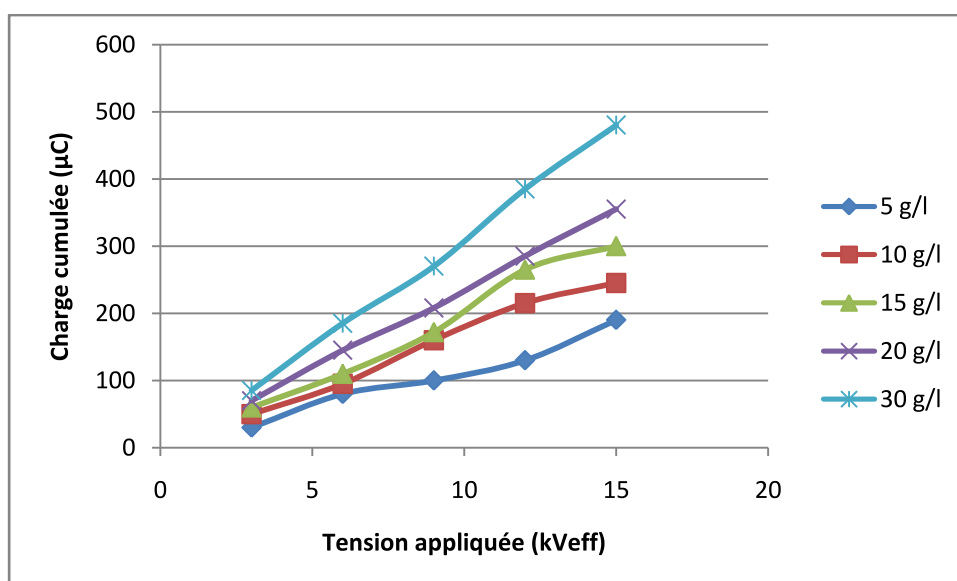


Figure VI.8 : Variation de l'amplitude de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl.

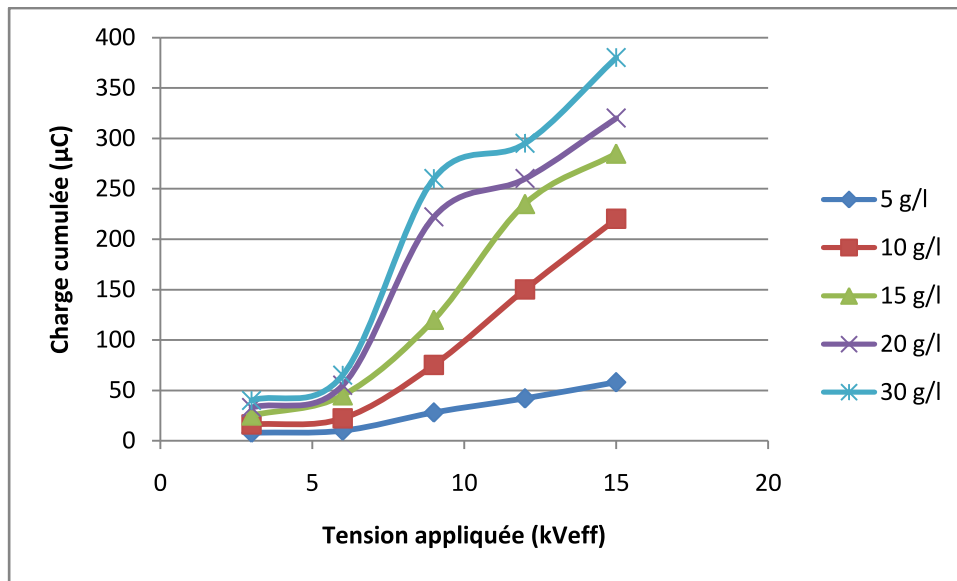


Figure VI.9 : Variation de l'amplitude de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration de 100 g/l de Kaolin.

Nous remarquons à partir des figures (VI.8 et VI.9) que l'amplitude de la charge électrique augmente d'une manière non linéaire avec l'augmentation de la tension appliquée quelque soit la concentration en NaCl utilisée. Comme il a été observé pour le courant, l'amplitude maximale de la charge augmente progressivement car il n'y a pas eu d'assèchement important de la couche de pollution.

VI.4.1 Résultats obtenus sous pollution non-uniforme :

Les variations de la charge sous pollution non-uniforme sont représentées sur les figures (VI.10 et VI.11).

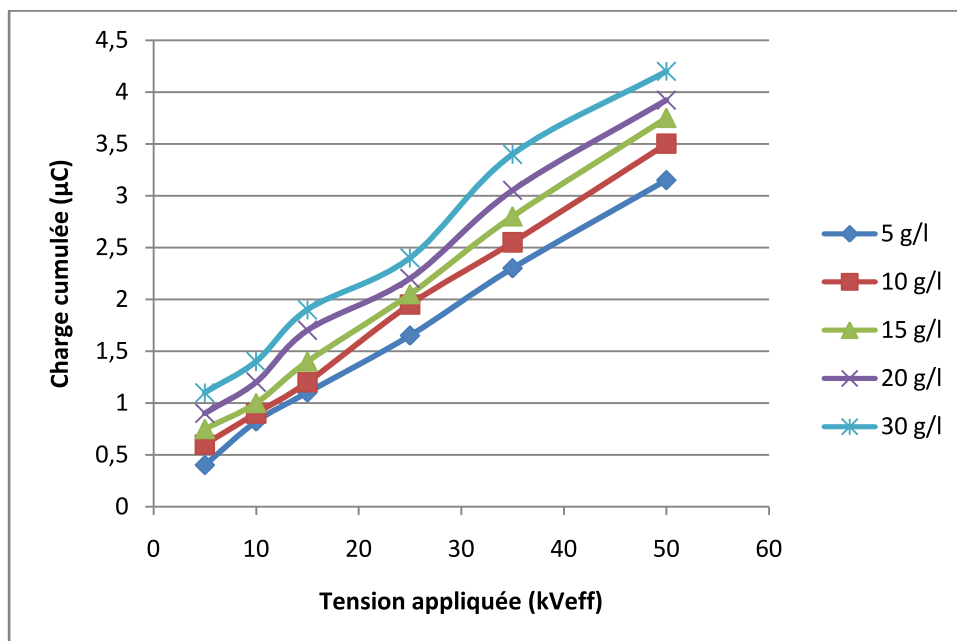


Figure VI.10 : Variation de l'amplitude de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl.

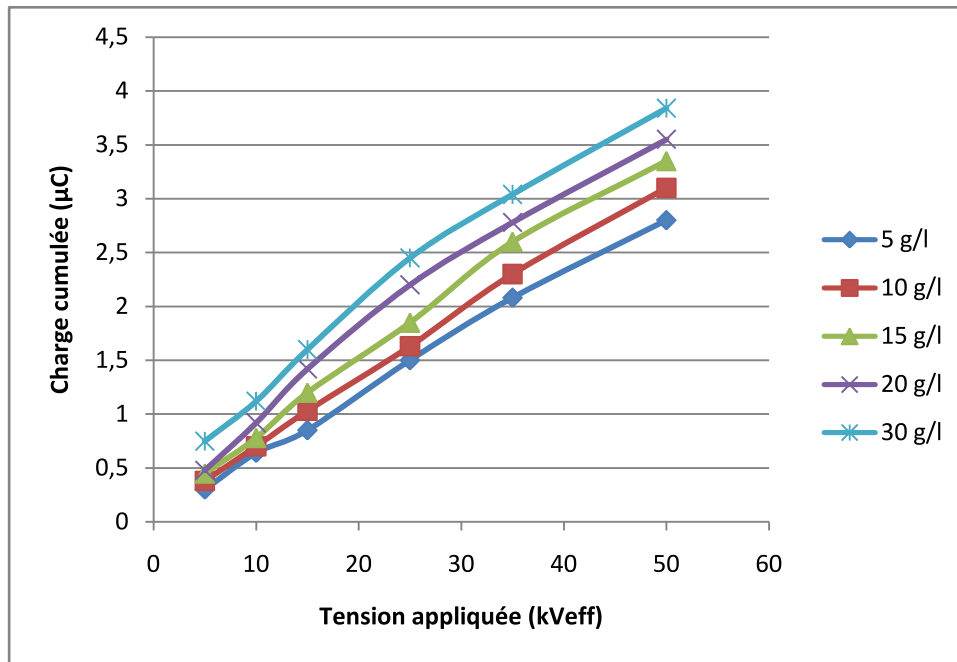


Figure VI.11 : Variation de l'amplitude de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration de 100 g/l de Kaolin.

D'après les figures VI.10 et VI.11, nous constatons que la charge électrique augmente d'une façon pratiquement linéaire en fonction de la tension appliquée pour les différentes concentrations en NaCl. Par ailleurs, une augmentation légère de la charge électrique en fonction de la concentration en NaCl est observée pour un seul palier de tension.

VI.5 Etude de l'impédance équivalente vue entre les électrodes

Pour déterminer les valeurs de l'impédance équivalente, nous exploitons les amplitudes du courant de fuite précédemment mesurées. L'équation permettant de calculer cette impédance est donnée ci-dessous :

$$Z_{eq} = \frac{U_{eff} \sqrt{2}}{I_{fmax}} \quad (VI.1)$$

Où Z_{eq} représente l'impédance équivalente vue des électrodes, I_{fmax} représente l'amplitude maximale du courant de fuite. U_{eff} est la valeur efficace de la tension appliquée lors de la mesure de I_{fmax} .

VI.5.1 Résultats obtenus sous pollution uniforme

Les résultats obtenus concernant l'évolution de l'impédance équivalente vue entre les électrodes sont représentés sur les figures VI.12 et VI.13.

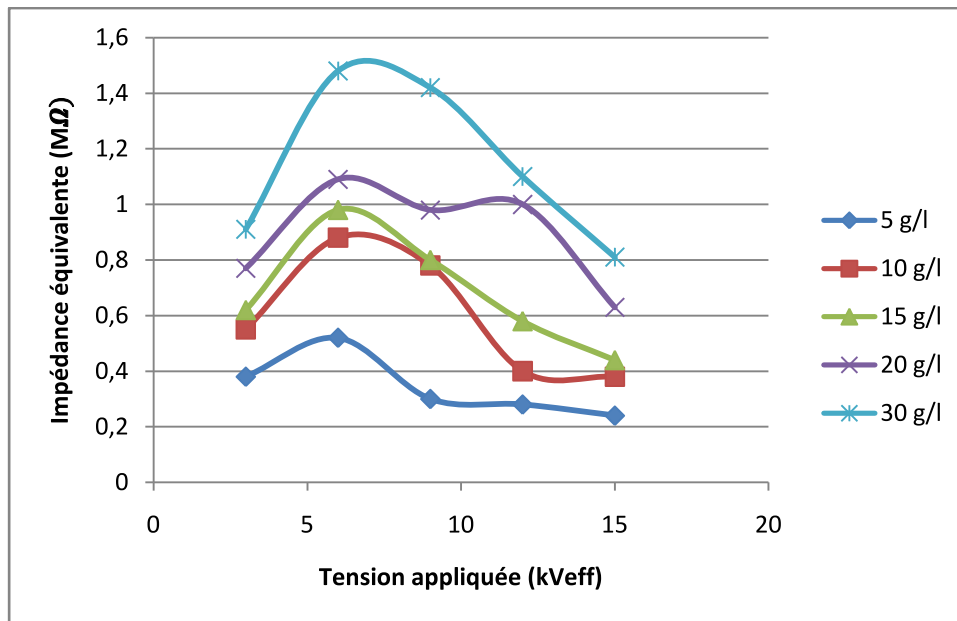


Figure VI.12 : Variation de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl

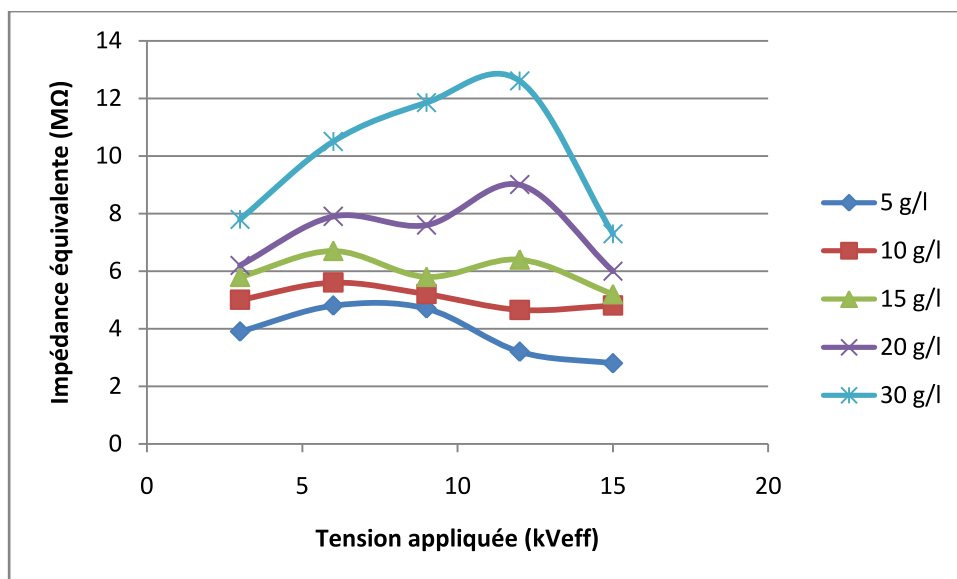


Figure VI.13 : Variation de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration de 100 g/l de Kaolin.

De façon générale, les résultats représentés sur la figure (VI.12) montrent que l'évolution de l'impédance équivalente vue des électrodes en fonction de la tension appliquée est similaire pour toutes les concentrations en sel étudiées. En effet, cette impédance commence à augmenter pour les faibles paliers de tensions (3 et 6 kV_{eff}), cependant, pour les paliers de tension variant entre 9 et 15 kV_{eff} , l'impédance équivalente a tendance à diminuer. Ces constatations relatives aux niveaux de tensions (9, 12 et 15 kV_{eff}) peuvent se justifier par l'occurrence des décharges électriques à la surface de l'isolateur. Pour la pollution contenant 100 g de kaolin, les résultats obtenus présentent les mêmes variations que le cas précédent.

VI.5.2 Résultats obtenus sous pollution non-uniforme

De la même manière que pour le cas de la pollution uniforme, nous calculons l'impédance équivalente vue entre les électrodes pour les deux natures de pollutions étudiées. Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures VI.14 et VI.15.

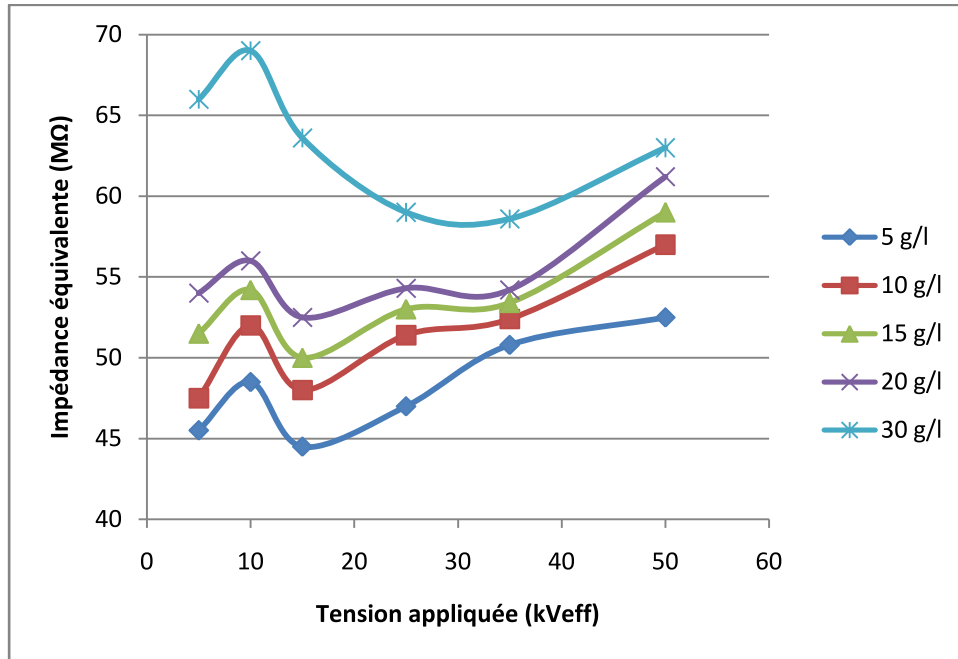


Figure VI.14 : Variation de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl.

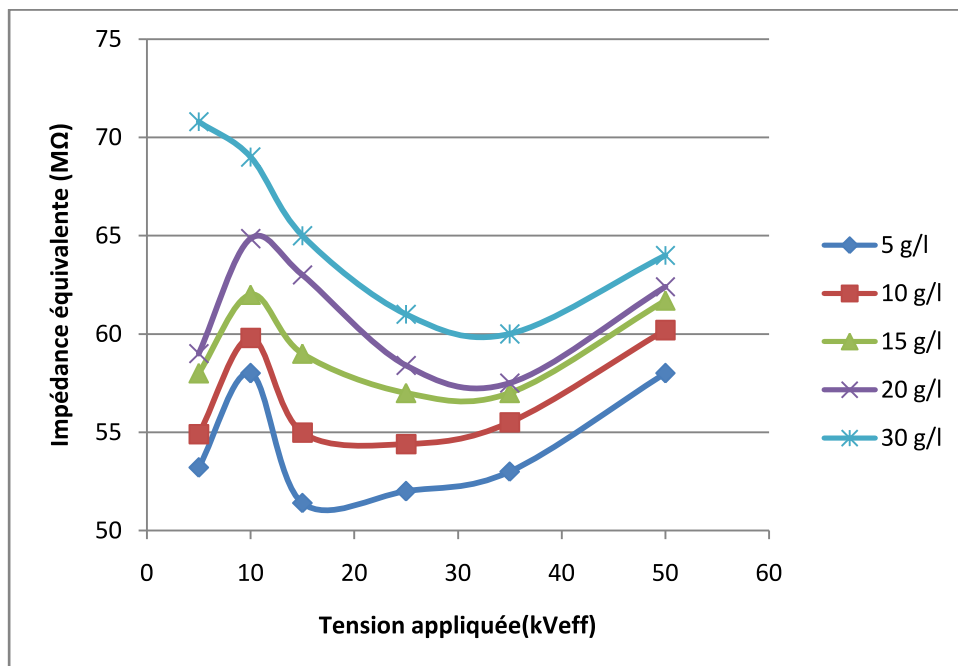


Figure VI.15 : Variation de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration de 100 g/l de Kaolin.

Nous remarquons d'après les figures VI.14 et VI.15 que l'impédance vue des électrodes varie d'une manière non linéaire en fonction de la tension appliquée. Ces caractéristiques montrent également d'une façon générale que l'impédance augmente lors de l'application de faibles niveaux de tensions (0 à $10kV_{eff}$). Ceci est dû à la variation peu significative du courant de fuite par rapport à celle de la tension appliquée. A partir de $10kV_{eff}$, l'impédance diminue avec l'augmentation de la tension appliquée. L'impédance augmente de nouveau sous l'influence des décharges qui engendrent l'apparition de zones sèche sur la surface polluée de l'isolateur.

VI.6 Etude de l'énergie dissipée

L'énergie dissipée sur la chaîne d'isolateurs est calculée en utilisant la formule suivante :

$$W = \frac{Q U_{eff} \sqrt{2}}{2} \quad \text{VI.2}$$

Où W représente l'énergie dissipée, Q représente la charge cumulée et U_{eff} est la valeur efficace de la tension appliquée lors de la mesure de Q.

VI.6.1 Résultats obtenus sous pollution uniforme

Les caractéristiques présentées aux figures (VI.16 à VI.17) montrent l'évolution de l'énergie en fonction de la tension appliquée, pour les différentes concentrations en NaCl étudiées. Nous remarquons que l'augmentation de la tension appliquée engendre la croissance de l'énergie. Ceci est dû à l'augmentation de la quantité de charge générée sur la surface polluée de la chaîne d'isolateurs.

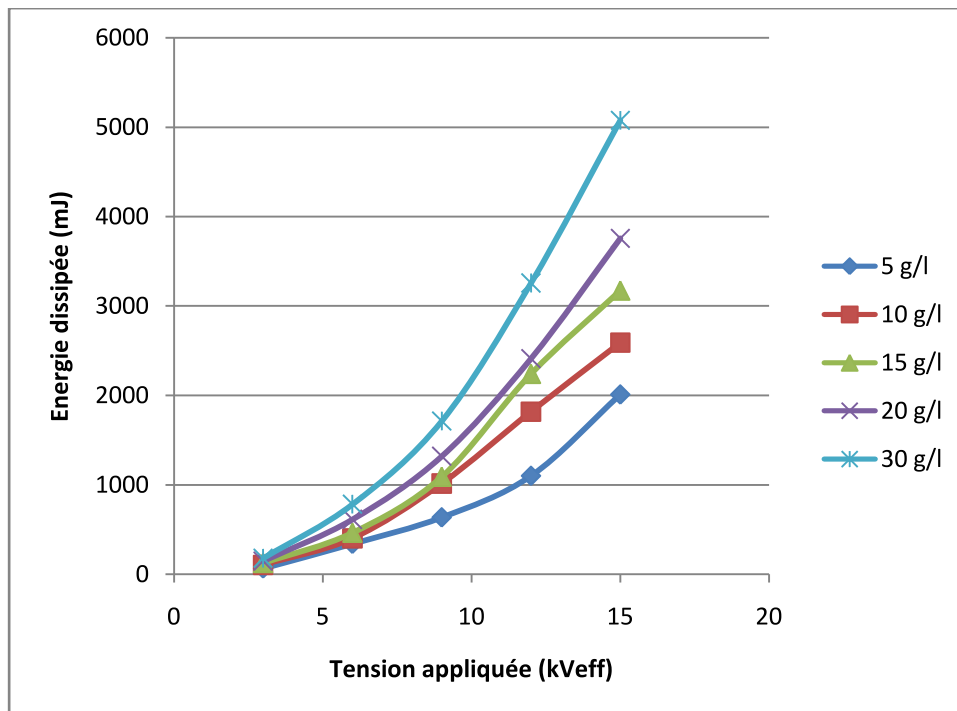


Figure VI.16 : Variation de l'énergie dissipée en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl.

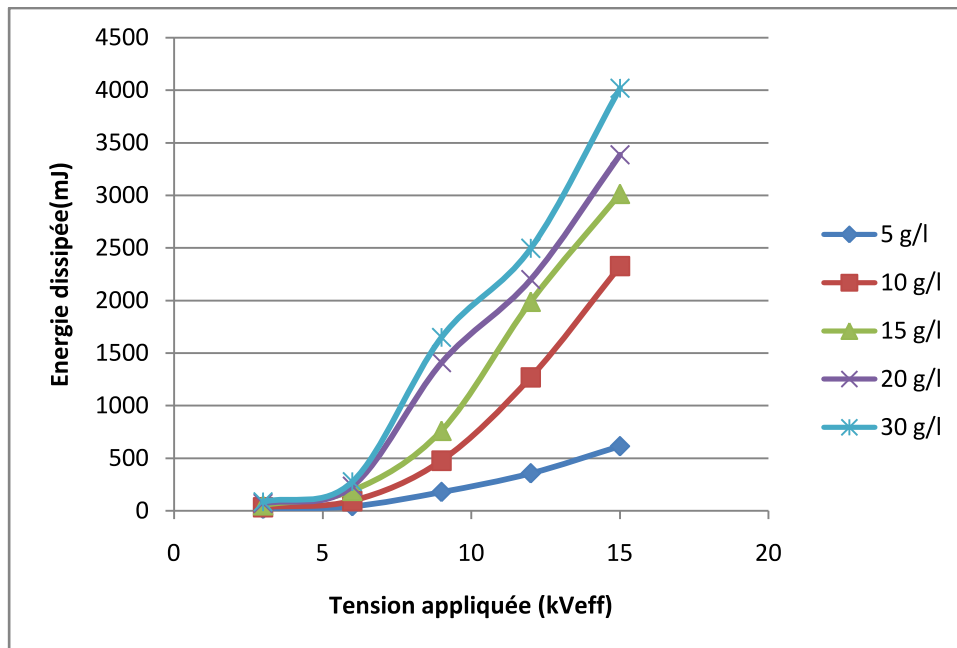


Figure VI.17 : Variation de l'énergie dissipée en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration de 100 g/l de Kaolin

VI.6.2 Résultats obtenus sous pollution non-uniforme

De même que dans le cas de la pollution uniforme, les caractéristiques des figures VI.18 et VI.19 montrent que les énergies mises en jeu sont d'autant plus importantes que le niveau de la tension appliqué est élevé.

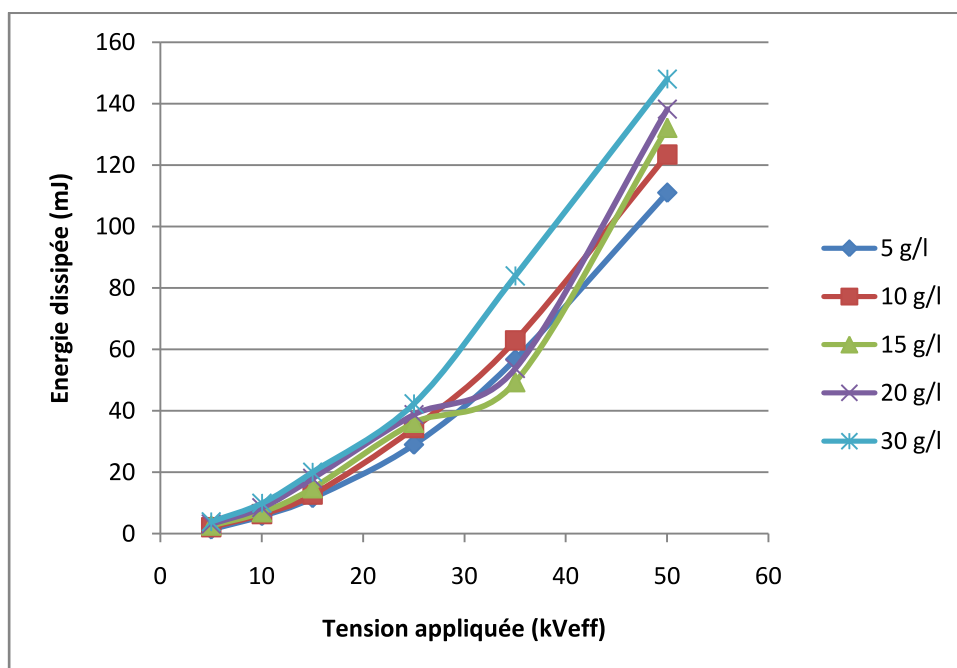


Figure VI.18 : Variation de l'énergie dissipée en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl

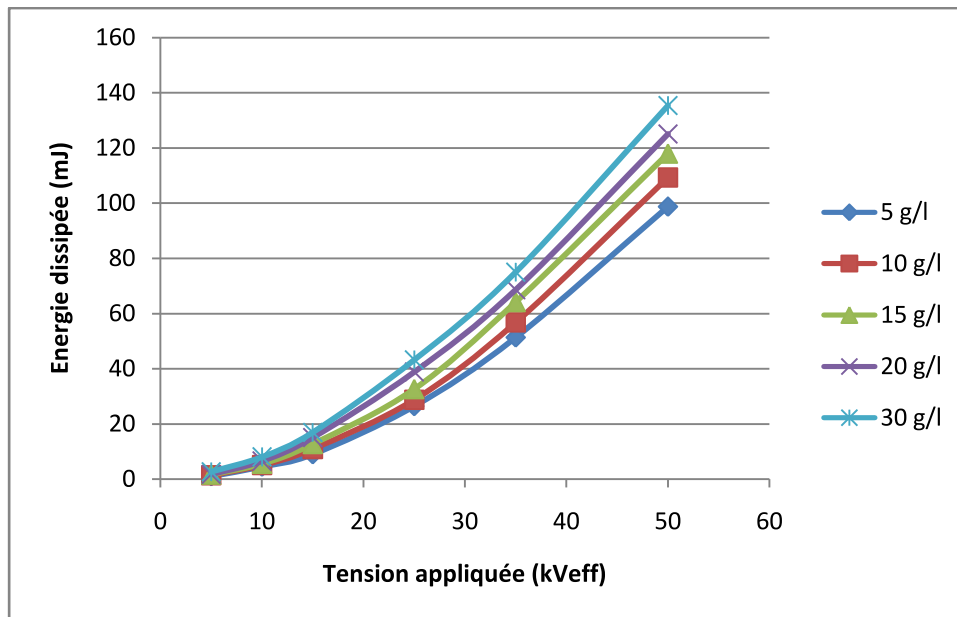


Figure VI.19 : Variation de l'énergie dissipée en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration de 100 g/l de Kaolin.

VI.7 Conclusion

Les investigations expérimentales effectuées nous permettent de conclure que la nature de l'agent polluant a une grande influence sur le comportement diélectrique des isolateurs de haute tension. En effet et comparé à la pollution marine, nous avons constaté que pour une même concentration en NaCl, une même configuration de la pollution et un même niveau de tension appliquée, la présence d'une concentration de 100 g/l de Kaolin a pour effet l'augmentation de la rigidité diélectrique de la chaîne d'isolateurs. En outre, la diminution des amplitudes du courant de fuite, de la charge électrique et de l'énergie dissipée ainsi que l'augmentation de l'impédance équivalente sont observées.

Pour les deux natures de pollution étudiées, la diminution de la largeur de la couche polluée (pollution non-uniforme) entraîne :

- augmentation de la rigidité diélectrique de l'isolateur ;
- augmentation de l'impédance équivalente de l'isolateur ;
- diminution de l'amplitude du courant de fuite ;
- diminution de l'amplitude de la charge électrique ;
- diminution de l'énergie dissipée.

Finalement, ce chapitre nous a permis de conclure que :

- la nature, la concentration de l'agent polluant ainsi que la configuration de la pollution ont un impact majeur sur la tension de contournement.
- les amplitudes du courant de fuite, de la charge cumulée, de l'impédance équivalente et de l'énergie dissipée varient avec la nature, la concentration de l'agent polluant et la configuration de la pollution.

Notre étude met en évidence que la pollution marine est plus sévère que la pollution mixte à base de kaolin. Nous déduisons également que la distribution uniforme de la pollution est plus néfaste par rapport à celle répartie d'une manière non uniforme.

Conclusion générale



Conclusion générale

Le présent travail nous a permis de voir l'impact de la configuration et de la sévérité de pollution sur le comportement d'un isolateur haute tension. Pour cela, nous avons procédé en premier lieu à la mesure du courant de fuite et de la charge cumulée sur un modèle plan. Ces mesures servent simultanément à évaluer les amplitudes de ces deux paramètres ainsi qu'à l'enregistrement de leurs formes d'ondes. Les résultats d'essais obtenus ont montré que la largeur d'une bande propre insérée sur le modèle pollué influe fortement sur les différentes étapes conduisant au contournement. Toutefois, la position de cette bande n'a aucun effet si celle-ci est placée du côté de l'électrode haute tension ou bien du côté de l'électrode terre. Il a été démontré expérimentalement que le modèle plan a la même rigidité diélectrique pour les deux configurations de la bande propre. Ces essais ont montré également que la largeur de cette bande a un effet majeur sur les amplitudes du courant de fuite et de la charge cumulée. Notons aussi que ces derniers sont beaucoup plus faibles que la largeur de la bande propre est élevée. Par ailleurs, nous exploitons ces résultats expérimentaux afin de prédire l'activité des arcs partiels en se basant sur la transformée en ondelette des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée. Nos résultats d'investigations ont montré que :

- l'évolution de la déviation standard (STD-MRA) en fonction du niveau de décomposition permet de déduire la présence ou bien l'absence des arcs partiels sur le modèle de l'isolateur. Nous avons constaté que l'augmentation simultanée des STD correspondant aux deux détails D8 et D10 indique l'activité intense des arcs partiels. Si cette augmentation est observée seulement au niveau de la STD du détail D10, ceci indique que l'état de surface du modèle de l'isolateur est caractérisé par l'absence totale d'arcs partiels.
- d'après l'analyse faite par la CWT sur l'onde de la tension appliquée, le diagnostic de sévérité de pollution peut se faire par l'intermédiaire du scalogramme. Ce dernier qui est une projection des coefficients d'ondelettes calculés pour des échelles données sur un plan orthogonal peut nous fournir des informations capitales sur l'onde du signal et ainsi sur le degré de sévérité de pollution.
- le diagnostic réalisé via la décomposition en paquets d'ondelettes a donné des résultats très satisfaisants. Cette décomposition a montré dans notre cas que l'évolution fréquentielle du nœud (3.2) permet un excellent diagnostic de l'état de surface polluée.

L'insertion de trois bandes propres sur le modèle plan nous permet de simuler et d'étudier le comportement diélectrique d'une chaîne d'isolateurs polluée naturellement sur site. La décomposition des signaux du courant de fuite, enregistrés pour trois classes de pollutions distinctes, par les deux techniques de traitement de signal nous fournis un nombre important de paramètres caractérisant ces différentes classes. Par ailleurs, ces paramètres ont été utilisés pour l'entraînement de deux méthodes de classifications à savoir les supports vecteurs machines et naïve bayésienne. 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). En dernier, nous pouvons conclure que le modèle SVM est plus performant que celui de Naïf Bayésien quelque soit le type de critères d'entraînements utilisés. En outre, l'application de la technique RP sur la composante haute fréquence D1 du signal du

courant de fuite semble être un excellent outil pour prédire l'évolution des décharges électriques durant le processus de contournement.

Les investigations expérimentales effectuées sur des chaînes d'isolateurs réels nous permettent de conclure que la nature de l'agent polluant a une grande influence sur le comportement diélectrique de la surface polluée. Notre étude a mis en évidence que la pollution marine est plus sévère que la pollution mixte à base de kaolin. Par ailleurs, nous déduisons également que la distribution uniforme de la pollution est plus néfaste par rapport à celle répartie d'une manière non uniforme.

Les perspectives dégagées de ces études sont diverses. Plusieurs de nos résultats pourraient éventuellement être développés dans des travaux futurs. Nous souhaitons que d'autres configurations de pollution soient étudiées sur des chaînes d'isolateurs réels pollués naturellement sur site.

Nous pensons également qu'il serait intéressant de modéliser le comportement de l'arc électrique en fonction de la configuration et du degré de sévérité de pollution.

Bibliographie

-
- [1] S.Venkataraman, R.S.Gorur, "Extending the applicability of insulator flashover models by regression analysis", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol.14, No.2, pp. 368-374, April 2007.
- [2] S.Venkataraman, 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, August 2006.
- [3] X.Yan Shi, C.Sun and Z. Zhang «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; pp1-9, April 2010.
- [4] A. Felix et G.K. George, «Linear Stochastic Analysis of polluted Insulators Leakage Current», IEEE Trans. Power Delivery, Vol.17, pp.1063-69, 2002.
- [5] S.M. Gubanski, A. J. Andersson et H. Hillborg, «Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol. 14, pp.1065-1080, 2007.
- [6] T. Suda. «Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of Artificially Polluted Suspension insulators», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, pp.705-709, 2005.
- [7] K.Tarakanath, D. K. Mohanta, Velaga Sreerama Murthy, «Insulator Condition Analysis for Overhead Distribution Lines Using Combined Wavelet Support Vector Machine (SVM)», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 17, No. 1; February 2010.
- [8] Suwarno, «Study on the waveform of Leakage Current on the 20 kV post-pin ceramic insulators Conditions», Intern. Sympos. Electr. Insulating Materials, pp. 387 – 390, 2001.
- [9] 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; pp1-9; April 2010.
- [10] R. Sarathi, S. Chandrasekar et N. Yoshimura, «Investigations into the Surface Condition of the Silicone Rubber Insulation Material using Multiresolution Signal Decomposition», IEEE Trans. Power Delivey, Vol. 21, pp.243-252, 2006.
- [11] A.Cavallini et 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; pp1-10; April 2009.
- [12] V.S.Murthy, «Insulator Condition Analysis for Overhead Distribution Lines Using Combined Wavelet Support Vector Machine (SVM) », IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, No. 1; pp 1-12, February 2010.
- [13] M.Uyar , M.T.Gencoglu : «Prediction of flashover voltage of insulators using least squares support vector machines», Expert Systems with Applications 36 (2009) pages 10789–10798.
- [14] 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.
- [15] 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, April 2010.
- [16] S.Chandrasekar, C.Kalaivananet 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. 1-12, February 2010.
- [17] R.S. Gorur and H.M. Schneider, « Surface resistance measurements on non-ceramic insulators »,IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, pp.801805, 2001.
- [18] T. Suda, « Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of a String of Suspension Insulator », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, pp. 481-487, 2005.

- [19] Aulia, F.David, E.P.Waldy, H.Hazmi «The Leakage Current Analysis on 20kV Suspension Porcelain Insulator Contaminated by Salt Moisture and Cement Dust in Padang Area », 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, 2006.
- [20] V.S. Murthy, «Insulator Condition Analysis for Overhead Distribution Lines Using Combined Wavelet Support Vector Machine (SVM) », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol. 17, No. 1;, pp 1-12; February 2010.
- [21] R.Sarathi, S.Chandrasekar, "Diagnostic study of the surface condition of the insulation structure using wavelet transform and neural networks", Elect. Power Syst. Res. 68 (4) (2003), pp. 137-147.
- [22] IEC 60507, Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on AC systems, 1991.
- [23] T. K. Abdel-Galil, A.H.El-Hag, M.M.A. Salama,R. Bartnikas, « Enhanced partial discharge denoising technique using eigen decomposition », IEEE Intern. Sympos. Electr. Insulation, pp. 294-297, 2006.
- [24] X.Song, C.Zhou, D.M.Hepburn, G.Zhang, « Second Generation Wavelet Transform for Data Denoising in PD Measurement », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 6; December 2007.
- [25]X. Zhou, C. Zhou, and I. J. Kemp, « An Improved Methodology for Application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol.12, pp. 586-594, 2005.
- [26] H.Zhang, T.Blackburn, B.Phung, D.Sen, « A Novel Wavelet Transform Technique for on-line Partial Discharge Measurements part 1: Wavelet Denoising Algorithm », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol. 14, pp 3-14, 2007.
- [27] W. Sweldens, « The lifting Scheme: A Custom-Design Construction of Biorthogonal Wavelets », Appl. Comput. Harmon. Anal, Vol. 3, pp. 186–200, 1996.
- [28] Xingliang Jiang, Yunfeng Xia, Qin Hu, Zhenyu Li and Shihua Zhao, « Evaluation of Insulator's Pollution Condition Based on Leakage Current », Chongqing University, Chongqing 400044, China, 14 September 2011.
- [29] Gubanski, S.M, Dernfalk, A., Andersson, J., Hillborg, H., « Diagnostic methods for outdoor polymeric insulators », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 14, (5), 2007, pp.1065-1080.
- [30] Y.Zhu, K.Haji, H.Yamamoto, T.Miyake, M.Otsubo,C.Honda, « Distribution of Leakage Current on Polluted Polymer Insulator Surface », Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,2006.
- [31] M. Otsubo, T. Hashiguchi, C. Honda, O.Takenouchi,T.Sakoda, Y. Hashimoto, «Evaluation of insulation performance of polymeric surface using a novel separation technique of leakage current », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol. 10, pp. 1053-1060, 2003.
- [32] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda and S. Tanaka, « Corona Discharge from Water Droplet on Electrically Stressed Polymer Surface »,Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45, pp. 234-238, 2006.
- [33] IEC Publication 507, pp. 1-37, 1975.
- [34] W.T.Starr, « Polymeric outdoor insulation », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., vol. 25, pp. 125-136, 1990.
- [35] S.W.Jee, C.H.Lee and K.S.Lee, "Signal analysis methods to distinguish tracking process using time-frequency analysis", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol. 16, No. 1, pp. 99-106, February 2009.
- [36] "Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials", International Standard IEC 60112, Fourth Edition 2003.
- [37] F. Hlawatsch, G.F. Boudreaux-Bartels, "Linear and quadratic time-frequency signal representation", IEEE Signal Processing Mag., Vol. 9, No. 2, pp. 21-67, April 1992.

- [38] E. Kreyszig, "Advanced engineering mathematics, sixth edition", John Wiley & Sons, pp.582-643, 1988.
- [39] Report of Power System Relaying Committee (PSRC) Working Group D15, « High Impedance Fault Detection Technology », 1996.
- [40] L.Prikler, M.Kizilcay, G.Ban, P.Handl, « Improved Secondary Arc Models Based on Identification of Arc Parameters from Staged Fault Test Records », 14th Power System Computation Conference (PSCC), Séville, 2002.
- [41] N.I.Elkalashy, M.Lehtonen, A.H.Darwish, A.M.Izzularab, A.M.I. Taalab, « Modeling and Experimental Verification of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 2; April 2007.
- [42] M. Solanki, Y. Song, S. Potts and A. Perks, « Transient Protection of Transmission Line Using Wavelet Transform », 7th Intern. Conf. Developments in Power System Protection, (IEE), pp. 299–302, 2001.
- [43] A.Cavallini, S.Chandrasekar, G.C.Montanari, F.Puletti, « 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.
- [44] D. 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 Electr. Insul.Mag, Vol. 8, No. 2, pp. 5-13-1992.
- [45] M. Otsubo, T. Hashiguchi, C. Honda, O. Takenouchi, T. Sakoda and Y. Hashimoto, "Evaluation of insulation performance of polymeric surface using a novel separation technique of leakage current", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol. 10, pp. 1053-1060, 2003.
- [46] X.Jiang, J.Yuan, Z.Zhang, J.Hu, L.Shu, « Study on Pollution Flashover Performance of Short Samples of Composite Insulators Intended for ± 800 kV UHV DC », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 5; October 2007.
- [47] J.M.Seifert, W.Petrusch, H.Janssen, « A Comparison of the Pollution Performance of Long Rod and Disc Type HVDC Insulators », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 1; February 2007.
- [48] « Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on d.c Systems», Technical Report IEC 61245, 1993.
- [49] 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 December 2007.
- [50] R. Benzid, "Ondelettes et Statistiques d'Ordre Supérieur Appliquées aux Signaux Uni et Bidimensionnels", Thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [51] M. Misiti, Y.Misiti, G. Oppenheim, J.M.Poggi, «Wavelets Toolbox Users Guide ». Wavelet Toolbox for use with MATLAB®, 2000.
- [52] A. D. Poularikas, "The handbook of formulas and tables for signal processing", Chap. 42, CRC Press LLC, 1999.
- [53] I. Daubechies, "Ten lectures on wavelets", SIAM publishing, 1992.
- [54] F. Cottet, «aide mémoire traitement de signal», pp 13-31, 149-167, Dunod, France,2005.
- [55] Rais El'hadi BEKKA, « fondements du traitement du signal », Office des Publications Universitaires, 3ème édition, 2005.
- [56] X. Zhou, C. Zhou, and I. J. Kemp, « An Improved Methodology for Application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol.12, pp. 586-594, 2005.
- [57] K.Dinesh, S.Ashwin, V.Harish, E.VarathKanth, C.Venkataseshaiah, R. Sarathi, «Understanding the surface condition of Insulation Material Using Wavelets », CBIP –

- International Conference in Maintenance Technologies of EHV Transmission Lines, New Delhi, India, April 2002.
- [58] E. Ghys, "L'attracteur de Lorenz, paradigme du chaos", CNRS - ENS Lyon, Séminaire Poincaré XIV, pp.1-52, 2010.
- [59] E.N. Lorenz, "Deterministic non periodic flow," J. Atmosph. Sci. 20 (1963), pp.130-141, 1968.
- [60] E.N. "Lorenz, The statistical prediction of solutions of dynamic equations", Proc. Internat. Sympos. Numerical Weather Prediction, Tokyo, pp. 629-635.
- [61] M. Viana, "What's new on Lorenz strange attractors?", Math. Intelligencer 22 (3) (2000), pp.6-19.
- [62] F. Takens, "Detecting strange attractors in turbulence", In Lecture notes in mathematics, Dynamical systems and turbulence, Vol. 898, Berlin, page 366, 1981.
- [63] N. Packard, J. Crutchfield, J. Farmer, and R. Shaw, "Geometry from a time series". Phys. Rev. Lett., pp. 45-712, 1980.
- [64] J.P. Huke, "Embedding non-linear dynamical systems : a guide to Takens theorem", Manchester Institute of Mathematical Sciences, 2006.
- [65] H. S. Kim, R. Eykholt, and J.D. Salas, "Nonlinear dynamics, delay times, and embedding windows". Physica D, 127 (1999), pp. 48–60.
- [66] H.G. Ma, X. H. Li and G.H. Wang, "Selection of embedding dimension and delay time in phase space reconstruction". J. Xi'an Jiao tong University, 38 (2004), pp. 335–338.
- [67] M. Small, C.K. Tse, "Optimal embedding parameters : a modeling paradigm". Physica D. Nonlinear phenomena, 194 (2004), pp. 283–296.
- [68] Y. Wang, W. Xu, "The methods and performance of phase space reconstruction for the time series in Lorenz system". J. Vibration Engrg, 19 (2006), pp. 277–282.
- [69] C.B. Xiu, X.D. Liu and Y.H. Zhang, "Selection of embedding dimension and delay time in the phase space reconstruction". Trans. Beijing Institute of Technology, 23 (2003), pp. 219–224.
- [70] Y. Zhang, C.L. Ren, "The methods to confirm the dimension of re-constructed phase space", J. National University of Defense Technology, 27 (2005), pp. 101–105.
- [71] C. Wei-Dong, Q. Yi-Qinget and Y. Bing-Ru, "Determination of phase-space reconstruction parameters of chaotic time series", Kybernetika, Vol. 44, issue 4, pp. 557-570, 2008.
- [72] H. Poincaré, "Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique", Acta Mathematica, 13 (1890), pp. 1–271.
- [73] J.P. Eckman, S. Oliffson Kamphorst and D. Ruelle, "Recurrence plots of dynamical systems", Urophysics Letters, 4 (91) (1987), pp. 973-977.
- [74] B.X. Du, D.S. Dong, "Recurrence plot analysis of discharge current in tracking test of Gamma-ray irradiated polymer", IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., Vol. 15, No. 4, pp. 974–981, August 2008.
- [75] G.M. Mindlin, R.Gilmore, "Topological analysis and synthesis of chaotic time series", Physica D, Vol. 58, pp. 229-242, 1992.
- [76] J.M. Nichols, S.T. Trickey and M. Seaver, "Damage detection using multivariate recurrence quantification analysis", Mech. Syst. Signal Process. 20 (2) (2006), pp. 421–437.
- [77] A. Giuliani, C. Manetti, "Hidden peculiarities in the potential energy time series of a tripeptide highlighted by a recurrence plot analysis: a molecular dynamics simulation", Phys. Rev, 53 (6) (1996), pp. 6336–6340.
- [78] N. Marwan, "Encounters with neighbours: current development of concepts based on recurrence plots and their applications". Ph.D. Thesis, University Potsdam, 2003.

- [79] N. Marwan, N. Wessel, U. Meyerfeldt, A. Schirdewan and J. Kurths, "Recurrence plot based measures of complexity and its application to heart rate variability data", *Phys. Rev.*, 66 (2) (2002), pp. 56-63.
- [80] H. John and Pat Langley. «Estimating Continuous Distributions in Bayesian Classifiers». *Proceedings of the Eleventh Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. pp. 338-345. Morgan Kaufmann, San Mateo, 1995.
- [81] Marti A. Hearst, «Support Vector Machines», *IEEE Intelligent Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 18-28, Jul/Aug, 1998.
- [82] J. Kharroubi, « Étude de Techniques de Classement ‘ Machines à Vecteurs Supports ’ pour la Vérification Automatique du Locuteur », Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure des télécommunications, France, 2002
- [83] Richard O. Duda, Peter E. Hart, David G. Stork, “Pattern classification”, Wiley-interscience, pp20-84, 215-282, 453-517, NY- USA, 2001
- [84] C.M. Bishop, « Pattern Recognition and Machine Learning », *Information Science and Statistics*, Springer, Springer, pp21-28, 78-110, 179-220, 325-357, New York, USA, 2006
- [85] R.Caruana, et A.Niculescu-Mizil, «An empirical comparison of supervised learning algorithms». *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning*, 2006.
- [86] G.Saporta, M. Legeune, « Probabilités, analyse de données et statistique » Technip,2006 pp 75-100, Paris.
- [87] H. John and Pat Langley. «Estimating Continuous Distributions in Bayesian Classifiers». *Proceedings of the Eleventh Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. pp. 338-345. Morgan Kaufmann, San Mateo, 1995.
- [88] Marti A. Hearst, «Support Vector Machines», *IEEE Intelligent Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 18-28, Jul/Aug, 1998
- [89] V. Vapnik, et S. Kotz,« Estimation of Dependences Based on Empirical Data», *Springer Series in Statistics*, 1982.
- [90] P. Ciarlet « Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation» Masson, nouvelle édition, 1994.
- [91] T.M. Mitchel, «Machine learning», Mc-Graw Hill, pp154-199, USA, 1997.
- [92] G. Paliouras, V. Karkaletsis, C.D. Spyropoulos, «Maching learning and its application», *Lecture Note in Artificial Intelligence*, Springer, pp249-258, Berlin, Germany, 2001.
- [93] F.V.D. Heijden, D. de Ridder, D.M.J. Tax «Classification, Parameter Estimation and state esimation », *An Engineering Approach using MATLAB*, John Wiley and Sons, pp13-79, 139-181, England, 2004.
- [94] IEC60060-1 “High voltage test techniques” *International Electrotechnical Commission Standard*” second edition 1989-11.

ملخص

هذا العمل هو المساهمة في تشخيص عوازل التوتر العالي من خلال إشارات تيار التسرب، التوتر المطبق المميزين لحالة سطح العازل الملوثة. الدراسة التجريبية تخص جمع هذه الإشارات لعدة تشكيلات و أنواع التلوث وأيضا لشدة تلوث مختلفة. أولا تم تمييز التفريعات الكهربائية باستخدام تقنيات الموجيات. بالإضافة إلى ذلك، قمنا بتطوير نهجين آخرين و هما التحليل إلى حزم الموجيات و التمثيل السكلوغرامى لتقدير شدة التلوث. نقوم أيضا بإجراء تصنيف شدة التلوث إلى ثلاثة فئات متميزة باستعمال طرق هجينة معتمدة على طريقتين لمعالجة الإشارة (FFT) والتحليل بالموجيات و تقنيتين التصنيف (MVS, BN).

نستكمل هذه الأبحاث بدراسة تجريبية لتقارن بين ساعات المعلمات الكهربائية المختلفة لتحديد شكل و نوع التلوث الأكثر خطورة.

الكلمات المفتاحية : التشخيص، شدة التلوث، التفريعات الكهربائية، تيار التسرب، الشحنة المتراكمة، التحليل بالموجيات، التصنيف، MVS, BN، المقاومة المعادلة، الطاقة المبذورة

Résumé

Ce travail est une contribution 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 consiste à récolter ces différents signaux pour plusieurs sévérités, configurations et natures de pollutions. En premier lieu, une caractérisation des décharges électriques en utilisant la technique de la transformée en ondelettes discrètes a été établie. 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, nous procédons à une classification de la sévérité de pollution en trois classes distinctes en adoptant des méthodes hybrides basées sur deux techniques de traitement de signal (FFT et transformée en ondelettes) et deux méthodes de classification (SVM, NB). Ces investigations sont complétées par une étude expérimentale sur un isolateur réel, elle sert à comparer les amplitudes des différents paramètres électriques afin de déterminer la nature ainsi que la configuration de pollution les plus néfastes.

Mots-Clés : diagnostic, sévérité de pollution, décharges électriques, courant de fuite, charge cumulée, transformée en ondelettes, classification, supports vecteurs machines, naïve bayésienne, impédance équivalente, énergie dissipée.

Abstract

This work is a contribution to the HV insulators diagnosis through the analysis of the leakage current and the applied voltage signals characterizing the polluted insulator surfaces. The experimental study consists to collect these signals for several severities, configurations and natures of pollution. First, a characterization of the electrical discharges using discrete wavelet transform has been established. Furthermore, two other approaches that is to say wavelet packet decomposition and scalogramme representation has been developed to estimate the pollution severity. In addition, a classification of the pollution severity in three distinct classes has been undertaken by adopting hybrid methods based on two techniques of signal processing (FFT and wavelet transform) and two classification methods (SVM, NB). These investigations are complemented by an experimental study. This last compare between the electrical parameters magnitudes in order to determine the worst nature and configuration pollutions.

Key words: diagnosis, pollution severity, electric discharges, leakage current, cumulative charge wavelet transform, classification, support vector machine, naïve Bayesienne, equivalent impedance dissipated energy.