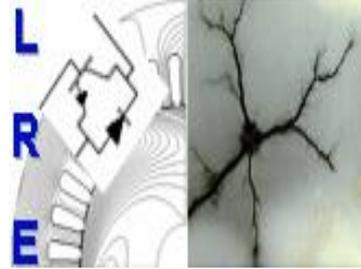


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique D'Alger



Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Intitulé

Analyse Fractale pour l'Etude des Isolateurs Pollués

Présenté par :

Oussama HOUARI
et
Rabie SALHI

Sous la direction du **Dr. A. K. Chaou**
Soutenu publiquement le 19 juin 2018

Membres du Jury

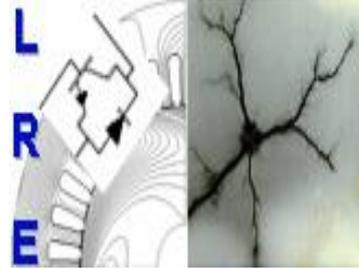
Président : A. Boubakeur, Professeur à l'ENP
Rapporteur : A. K. Chaou, MC-B à l'ENP
Examineur : M. Tegar, Professeur à l'ENP

ENP 2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique D'Alger



Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Intitulé

Analyse Fractale pour l'Etude des Isolateurs Pollués

Présenté par :

Oussama HOUARI
et
Rabie SALHI

Sous la direction du **Dr. A. K. Chaou**
Soutenu publiquement le 19 juin 2018

Membres du Jury

Président : A. Boubakeur, Professeur à l'ENP
Rapporteur : A. K. Chaou, MC-B à l'ENP
Examineur : M. Tegar, Professeur à l'ENP

ENP 2018

Dédicaces

A mes très chers parents

A mes sœurs

A mes frères

A tous mes Amis (es) qui m'Aiment et qui m'Apprécient

A toutes celles et tous ceux qui me sont chers

A tous mes camarades de la promotion 2018 pour les bons moments passés ensemble.

« Je dédie ce modeste travail »

RABIE

DÉDICACES

JE DÉDICACE CE TRAVAIL :

À MES PARENTS, EXEMPLE DE COURAGE ET DE SÉRIEUX, QUI M'ONT TOUT DONNÉ POUR ME PERMETTRE DE RÉALISER MES RÊVES. EN CES QUELQUES MOTS, JE LEUR EXPRIME TOUT MON AMOUR ET MON RESPECT, POUR TOUT CE QU'ILS M'ONT OFFERT COMME SOUTIEN, ENCOURAGEMENT ET AIDE.

À MES AMIS, POUR LEURS AMITIÉS SINCÈRES.

À TOUS LES ÉLECTROTECHNICIENS PROMOTION 2018

OUSSAMA

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience afin de mener ce modeste travail à terme.

Nous tenons à remercier notre promoteur, Dr. A.K. Chaou pour sa constante présence ainsi que son soutien et ses précieux conseils tout le long de ce travail.

Nos remerciements vont également aux Pr. A.Mekhaldi et Pr. M.Teguar, pour leurs aides et leurs qualités humaines.

Nous tenons également à remercier le président Pr. A.BOUBAKEUR et les membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

Nous tenons également à remercier tous les enseignants ayant contribué à notre formation et ce depuis le tronc commun jusqu'à la dernière année de graduation.

يتناول هذا العمل تشخيص وتوصيف حالة نموذج مسطح لعازل ذا جهد عالي تحت توتر متناوب 50 هرتز تحت تأثير تلوث منتظم وغير منتظم. يشمل بحثنا معالجة الاشارات بواسطة التحليل الفركتلي. أولاً، نقوم بشرح نظرية الفركتلات، وكذلك مختلف الأساليب المعتمدة لحساب البعد الفركتلي. بعد ذلك، نحقق خوارزمية لحساب البعد الفركتلي استناداً إلى طريقة «box-counting». فيما بعد، نطبق هذه الخوارزمية (والتي تعتمد في الأساس على تقنية الدقة المتعددة) على إشارات تيار التسرب، التوتر المطبق والشحنة الكهربائية، من أجل دراسة، من ناحية، كفاءة البعد الفركتلي لوصف أداء العازل، ومن ناحية أخرى، استنباط أي الإشارات هي الأكثر فعالية لتشخيص حالة سطح العازل الملوث. وأخيراً، نقترح تحسباً للطريقة السابقة، من خلال تطبيق تحويل المويجات على إشارة معينة، قبل تطبيق خوارزمتنا المعتمدة لحساب البعد الفركتلي. النتائج الرئيسية لهذه الرسالة تسلط الضوء على فعالية البعد الفركتلي، استناداً إلى إشارة تيار التسرب مباشرة، أو على تحليلها إلى مويجات، لدراسة العوازل الملوثة.

الكلمات المفتاحية: نموذج مسطح لعازل، تلوث، التحليل الفركتلي، البعد الفركتلي، box-counting، الدقة المتعددة، إشارة التسرب، التوتر المطبق، الشحنة الكهربائية، تحليل المويجات.

Abstract

This present work deals with the diagnosis and characterization of the surface condition of a high-voltage under 50 Hz alternative voltage plane insulator model under uniform and non-uniform pollution conditions. Our investigation is done by the signal processing using fractal analysis. First, we explain the theory of fractals, as well as the various methods for calculating the fractal dimension. Then, we develop an algorithm for calculating the fractal dimension, based on the box-counting method. Subsequently, we apply this algorithm (which is based on the multi-resolution technique) on leakage current, applied voltage and load signals, in order to study, on the one hand, the efficiency of the fractal dimension to describe the performance of the insulator but on the other hand, identify which signal is most effective to diagnose the surface condition under pollution conditions. Finally, we propose an improvement of the previous method, by applying the wavelet transform on a given signal, before applying our fractal dimension algorithm. The main results of this thesis have highlighted the efficiency of the fractal dimension, based on the signal of the leakage current directly, or on its decomposition in wavelets, for the study of polluted insulators.

Keywords: plane insulator model, pollution, fractal analysis, fractal dimension, box-counting, multi-resolution, leakage current, applied voltage, load, wavelet transform.

Résumé

Ce présent travail porte sur le diagnostic et la caractérisation de l'état de surface d'un modèle plan d'isolateur de haute tension sous tension alternative 50 Hz, sous condition de pollution uniforme et non-uniforme. Notre investigation se fait par le traitement du signal à l'aide de l'analyse fractale. En premier lieu, nous explicitons la théorie des fractales, ainsi que les diverses méthodes pour le calcul de la dimension fractale. Puis, nous élaborons un algorithme de calcul de la dimension fractale, sur la base de la méthode « box-counting ». Par la suite, nous appliquons cet algorithme (qui est basé sur la technique de multi-résolution) sur les signaux de courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge, afin d'étudier, d'une part, l'efficacité de la dimension fractale pour décrire la performance de l'isolateur, mais d'autre part, de relever quel signal est le plus efficace pour diagnostiquer l'état de surface sous conditions de pollution. En dernier lieu, nous proposons une amélioration de la méthode précédente, en appliquant la transformée en ondelette sur un signal donné, avant d'appliquer notre algorithme de calcul de la dimension fractale. Les principaux résultats de cette thèse ont mis en avant l'efficacité de la dimension fractale, basée sur le signal du courant de fuite directement, ou sur sa décomposition en ondelettes, pour l'étude des isolateurs pollués.

Mots-Clés : Modèle plan d'isolateur, pollution, analyse fractale, dimension fractale, box-counting, multi-résolution, courant de fuite, tension appliquée, charge, transformée en ondelettes.

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE..... 15

Chapitre I

TRAVAUX ANTERIEURS SUR L'ETUDE DES ISOLATEURS POLLUES PAR L'ANALYSE FRACTALE

Introduction.....	18
I.1. Prévision de la contamination par l'analyse fractale du courant de fuite.....	18
I.1.1. Appareils de test et échantillons	18
I.1.2. Analyse des résultats de tests.....	19
I.1.3. Effet de l'humidité sur la dimension fractale	19
I.1.4. Effet de la pollution sur la dimension fractale.....	20
I.2. Analyse fractale des isolateurs en caoutchouc de silicone nanostructures évalués sur une « tracking wheel »	21
I.3. Méthode ondelette-fractale pour l'étude du courant de fuite	23
I.3.1. Méthode de calcul de la dimension fractale	23
I.3.2. Résultats.....	24
I.4. Analyse fractale pour l'étude des streamers dans un isolateur liquide sous une tension de choc de foudre	26
I.4.1. Dimension fractale en fonction du temps de propagation	26
I.4.2. Dimension fractale en fonction de la tension appliquée.....	27
Conclusion	28

Chapitre II

THEORIE DES FRACTALES

Introduction.....	30
II.1. Objet fractal dans la nature.....	30
II.2. Domaines d'application.....	31
II.3. Courbes fractales	32
II.4. Définition de la Dimension fractale	33
II.5. Types de dimension fractale.....	34
II.5.1. Méthode des boules disjointes	34
II.5.2. Dimension masse-rayon	35
II.5.3. Méthode du spectre de puissance	36

II.5.4. Méthode de box-counting	37
Conclusion	38

Chapitre III

ALGORITHME DE CALCUL DE LA DIMENSION FRACTALE

Introduction	40
III.1. Algorithme de calcul de la DF par la méthode de box-counting	40
III.1.1. Algorithme de Katz	40
III.1.2. Algorithme de Higuchi	40
III.1.3. Algorithme de Multi-résolution MRBC	41
III.2. Amélioration de l'algorithme	45
III.3. Validation de la méthode	45
Conclusion	47

Chapitre IV

APPLICATION DES FRACTALES SUR LES SIGNAUX DES COURANT DE FUITE, LA TENSION APPLIQUÉE ET LA CHARGE

Introduction	50
IV.1. Etude de la DF du signal du courant de fuite	51
IV.1.1. Cas uniforme	51
IV.1.1.1. Étude de la DF du signal du courant de fuite en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée	51
IV.1.1.2. Etude de la DF du signal du courant de fuite en fonction de la conductivité	52
IV.1.2. Cas non-uniforme	53
IV.1.2.1. Etude de la DF du signal du courant de fuite en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée	53
IV.1.2.2. Etude de la DF du signal du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante	55
IV.2. Etude de la DF du signal de la tension appliquée	56
IV.2.1. Cas uniforme	56
IV.2.1.1. Etude de la DF du signal de la tension appliquée en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée	56
IV.2.1.2. Etude de la DF du signal de la tension appliquée en fonction de la conductivité	57
IV.2.2. Cas non-uniforme	58
IV.2.2.1. Etude de la DF du signal de la tension appliquée en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée	58

IV.2.2.2. Etude de la DF du signal de la tension appliquée en fonction de la largeur de la couche polluante	59
IV.3. Etude de la DF du signal de la charge	60
IV.3.1. Cas uniforme.....	61
IV.3.1.1. Etude de la DF du signal de la charge en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée	61
IV.3.1.2. Etude de la DF du signal de la charge en fonction de la conductivité	62
IV.3.2. Cas non-uniforme	63
IV.3.2.1. Etude de la DF du signal de la charge en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée	63
IV.3.2.2. Etude de la DF du signal de la charge en fonction de la conductivité	64
Conclusion	65

Chapitre V

APPLICATION DES FRACTALES SUR LES TRANSFORMEES EN ONDELETTES DISCRETES

Introduction.....	68
V.1. Transformée en ondelette	68
V.1.1. Transformée en ondelettes discrète	68
V.1.2. Analyse multi-résolution	68
V.1.3. Transformée en ondelettes de Daubechies	69
V.2. Application de la décomposition d'ondelettes sur les signaux (courant de fuite, tension appliquée et charge).....	70
V.2.1. Etude de la DF des ondelettes appliquée sur le signal du courant de fuite.....	71
V.2.1.1. Pollution uniforme.....	72
V.2.1.2. Pollution non-uniforme	72
V.2.2. Etude de la DF des ondelettes appliquée sur le signal de la tension appliquée.....	74
V.2.2.1. Pollution uniforme.....	74
V.2.2.2. Pollution non-uniforme	74
V.2.3. Etude de la DF des ondelettes appliquée sur le signal de charge	75
V.2.3.1. Pollution uniforme.....	75
V.2.3.2. Pollution non-uniforme	76
Conclusion	77
CONCLUSION GENERALE	79
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Comparaison des dimensions fractales des courants de fuites pour les différents logiciels.....	23
Tableau III.1. DF réelle et celle calculée par l’algorithme de MRBC	47
Tableau III.2. DF réelle et celle calculée par l’algorithme, amélioré de MRBC	47

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Dispositif expérimental	18
Figure I.2. Signal du courant de fuite et sa représentation fractale, pour les trois étapes de progression des décharges.....	19
Figure I.3. Courants de fuite et leurs dimensions fractales sous diverses valeurs d'humidité	20
Figure I.4. Dimension fractale du signal du courant de fuite, tout au long des différentes étapes de progression des décharge pour : (a) $\rho\text{ESDD} = 0,2 \text{ mg} / \text{cm}^2$. (b) diverses valeurs de pollution	20
Figure I.5. La valeur moyenne (a) et l'écart type (b) de la dimension fractale dans la zone de la prévision en fonction du degré de la contamination	21
Figure I.6. Isolateur : (a) standard, (b) nano-renforcer, (c) dans un « tracking wheel ».....	21
Figure I.7. Courants de fuite enregistrés sur : (a) isolateur nano-renforcé, (b) et (c) isolateurs réels	22
Figure I.8. La courbe de Richardson.....	24
Figure I.9. Courant de fuite et sa représentation ondelette-fractale correspondante ($\text{ESDD} = 0,1 \text{ mg}/\text{cm}^2$).....	24
Figure I.10. Courant de fuite et sa représentation ondelette-fractale correspondante ($\text{ESDD} = 0,15 \text{ mg}/\text{cm}^2$)	25
Figure I.11. Courant de fuite et sa représentation ondelette-fractale correspondante ($\text{ESDD} = 0,2 \text{ mg}/\text{cm}^2$).....	25
Figure I.12. Représentation ondelette-fractale du courant de fuite pour différentes ESDD...25	
Figure I.13. Progression des streamers pendant $28\mu\text{s}$, ainsi que l'image correspondante en binaire	26
Figure I.14. Dimension fractale, surface et longueur de propagation des streamer en fonction de temps	27
Figure I.15. Images des streamers de différents tensions d'applications et leurs formes binaires.....	27
Figure I.16. Dimension fractale sous diverses tensions en fonction du temps de propagation	28
Figure II.1. Fougère modélisés par ordinateur à l'aide d'un algorithme récursif [18].....	31
Figure II.2. Antenne fractale dont la géométrie est basée sur la fractale de Hilbert, L : dimension latérale, d : segment de ligne et b : diamètre du conducteur [21]	32
Figure II.3. Courbe de Koch.....	33

Figure II.4. Recouvrement par des disques disjoints.....	35
Figure II.5. Mesure de la dimension fractale par la relation entre masse et rayon.....	36
Figure II.6. Méthode de box-counting appliqué sur la courbe de Koch.....	37
Figure III.1. Approche multi-résolution de comptage des box pour un signal sinusoïdal aux résolutions temporelles : (a) la plus fine $r = Te$, (b) $r = 2Te$ et (c) $r = 3Te$	41
Figure III.2. Elaboration d'algorithme de calcul de la DF du signal par la méthode du box-counting.....	43
Figure III.3. Signal échantillonné avec une box de longueur $r < Te$	44
Figure III.4. Signal échantillonné en ajoutant un point supplémentaire entre deux points successifs.....	45
Figure III.5. Fonction de Weierstrass, avec une DF= 1,5, le nombre qui définit l'allure $\lambda = 2$, le paramètre du signal $H = 0,5$ et nombre de point $n = 1024$	46
Figure IV.1. Dispositif expérimental.....	50
Figure IV.2. DF du signal du courant de fuite en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour différentes conductivités.....	51
Figure IV.3. Courant de fuite pour : (a) une conductivité de 0,01 mS/cm (DF = 1,57), (b) une conductivité de 10,1 mS/cm (DF = 1,43), sous tension appliquée de 15 kV _{eff}	52
Figure IV.4. DF du signal du courant de fuite en fonction de la conductivité pour différentes tensions appliquées.....	52
Figure IV.5. DF du courant de fuite en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour différentes dispositions de la couche polluée.....	54
Figure IV.6. DF du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante pour différentes dispositions et tensions appliquées.....	56
Figure IV.7. DF du signal de la tension appliquée en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour différentes conductivités.....	57
Figure IV.8. DF du signal de la tension appliquée en fonction de la conductivité pour différentes valeur efficace des tensions appliquées.....	57
Figure IV.9. DF de la tension appliquée en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour différentes dispositions de la couche polluée.....	59
Figure IV.10. DF de la tension appliquée en fonction de la largeur de la couche polluante pour différentes dispositions et tensions appliquées.....	60

Figure IV.11. DF de la charge en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour différentes conductivités et concentrations en Kaolin	61
Figure IV.12. DF de la charge en fonction de la conductivité, pour différentes valeurs efficace de la tension applique et concentrations en Kaolin	62
Figure IV.13. DF du signal de la charge en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour différentes conductivités et concentrations en Kaolin	63
Figure IV.14. DF de la charge en fonction de la conductivité et pour différentes valeurs efficace de la tension appliquée et concentrations en Kaolin	65
Figure V.1. Arbre de décomposition d'un signal sur une base d'ondelettes	69
Figure V.2. Ondelette mère de Daubechies	70
Figure V.3. Dix détails d'un signal du courant de fuite par l'ondelette de Daubechies (db1) 71	
Figure V.4. DF des détails d'ondelettes du signal du courant de fuite pour les différentes conductivités	72
Figure V.5. DF des détails d'ondelettes du signal du courant de fuite pour les différentes conductivités et pour trois configurations de la couche polluante	73
Figure V.6. Comparaison entre la DF du signal du courant de fuite et celui du détail D1	73
Figure V.7. DF des ondelettes appliquées sur le signal de la tension appliquée pour les différentes conductivités	74
Figure V.8. DF des ondelettes appliquées sur le signal de la tension appliquée pour les différentes largeurs de la couche polluante.....	74
Figure V.9. DF des ondelettes appliquées sur le signal de la charge pour les conductivités dans le cas uniforme.....	75
Figure V.10. DF des ondelettes appliquées sur le signal de la charge pour les conductivités dans le cas non-uniforme	76

LISTE DES ABREVIATIONS

DF : Dimension Fractale.

ESDD: Equivalent Salt Deposit Density.

NSDD: Non-Soluble Deposit Density.

IEC: International Electrotechnical Commission.

EEG: Electroencephalographic.

MRBC: Multi-Resolution Box-Counting.

HT: Haute Tension.

AMR: Analyse Multi-Résolution.

DWT : Discret Wavelet Transform.

**INTRODUCTION
GENERALE**

L'énergie électrique n'est généralement pas produite à proximité des lieux où elle est consommée. De ce fait, il faut la transporter à partir des centrales de production jusqu'aux consommateurs, via des lignes de transmission qui sont, dans la plus part des cas, aériennes. En plus des conducteurs nus, les lignes aériennes de transport et de distribution de l'énergie électrique comportent deux autres éléments principaux : les pylônes et les isolateurs de lignes. Ces derniers ont un rôle primordial dans la fiabilité des réseaux électriques aériens. En effet, ils assurent le maintien et le soutien des lignes électriques tout en fournissant, en tout temps, une isolation adéquate entre le conducteur et le pylône et cela quelles que soient les conditions climatiques et environnementales [1].

Les conditions environnementales sévères et le degré de pollution affectent fortement la performance diélectrique et la fiabilité des isolateurs électriques. Le phénomène de pollution est plutôt complexe dans le cas des isolateurs, car un seul défaut sur cet isolateur peut entraîner une panne totale du réseau. Des dépôts polluants humidifie sur la surface des isolants laissent le courant de fuite s'écouler qui, à son tour, va petit à petit provoquer la formation de bandes sèches, puis donne naissance à des décharges qui vont éventuellement conduire à un arc de contournement complet [2]. C'est pour cela qu'il est important d'avoir une bonne connaissance de tous les phénomènes liés, de près ou de loin, au bon fonctionnement de l'isolateur de ligne afin d'éviter toute défaillance pouvant interrompre le transport de l'énergie électrique.

Par conséquent, il devient nécessaire de développer des techniques de diagnostic (ou monitoring) pour évaluer et surveiller en temps réel l'état les isolateurs [3-4]. Parmi ces méthodes, l'analyse fractale [5], qui sera le principal objet d'étude de notre présent travail.

Notre étude consiste à examiner la sévérité de la pollution sur un modèle d'isolateur plan qui simule un isolateur réel, avec différentes configurations de pollution, uniforme et non-uniforme, afin de comprendre l'impact de celles-ci sur les performances électriques de l'isolateur, en exploitant principalement les signaux du courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge.

Dans le premier chapitre, nous présentons, de manière succincte, les principaux travaux antérieurs qui ont traité la problématique des isolateurs pollués à l'aide de la méthode des fractales. Ces études sont à base du signal du courant de fuite principalement.

Etant donné que notre travail repose sur la méthode des fractales, de ce fait, le deuxième chapitre expose d'une manière succincte la théorie, l'historique et les objets existants dans la nature de celles-ci. Nous avons cité, entre autres, quelques domaines d'application intéressants et d'actualités. De manière brève, la théorie des fractales permet de calculer différents paramètres permettant de quantifier le signal étudié, parmi eux, la dimension fractale (DF). Ce dernier paramètre peut être calculé à l'aide de différentes méthodes que nous exposons de manière succincte. Aussi, nous exposons nos arguments pour le choix de la méthode à utiliser dans notre étude.

Nous avons mis en œuvre, dans le troisième chapitre, un algorithme de calcul de la dimension fractale des signaux du courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge. Cet algorithme est suffisamment robuste pour estimer la dimension fractale d'un signal de manière précise et rapide dans les limites du calcul. Par conséquent, nous avons testé et validé notre

algorithme sur un signal théorique ayant une dimension fractale bien connue. Ce test nous a permis de choisir de manière optimale et de calibrer les paramètres de notre algorithme.

Le quatrième chapitre est entièrement consacré à l'étude, à l'aide de notre algorithme, des signaux qui caractérisent l'état de surface d'un isolateur pollué, à savoir le courant de fuite, la tension appliquée et la charge. Il a été observé que la DF évolue avec décroissance suite à l'augmentation du niveau de la pollution, ou l'augmentation de la largeur de la couche de cette dernière.

Cependant, étant donné que l'étude de la DF sur certains signaux ne donnent pas de résultats satisfaisants. C'est pourquoi, dans le cinquième chapitre, nous proposons la transformée en ondelette discrète qui a été appliquée sur les signaux de courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge. Puis, l'algorithme de calcul de la dimension fractale est appliqué sur les détails de chaque signal. Afin de faciliter l'étude des phénomènes liés à la pollution des isolateurs.

Notre manuscrit se solde par une conclusion générale, résumant nos principaux résultats, ainsi que nos commentaires et préconisations, quant à l'analyse fractale pour l'étude des isolateurs pollués.

Chapitre I

**TRAVAUX ANTERIEURS SUR
L'ETUDE DES ISOLATEURS
POLLUES PAR L'ANALYSE
FRACTALE**

Introduction

Nous présentons, dans ce chapitre, les travaux les plus récents concernant l'analyse fractale pour l'étude des isolateurs pollués. Ces recherches sont, pour la plupart, basées sur l'étude des signaux unidimensionnel à savoir le signal du courant de fuite ou bien bidimensionnel (image) qui procurer des informations précieuses et efficaces sur l'état de surface des isolateurs, ainsi que des décharges partielles existantes sur ces derniers. Dans la plus part des travaux, l'étude de ce signal est effectuée sur la base de l'analyse fractale, avec variante par la méthode ondelette-fractale.

I.1. Prévion de la contamination par l'analyse fractale du courant de fuite

Dans le but d'extraire des paramètres fiables pour la prévion de la contamination des isolateurs pollués, à base du signal du courant de fuite, W. Chen et al [6] ont utilisé la théorie fractale, plus précisément, la dimension fractale (box-counting) pour analyser la zone de sécurité, la zone de prévion et la zone danger avant apparition de l'arc de contournement.

I.1.1. Appareils de test et échantillons

- Chambre à brouillard (4,0 m × 3,7 m × 4,0 m).
- Diviseur de tension capacitif de rapport de 1 :1000 pour enregistrer la tension appliquée.
- Le courant de fuite a été enregistré par un transducteur de courant développé dans leur laboratoire [7].
- XP-70 chaine de trois isolateurs en porcelaine comme un échantillon de test.
- La tension appliquée sur la chaine d'isolateurs est de 20,2 kV, qui a été appliquée pour simuler une tension de ligne de transport de 35 kV.
- Quatre types de niveau d'ESDD ont été appliqués pour simuler les quatre degré de contamination selon la norme IEC-60507 [8] : $\rho_{ESDD} = 0,06 \text{ mg/cm}^2$ et $\rho_{NSDD} = 1,0 \text{ mg/cm}^2$, $\rho_{ESDD} = 0,12 \text{ mg/cm}^2$ et $\rho_{NSDD} = 1,0 \text{ mg/cm}^2$, $\rho_{ESDD} = 0,2 \text{ mg/cm}^2$ et $\rho_{NSDD} = 2,0 \text{ mg/cm}^2$, et $\rho_{ESDD} = 0,25 \text{ mg/cm}^2$ et $\rho_{NSDD} = 2,0 \text{ mg/cm}^2$, avec ESDD et NSDD sont la densité équivalente de dépôt de sel et la Densité de dépôt sans sel.

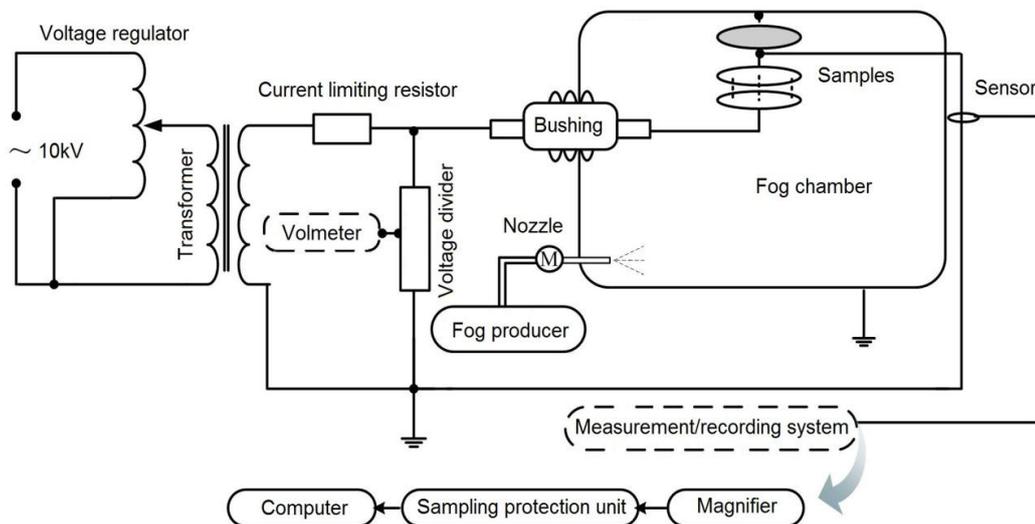


Figure I.1. Dispositif expérimental

I.1.2. Analyse des résultats de tests

La figure I.2 montre les représentations fractales pour les trois signaux du courant de fuite correspondants aux zones de sécurité, prévision et danger. La dimension fractale est calculée comme étant la pente de chaque droite (1,964 pour le cas uniforme, 1,8103 pour le cas non-uniforme et 1,6376 pour le cas extrêmement non-uniforme). Plus les formes d'ondes sont proches de l'uniformité, plus les dimensions fractales sont grandes. En raison des différences dans le caractère non-uniforme et la complexité de chaque phase de décharge, les dimensions fractales peuvent être utilisées pour distinguer l'étape de décharge et donc prévoir l'apparition du contournement.

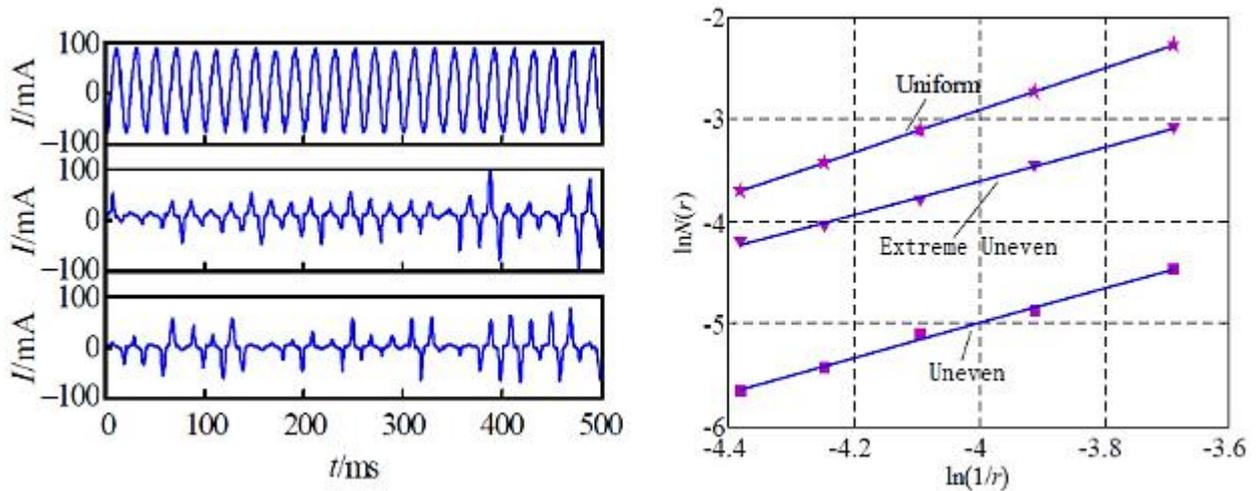
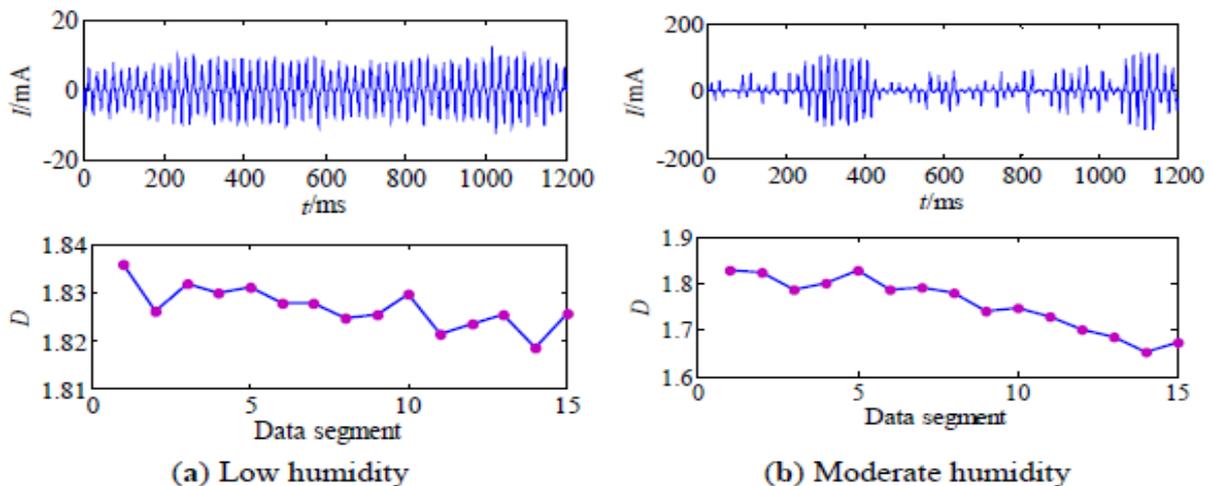


Figure I.2. Signal du courant de fuite et sa représentation fractale, pour les trois étapes de progression des décharges

I.1.3. Effet de l'humidité sur la dimension fractale

Une fois que les auteurs ont mis en avant le lien entre la dimension fractale et l'étape des décharges (paragraphe précédent), ils se sont dès lors intéressés à l'effet de l'humidité sur la dimension fractale pour quatre degrés de contamination. Les résultats sont présentés sur la figure I.3.



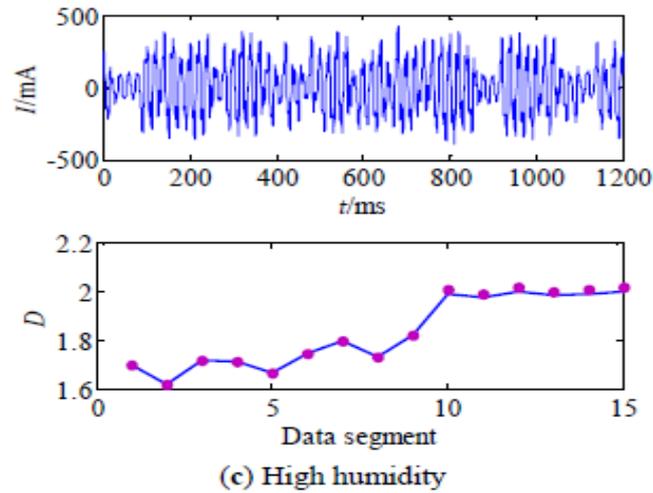


Figure I.3. Courants de fuite et leurs dimensions fractales sous diverses valeurs d'humidité

Sachant que l'humidité ambiante dans la chambre de brouillard augmente graduellement d'un faible niveau jusqu'à une valeur élevée, l'amplitude du courant de fuite augmente progressivement de la zone de sécurité à la zone de danger. Dès lors, la forme d'onde présente une forme uniforme dans la zone de sécurité (a), puis une morphologie non-uniforme dans la zone de prévision (b) et une courbe extrêmement non-uniforme dans la zone de danger (c). Tout au long du processus de progression de décharge, la dimension fractale du courant de fuite diminue lentement dans la zone de sécurité, puis rapidement dans la zone de prévision mais augmente vivement dans la zone de danger.

I.1.4. Effet de la pollution sur la dimension fractale

Comme exposé sur la figure I.4, plus le degré de contamination augmente, plus les valeurs de la dimension fractale diminuent. Cependant, si la contamination est sévère, la décharge sur l'isolateur est intense, les impulsions sont alors bien denses, ce qui fait que la dimension fractale du courant de fuite est plus élevée.

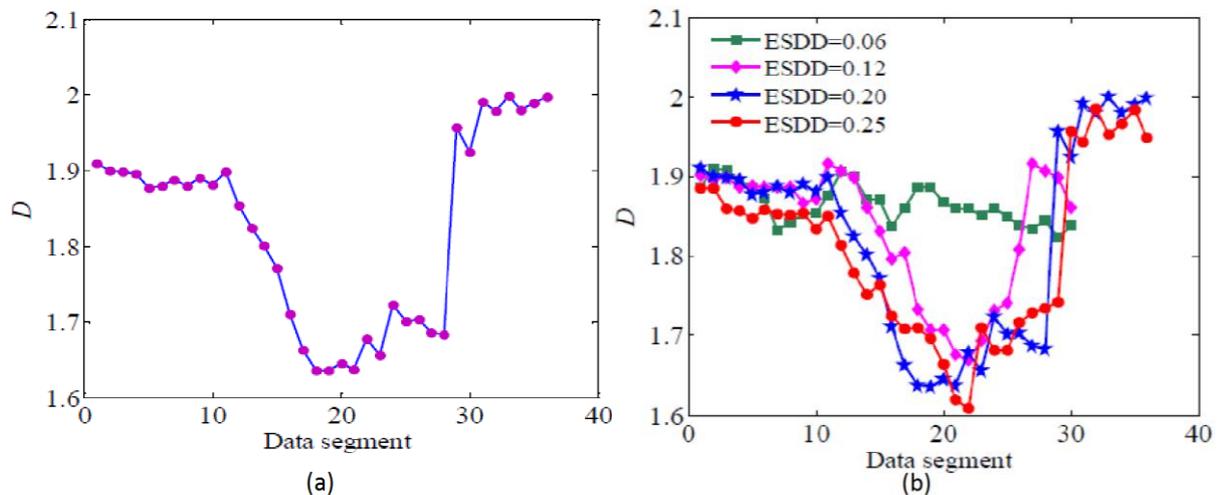


Figure I.4. Dimension fractale du signal du courant de fuite, tout au long des différentes étapes de progression des décharge pour : (a) $\rho\text{ESDD} = 0,2 \text{ mg/cm}^2$. (b) diverses valeurs de pollution

Les courbes de la DF du courant de fuite sous différents degrés de contamination sont similaires, elles sont difficiles à distinguer dans la zone de sécurité, mais elles sont distinctes

dans la zone de prévision. De ce fait, les auteurs ont soumis l'étude de la valeur moyenne (D_m) et l'écart type (D_e) de la dimension fractale (figure I.5).

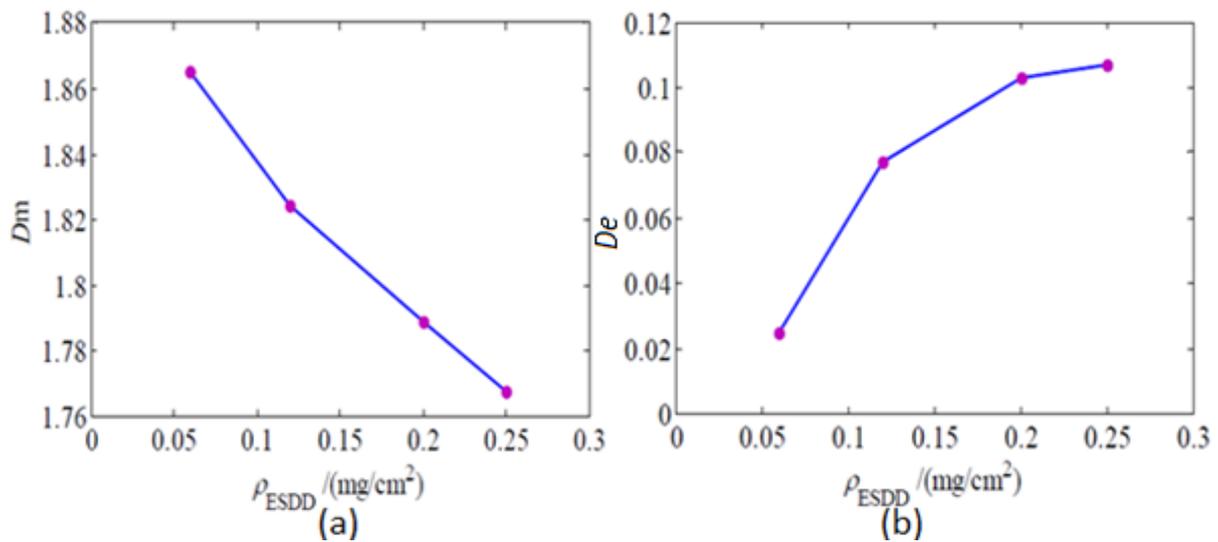


Figure I.5. La valeur moyenne (a) et l'écart type (b) de la dimension fractale dans la zone de la prévision en fonction du degré de la contamination

La D_m diminue de 0,0438, à 0,0325 jusqu'à 0,0212 et la D_e augmente lentement avec l'augmentation du degré de la contamination. Donc, plus la contamination est grave, plus la D_m est faible et plus le D_e de la dimension fractale est élevé.

De plus, avec une contamination plus élevée, la différence entre la D_m et le D_e pour différents degrés de contamination diminue progressivement, ce qui reflète la divergence de l'intensité de décharge pour différents degrés de contamination. De ce fait, plus la contamination est sévère, plus la différence est petite du degré d'intensité des décharges.

I.2. Analyse fractale des isolateurs en caoutchouc de silicone nanostructures évalués sur une « tracking wheel »

I. Ramirez-Vazquez et al [9] ont mené une étude en laboratoire en appliquant la méthode de « tracking wheel » pour établir une mesure quantitative des dommages aux isolants en polymère sur la base de l'analyse fractale du courant de fuite. Les résultats obtenus sont validée par la méthode du plan incliné selon la norme IEC 60587 [10].

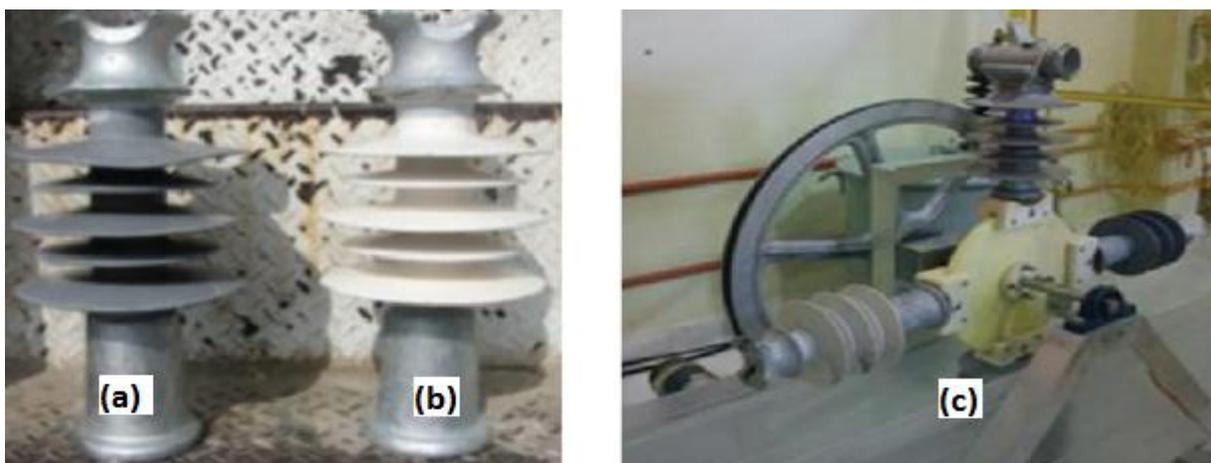


Figure I.6. Isolateur : (a) standard, (b) nano-renforcer, (c) dans un « tracking wheel »

Les formes lisses des signaux ont une dimension fractale proche de l'unité, alors que les formes rudes ont une DF plus élevée. Une dimension fractale plus élevée signifie que la forme est plus irrégulière et qu'elle remplit plus d'espace. La façon la plus simple de mesurer la dimension fractale est de mesurer la dimension de box-counting. L'un des avantages de la méthode de box-counting est qu'elle est applicable aux structures avec ou sans autosimilarité [11].

Les auteurs ont utilisé des prototypes d'isolateurs de laboratoires (nano-renforcés) et deux types d'isolateurs réels, l'un d'eux ayant le même profil et les mêmes dimensions (figure I.6) ont été évalués sur la « tracking wheel » (figure I.6.c). Avant de passer au test, les isolateurs ont été soigneusement nettoyés avec de l'eau déminéralisée. Durant l'essai, chaque isolateur est resté stationnaire pendant 40 secondes dans chacune des quatre positions de la roue et le temps de déplacement entre les positions était de 8 secondes. La concentration de la solution saline était de $1,4 \text{ kg/m}^3$ de NaCl, qui a été changée chaque semaine. Dans cette étude, la méthode de box-counting a été utilisée pour déterminer la dimension fractale des données du courant de fuite du domaine temporelle obtenues à partir de l'essai, pour définir quantitativement les performances de l'isolateur.

Le calcul de la dimension fractale, pour les trois échantillons du courant de fuite (figure I.6), a été fait en utilisant la méthode de box-counting.

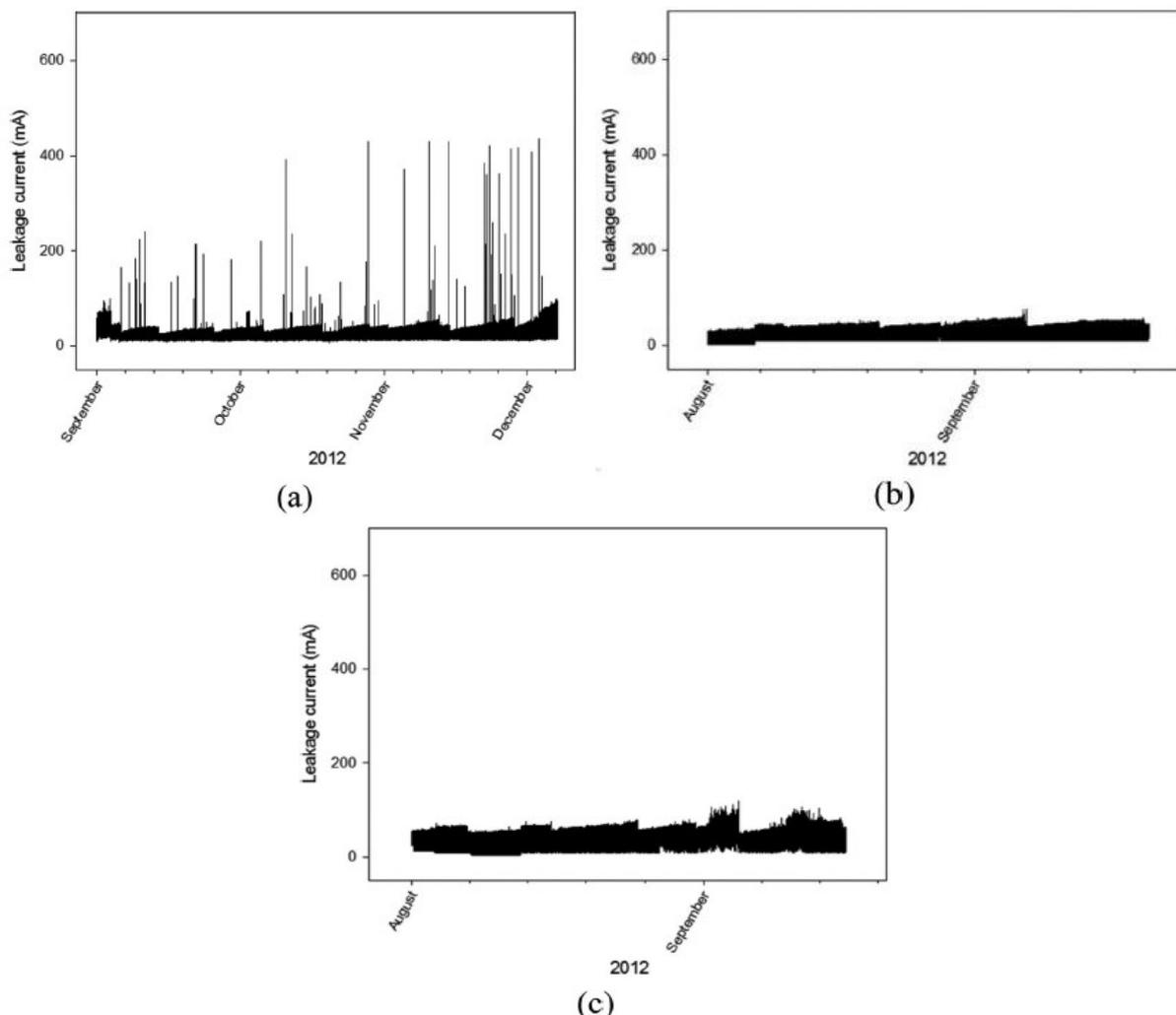


Figure I.7. Courants de fuite enregistrés sur : (a) isolateur nano-renforcé, (b) et (c) isolateurs réels

L'algorithme développé par les auteurs a également été implémenté pour comparer les résultats obtenus avec les quatre méthodes des logiciels. Ces résultats sont présentés dans le tableau I.1.

Tableau I.1. Comparaison des dimensions fractales des courants de fuites pour les différents logiciels.

Insulator	Fractal dimension (Ds) (average of two insulators per type)				
	Ds Fractop	Ds HarFA	Ds ImageJ	Benoît 2.0	Sevcik
Post-1	1.4835 ¹	1.5650 ¹	1.4888 ¹	1.4806 ¹	1.5235 ¹
Post-2	1.4910 ²	1.7700 ²	1.6015 ²	1.5993 ²	1.6673 ³
Post-3	1.5730 ³	1.8100 ³	1.6683 ³	1.6596 ³	1.6569 ²

¹Best insulator (lower fractal dimension).

²Normal performance.

³Worst performance (higher fractal dimension).

Le tableau I.1 présente les dimensions fractales du courant de fuite d'un isolateur renforcé par des nanoparticules (post-1) et de deux isolateurs commerciaux (post-2 et post-3) et leurs performances.

En comparant les dimensions fractales de courant de fuite déterminées par l'algorithme de box-counting, on peut déduire que la dimension fractale de l'isolateur renforcé par des nanoparticules est toujours inférieure à celle des isolateurs réels.

La comparaison entre les isolateurs réels (Post-2 et Post-3) indique que la dimension fractale est plus faible pour l'isolateur Post-2 que pour Post-3 dans tous les cas, sauf avec l'algorithme de box-counting utilisé pour l'analyse. La dimension fractale la plus basse correspond à l'isolant Post-1, qui est l'isolant le plus performant, alors que la dimension fractale la plus élevée correspond à l'isolateur Post-3, qui est l'isolateur le moins performant.

I.3. Méthode ondelette-fractale pour l'étude du courant de fuite

Afin d'explorer une méthode de diagnostic de l'état de surface des isolateurs, A. Hui et al [12] ont proposé d'utiliser l'analyse fractale (box-counting) pour l'étude des transformées en ondelettes des signaux de courant de fuite.

Le courant de fuite est enregistré à partir de condition de contamination diverses, sous brouillard propre, tension constante. La chambre à brouillard mesure 4m × 4m × 5m, L'isolateur réel de ligne testé est le XP-70. NSDD est de 2,0 mg / cm², ESDD sont 0,10 mg / cm², 0,15 mg / cm² et 0,20 mg / cm².

I.3.1. Méthode de calcul de la dimension fractale

Afin de mettre en œuvre la méthode ondelette-fractale, les auteurs ont proposé un algorithme comme suit :

- 1- Décomposition des signaux du courant de fuite par la transformé en ondelettes orthogonale, puis les coefficients de haute fréquence (communément appelés « détails », $D_{i,j}$) sont calculés pour chaque niveau de décomposition.

- 2- Les coefficients de la transformée en ondelettes sont choisis et multipliés par $a^{3/2}$. Notant les coefficients normalisés comme :

$$a^{3/2}D_{j,k} = |k = 1, 2, \dots, M_j \quad a : \text{coefficient d'échelle} \quad (I.1)$$

- 3- La mesure du résultat de décomposition obtenu par la transformée en ondelettes est calculée par la somme des valeurs absolues des coefficients normalisés, notés comme :

$$S_j = \sum_{k=1}^{M_j} |a^{3/2}D_{j,k}|^2 \quad (I.2)$$

La courbe de $\ln(j)$ en fonction de $\ln(S_j)$ est tracée, afin d'obtenir une forme qui ressemble la courbe de Richardson. La courbe est, par la suite divisée en trois régions *A*, *B* et *C* en termes de pentes différentes (figure I.8). Supposons que le point de départ et le point final de la région *B* sont j_1 et j_2 , respectivement, alors $\ln(j)$ en fonction de $\ln(S_j)$ vérifie le modèle de régression linéaire suivant :

$$\ln S_j = -D_w \ln j + b, \quad j_1 \leq j \leq j_2 \quad (I.3)$$

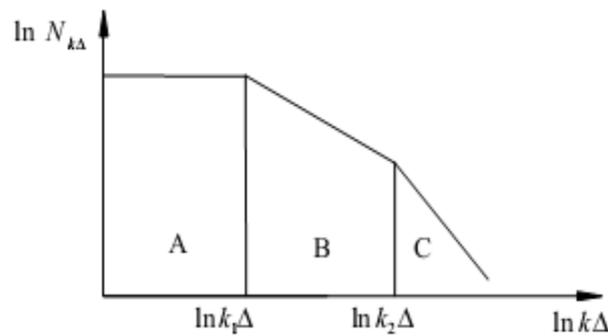


Figure I.8. La courbe de Richardson

La pente D_w est définie comme la dimension ondelette-fractale de la séquence discrète et peut être obtenue par la méthode des moindres carrés.

I.3.2. Résultats

Les résultats de l'algorithme précédent sont donnés sous divers niveaux de pollution (ESDD) (0,10, 0,15 et 0,20 mg/cm^2), comme suit :

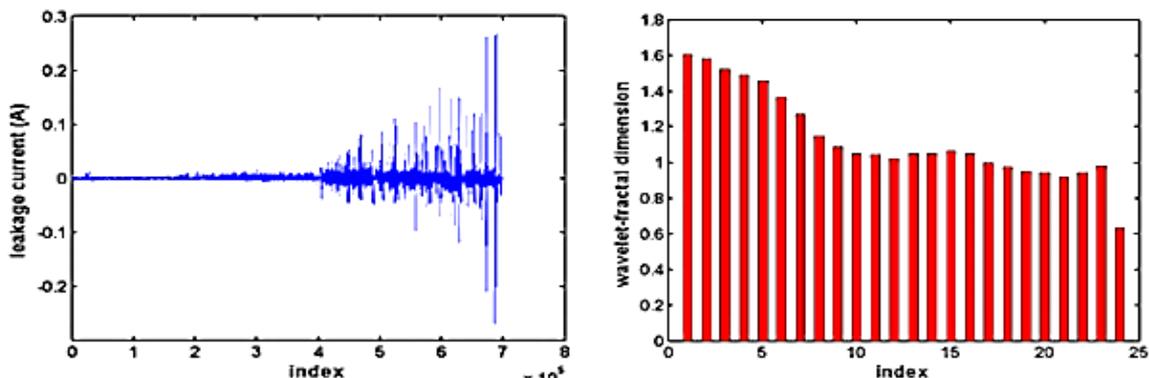


Figure I.9. Courant de fuite et sa représentation ondelette-fractale correspondante (ESDD = 0,1 mg/cm^2)

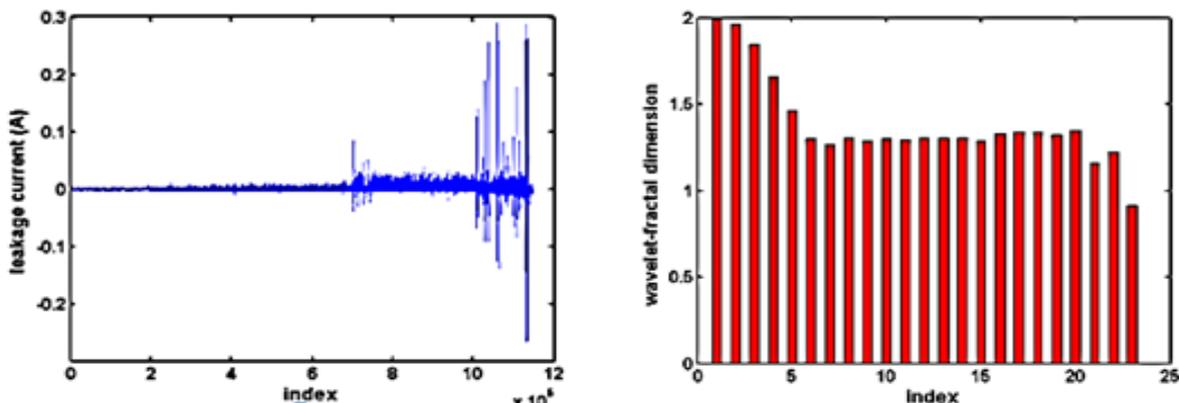


Figure I.10. Courant de fuite et sa représentation ondelette-fractale correspondante (ESDD = 0,15 mg/cm²)

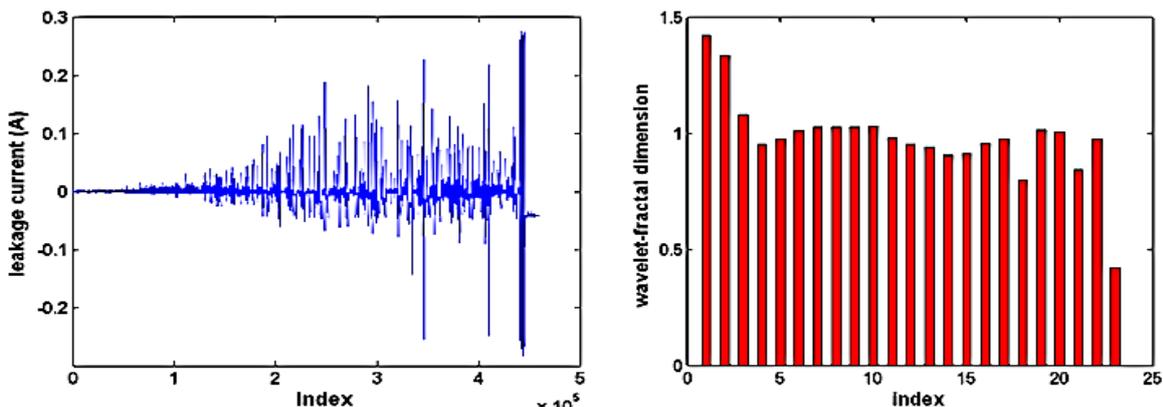


Figure I.11. Courant de fuite et sa représentation ondelette-fractale correspondante (ESDD = 0,2 mg/cm²)

Les auteurs ont conclu que la valeur de la dimension fractale des détails de la représentation en ondelettes du courant de fuite diminue avec l'augmentation du niveau de pollution ESDD. Dans la phase initiale, la couche de pollution est faiblement humidifiée avec une étincelle et une lueur de décharge non localisée, donc la dimension ondelette-fractale correspondante diminue uniformément.

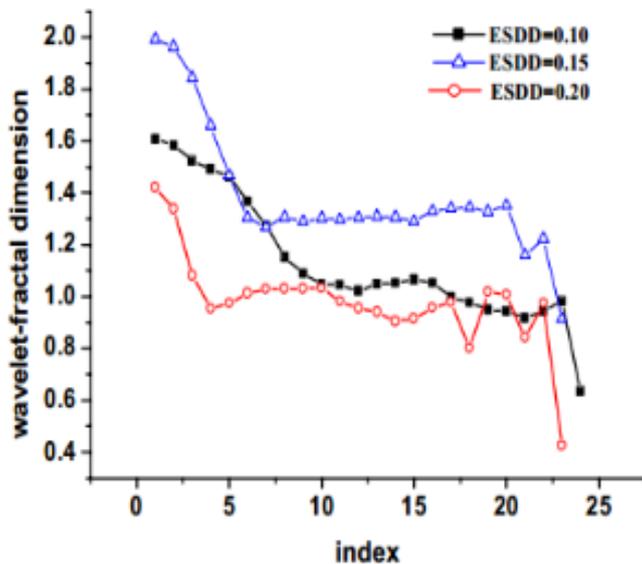


Figure I.12. Représentation ondelette-fractale du courant de fuite pour différentes ESDD

Les trois courbes de la dimension fractales des représentations d'ondelettes du courant de fuite sont montrées sur la figure I.12. Il est noté qu'avec l'augmentation du courant de fuite, la dimension d'ondelette-fractale présente une tendance évidente à la baisse. Cette baisse est variable dépendamment de l'étape de progression des décharges sur la surface isolante avant le contournement. En effet, cette décroissance est d'abord uniforme au cours de la phase initiale, puis stable durant l'étape intermédiaire et enfin rapide tout au long de l'étape finale. En outre, la dimension ondelette-fractale diminue fortement lorsque le courant de fuite augmente intensément. Ceci montre que la dimension ondelette-fractale, à base du signal du courant de fuite, décrit efficacement les informations des décharges électriques.

I.4. Analyse fractale pour l'étude des streamers dans un isolateur liquide sous une tension de choc de foudre

Dans cet article [13], les chercheurs se sont intéressés à étudier le phénomène de streamer dans les isolateurs liquides, plus précisément celui d'ester, en utilisant la dimension fractale.

Les tests de pré-dégradation de l'isolateur liquide synthétique ester (de type Midel-7131) ont été effectués en utilisant des électrodes planes sous tension de choc de foudre standard 1,2/50 μ s. La distance entre les électrodes a été fixée à 50 mm. La tension appliquée était alors augmentée progressivement de 10 kV (tension de l'apparition des streamers) jusqu'à l'apparition du claquage. En dessous de la tension de claquage, les streamers apparaissent et se propagent, mais s'arrêtent finalement sans atteindre la seconde électrode. Avec l'aide d'une caméra à grande vitesse multi-images, tout le processus de propagation de streamer a été enregistré image par image.

I.4.1. Dimension fractale en fonction du temps de propagation

La figure I.13 montre un processus typique de propagation de streamer sous une tension appliquée de -110 kV. Une fois initié, le streamer se propage continuellement et s'arrête finalement à environ 28 μ s d'une longueur de 20,26 mm de l'électrode de départ. L'image qui contient les streamers originales est, par la suite, convertie en image binaire, pour faciliter la mise en application de l'analyse fractale de cette dernière.

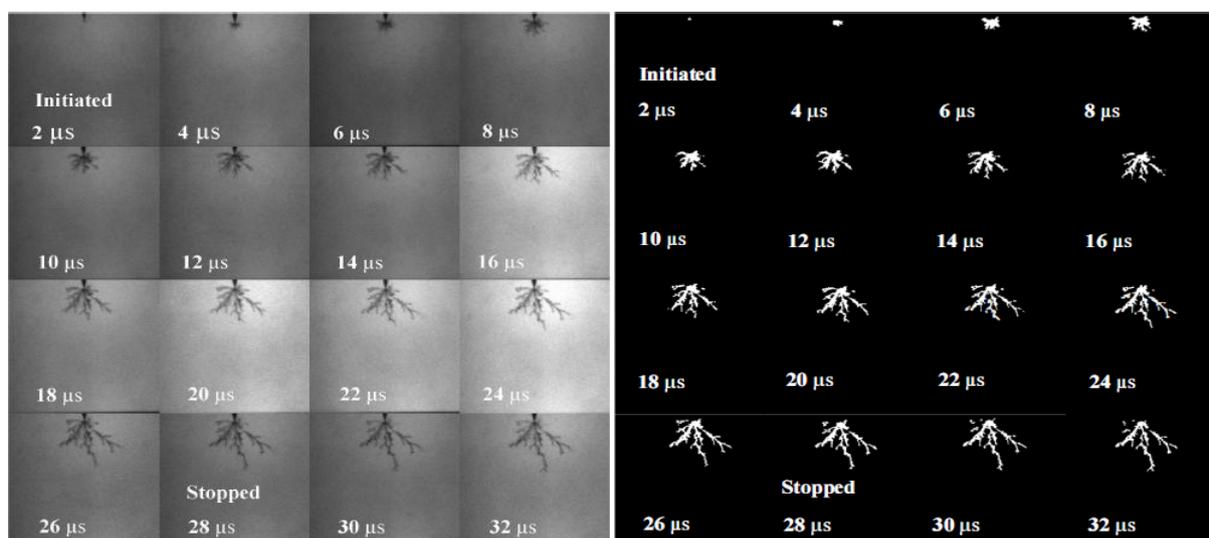


Figure I.13. Progression des streamers pendant 28 μ s, ainsi que l'image correspondante en binaire

Chaque image binaire contient 512×512 pixels. En couvrant, par des boîtes de longueur r ($r = 512, 256, 128, \dots, 1$ pixels), la dimension fractale sera la pente de $\ln(N(r))$ en fonction de $\ln(r)$ où $N(r)$ est le nombre de boîtes. Les résultats sont donnés comme suit :

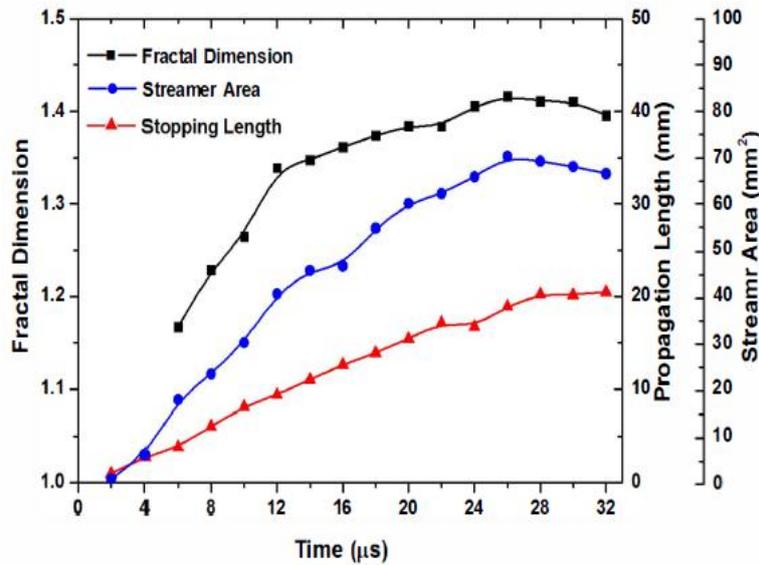


Figure I.14. Dimension fractale, surface et longueur de propagation des streamers en fonction de temps

La figure I.14 montre la variation de la dimension fractale, la propagation de la longueur et la surface des streamers en fonction du temps. Il est à noter que la dimension fractale des streamers augmente avec l'apparition de plusieurs branches de streamers, donc l'augmentation de la longueur et la surface des streamers. Après un certain temps, la longueur et la surface des streamers continuent à augmenter, mais elles gardent toujours la stabilité de la forme, ce qui résulte en l'augmentation lente de la dimension fractale.

I.4.2. Dimension fractale en fonction de la tension appliquée

La figure I.15 représente les images de streamers engendrés par différentes tensions négatives appliquées ($-90, -110$ et -130 kV), avec une longueur totale de $13,50$ mm, $20,26$ mm, $28,37$ mm respectivement.

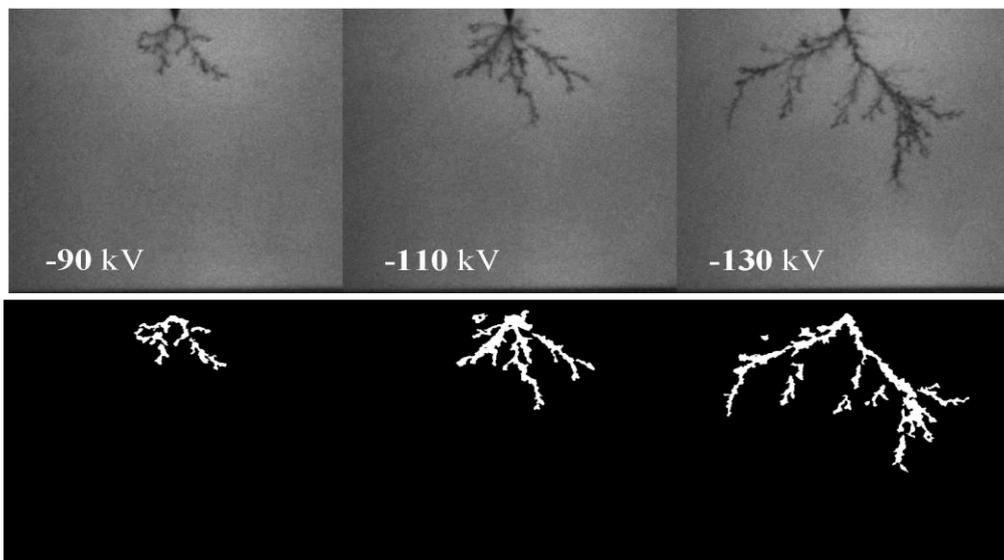


Figure I.15. Images des streamers de différentes tensions d'applications et leurs formes binaires

Les mêmes processus cités dans le paragraphe précédent sont appliqués sur les images binaires (Figure I.15) afin d'en extraire les dimensions fractales. Les résultats sont exposés comme suit :

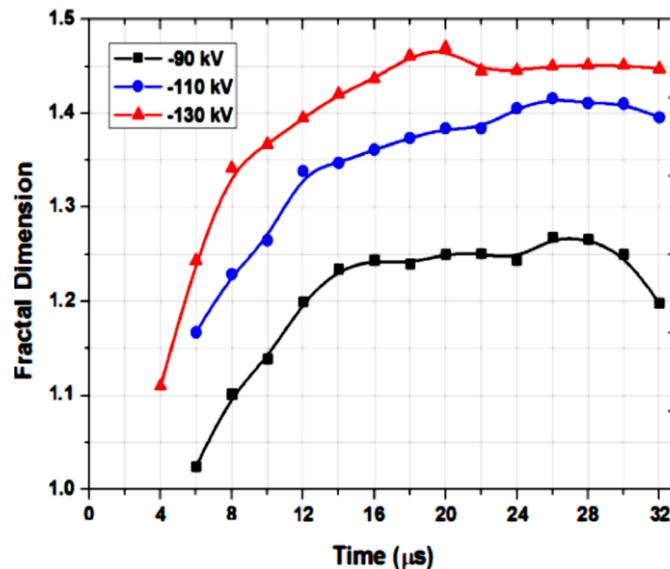


Figure I.16. Dimension fractale sous diverses tensions en fonction du temps de propagation

La figure I.16 montre que la dimension fractale prend des valeurs élevées dans le cas des tensions -110 kV et -130 kV, mais se stabilise dans le cas -90 kV.

Dans cette étude, les auteurs ont mis en avant la relation entre la dimension fractale et le temps de diffusion des streamers. En effet, la dimension fractale augmente avec le temps et la valeur de la tension négative d'application du choc de foudre.

Conclusion

Compte tenu des risques résultants de l'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 majoritairement sur les méthodes de traitement de signal.

Parmi les méthodes les plus usuelles, nous citons l'analyse fractale, appliquée sur le signal temporel directement ou sa transformée en ondelettes. Le signal le plus utilisé, dans le cas des isolateurs, est celui 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, couramment employées, dans le domaine de la haute tension et spécialement dans celui de la pollution des isolateurs.

Chapitre II

THEORIE DES FRACTALES

Introduction

Avant de passer à l'utilisation des fractales, il va de soi, qu'il faut d'abord définir les principes et méthodes de bases de l'analyse par fractales. De ce fait, ce premier chapitre, vise à exposer la théorie des fractales, de son invention, en passant par son évolution, jusqu'à son utilisation actuelle.

II.1. Définitions et histoire des fractales

Formalisé vers le milieu des années 1970 par Benoit Mandelbrot [14], le terme « fractal » vient du latin « fractus » qui signifie brisé ou irrégulier [14]. La géométrie fractale sert à décrire les objets très irréguliers de la nature, dont les formes laissent néanmoins apparaître des motifs similaires à des échelles d'observation de plus en plus fines [15], tels que : arbre, flocon de neige, voire même une décharge ou un arc électrique...etc. Une structure fractale se reproduit identiquement à elle-même qu'elle soit vue de près comme de loin. Il existe de nombreux objets de la nature, de tailles physiques très différentes, qui peuvent être décrits par les fractales. Cette représentation a donc rapidement mené à des applications dans plusieurs domaines, aussi divers que la géologie et le biomédical [16]. Elle a également des applications plus rapprochées de notre spécialité, notamment dans le domaine de l'électrotechnique où, en moins d'une décennie, elle s'est positionnée comme outil efficace de diagnostic.

II.1.1. Objet fractal dans la nature

Des formes fractales approximatives sont facilement observables dans la nature. Ces objets ont une structure auto-similaire sur une échelle étendue, mais finie, telles que les nuages, les flocons de neige, les montagnes, les réseaux de rivières, le chou-fleur ou le brocoli et les vaisseaux sanguins.

Les arbres et les fougères sont de nature fractale et peuvent être modélisés par ordinateur à l'aide d'algorithmes récursifs (Figure II.1). La nature récursive est évidente dans ces exemples, la branche d'un arbre ou la fronde d'une fougère sont des répliques miniatures de l'ensemble : pas identiques, mais de forme similaire.

A une distance de soixante kilomètres, le contour des montagnes, tout en étant irrégulier, est facilement reconnaissable. A mesure que l'on s'en approche, le nombre de détails augmente et même lorsque l'on en commence l'escalade, on distingue le même schéma d'irrégularité et de détails dans chacun des rochers. La surface d'une montagne peut être modélisée sur ordinateur en utilisant une fractale [17] : prenons un triangle dans un espace tridimensionnel dont nous connectons les milieux de chaque côté par des segments, il en résulte quatre triangles. Les points centraux sont ensuite déplacés aléatoirement vers le haut ou le bas, dans un rayon défini. La procédure est répétée, diminuant le rayon de moitié à chaque itération. La nature récursive de l'algorithme garantit que le tout est statistiquement similaire à chaque détail.

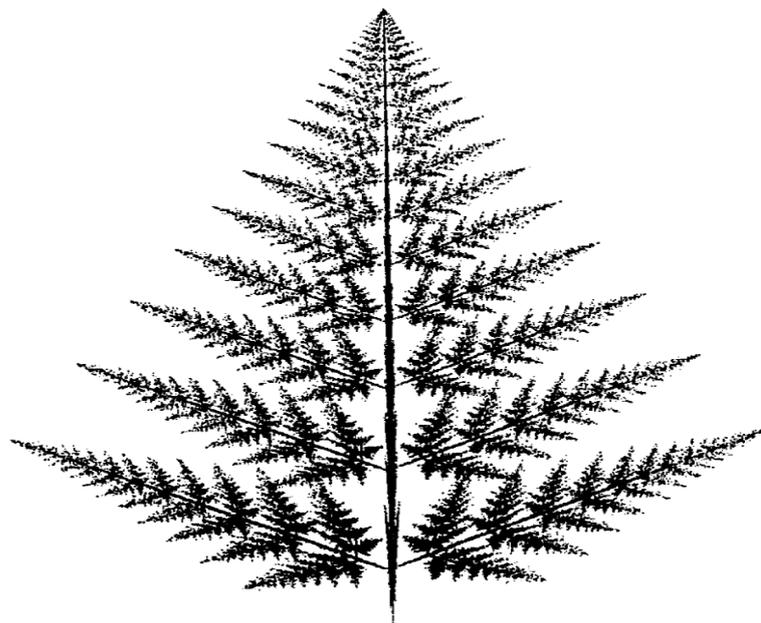


Figure II.1. Fougère modélisés par ordinateur à l'aide d'un algorithme récursif [18]

Enfin, la circulation du sang dans notre organisme, les branchements répétés des veines et des artères peuvent paraître chaotiques. Néanmoins, une étude plus détaillée démontre de manière évidente que ces mêmes branchements complexes se répètent dans des vaisseaux sanguins de plus en plus petits, jusqu'aux capillaires [19].

II.2. Domaines d'application

Les domaines d'application des fractales sont très nombreux, on peut citer en particulier [20] :

- Biologie : répartition des structures des plantes, bactéries, feuilles, branches d'arbres...
- Médecine : structure des poumons, intestins, battements du cœur.
- Météorologie : nuages, vortex, banquise, vagues scélérates, turbulences, structure de la foudre.
- Volcanologie : prévision d'éruptions volcaniques, tremblements de terre.
- Astronomie avec la description des structures de l'univers, cratères sur la Lune, répartition des exo-planètes et des galaxies...
- Sciences humaines : évolution de la démographie.
- Economie et finance : prévision des krachs boursiers, (théorie du « multi-fractal »).
- Electronique : antennes larges bandes des téléphones portables, la figure II.2 représente une antenne fractale, qui utilise la propriété d'autosimilarité de la géométrie fractal dans le but de réaliser une antenne multifréquence, parmi plusieurs fractale, la fractale de Hilbert remplit beaucoup d'espace, donc permet de capter une large bande de fréquence.

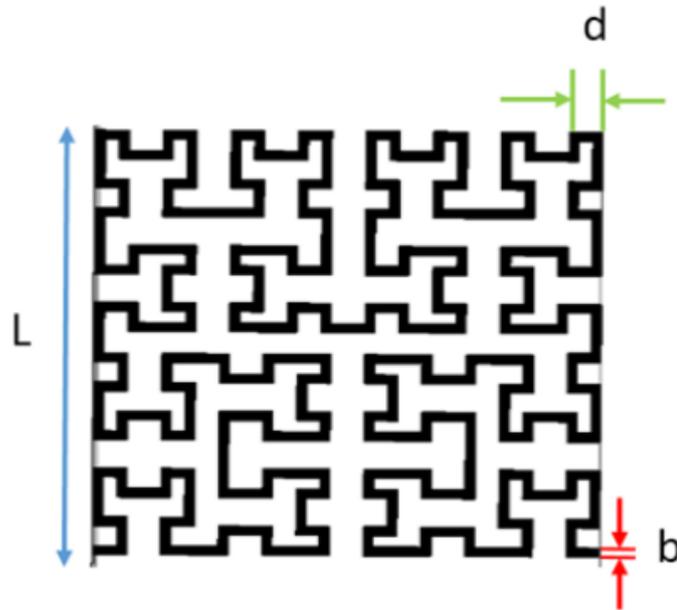


Figure II.2. Antenne fractale dont la géométrie est basée sur la fractale de Hilbert, L : dimension latérale, d : segment de ligne et b : diamètre du conducteur [21]

Tous ces domaines (et bien d'autres) peuvent bénéficier de la description et d'une modélisation en termes fractales des phénomènes associés.

II.3. Courbes fractales

Nous sommes tous habitués aux objets de la géométrie euclidienne : aux droites, aux rectangles, aux cubes, etc... Ils nous permettent de décrire simplement ce que l'on trouve dans la nature. Mais, face à des objets plus complexes tels que les nuages, les feuilles, un flocon de neige, la géométrie euclidienne est inadéquate, on fait donc appel à la géométrie fractale. Cette dernière est donc un langage utile pour décrire les courbes fractales, et permet la description de processus non linéaires. La complexité des formes des courbes fractales, résulte généralement de processus simples mais souvent récursifs. Ainsi c'est grâce à l'informatique que l'étude des fractales s'est développée [22].

Pour mieux comprendre les courbes fractales, il faut d'abord comprendre la notion de l'autosimilarité de ces dernières, on peut créer ces courbes à partir d'un segment de droite (courbe de Koch) à l'aide d'un algorithme récursif, en modifiant récursivement chaque segment de droite de la façon suivante [23] :

- On divise le segment de droite en trois segments de longueurs égales ;
- On construit un triangle équilatéral ayant pour base le segment médiane de la première étape ;
- On supprime le segment de droite qui était la base du triangle de la deuxième étape ;

Au bout de ces trois étapes, l'objet résultant a une forme similaire à une section transversale d'un chapeau de sorcière (Figure II.3.B). La courbe de Koch (Figure II.3.E) est la limite des courbes obtenues, lorsqu'on répète indéfiniment les étapes mentionnées ci-avant.

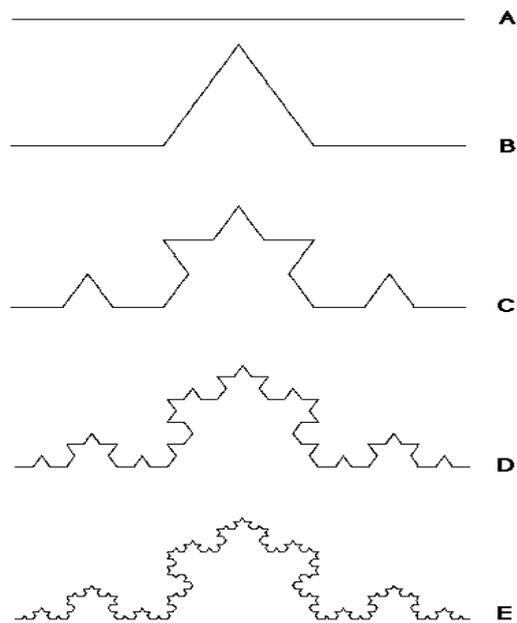


Figure II.3. Courbe de Koch

Une propriété beaucoup plus descriptive des objets fractals est possible, c'est sa dimension, qui permet d'attribuer à la courbe de Koch, ainsi que d'autres courbes. De ce point de vue, la théorie des fractales permet de calculer la dimension fractale. Cette dernière est alors utile pour quantifier un signal donné.

II.4. Définition de la Dimension fractale

La dimension d'une ligne droite, d'un cercle et d'une courbe régulière est de 1. Une fois que le sens et l'origine sont choisis, chaque point de la courbe peut être remplacé par un nombre, qui définit la distance entre l'origine et le point. Le nombre est pris négativement s'il faut se déplacer dans le sens opposé à celui choisi au départ. La dimension d'une figure simple dans le plan est de 2. Une fois un repère défini, chaque point de la figure peut être déterminé par deux nombres. La dimension d'un corps simple dans l'espace est de 3.

Nous sommes donc habitués à des objets dont la dimension d est un nombre entier 1, 2 ou 3. On peut aussi définir le nombre de dimensions d'un espace à partir des propriétés géométriques des objets qui le constituent, c'est ce qui permet de généraliser cette notion de dimension à des nombres non entiers. On peut, par exemple, parler d'un espace de dimension 2.5 alors même que cette valeur est impensable lorsqu'on a en tête un nombre de coordonnées [24].

En géométrie fractale, la dimension fractale, d , est une grandeur qui a vocation de traduire la façon qu'a un ensemble fractal de remplir l'espace, à toutes les échelles. Dans le cas des fractales, elle est non entière. La notion de dimension fractale est intrinsèque à l'objet que l'on considère [25]. Cette notion de dimension fractale s'applique aux objets invariants d'échelle, quand on change l'échelle d'observation d'un objet invariant d'échelle, on conserve les formes.

Le terme dimension fractale est un terme générique qui recouvre plusieurs définitions. Chacune de ces définitions peut donner des résultats différents selon les principes et notions

considérés. Il est donc essentiel de définir le type (ou la méthode de calcul) de la dimension fractale avant de passer à son utilisation. Les définitions les plus courantes sont [18] :

d_t : est la dimension topologique de l'ensemble

d_c : est la dimension de corrélation de l'ensemble

d_i : est la dimension d'information de l'ensemble

d_h : est la dimension de Hausdorff de l'ensemble (ou dimension d'homothétie)

d_{box} : est la dimension de Minkowski de l'ensemble ('box-counting')

d_d : est la dimension "divider" de l'ensemble

Une figure telle qu'une fractale n'est pas simple. Sa dimension n'est plus aussi facile à définir et n'est plus forcément entière. Pour comprendre le calcul de la dimension fractale, nous allons étudier le cas d'une autosimilarité exacte, prenant comme un exemple une fractale S . Cette fractale est formée de répliques d'elle-même en plus petit, sa dimension fractale peut se calculer comme suit :

$$d = \frac{\ln(n)}{\ln(h)} \quad (II.1)$$

La fractale de départ est formée de n exemplaires dont la taille a été réduite d'un facteur h . Un exemple de la dimension fractale du côté de la courbe de Koch (figure II.2), dont elle est formée de $n = 4$ d'exemplaires de lui-même réduit d'un facteur $h = 3$. Sa dimension fractale vaut :

$$d = \frac{\ln(4)}{\ln(3)} = 1.2618595 \dots \quad (II.2)$$

Il existe dans certains cas simples des méthodes pouvant déterminer analytiquement la dimension fractale d'une fractale S , à partir de sa description géométrique. C'est cette approche que nous privilégierons dans la suite pour mieux comprendre les liens entre géométrie et dimension.

II.5. Types de dimension fractale

II.5.1. Méthode des boules disjointes

La méthode des boules disjointes consiste à recouvrir une fractale S par le maximum de disques $B(\varepsilon)$ disjoints de rayon ε (Figure II.4). Elle est très peu utilisée car sa mise en œuvre est lourde [26]. Soit $N(\varepsilon)$, ce nombre maximum, la dimension fractale est donnée par :

$$dim_b(S) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)} \quad (II.3)$$

Cette méthode implantée sur ordinateur permet de calculer facilement la dimension fractale. Mais elle est peu précise car il est rare d'obtenir un bon alignement des points sur le

graphique [29]. Comme toute autre méthode basée sur la dilatation, elle ne peut pas s'appliquer pour des courbes remplissant le plan, comme par exemple des vaisseaux sanguins, car la dilatation des cercles fournira toujours la même surface, soit le plan en entier.

C'est une méthode très peu utilisée dans la pratique. Parmi l'utilisation de la méthode des boules disjointes la reconnaissance de la texture par image afin de disposer un nombre de paramètres plus important pour la détermination de la nature de la texture et leurs matières [38]. Ce type de méthode a des inconvénients dans le traitement d'un vecteur d'une dimension car elle est basée sur deux implémentations possibles soit sur le volume ou bien la surface. Dans notre travail, vu que nous allons étudier les signaux temporels du courant de fuite et de la tension appliquée, cette méthode n'est pas la bonne solution à préconiser pour notre analyse.

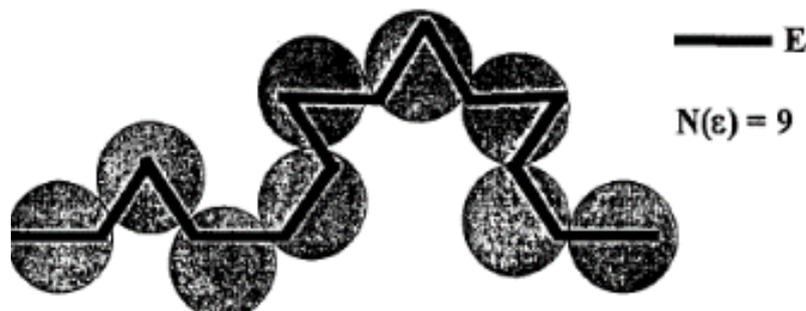
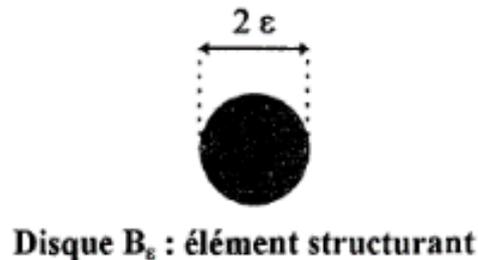


Figure II.4. Recouvrement par des disques disjoints

II.5.2. Dimension masse-rayon

La masse $M(L)$ de la structure incluse dans une série de cercle $C(L)$ concentrique (Figure II.5), de rayon L , d'origine x_0 et de dimension d (d étant la dimension de l'espace ou est plongé l'ensemble) est mesurée [29].

La dimension fractale d_{mr} est donnée par la relation suivante :

$$d_{mr} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\log(M(L))}{\log(L)} \quad (II.4)$$

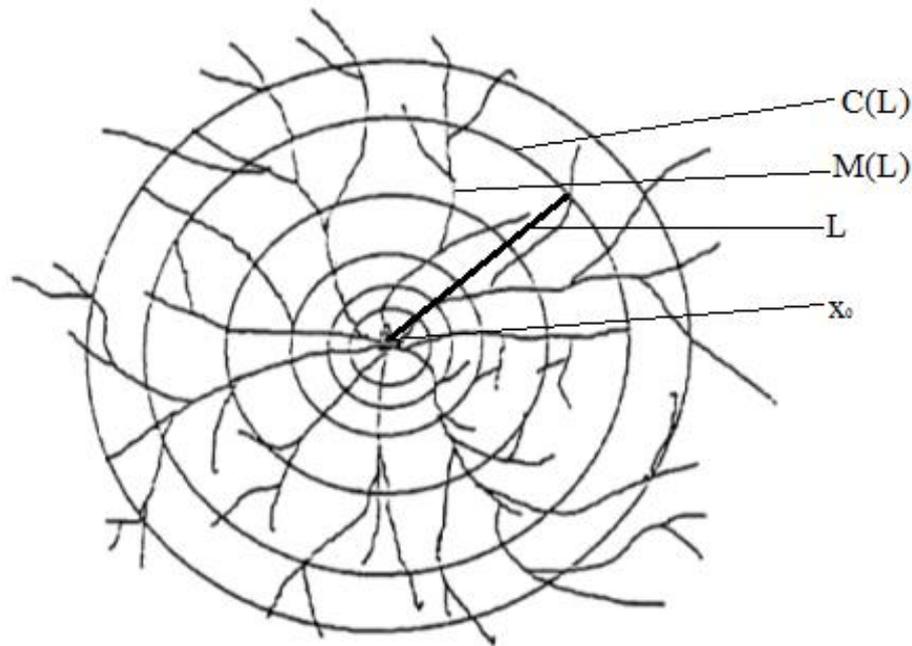


Figure II.5. Mesure de la dimension fractale par la relation entre masse et rayon

Cette méthode est utile pour des structures grandissant d'un point bien spécifique (racine ou noyau) et qui sont auto-similaires. Théoriquement, la dimension fractale ainsi calculée ne dépend pas du point à partir duquel les mesures sont faites (le centre x_0). Cependant, cette dimension est considérée comme une dimension locale car elle est définie à partir d'un seul point. Pour calculer la dimension globale de la structure, il est recommandé de varier le point x_0 et faire une moyenne des dimensions obtenues.

II.5.3. Méthode du spectre de puissance

Pentland [32] a proposé une méthode d'évaluation de la dimension fractale d'un signal. La méthode du spectre de puissance est largement utilisée en science des matériaux. Elle exige que la fonction f soit définie sur $[0, +\infty[$, ou tout du moins sur un intervalle de grande longueur. La décomposition spectrale de la fonction, selon les procédés classiques de la théorie du signal est :

$$P_f(w) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_0^T e^{-iwx} f(x) \cdot dx \right|^2 \quad (II.5)$$

A partir de l'algorithme de Transformée de Fourier Rapide (FFT) d'une courbe fractale, on obtient son spectre de puissance, c'est à dire le carré de l'amplitude du module $P_f(w)$ pour une fréquence w donnée. Dès lors, la dimension fractale est estimée à partir de la pente α de la droite obtenue par régression linéaire dans le plan $\{\ln(w), \ln(P_f(w))\}$ par la relation :

$$D = \left(\frac{3-\alpha}{2}\right) \quad (II.6)$$

La méthode de spectre de puissance est une méthode utilisée généralement dans le domaine de traitement de signal de haute fréquence représenté dans l'espace fréquentiel [31-32]. Comme notre signal traité est de 50 HZ, cette méthode est moins précise et peut fausser notre analyse sur le signal à base fréquence.

II.5.4. Méthode de box-counting

En géométrie fractale, la dimension de box-counting, aussi appelée dimension de Minkowski-Bouligand, est une manière de déterminer la dimension fractale d'un sous-ensemble S dans un espace euclidien \mathbb{R}^n ou, plus généralement, dans un espace métrique.

Pour calculer cette dimension pour une fractale S , placer cette fractale dans un réseau carré et compter le nombre de cases nécessaires pour recouvrir l'ensemble. La dimension de Minkowski est calculée en observant comment ce nombre de cases évolue à mesure que le réseau s'affine à l'infini.

Supposons que $N(\varepsilon)$ soit le nombre de cases de côté ε nécessaires pour recouvrir l'ensemble (Figure II.6). Alors la dimension de Minkowski est définie par :

$$\dim_{\text{box}}(S) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)} \quad (\text{II.7})$$

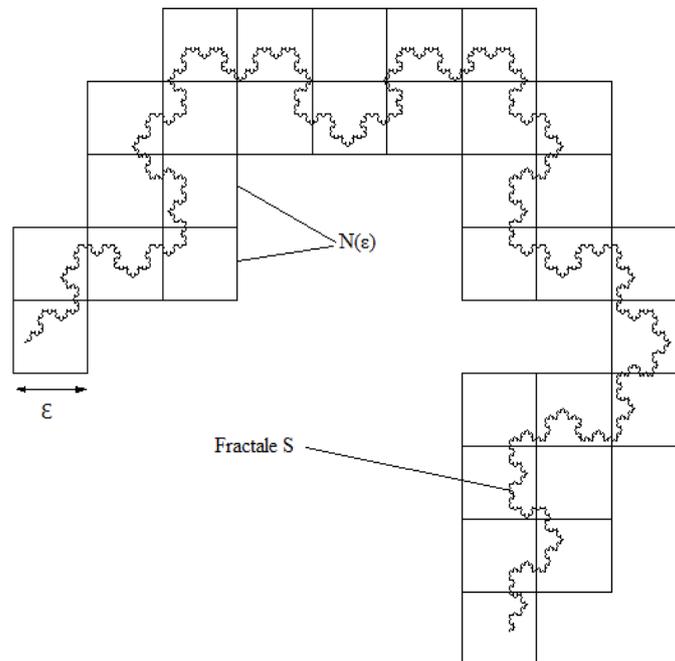


Figure II.6. Méthode de box-counting appliqué sur la courbe de Koch

Cette méthode est la plus utilisée dans le calcul de dimension fractale car elle est très simple, facilement implantable sur ordinateur et très versatile. Elle permet de mesurer la dimension de structures irrégulières. En effet, la méthode de box-counting ne tient pas compte des chevauchements d'une courbe, cette méthode est utilisée dans plusieurs domaines (biologie, médecine, imagerie, informatique, le graphisme, traitement d'image et de signal.....etc.), [33-34].

Dans notre présent travail, compte tenu de la nature des signaux temporels du courant de fuite et de la tension appliquée, nous allons utiliser la méthode box-counting pour calculer la DF. Il est aussi important de noter que cette méthode est, de loin, la plus utilisée sur ce type de signaux (voir chapitre I de travaux antérieurs).

Cette méthode peut être appliquée sur le traitement d'image [35], en transformant le signal bidimensionnel, ou matrice, de l'image en deux signaux, ou vecteurs, unidimensionnel [36], tel qu'exposé dans le paragraphe 4 du chapitre I.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière succincte des notions de base sur la théorie fractale, ainsi que des diverses et nombreuses méthodes de calcul de la dimension fractale. A partir de ces méthodes, nous avons opté pour l'outil box-counting pour mettre en œuvre notre étude. En effet, cette méthode nous permettra par la suite d'élaborer un algorithme pour calculer la dimension fractale du signal du courant de fuite, et de la tension appliquée d'un isolateur pollué.

La méthode de box-counting est la méthode la plus fréquemment utilisée pour le calcul de la dimension fractale. Très simple de mise en œuvre, elle peut être préconisée sur n'importe quel ensemble, sans jamais avoir des boîtes disjointes ou adjacentes, comme dans le cas du recouvrement par des disques ou par des formes quelconque.

Chapitre III

**ALGORITHME DE CALCUL DE
LA DIMENSION FRACTALE**

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à élaborer un algorithme pour calculer la DF en utilisant la méthode de box-counting. Cet algorithme sera appliqué sur des signaux échantillonnés (courant de fuite, tension appliquée puis charge, au cours du prochain chapitre IV), relevés suite à des essais sur un modèle d'isolateur plan de haute tension. L'algorithme que nous avons mis en place sera validé par le signal connu de Weierstrass, qui possède une dimension fractale bien connue.

III.1. Algorithme de calcul de la DF par la méthode de box-counting

Il existe de nombreuses définitions de la DF et de multiples algorithmes sont disponibles pour les calculer, dépendamment du type de signal étudié [27-37] la méthode de box-counting est l'une des plus préconisées, à cause de sa simplicité et de son efficacité pour l'étude des signaux temporels [40]. La dimension de box-counting est définie par la notion de remplissage de l'espace d'une courbe (représentative du signal). Dans cette approche, la courbe est recouverte d'un ensemble de box (de forme carrée). Le nombre de ces box est compté pour voir combien d'entre elles sont nécessaires pour couvrir complètement la courbe du signal étudié. Parmi les différents algorithmes [39] de calcul de la DF par la méthode de box-counting, nous citons :

III.1.1. Algorithme de Katz

Le calcul de la DF proposé par Katz [40] est décrit comme le rapport de la longueur d'un signal L (calculé par la somme des distances Euclidiennes entre deux points successifs) divisé par la distance maximale d (c'est-à-dire, la distance Euclidienne entre le premier et le dernier point du signal). Donc, la DF sera donnée par la formule suivante :

$$DF = \frac{\log(L)}{|\log(d)|} \quad (III.1)$$

Cet algorithme peut être utilisé avec succès dans l'analyse de la réponse impulsionnelle des signaux acoustiques dans une salle [40]. Mais il est moins précis comparé à d'autres algorithmes qui seront ultérieurement cités. Par ailleurs, R. Dubravka et al [41] ont consacré toute une recherche en proposant d'utiliser la DF par l'algorithme de Katz pour l'analyse des réponses impulsionnelles des signaux acoustiques dans une pièce. Ils ont trouvés que la DF de Katz est plus petites avec moins de fluctuations dans les signaux. Aussi, ils ont constaté que la DF peut être par la suite utilisée avec succès pour l'évaluation des propriétés acoustiques de la pièce avec réponse impulsionnelle.

III.1.2. Algorithme de Higuchi

L'algorithme de Higuchi [44] estime la DF d'une série temporelle discrète X en calculant, pour plusieurs valeurs de k entières, les quantités $\langle L(k) \rangle$ (moyenne sur m points des coefficients $L_m(k)$) qui sont définis par l'équation suivante :

$$L_m(k) = \frac{N-1}{\left[\frac{N-m}{k}\right]k^2} \sum_{i=1}^{[(N-m)/k]} [X(m+ik) - X(m+(i-1)k)] \quad (III.2)$$

Si la série X est de dimension fractale (DF), alors :

$$DF = \frac{\log(L(k))}{\log(k)} \quad (III.3)$$

Cet algorithme est un peu compliqué, mais ça n'empêche pas de le retrouver dans un certain nombre de travaux de recherche, surtout en médecine [43-44], pour traiter les signaux de l'Électroencéphalographie (EEG), afin de déceler les patients porteurs de pathologies médicales.

III.1.3. Algorithme de Multi-résolution MRBC

L'algorithme de Multi-résolution (Multiresolution Box-Counting Method « MRBC ») est très simple, robuste et efficace. Il est basé sur le comptage du nombre de box pour couvrir entièrement un signal, en calculant la DF à plusieurs résolutions. La figure III.1 montre un signal sinusoïdale présenté à trois résolutions temporelles successives, (a) à la résolution temporelle la plus fine $r = T_e$, (b) à la résolution temporelle $r = 2T_e$ et (c) à la résolution temporelle $r = 3T_e$. L'approche du calcul de la DF du signal est généralement estimée par la valeur moyenne pour toutes les résolutions, ou bien par la méthode du moindre carré [45].

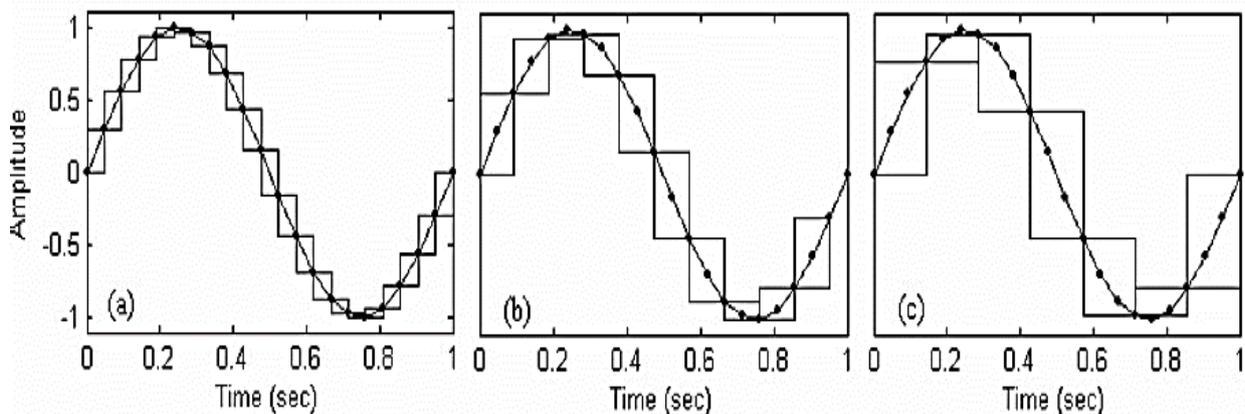


Figure III.1. Approche multi-résolution de comptage des box pour un signal sinusoïdal aux résolutions temporelles : (a) la plus fine $r = T_e$, (b) $r = 2T_e$ et (c) $r = 3T_e$

Pour comparer la performance de cet algorithme avec d'autres algorithmes (à savoir l'algorithme de Katz), B. S. Raghavendra et al [39] ont utilisé des signaux qui ont des DF bien connues comme par exemple le signal de Knapp [46], en traçant un graphique de DF calculée par ces algorithmes par rapport à DF réelle. L'algorithme de MRBC proposé a montré une performance supérieure de l'estimation de la DF que les méthodes de Katz, alors que les résultats de précision sont comparables à ceux de la méthode de Higuchi.

De plus, l'algorithme de MRBC a pris moins de temps pour calculer la DF par rapport à la méthode de Higuchi. La méthode de Katz a montré des performances médiocres dans l'estimation de la DF. Les auteurs (B. S. Raghavendra et al [39]) ont également observé à partir

des résultats, que la méthode de Higuchi a pris plus de temps pour calculer la DF des signaux temporels de grande longueur.

En vue de cela, nous proposons d'utiliser et d'adapter l'algorithme de MRBC durant notre étude, en appliquant ce dernier sur les signaux de courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge, afin de réaliser un diagnostic fiable de l'état de surface d'un isolateur pollué.

Dans cette section, nous allons expliquer l'algorithme de MRBC en détails. L'approche considérée est décrite comme suit. En premier lieu, nous considérons un signal discret L , de période d'échantillonnage T_e , étendu sur un intervalle T . En second lieu, il faut recouvrir le signal par des box de même taille de longueur r , c'est ce qu'on appelle sa résolution [47] et compter le nombre $N(r)$ de toutes ces box. Enfin, la DF de ce signal est définie par l'équation [48] :

$$DF = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log(N(r))}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (III. 4)$$

De ce fait, L'algorithme de MRBC consiste à trouver une longueur totale L_t , qui recouvre l'ensemble du signal. Cette longueur sera divisée par la résolution r du box, le résultat de ce dernier sera le nombre $N(r)$.

A travers cet algorithme, plusieurs étapes sont utilisées, comme le schématise la figure III.2. Afin de faciliter la compréhension de cet algorithme au lecteur, l'explication de chaque étape est donnée comme suit :

- 1- Nous faisons l'acquisition du signal L , qui sera l'objet du calcul de la DF.
- 2- La longueur totale L_T du signal L est mesurée en appliquant la somme de la différence entre la valeur du point le plus haut $\max(L)$ et le point le plus bas $\min(L)$ pour n segments de taille r (on prend tous l'intervalle T).

$$L_T = \sum_{i=1}^{n-1} |L(i+1) - L(i)| \quad (III. 5)$$

- 3- Pour obtenir le nombre total de box $N(r)$ qui couvrent tous le signal, on divise la longueur totale L_T qu'on a déjà calculée par la résolution r .

$$N(r) = \frac{L_T}{r} \quad (III. 6)$$

- 4- La DF pour la résolution r est donnée par la formule suivante :

$$DF_r = \frac{\log(N(r))}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (III. 7)$$

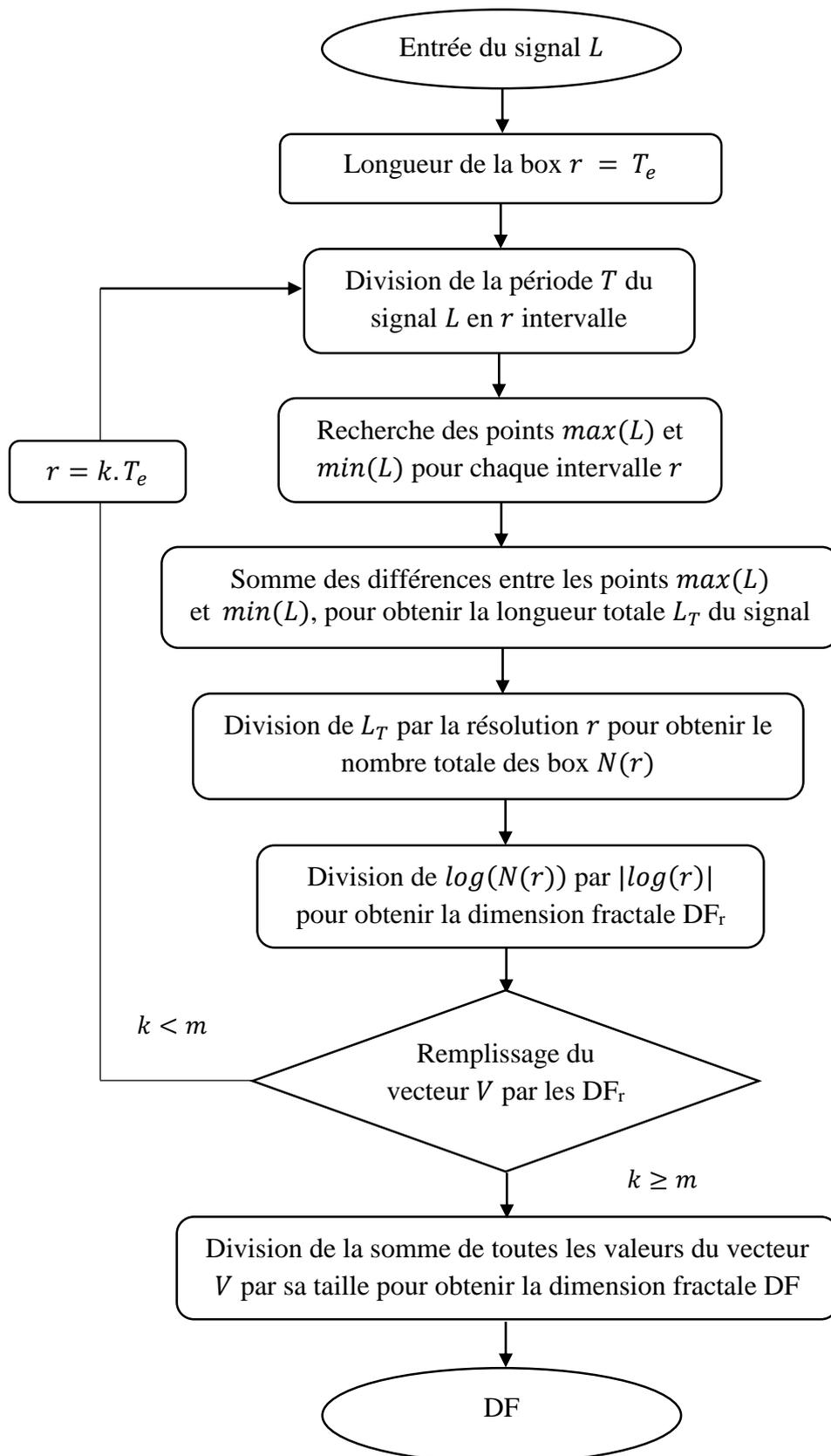


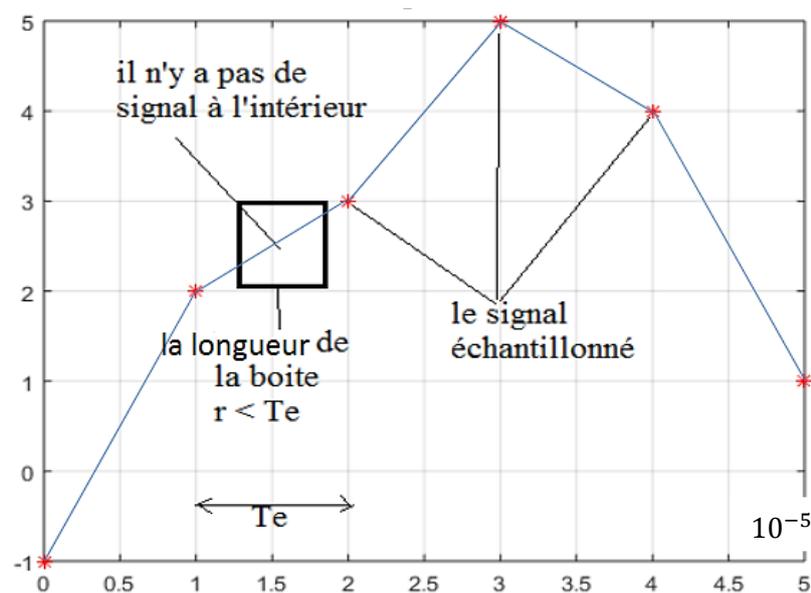
Figure III.2. Elaboration d'algorithme de calcul de la DF du signal par la méthode du box-counting.

- 5- Nous considérons le signal à la prochaine résolution de temps, en multipliant la période d'échantillonnage par un facteur k . Cela signifie que nous laissons tous les points alternatifs sur le signal pour obtenir une résolution temporelle $r = k.T_e$. Maintenant, la résolution de la box considérée pour recouvrir le signal est r . Les mêmes étapes décrites précédemment sont répétées à cette résolution temporelle, partant de $k = 1$ jusqu'à une valeur optimale m , pour avoir un vecteur V de DF de taille m .
- 6- La DF du signal sera la somme des DF pour chaque résolution divisé par m .

Afin d'appliquer et de tester l'algorithme précédemment énoncée, nous avons décidé de créer un code de calcul. Afin d'avoir plus de flexibilité et plus de rapidité d'action, le logiciel MATLAB a été choisi pour accomplir cette tâche. Le choix de la valeur optimale m est choisi sur la base des résultats de l'algorithme. En effet, m est fixé plus tard dans la section de validation de l'algorithme.

Le problème majeur de la méthode de box-counting est la sensibilité aux valeurs extrêmes [49]. Il est donc primordial de souligner que l'utilisation des box de petite ou grande taille est un facteur critique, qui nous permettra d'obtenir un algorithme qui donne des résultats de précision optimale. Un bon choix du nombre de multiplication k de la résolution r est important, et surtout pour les deux valeurs extrêmes $k = 1$ et $k = m$. En effet, si r est trop grand, la résolution du signal s'agrandit et la dimension approche de 0 (équivalente à la dimension d'un point). Alors que, si r est trop petite, la résolution du signal s'amointrit et la dimension devient 1 (équivalente à la dimension d'une ligne) [50].

Tout au long de cet algorithme, nous avons choisis la valeur la plus petite de r comme étant égale à T_e [47]. Ce choix est fait pour garantir que les box sont les plus petites possibles, étant donné que le signal du courant de fuite a une période d'échantillonnage de T_e . Par contre si on considère par exemple que $r < T_e$, on peut avoir des box entre deux points successifs qui n'appartiennent pas au nombre total des box. Ce choix va alors présenter une perte d'informations, comme montré sur la figure III.3.



III.2. Amélioration de l'algorithme

Comme tenu des points soulevés dans le paragraphe précédent, nous avons pensé à améliorer la méthode précédente. L'amélioration consiste à diviser la période d'échantillonnage, d'une ou plusieurs divisions et nous ajoutons un ou bien des points supplémentaires, dans le but d'obtenir plus de détail sur notre signal, donc plus de box à compter et de longueur de box plus petite (figure III.4). L'algorithme reste le même tandis que le nombre de points du signal se multiplie. Le choix du nombre de division sera fixé plus tard dans la section de validation de l'algorithme.

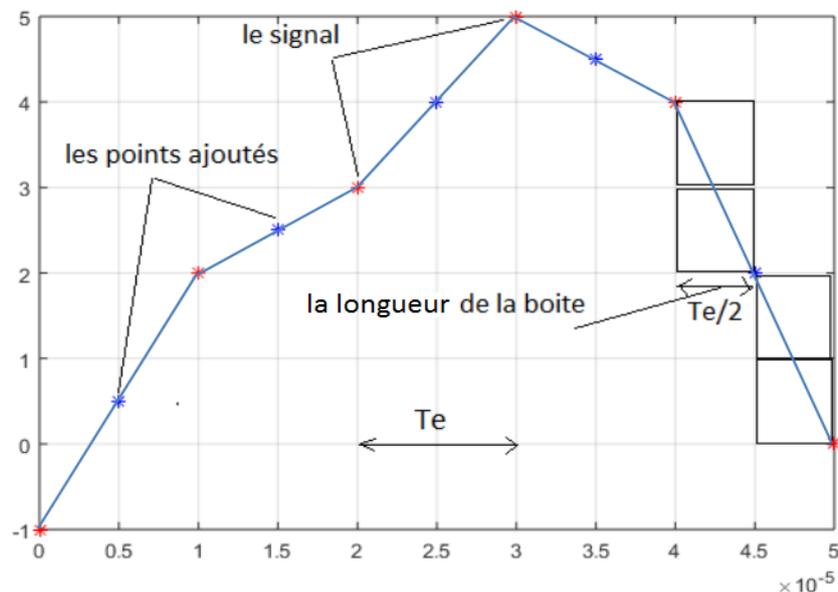


Figure III.4. Signal échantillonné en ajoutant un point supplémentaire entre deux points successifs

III.3. Validation de la méthode

L'algorithme MRBC mise au point est évalué à partir de fonction test de référence (courbe ou signal) dont on connaît la structure mathématique et la DF. Nous présentons ci-après la fonction test de Weierstrass, qui nous servi à comparer la DF obtenu par l'algorithme MRBC avec sa DF réelle et cela dans le but de tester et valider l'efficacité de l'algorithme et de savoir combien de résolution nous avons besoin pour minimiser l'erreur entre les deux dimensions.

La fonction de Weierstrass, fut le premier exemple publié d'une fonction réelle d'une variable réelle qui est continue partout mais dérivable nulle part, la fonction a un comportement fractale, c'est-à-dire n'importe quel zoom ressemble au zoom total.

La validation, sur la base de la fonction de Weierstrass a été sujet de nombreuses études [39-51]. Ce signal a une DF bien connue, alors que ses paramètres sont les suivants [52] :

λ : nombre supérieur à 1 ($\lambda > 1$) qui définit l'allure du signal.

H : paramètre du signal $0 < H < 1$ définit par :

$$H = 2 - DF \quad (III.8)$$

(DF c'est la dimension fractale de la fonction $W(t)$).

N_p : définie par :

$$2\pi\lambda^{N_p} \leq 10^{12} \quad (III.9)$$

$$W(t) = \sum_{k=1}^{N_p} \lambda^{-kH} \cos(2\pi\lambda^k t) \quad (III.10)$$

La figure III.5 présente la fonction de Weierstrass, on choisissant le nombre $\lambda = 2$, le paramètre $H = 0,5$, sa DF est obtenu on appliquant la formule III.8 on trouve $DF = 1,5$ et le nombre de point choisi est $n = 1024$. Pour trouver le nombre maximal de la somme de la formule III.10. On applique la formule III.9 on trouve $N_p < 11$.

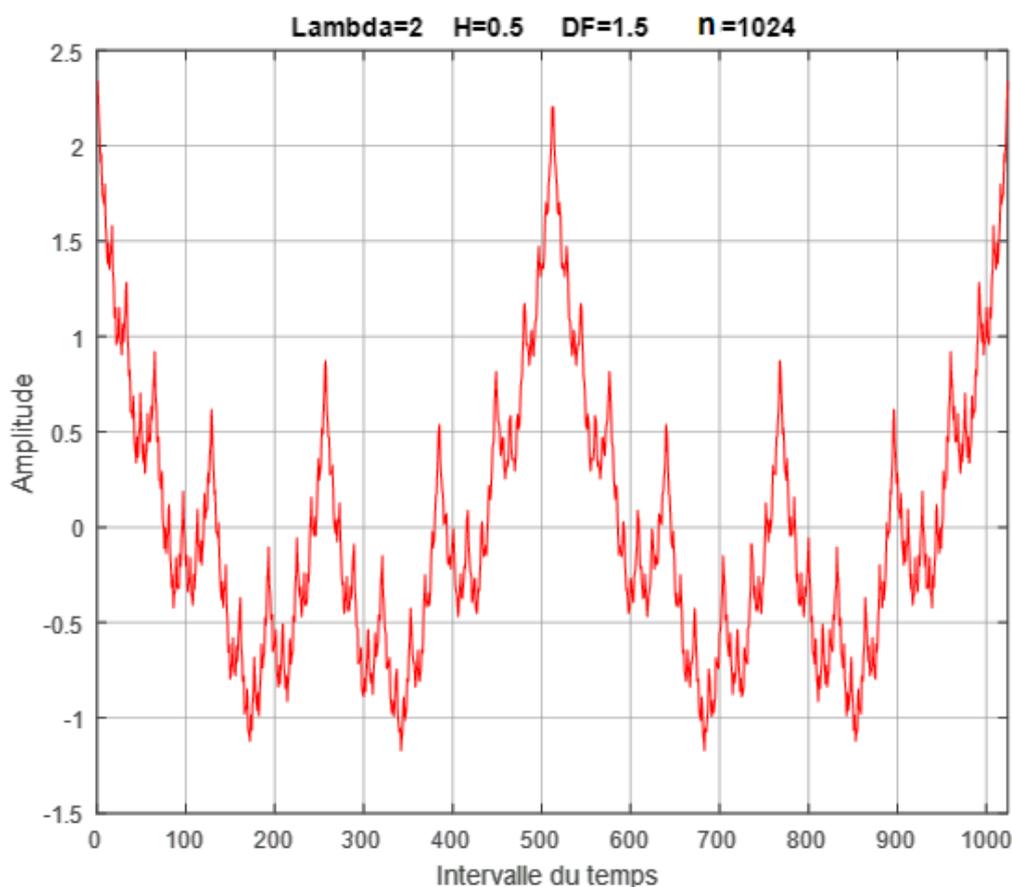


Figure III.5. Fonction de Weierstrass, avec une $DF = 1,5$, le nombre qui définit l'allure $\lambda = 2$, le paramètre du signal $H = 0,5$ et nombre de point $n = 1024$

Nous avons appliqué l'algorithme de MRBC précédemment détaillé avec et sans amélioration sur la fonction de Weierstrass $W(t)$, en variant le paramètre H , de 0 jusqu'à 1 de pas de l'ordre de 0,1, puis nous avons calculé le DF pour chaque H à l'aide de la formule III.8. Au finale nous avons comparé les DF réelle par celle obtenu par l'algorithme de MRBC.

Après plusieurs essais appliqués sur la fonction de Weierstrass, nous avons trouvé les meilleurs résultats en choisissant le nombre d'itération $m = 16$, et le nombre de division de la période d'échantillonnage égale à $\frac{1}{2}$. Les résultats sont exposés dans les tableaux III.1 et III.2.

Tableau III.1. DF réelle et celle calculée par l'algorithme de MRBC

H	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DF réelle	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
DF théorique	1.9863	1.8722	1.7595	1.6486	1.5399	1.4339	1.3329	1.2383	1.1525
L'erreur $ DF_{réelle}-DF_{théorique} $	0.0863	0.0722	0.0595	0.0486	0.0399	0.0339	0.0329	0.0383	0.0525
L'erreur en %	8.63	7.22	5.95	4.86	3.99	3.39	3.29	3.83	5.25

Tableau III.2. DF réelle et celle calculée par l'algorithme, amélioré de MRBC

H	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DF réelle	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
DF théorique	1.8567	1.7564	1.6573	1.5600	1.4646	1.3722	1.2849	1.2038	1.1311
L'erreur $ DF_{réelle}-DF_{théorique} $	0.0433	0.0436	0.0427	0.0400	0.0354	0.0278	0.0151	0.0038	0.0311
L'erreur en %	4.33	4.36	4.27	4.00	3.54	2.78	1.51	0.38	3.11

Nous avons trouvé que l'erreur entre la DF réelle et celle théorique diminue avec la diminution de la DF, pour la valeur la plus grande de la DF nous avons une erreur de l'ordre de 8,63%, dans le cas sans amélioration, et de l'ordre de 4,33%, si l'amélioration est appliquée. L'erreur paraît plus ou moins élevée, et ça est dû où plusieurs facteurs parmi eux :

- L'équation (III.10) est une équation continue tandis que nous avons utilisé que n point.
- La somme dans l'équation doit être tend vers l'infini alors que nous avons utilisé la somme jusqu'à N_p fois car nous sommes obligés d'appliquer la fonction III.9.
- La valeur de la DF réelle est purement mathématique donc elle est parfaite.
- La période d'échantillonnage joue un rôle très important.

Nous avons remarqué aussi que l'erreur totale ne dépasse pas le 5,16% pour les DF calculées sans amélioration, tandis qu'elle est de l'ordre de 3,14% avec amélioration.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence un algorithme de calcul de la DF par la méthode de box-counting, basé sur la technique de multi-résolution.

La méthode mise au point est évaluée à partir de fonction test (Weierstrass), dont on connaît sa structure mathématique et sa DF. La mise en œuvre de la méthode nous impose des limites d'estimation de la DF, tels que la résolution et la discrétisation du signal, la taille du box, la valeur réelle de la DF ...etc. Même si la formulation et le calcul de la DF sont bien maîtrisés d'un point de vue théorique, le calcul numérique est grandement lié aux paramètres choisis de l'algorithme.

Suit à ce chapitre, et afin de pouvoir utiliser notre algorithme par la suite et tout au long de ce manuscrit, nous avons pris les paramètres suivantes :

1. La valeur de m est choisie égale à 16.

2. La méthode de rajout des points est adoptée (elle permet l'amélioration des résultats)
3. L'amélioration prouve l'efficacité de cet algorithme lorsqu'on ajoute un seul point pour chaque période d'échantillonnage.
4. Le calcul de la DF du signal est estimé par la valeur moyenne de toutes les résolutions.

L'algorithme exposé tout au long de ce chapitre sera appliqué par la suite sur des signaux échantillonnés (courant de fuite, tension appliquée et charge). Pour chaque signal, la DF sera calculée, sous différentes conditions de pollution.

Chapitre IV

**APPLICATION DES FRACTALES
SUR LES SIGNAUX DES
COURANT DE FUITE, LA
TENSION APPLIQUÉE ET LA
CHARGE**

Introduction

Dans ce chapitre, l'utilisation de la théorie fractale est mise en pratique pour diagnostiquer l'état de surface d'un isolateur pollué. De ce fait, nous allons adapter, à notre cas l'algorithme MRBC (que nous avons mis en œuvre dans le chapitre III) pour calculer la dimension fractale (DF) d'un signal échantillonné. En premier lieu, nous exploitons les signaux (courant de fuite, tension appliquée et charge) dans le cas de la pollution uniforme. Pour ce cas de figure, le modèle plan qui simule l'isolateur 1512L (ayant une distance de fuite $d = 292$ mm) est mis sous une pollution (NaCl diluée dans l'eau distillée). Cette solution polluante, de conductivité variant de $0,1 \mu\text{S/cm}$ à $10,1 \text{ mS/cm}$, est appliquée par pulvérisation totale sur la surface isolante. En deuxième lieu, nous exploitons les signaux dans le cas de la pollution non-uniforme [53], où la conductivité volumique est gardée constante à $1,2 \text{ mS/cm}$, alors que la pulvérisation se fait comme suit :

- Couche polluée disposée du côté de l'électrode sous tension.
- Couche polluée disposée du côté de l'électrode mise à la terre.
- Couche polluée disposée au centre du modèle plan.

Le signal du courant est visualisé aux bornes d'une résistance insérée en série avec l'objet d'essai et le retour de terre par l'intermédiaire du signal de la tension avec une résistance $R = 1\text{k}\Omega$ pour la pollution uniforme. Pour la pollution non-uniforme, la mesure du courant de fuite a été effectuée avec une résistance $R' = 2 \text{ k}\Omega$. Alors qu'il est visualisé directement pour prélever la tension. Or, pour le signal de la charge [54], la signalisation est faite aux bornes d'une capacité de $20 \mu\text{F}$ pour la pollution uniforme et une capacité de $33 \mu\text{F}$ pour la pollution non-uniforme. Les mesures ont été enregistrées auparavant grâce à l'oscilloscope TEKTRONIX, ayant une fréquence d'échantillonnage égale à 100 kHz pour le cas uniforme et de 250 kHz pour le cas non-uniforme. Ce choix permet d'avoir une vision plus large des ondes de tension et du courant de fuite pour les deux cas de pollution. Le dispositif qui permet de faire toutes les mesures montre sur la figure IV.1.

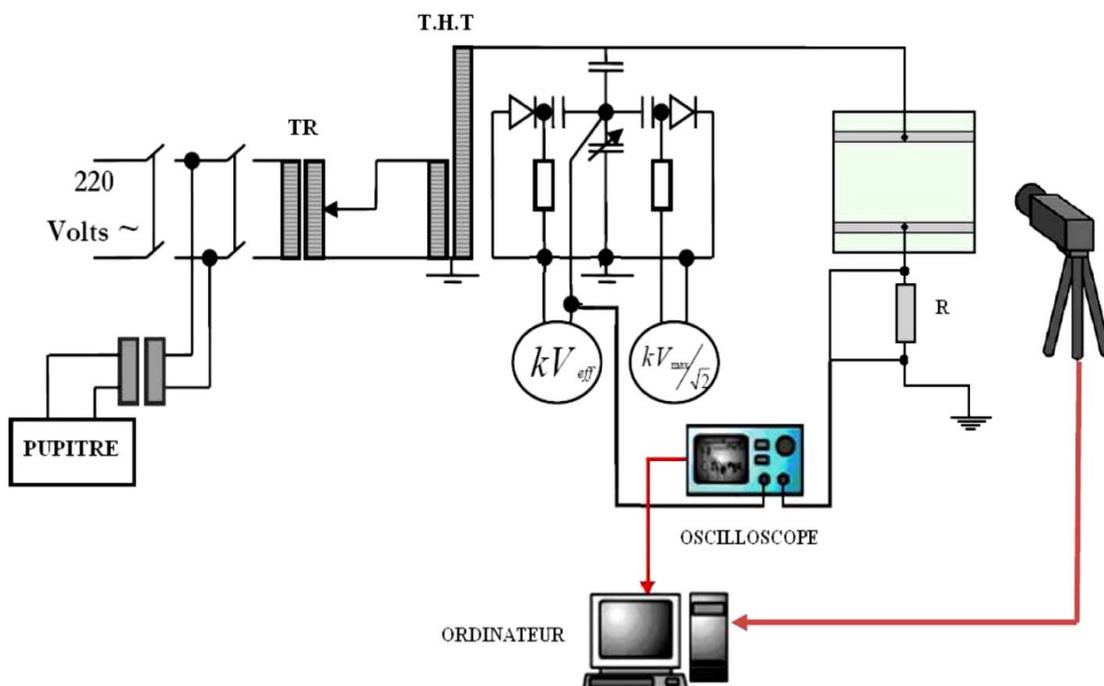


Figure IV.1. Dispositif expérimental

IV.1. Etude de la DF du signal du courant de fuite

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'évolution de la DF du signal du courant de fuite de l'isolateur, pour les deux cas de la pollution uniforme et non-uniforme.

IV.1.1. Cas uniforme

Nous étudions dans ce cas, l'influence de la tension appliquée (3, 6, 9, 12, et 15 kV_{eff}) et de la conductivité volumique (10,1, 1,2, 0,71, 0,19 et 0,01 mS/cm) sur la DF du signal du courant de fuite. Les résultats des DF obtenues sont exposés sur les figures IV.2 et IV.4.

IV.1.1.1. Étude de la DF du signal du courant de fuite en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée

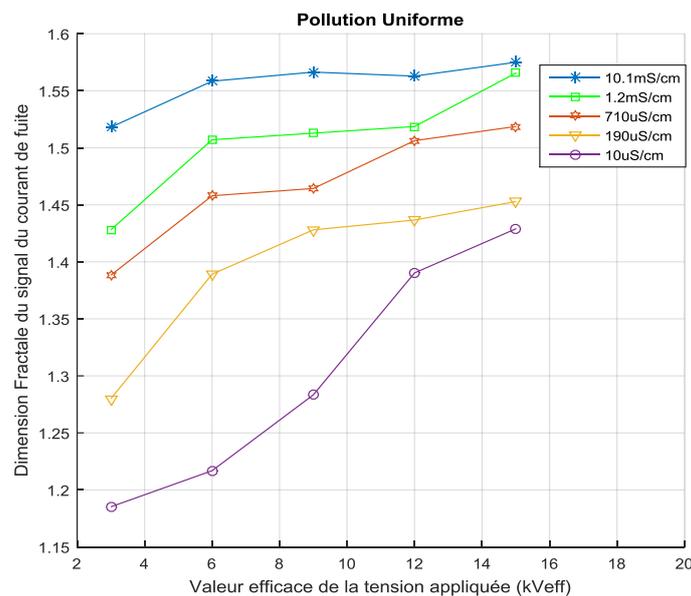


Figure IV.2. DF du signal du courant de fuite en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour différentes conductivités

D'après la figure IV.2, nous remarquons tout d'abord, que la DF augmente en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée de manière non-linéaire pour toutes les conductivités. Cependant, la DF augmente rapidement pour les conductivités les plus faibles (0,01 mS/cm), où le signal du courant de fuite est bruité et à tendance de remplir plus d'espace, ce qui donne un nombre de box beaucoup plus important. Ceci fait que, la DF du signal du courant de fuite augmente, selon la définition mentionnée dans le paragraphe 5 du chapitre II.

Pour la conductivité la plus élevée (10,1 mS/cm), la DF augmente en fonction de la tension appliquée lentement à cause de l'évaporation progressive de la couche de pollution. Cette évaporation peut être expliquée par l'augmentation de la densité du courant sur la surface isolante où l'eau se vaporise petit à petit par effet joule, ce qui résulte en une évolution lente du remplissage d'espace du signal du courant de fuite. Ceci donne des DF qui augmentent de manière lente et progressive, de l'ordre de 0,06 (à partir de 3 jusqu'à 15 kV_{eff}). Les observations expérimentales qui ont été effectuées [6] montrent que le contournement peut avoir lieu quand la DF se rapproche de la valeur de 2. Pour cette valeur maximale de la DF, le signal du courant de fuite est dense et composé de pics très variables, où son remplissage est quasi-total, comme indiquée par la figure suivante.

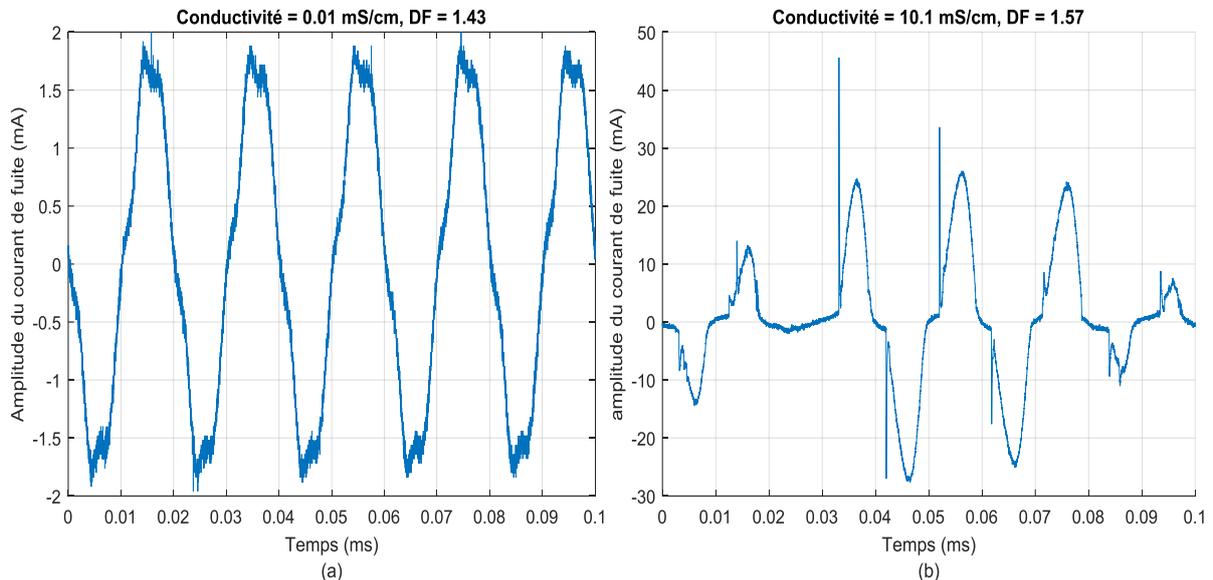


Figure IV.3. Courant de fuite pour : (a) une conductivité de 0,01 mS/cm (DF = 1,57), (b) une conductivité de 10,1 mS/cm (DF = 1,43), sous tension appliquée de 15 kV_{eff}

Les augmentations des DF sont relativement rapides, elles sont de l'ordre de 0,17, 0,13 et 0,14 pour les conductivités de 0,19, 0,710 et 1,2 mS/cm respectivement. Pour la conductivité la plus faible (0,01 mS/cm), la DF augmente rapidement, l'augmentation est de l'ordre de 0,25, elle nous a permis de suivre facilement l'évolution de la tension appliquée.

IV.1.1.2. Etude de la DF du signal du courant de fuite en fonction de la conductivité

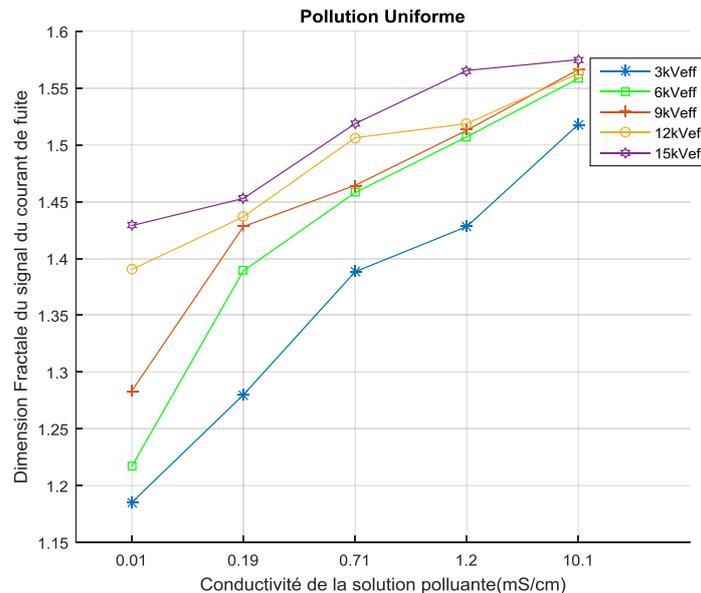


Figure IV.4. DF du signal du courant de fuite en fonction de la conductivité pour différentes tensions appliquées

D'après les résultats obtenus de la figure IV.4 nous remarquons que la DF augmente proportionnellement avec la conductivité de la solution polluante. Une telle variation indique une augmentation de l'activité des décharges à la surface de l'isolateur, qui sont traduits par un remplissage plus dense du signal du courant de fuite.

L'augmentation de la DF est relativement rapide pour les tensions les plus élevées (12 et 15 kV_{eff}), où elle est de l'ordre de 0,14. Tandis qu'elle est très rapide pour les tensions les plus faibles (3, 6 et 9 kV_{eff}), où ses valeurs sont de 0,34, 0,35 et 0,27 respectivement.

Nous remarquons, que l'augmentation de la DF se trouve fortement ralentie, voire stabilisée, pour la conductivité la plus élevée (10,1 mS/cm). La tension appliquée à peu d'effet sur la DF quand les conductivités sont très grandes (10,1 ms/cm). Ainsi, nous avons constaté que la variation de la DF à partir de la conductivité la plus basse (0,01 mS/cm), jusqu'à la valeur la plus élevée (10,1 mS/cm) est très remarquable (de l'ordre de 0,35). De ce fait, la DF quantifie remarquablement l'évolution de la conductivité de la solution polluante.

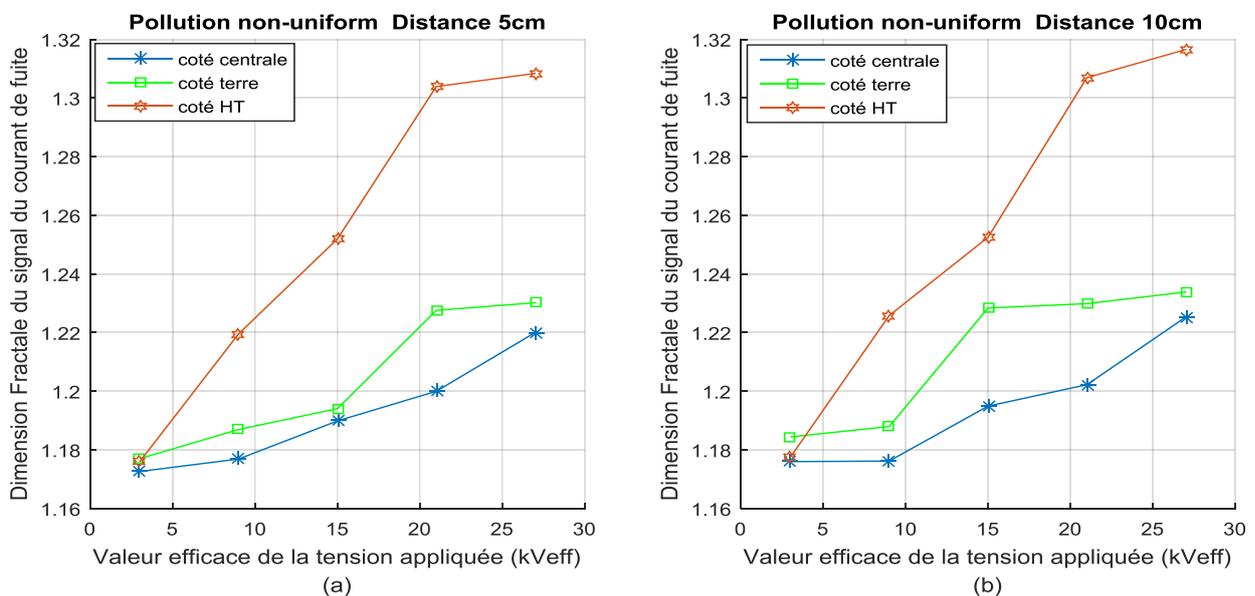
IV.1.2. Cas non-uniforme

Pour ce type de pollution, le courant de fuite a été mesuré dans le cas où la couche polluée (de différentes largeurs : 5, 10, 15, 20 et 25 cm) se situe du côté de l'électrode haute tension, de l'électrode de terre et lorsque la couche polluée se trouve au centre de la plaque isolante. L'ensemble de ces essais sont établis pour différents paliers de la tension appliquée (3, 9, 12, 15, 21 et 27 kV_{eff}).

En premier lieu, nous nous intéressons à la DF du courant de fuite pour plusieurs niveaux de tension appliquées et pour différentes dispositions de la couche (Figure IV.5). En deuxième lieu, nous nous intéressons à la DF du courant de fuite pour différentes largeur de la couche polluante et pour différents paliers de tension appliquée (Figure IV.6).

Le but de cette section est de trouver, à partir de la DF, quel emplacement de la couche polluante représente le plus de danger, du point de vue de l'isolation et apparition des décharges électriques. Autrement dit, quelle répartition de la couche de pollution, dont l'isolateur est le moins rigide ?

IV.1.2.1. Etude de la DF du signal du courant de fuite en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée



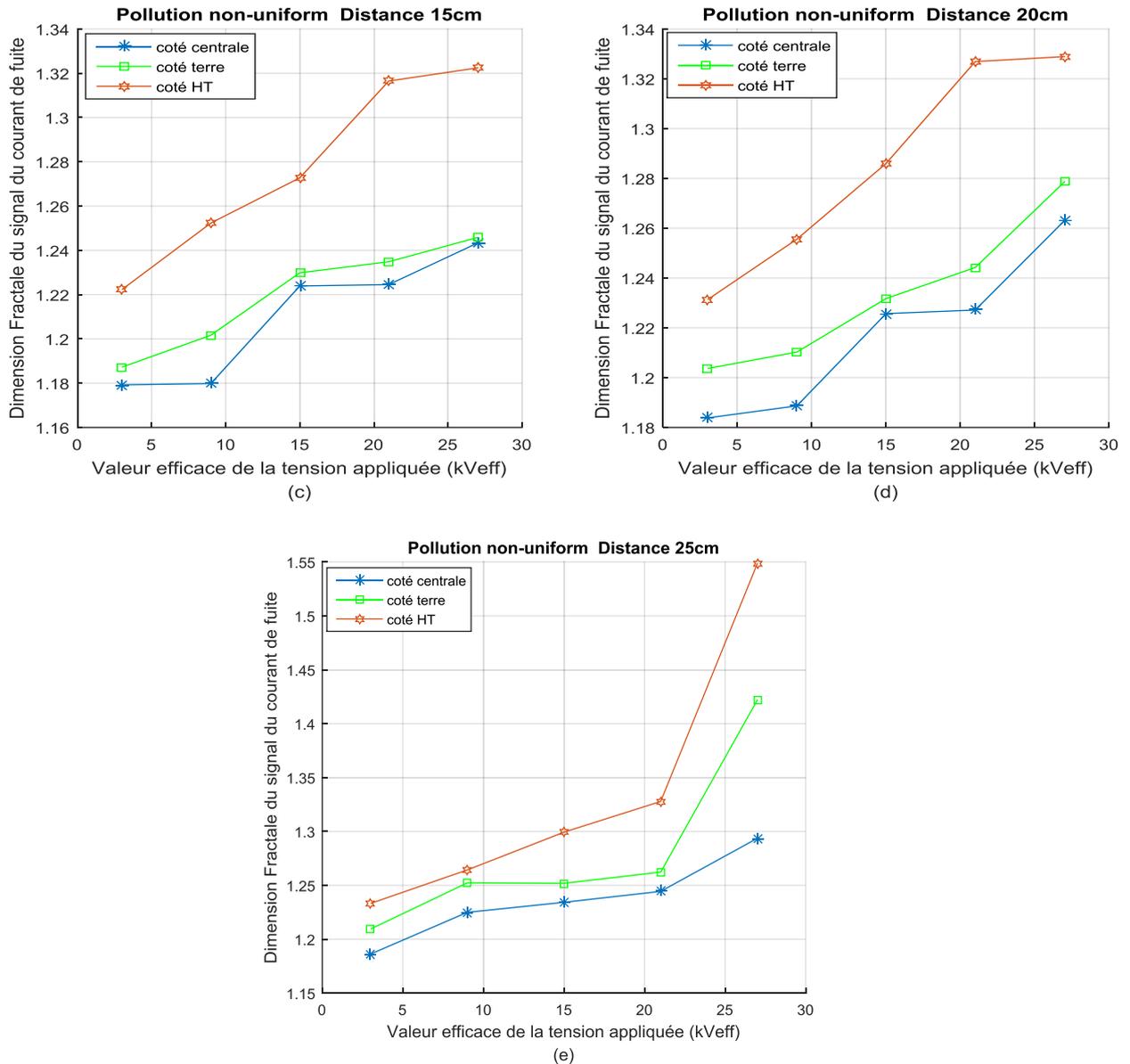


Figure IV.5. DF du courant de fuite en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour différentes dispositions de la couche polluée

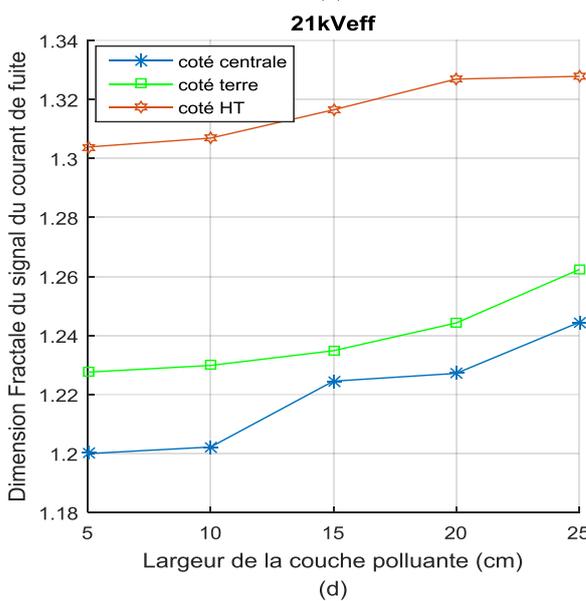
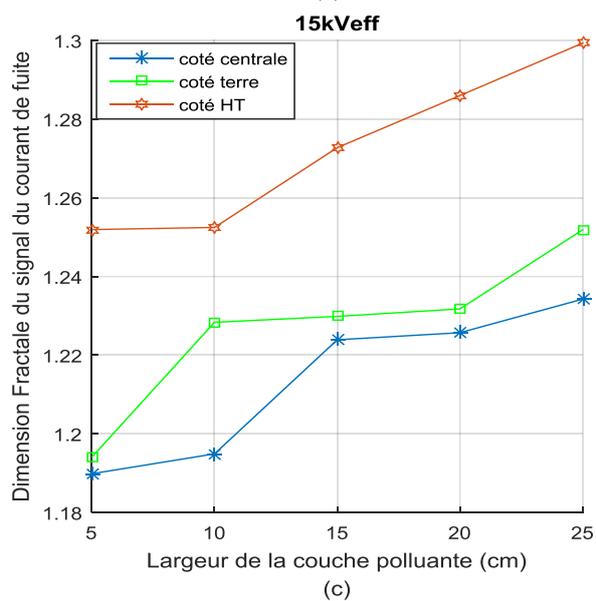
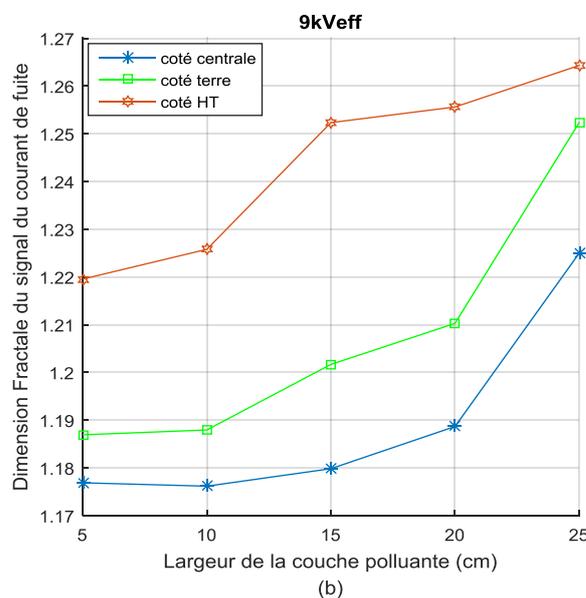
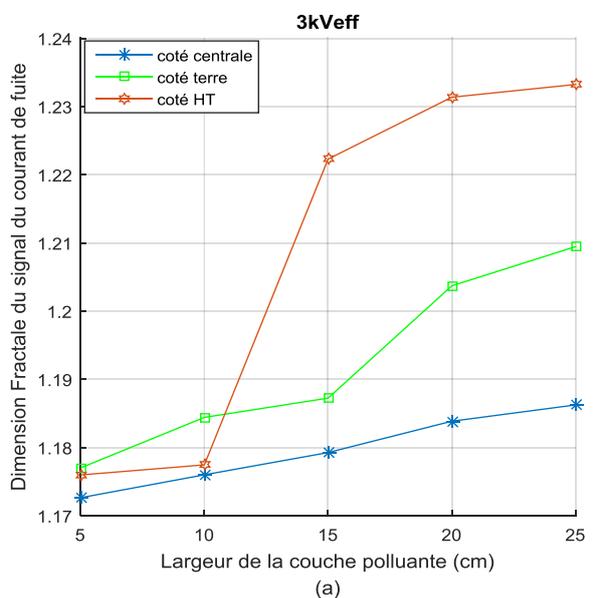
Pour la pollution non-uniforme, nous remarquons que la DF augmente en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour chaque configuration et pour les différents paliers de la largeur de la couche polluante. Nous remarquons que les DF sont très proches, dans les deux cas de la largeur de la couche polluante 5 et 10 cm (Figure IV.5.a et IV.5.b), où la tension appliquée prend la valeur la plus faible (3 kV_{eff}), dans ce cas les signaux de courant de fuite à tendance de remplir presque le même espace. Un tel constat indique que les courbes des signaux des courants de fuite sont semblables, tant que la tension reste égale ou en dessous de 3 kV, pour 5 et 10 cm de largeur de la couche polluée.

Nous avons remarqué aussi que la DF est toujours plus grande dans le cas où la couche polluée est disposée du côté de l'électrode sous tension, que dans les deux autres dispositions. Ceci peut indiquer que le cas le plus dangereux est celui où la pollution est du côté haute tension.

L'augmentation de la DF démontre une valeur maximale de 1,55 pour le niveau de tension le plus élevé (27 kV_{eff}), qui représente le cas le plus favorable à la formation de l'arc

électrique. L'évolution de DF en fonction de la tension reste relativement proche, pour les deux cas, lorsque la couche polluée se trouve au centre de la plaque isolante, et du côté de l'électrode mise à la terre, mais elle est plus grande pour la première configuration que la deuxième. Ceci indique que la disposition de la pollution du côté de l'électrode de terre est plus dangereux que celui du milieu de l'isolateur, tout en restant, bien évidemment, moins dangereux du cas où elle est disposée du côté sous tension.

IV.1.2.2. Etude de la DF du signal du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante



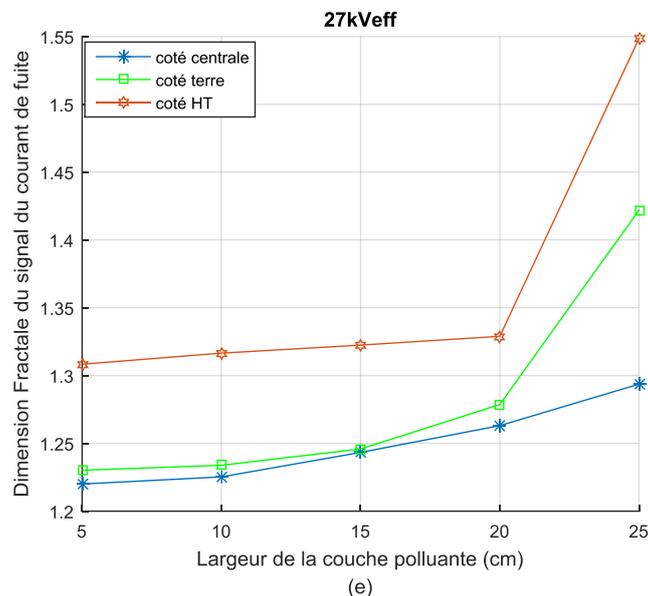


Figure IV.6. DF du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante pour différentes dispositions et tensions appliquées

Les résultats obtenus (Figure IV.6) montrent que la DF augmente progressivement en fonction de la largeur de la couche polluante. Cette augmentation est remarquable aussi bien pour les tensions les plus élevées (21 et 27 kV_{eff}) que pour les tensions les plus faibles (3 et 6 kV_{eff}). L'augmentation de la DF est due à l'augmentation des valeurs du courant de fuite, qui de part cette augmentation, rendent la courbe du courant de fuite plus dense. Cet accroissement s'explique par l'affaiblissement de la rigidité du système. Pour la tension de 3 kV_{eff} les DF sont très proches pour les largeurs de la couche polluante de 5 et 10 cm.

Les observations expérimentales qui ont été effectuées [55], lorsque la bande polluée se trouve au milieu du modèle plan, montrent également que les amplitudes du courant de fuite sont les plus basses comparées aux configurations précédentes. Ces résultats indiquant que la rigidité de l'isolant pollué est la plus élevée si la largeur polluée atteint 15, 20 et 25 cm et quand la tension appliquée est égale à 9, 15 et 21 kV_{eff}. Ainsi, les valeurs de la DF de la couche polluante coté central peuvent refléter que la rigidité du modèle d'isolateur est la plus élevée, comparée aux autres configurations de pollution.

IV.2. Etude de la DF du signal de la tension appliquée

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'évolution de la DF du signal de la tension appliquée sur l'isolateur, pour les deux cas de la pollution uniforme et non-uniforme.

IV.2.1. Cas uniforme

Nous étudions dans ce cas, la variation de la DF en fonction des valeurs efficace de la tension appliquée pour différentes conductivités volumiques (10,1, 1,2, 0,71, 0,19 et 0,01 mS/cm) (Figure IV.7), sur tous les signaux de la tension appliquée.

IV.2.1.1. Etude de la DF du signal de la tension appliquée en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée

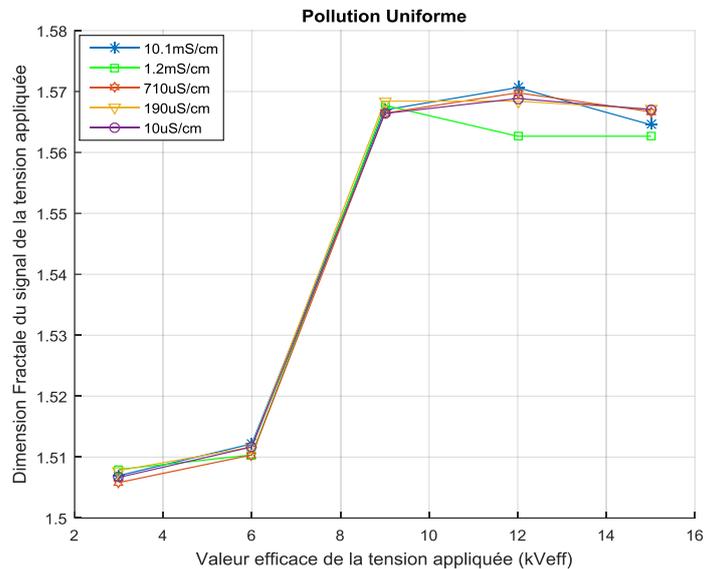


Figure IV.7. DF du signal de la tension appliquée en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour différentes conductivités

D'après la figure IV.7, nous remarquons que la variation de la DF est très faible en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée, nous remarquons aussi que quel que soit le niveau de la conductivité de la solution polluante, les courbes de la DF sont superposées. Ainsi, la différence entre la DF des tensions de 3 et 15 kV_{eff} est de 0,06 uniquement. De ce fait, la DF du signal de la tension appliquée représente très mal l'état de surface de l'isolateur pollué.

IV.2.1.2. Etude de la DF du signal de la tension appliquée en fonction de la conductivité

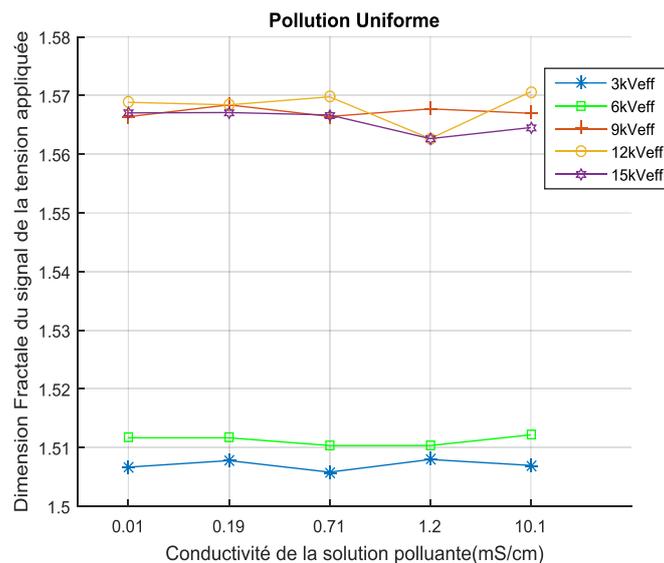


Figure IV.8. DF du signal de la tension appliquée en fonction de la conductivité pour différentes valeurs efficaces des tensions appliquées

Nous remarquons d'après la figure IV.8 que la DF reste presque constante, peu importe la valeur de la conductivité de la solution polluante et la valeur de la tension appliquée. Ce qui nous permet de dire que le nombre de box qui couvre ces signaux est très proche. Nous remarquons aussi, que les DF pour les deux tensions 3 et 6 kV_{eff} sont très proches des autres

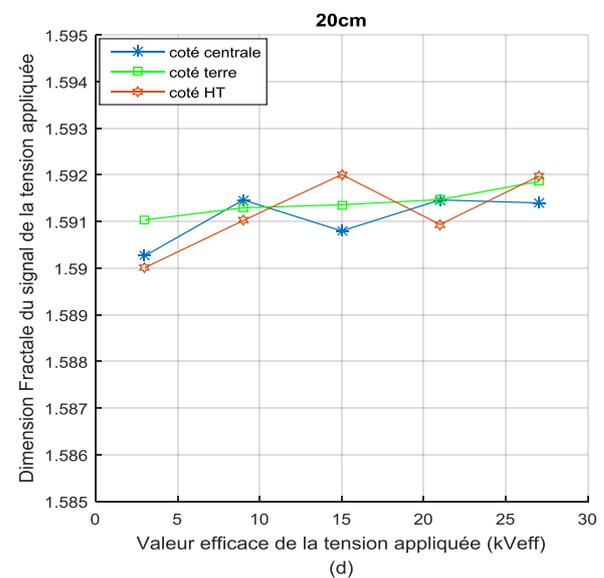
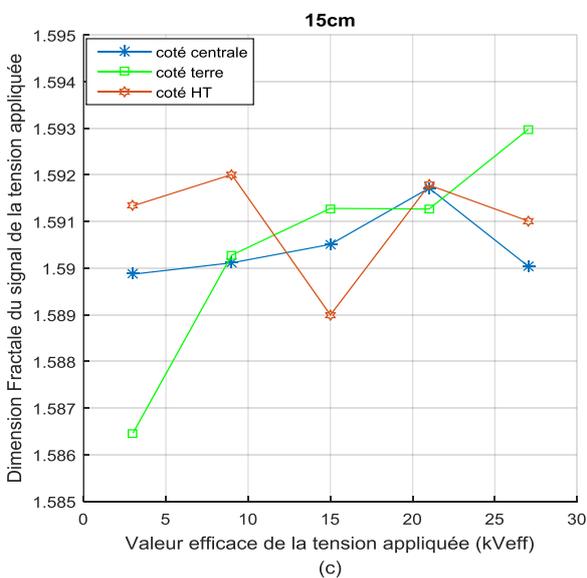
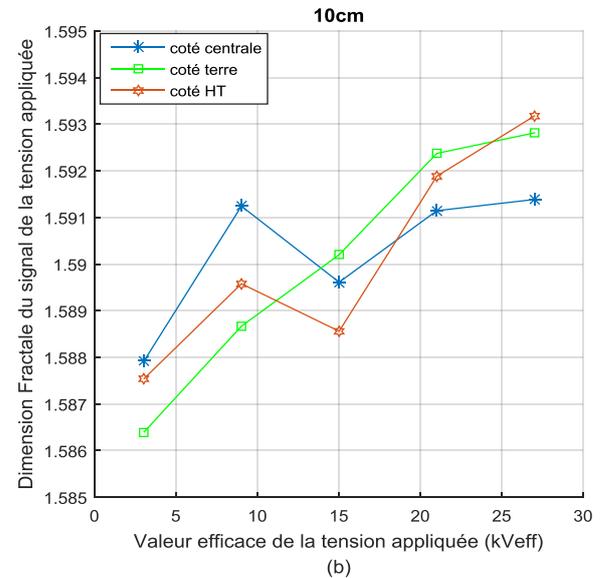
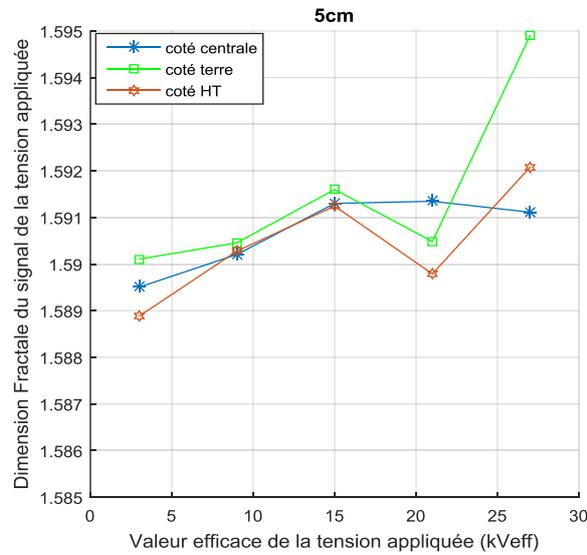
valeurs. Nous remarquons que la différence entre la DF de 0,01 et celle de 10,1 mS/cm est de 0,06. De ce fait, la DF, là aussi, représente très mal l'état de surface d'un isolateur pollué.

IV.2.2. Cas non-uniforme

Pour ce type de pollution, le signal de la tension appliquée a été mesuré pour le cas où la couche polluée, de différentes largeurs (5, 10, 15, 20 et 25 cm), se situe du côté de l'électrode haute tension, de l'électrode mise à la terre et lorsque la couche polluée se trouve au centre du plan isolant, pour différents paliers de la valeur efficace de la tension appliquée (3, 9, 12, 15, 21 et 27 kV_{eff}).

En premier lieu, nous nous intéressons à la DF du signal de la tension appliquée pour plusieurs valeurs efficace de la tension appliquée (Figure IV.9). En deuxième lieu, nous nous intéressons à la DF du signal de la tension appliquée pour différentes largeur de la couche polluante et pour différents paliers de tension appliquée (Figure IV.10).

IV.2.2.1. Etude de la DF du signal de la tension appliquée en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée



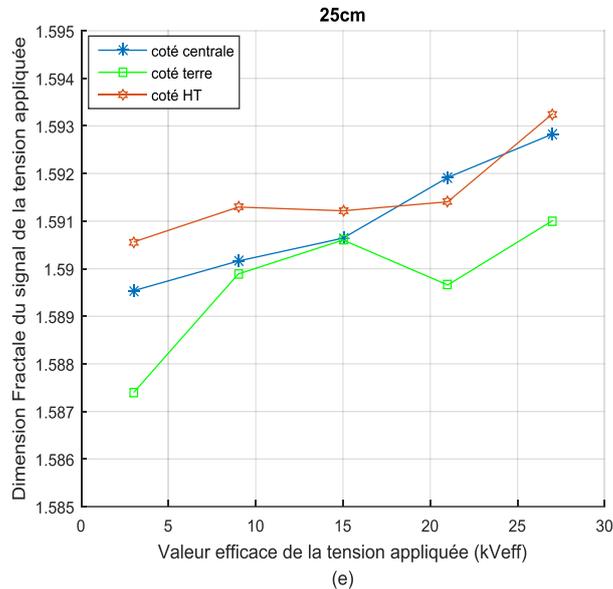
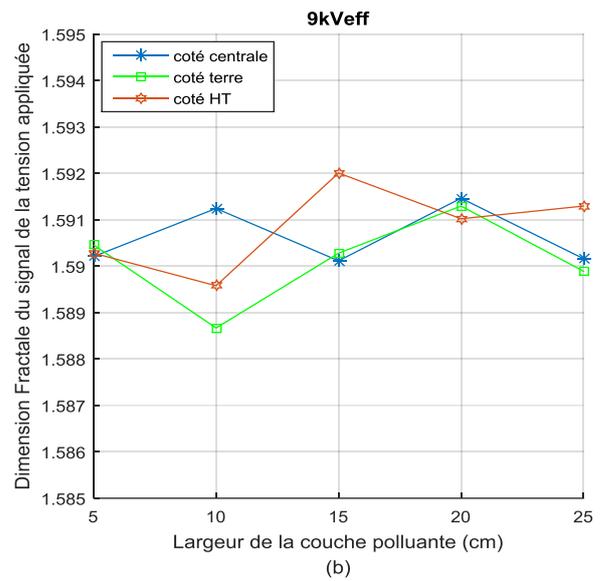
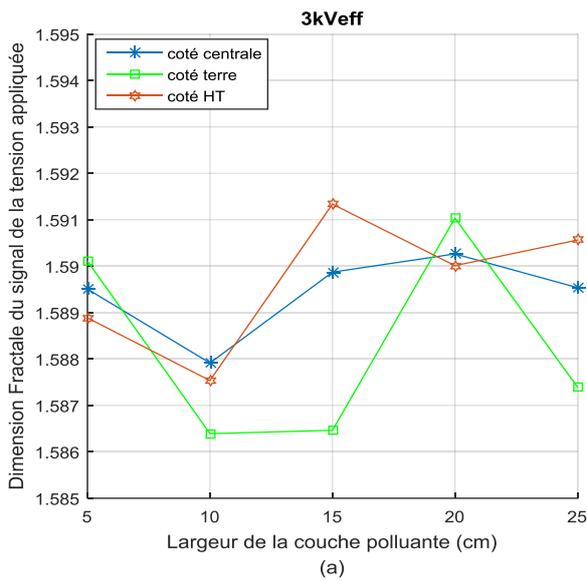


Figure IV.9. DF de la tension appliquée en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour différentes dispositions de la couche polluée

La figures IV.9 montre que, quelle que soit la valeur de la tension appliquée et quel que soit la distance de la couche polluante, la DF prend une valeur plus ou moins élevée, autour de 1,59, cela valable pour chaque configuration. Nous ne pouvons rien conclure ou dire, car les résultats dans tous les cas sont semblables et invariants.

IV.2.2.2. Etude de la DF du signal de la tension appliquée en fonction de la largeur de la couche polluante



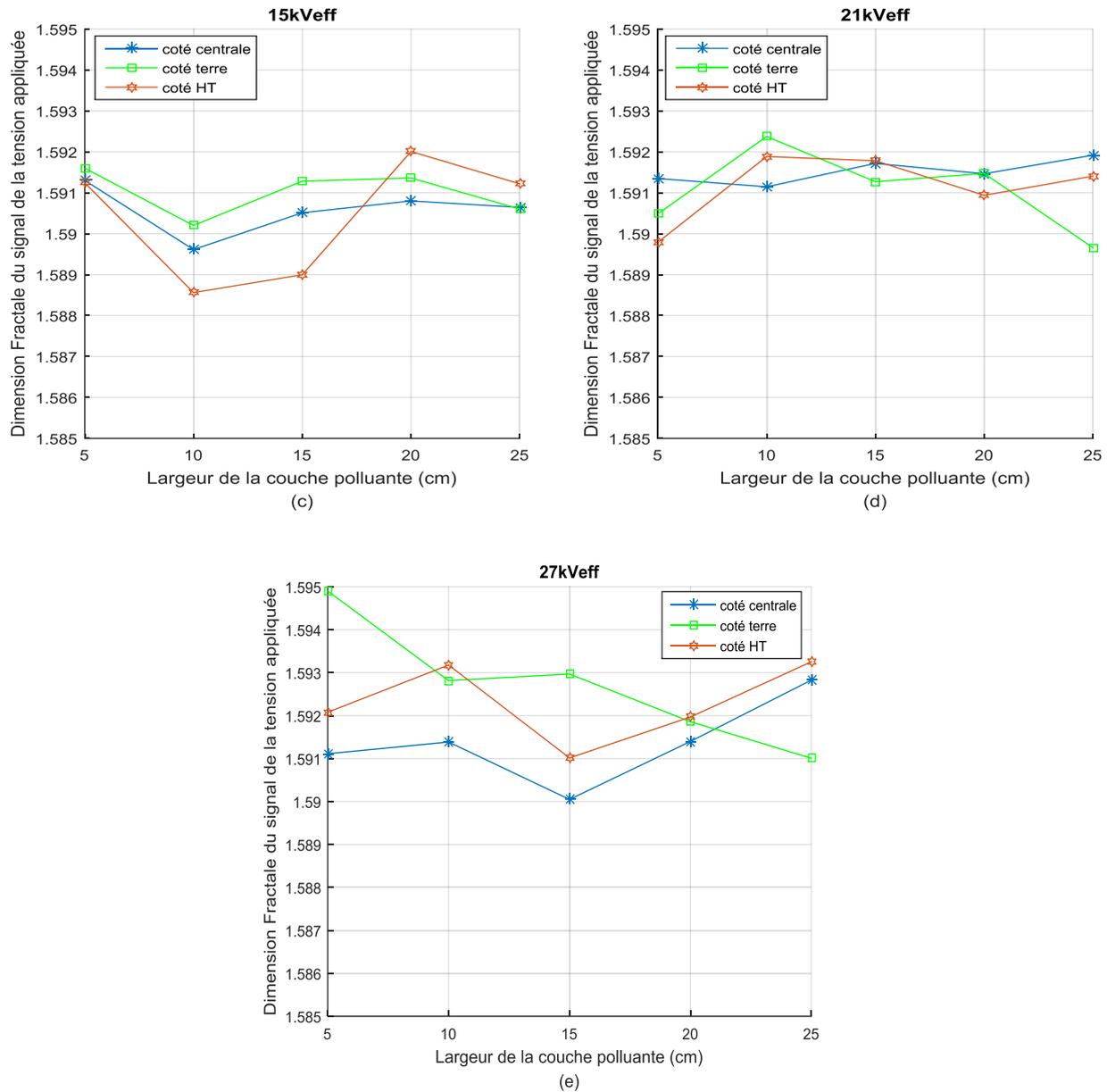


Figure IV.10. DF de la tension appliquée en fonction de la largeur de la couche polluante pour différentes dispositions et tensions appliquées

La figure IV.10 montre que, peu importe la distance de la couche polluante et pour différentes dispositions, la DF varie autour d'une valeur de l'ordre de 1,59. Nous ne pouvons rien conclure ou dire, car les résultats dans tous les cas sont semblables et invariants. Donc, l'application de l'analyse fractale sur les signaux de tension ne donne malheureusement pas d'information fiable sur l'état de surface de l'isolateur.

IV.3. Etude de la DF du signal de la charge

Pour les pollutions uniforme et non-uniforme de la surface du modèle plan, la mesure de la charge électrique a été préalablement enregistrée en utilisant l'oscilloscope TEKTRONIX. Le signal de la charge est visualisé aux bornes d'une capacité insérée en série avec l'objet d'essai et le retour de terre par l'intermédiaire du signal de la tension avec une capacité de 20 μF pour la pollution uniforme et une capacité de 33 μF pour la pollution non-uniforme. La fréquence d'échantillonnage est de 100 kHz, ce qui permet d'avoir une vision plus large des ondes de la charge électrique pour les deux configurations de la pollution.

IV.3.1. Cas uniforme

Nous étudions dans ce cas, la DF du signal de la charge en fonction des valeurs efficace de la tension appliquée pour différentes conductivités volumiques (1,2, 3,5, 6, 10, et 20 mS/cm), et pour les trois concentrations en Kaolin (40, 100 et 200 g/l) (Figure IV.11). Afin de voir l'influence de la DF sur les signaux de charge dans ce cas-là.

IV.3.1.1. Etude de la DF du signal de la charge en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée

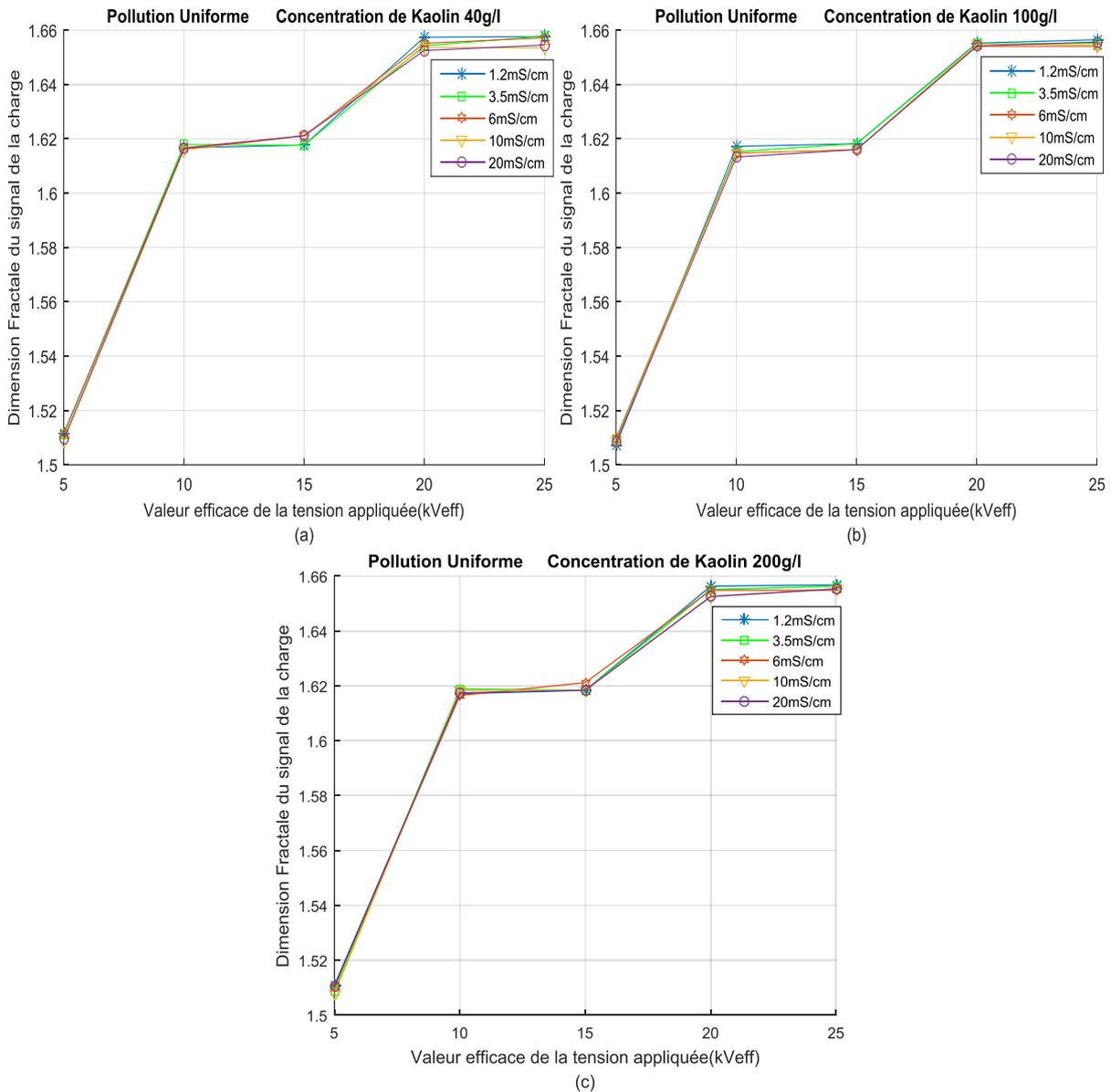


Figure IV.11. DF de la charge en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour différentes conductivités et concentrations en Kaolin

Selon la figure (IV.11), nous voyons bien que la DF augmente en fonction de la tension appliquée. Cependant, la distinction des courbes est quasiment impossible à partir de leur conductivité. En effet, les courbes sont superposées dans les trois cas de concentration de Kaolin. Nous remarquons aussi que le changement de la concentration en Kaolin joue un rôle presque négligeable sur la variation des DF pour les différents paliers de la tension appliquée. Cela veut dire que le nombre de box à compter est presque égale pour chaque valeur efficace de la tension et quelle que soit la variation de la conductivité et pour les trois concentrations en

Kaolin, donc le signal de la charge rempli presque le même espace pour chaque valeur efficace de la tension. Ainsi, nous remarquons que la différence entre la DF de 5 et celle de 25 kV_{eff} est de 0,14.

IV.3.1.2. Etude de la DF du signal de la charge en fonction de la conductivité

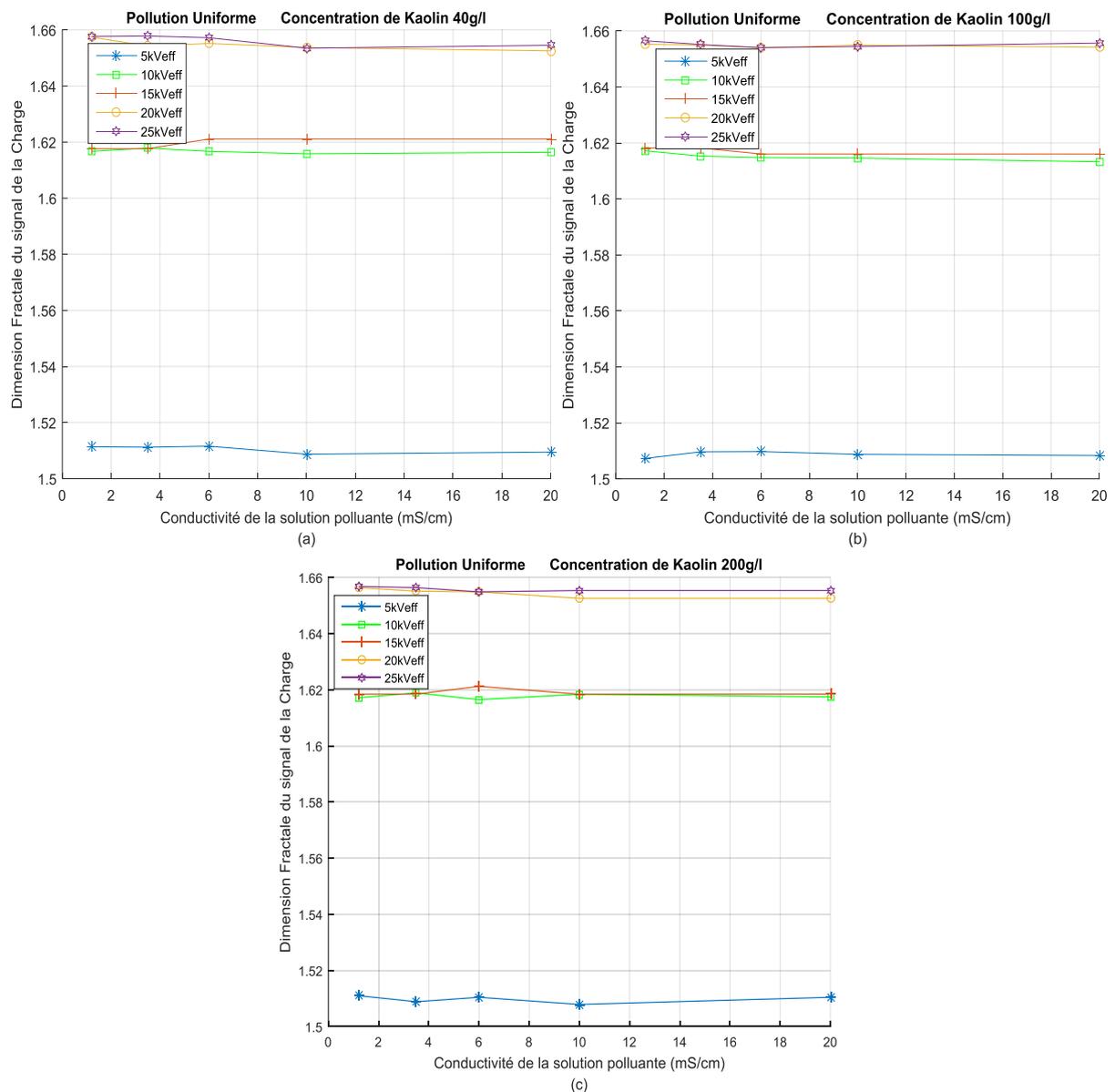


Figure IV.12. DF de la charge en fonction de la conductivité, pour différentes valeurs efficace de la tension applique et concentrations en Kaolin

D’après la figure IV.12, la DF ne donne aucune variation en fonction de la conductivité pour les trois cas de concentration en Kaolin (40, 100 et 200 g/l). Par contre, nous remarquons qu’il y’a une séparation entre les courbes, la DF prend la valeur la plus faible (1,51) pour la tension de 5 kV_{eff} dans ce cas le signal de la charge remplit le moins d’espace. Les tensions 10 et 15 kV_{eff} ont des DF très proche, elles sont élevées de 0,1 par rapport à celle de la tension de 5 kV_{eff}. Les tensions 20 et 25 kV_{eff} ont des DF très proche, dans ce cas le signal de la charge remplit le plus d’espace elles sont élevées de l’ordre de 0,04 par rapport à celle de la tension de 10 kV_{eff} pour toutes les concentrations de Kaolin de l’agent polluant.

De ce fait, des deux précédents paragraphes, nous pouvons dire que la DF du signal de la charge ne peut représenter l'état de surface d'un isolateur pollué, dans le cas de la pollution uniforme.

IV.3.2. Cas non-uniforme

Dans le cas de la pollution non-uniforme, la pulvérisation se fait sur la surface du modèle plan en laissant des bandes sèches sur la surface, tout en gardant la largeur de la couche de pollution et celle de la couche propre constante ainsi que sa position (coté HT et coté terre).

Nous étudions dans ce cas, la DF du signal de la charge en fonction des valeurs efficace de la tension appliquée pour différentes conductivités volumiques (1,2, 3,5, 6, 10, et 20 mS/cm), et pour les trois concentrations en Kaolin (40, 100 et 200 g/l) (Figure IV.13).

IV.3.2.1. Etude de la DF du signal de la charge en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée

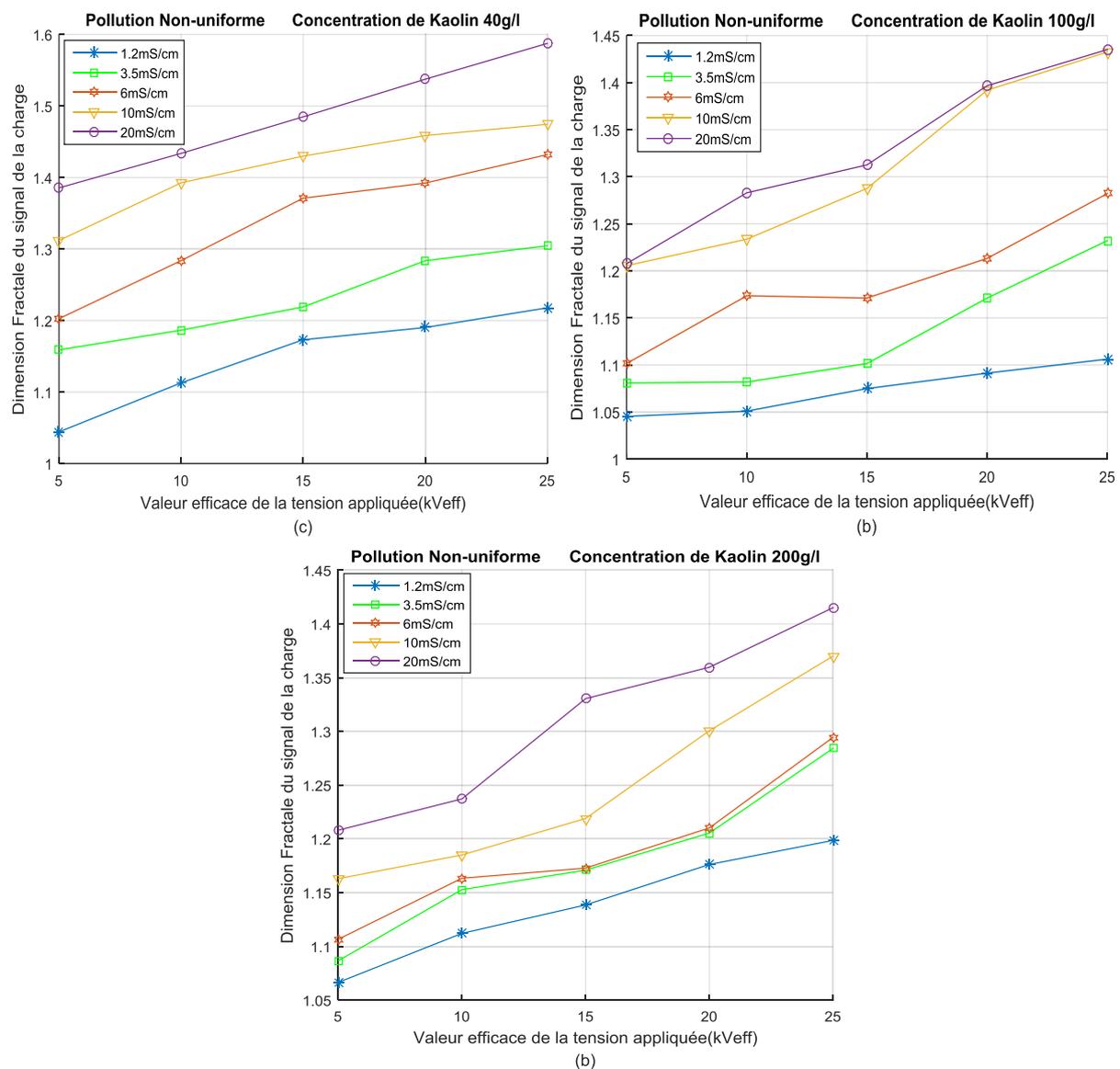


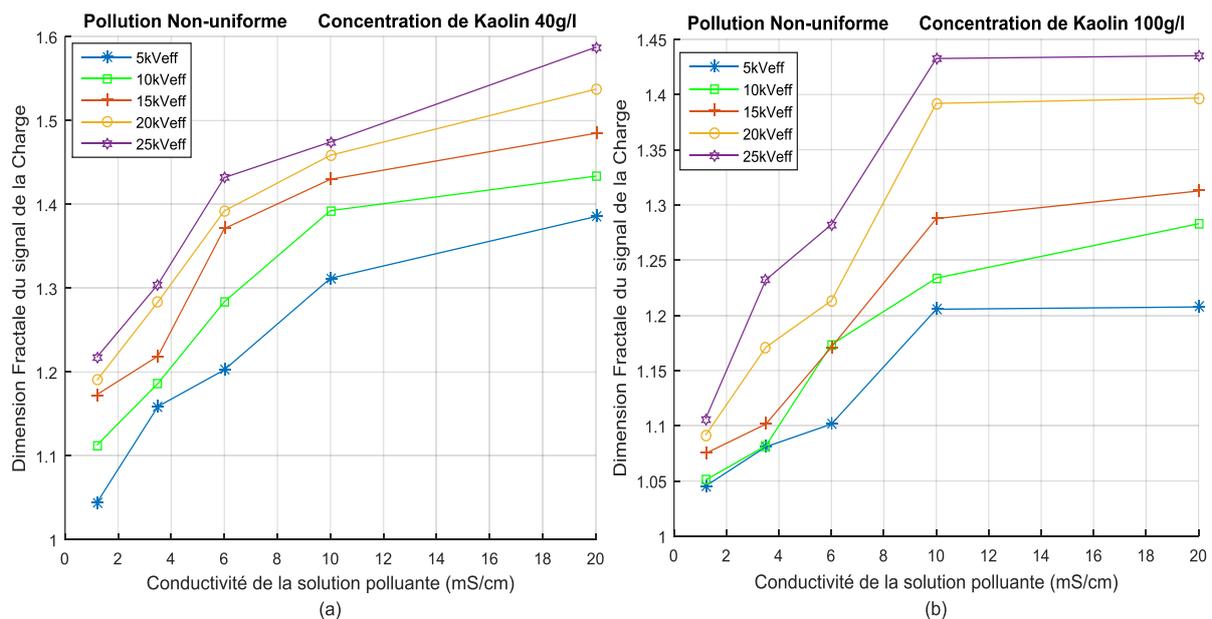
Figure IV.13. DF du signal de la charge en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée pour différentes conductivités et concentrations en Kaolin

D'après la figure IV.13, nous remarquons que la DF augmente en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée. Cette augmentation est quasi-linéaire apparaît pour chaque conductivité et pour les différentes concentrations en Kaolin. L'augmentation est lente pour les conductivités les plus faibles (1,2 mS/cm), donc les décharges n'étaient pas encore intenses, cela veut dire que les signaux dans ce cas-là remplis moins d'espace, tandis que, elle est légèrement rapide pour les conductivités les plus élevées (10 et 20 mS/cm), cela est dû à l'activité des décharges dans les zones sèches qui deviennent intenses, donc les signaux de la charge remplissent plus d'espace.

D'autre part, nous avons remarqués que pour la conductivité de 20 mS/cm, la DF est plus ou moins élevées, elle peut atteindre 1,6 comme valeur extrême, dans le cas où la concentration de Kaolin est de 40 g/l, tandis que, pour les deux autres concentrations 100 et 200 g/l, elle ne dépasse pas 1,45. Cela veut dire que le signal de la charge remplit plus d'espace dans le cas où la concentration de Kaolin est de 40 g/l que pour les deux autres concentrations 100 et 200 g/l.

Ceci est en accord avec nos prévisions. En effet, la nature chimique de l'agent polluant « Kaolin » fait que plus il est ajouté à une solution polluante (NaCl dans notre cas), plus il diminue la concentration de cette solution. Autrement dit, le Kaolin a pour effet de réduire la concentration en sel de la solution polluante. C'est pour cela que, plus la concentration en Kaolin augmente, plus la DF (du signal de la charge) diminue, pour une même conductivité et un même niveau de tension.

IV.3.2.2. Etude de la DF du signal de la charge en fonction de la conductivité



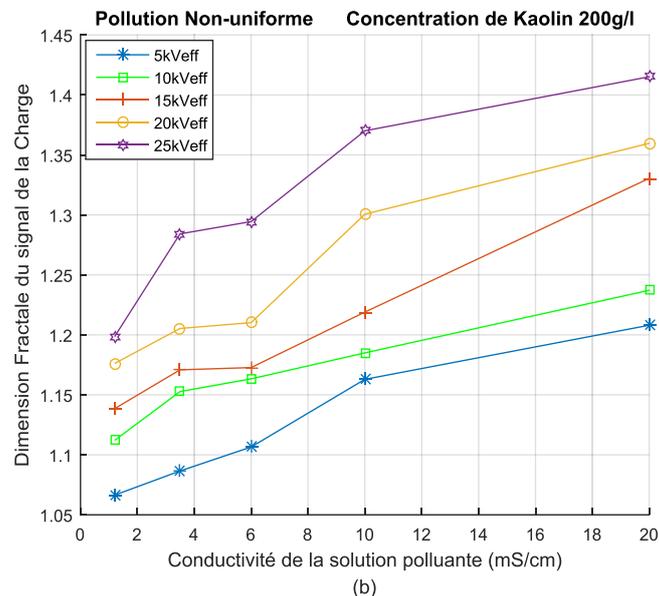


Figure IV.14. DF de la charge en fonction de la conductivité et pour différentes valeurs efficace de la tension appliquée et concentrations en Kaolin

La figure IV.14 montre que la DF augmente en fonction de la conductivité de manière non-linéaire pour chaque tension appliquée, et pour les différentes concentrations en Kaolin, la DF pour la concentration en Kaolin de 40 g/l paraît plus ou moins élevée, en comparant celle-ci aux autres concentrations, elle peut atteindre 1,6 comme valeur extrême. Cela vaut dire que le signal de la charge a tendance de remplir plus d'espace donc plus de nombre de box ont compté dans le cas où la concentration de Kaolin est de 40 g/l que pour les deux autres concentrations 100 et 200 g/l. Ceci est, bien évidemment, en accord avec nos interprétations lors du paragraphe précédent.

De ce fait, malgré que la DF du signal de la charge n'est pas apte à faire le diagnostic de l'isolateur pollué sous pollution uniforme, elle reste efficace dans le cas de la configuration non-uniforme.

Conclusion

Dans ce chapitre, la DF a été calculée pour les signaux du courant de fuite, la tension appliquée et la charge.

L'analyse fractale du courant de fuite nous a permis de conclure que la DF de celui-ci augmente en fonction de la tension appliquée, de la conductivité de l'agent polluant (NaCl), que ce soit dans le cas uniforme ou non-uniforme.

Dans le cas uniforme, nous constatons que :

- La DF du signal du courant de fuite augmente :
 - Rapidement en fonction de la tension appliquée dans le cas où la conductivité est faible (0,01 mS/cm) ;
 - Lentement dans le cas où la conductivité est relativement élevée (10,1 mS/cm), mais augmente très rapidement pour les niveaux de tensions les plus faibles (3, 6 et 9 kV_{eff}) ;

- De manière ralentie, voire stabilisée, pour les conductivités les plus élevées (1,2 et 10,1 mS/cm) à cause de l'assèchement progressif de certaines zones du modèle plan.
- De ce fait, pour le signal du courant de fuite, plus la valeur de la conductivité est élevée, plus l'augmentation de la DF est lente.

Dans le cas non-uniforme, nous pouvons conclure que :

- L'augmentation de la conductivité de la couche polluée indique l'intensification des décharges sur la surface de l'isolateur.
- La DF augmente en fonction de la tension appliquée, de la largeur de la couche polluante, que ce soit dans le cas où la couche polluée se situe du côté de l'électrode haute tension, de l'électrode mise à la terre ou lorsque la couche polluée se trouve au centre de la plaque isolante.
- Les valeurs de la DF (couche polluante disposée sur le milieu de l'isolateur plan) sont les plus faibles comparés à celles des autres configurations. Ceci indique que cette configuration de pollution, présente une rigidité élevée, par rapport aux autres configurations.
- Le cas le moins rigide, du point de vue isolation et prévention du contournement est celui où la couche polluée est disposé du côté haute tension.
- Alors que le cas le plus rigide, est quand la couche polluée est au milieu de l'isolateur.
- L'apparition de ces décharges peut être observée par l'augmentation de la DF.

L'analyse fractale de la tension appliquée nous permet de conclure que la DF de celle-ci ne donne malheureusement pas d'information pertinente. En effet, d'après nos résultats, aucune variation importante de la DF (du signal de la tension appliquée) n'a été observée, peu importe le niveau de tension ou de pollution.

L'analyse fractale du signal de la charge nous permet de conclure que la DF de celle-ci augmente en fonction de la tension, mais reste presque stable en fonction de la conductivité dans le cas uniforme. La DF augmente en fonction de la tension et en fonction de la conductivité dans le cas non-uniforme. De ce fait, la DF permet le diagnostic l'état de surface de l'isolateur pollué, à partir du signal de la charge, uniquement dans le cas de la configuration non-uniforme de la pollution.

D'après l'analyse faite sur les signaux du courant de fuite, la tension appliquée et la charge, le diagnostic de la sévérité de pollution se fait de manière efficace et pertinente uniquement pour les signaux du courant de fuite. Ceci est en accord avec notre recherche bibliographique, explicitée lors du chapitre I, mais aussi avec de nombreuses études [55-62] qui démontrent la véracité du courant de fuite pour le diagnostic de l'état de surface d'un isolateur pollué, même si ce diagnostic est établie en utilisant des méthodes autres que l'analyse fractale.

Chapitre V

**APPLICATION DES FRACTALES
SUR LES TRANSFORMEES EN
ONDELETTES DISCRETES**

Introduction

Le traitement du signal a pour principal objet la description des signaux liés au monde réel dans un but de traitement, d'identification, de compression, de compréhension ou de transmission. Dans ce contexte, les transformations linéaires ont toujours joué un très grand rôle, telles que la transformée de Fourier et la transformée en ondelette.

La transformation en ondelette d'un signal permet de décomposer le signal sur plusieurs échelles, fournissant alors des informations conjointes en temps et en fréquence. Les ondelettes sont, en réalité, un cas particulier de bancs de filtres, car elles décomposent le signal à l'aide de deux filtres, l'un passe bas et l'autre passe haut, afin de diviser le signal en deux parties haute et basse fréquences [56]. Une telle décomposition transforme un signal de taille N en deux signaux de tailles $N/2$, dont un signal est de haute fréquence et l'autre de basse fréquence.

Nous allons étudier dans ce dernier chapitre, la DF de la transformée en ondelette discrète des signaux. Ces derniers seront décomposés en utilisant l'ondelette mère sur 10 niveaux, donnant ainsi 10 signaux appelés « détails » et « approximations ». La DF sera appliquée uniquement sur les détails.

V.1. Transformée en ondelette

V.1.1. Transformée en ondelettes discrète

Dans l'analyse numérique et l'analyse fonctionnelle, une transformée en ondelettes discrète (DWT) est une transformée en ondelettes pour laquelle les ondelettes sont discrètement échantillonnées [57]. Comme pour les autres transformées en ondelettes, un avantage clé sur les transformées de Fourier est la résolution temporelle : elle capture à la fois les informations de fréquence et de localisation (dans le temps).

D'où l'expression de la transformée en ondelettes discrète donnée ci-après [58].

$$DWT_{\psi}(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) \Psi\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (V.1)$$

Ψ est l'ondelette mère dilatée par le paramètre a_0^m et translatée via le paramètre n , b_0 , a_0^m . a_0 et b_0 sont des valeurs fixées tel que $a_0 > 1$ et $b_0 > 0$. m et n sont des entiers naturels. Si on choisit $a_0 = 2$ et $b_0 = 1$, on parle alors de transformée dyadique. Certaines ondelettes peuvent être générées par analyse multi-résolution (AMR).

V.1.2. Analyse multi-résolution

L'analyse en multi-résolution permet de décomposer un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui donne une vue de la plus fine à la plus grossière.

Soit φ la fonction échelle. Elle doit être $L2$ et avoir une moyenne non nulle. On forme une base de fonctions d'échelle pour tout $j \in \mathbb{Z}$ comme suit :

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k) \quad (V.2)$$

et de la même manière la base d'ondelette ψ :

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad (V.3)$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à :

$$\varphi(t) = \sum_k 2 \cdot h(k) \varphi(2t - k) \quad (V.4)$$

$$\psi(t) = \sum_k 2 \cdot g(k) \varphi(2t - k) \quad (V.5)$$

Les expressions V.4 et V.5 représentent la décomposition de la fonction échelle et de la fonction ondelette en combinaisons linéaires de la fonction échelle à la résolution haute suivante directement.

La figure V.1 présente la décomposition en base d'ondelettes du signal x composé de N points. L'arbre de décomposition a $\log_2(N)$ niveaux. A chaque niveau, la résolution temporelle est divisée par 2, au dernier niveau les coefficients de détails sont représentés par un unique point, la résolution temporelle est nulle et la résolution fréquentielle est maximum. Le signal est décomposé en $N - 1$ coefficients de détail et 1 coefficient d'approximation (la composante de plus basse fréquence du signal).

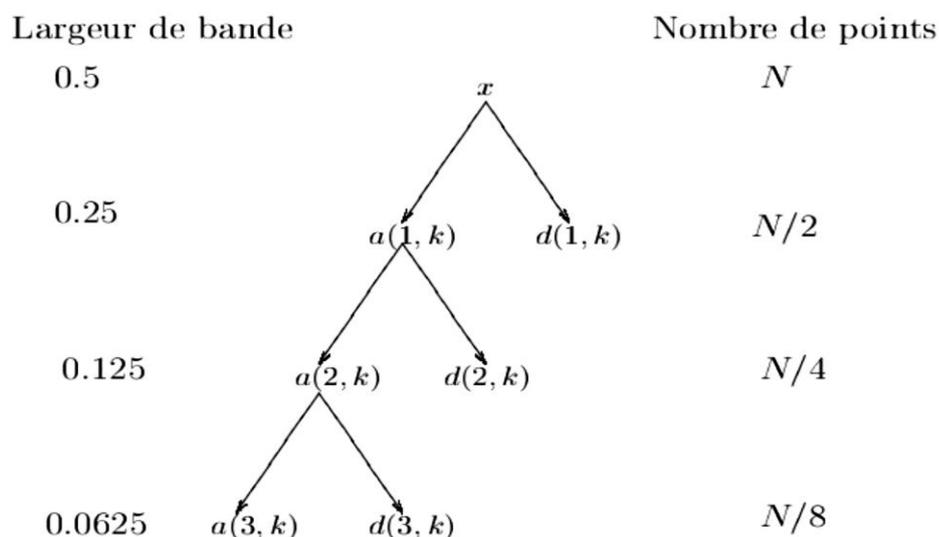


Figure V.1. Arbre de décomposition d'un signal sur une base d'ondelettes

V.1.3. Transformée en ondelettes de Daubechies

Les fonctions analysantes ou ondelettes sont définies par :

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (V.6)$$

L'ensemble de transformées d'ondelettes discrètes le plus couramment utilisé a été formulé par la mathématicienne belge Ingrid Daubechies en 1988. Cette formulation est basée sur l'utilisation de relations de récurrence pour générer des échantillonnages discrets de plus en plus fins d'une fonction d'ondelette mère implicite, chaque résolution est deux fois celle de l'échelle précédente [59].

Le choix de l'ondelette analysante joue un rôle primordial pour la compréhension des phénomènes transitoires comme les impulsions de décharges électriques observées sur le courant de fuite pour un état de pollution d'isolateurs sous des conditions humides. Il est cependant connu que les ondelettes db4 et db6 sont plus appropriées pour la détection des perturbations de courtes durées alors que les ondelettes db8 et db10 sont adéquates pour l'étude des perturbations de relatives longues durées [60].

Dans notre présent travail, nous choisissons d'utiliser l'ondelette de Daubechies 4 pour décomposer les signaux du courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge, afin d'appliquer notre algorithme (MRBC) pour voir l'influence de la DF sur les dix premiers détails de chaque signal.

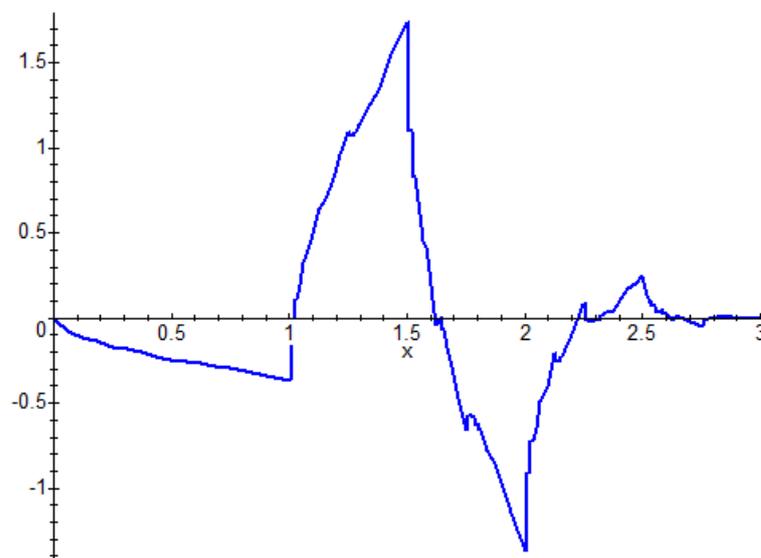


Figure V.2. Ondelette mère de Daubechies

V.2. Application de la décomposition d'ondelettes sur les signaux (courant de fuite, tension appliquée et charge)

Dans cette partie, nous avons utilisé la transformation en ondelettes à base d'ondelettes de Daubechies à l'aide de la bibliothèque Matlab sur les ondelettes (wavelet) [61]. Nous avons appliqué cette transformation sur les signaux que nous avons utilisés lors du chapitre IV pour l'en extraire les dix premiers détails. La figure V.3 présente les signaux de chaque détail d'un signal de courant de fuite.

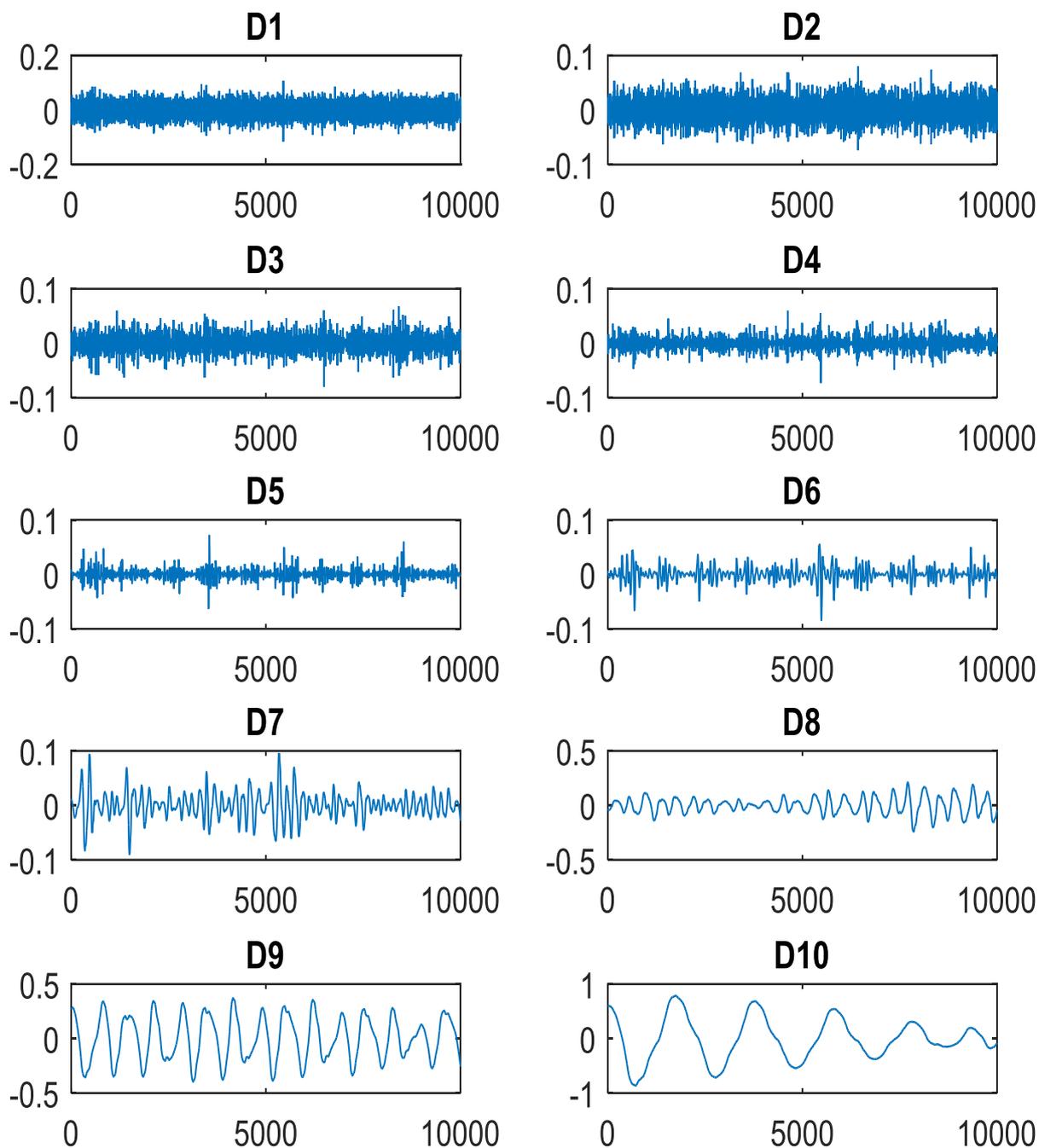


Figure V.3. Dix détails d'un signal du courant de fuite par l'ondelette de Daubechies (db1)

Dans les dix représentations des signaux, nous voyons bien qu'à chaque fois qu'on décompose un signal d'approximation, nous obtenons un signal d'une forme proche à celle de fondamental (D10) (sinusoïdale).

V.2.1. Etude de la DF des ondelettes appliquée sur le signal du courant de fuite

Nous avons choisi le signal du courant de fuite pour différentes conductivités (10,1, 1,2, 0,71, 0,190 et 0,01 mS/cm) avec une tension d'application de $3 \text{ kV}_{\text{eff}}$ dans le cas de la pollution uniforme. Nous avons appliqué la décomposition en ondelettes sur ces signaux, après avoir appliqué l'algorithme de calcul de la DF pour chaque détail de chaque signal. Les résultats sont présentés sur la figure V.4 dans le cas non-uniforme, à savoir, les trois configurations que nous avons explicités lors de chapitre IV.

V.2.1.1. Pollution uniforme

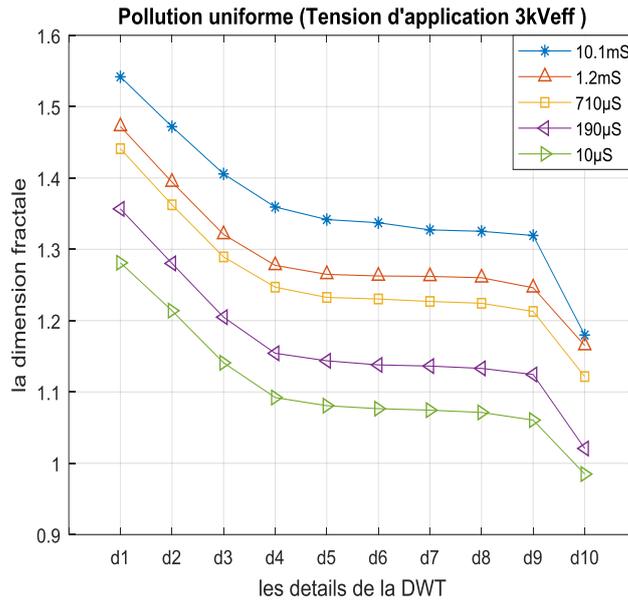
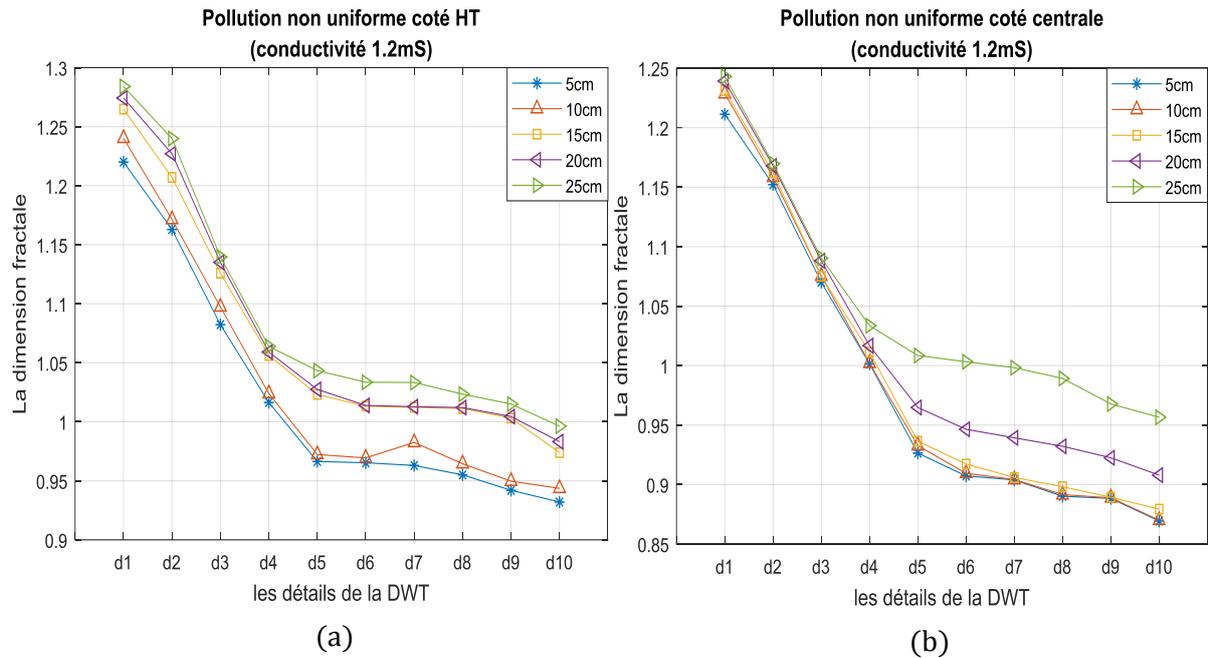


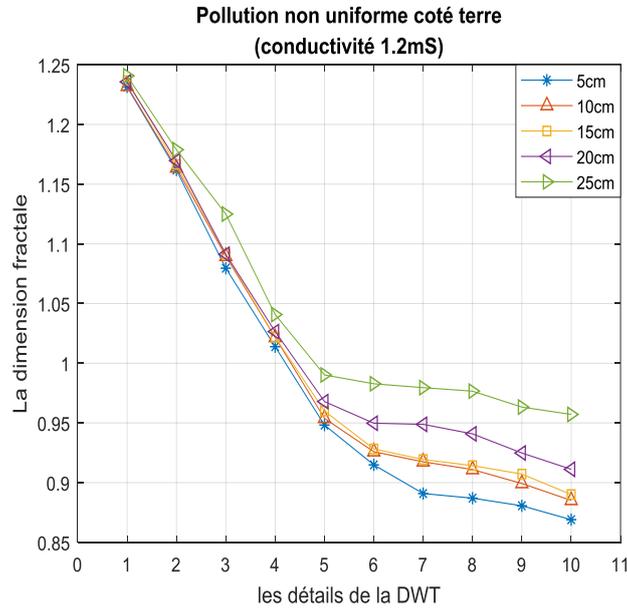
Figure V.4. DF des détails d’ondelettes du signal du courant de fuite pour les différentes conductivités

La DF diminue en fonction de détail pour tous les signaux du courant de fuite la diminution est rapide pour les trois premiers détails, alors qu’elle est lente pour les six derniers, puis elle est rapide pour le détail dix.

Pour le cas uniforme, nous voyons bien que les courbes sont différenciées Le premier détail donne des DF très proche de celle du signal lui-même.

V.2.1.2. Pollution non-uniforme

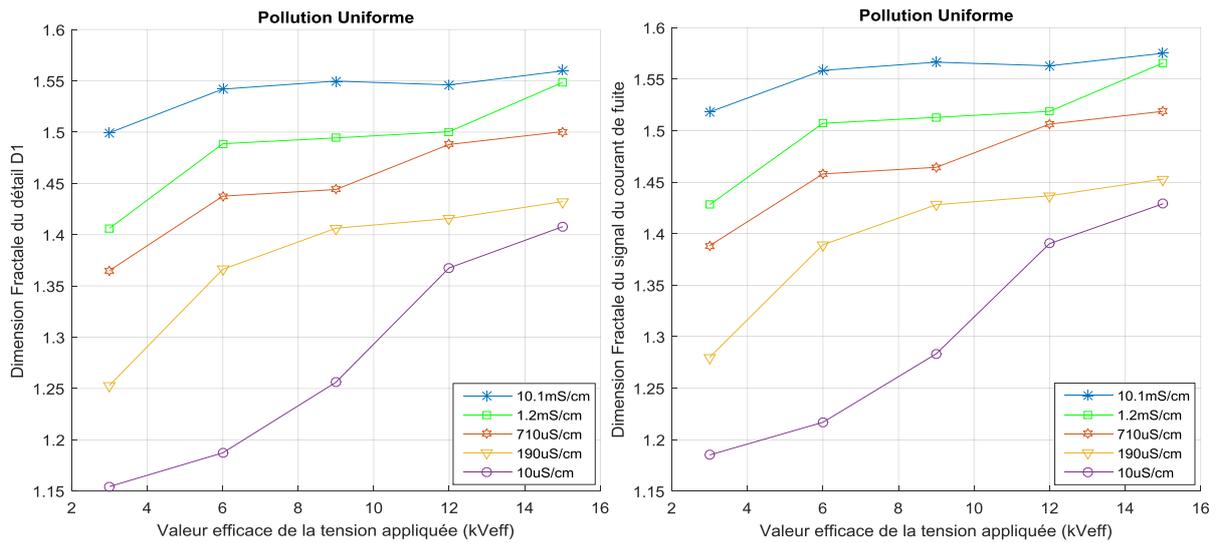




(c)

Figure V.5. DF des détails d’ondelettes du signal du courant de fuite pour les différentes conductivités et pour trois configurations de la couche polluante

La DF diminue en fonction de détail pour tous les signaux de courant de fuite [12]. Cette diminution, dû à l’appauvrissement des détails en information en raison de la décomposition de la fréquence de D1 à D10, est rapide pour les cinq premiers détails, alors qu’elle est lente pour les cinq derniers. Le premier détail donne des DF très proche de celle du signal de base, comme le montre la figure V.6. Donc le premier détail contient le plus d’information sur le signal, ce résultat est confirmé par plusieurs auteurs [63].



(a)

(b)

Figure V.6. Comparaison entre la DF du signal du courant de fuite et celui du détail D1

Pour le cas non-uniforme, les courbes sont très proches pour les cinq premiers détails, légèrement séparées pour les cinq derniers détails. En comparant la DF de chaque détail en fonction de la conductivité, nous trouvons que la dimension la plus élevée est celle de la conductivité la plus sévère. Donc, nous constatons pour la dimension des détails obtenus par la transformée en ondelettes discrète (DWT) qu’il y’a une relation de corrélation directe avec la pollution (conductivité).

Comme conclusion, nous pouvons dire que l'utilisation de la DF sur la transformée en ondelettes est tout aussi performant que son application directe sur le signal du courant de fuite, dans le cas de la pollution uniforme. Cependant, dans le cas de la pollution non-uniforme, il est préférable d'appliquer la DF directement sur le signal du courant de fuite, sans pour autant appliquer la transformée en ondelette.

V.2.2. Etude de la DF des ondelettes appliquée sur le signal de la tension appliquée

Nous étudions dans ce cas, l'influence de la conductivité volumique (10,1, 1,2, 0,71, 0,19 et 0,01 mS/cm) dans le cas uniforme et de la largeur de la couche polluante (5, 10, 15, 20 et 25 cm) dans le cas non-uniforme sur la DF de la transformée en ondelettes du signal de la tension appliquée. Les résultats des DF obtenues sont exposés sur les figures V.7 et V.8.

V.2.2.1. Pollution uniforme

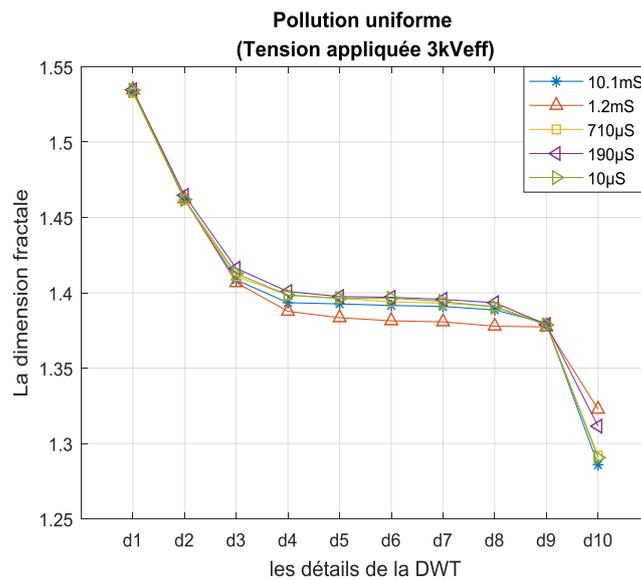


Figure V.7. DF des ondelettes appliquées sur le signal de la tension appliquée pour les différentes conductivités

V.2.2.2. Pollution non-uniforme

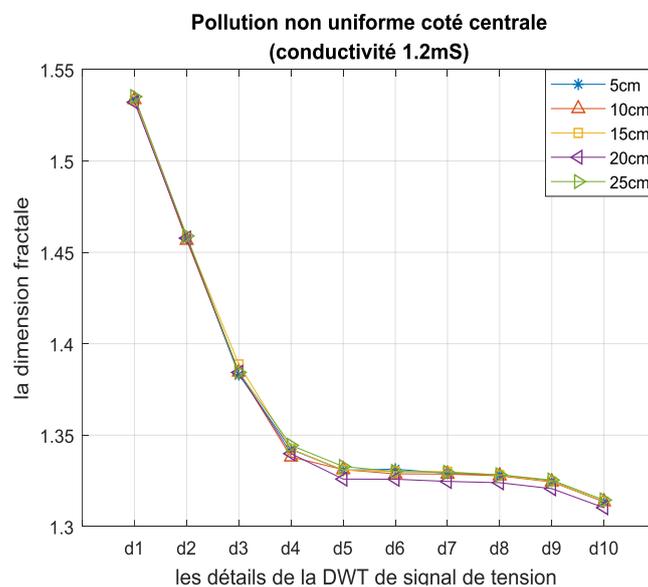


Figure V.8. DF des ondelettes appliquées sur le signal de la tension appliquée pour les différentes largeurs de la couche polluante

Les courbes de la DF de chaque détail du signal de la tension appliquée dans les deux cas de pollution sont semblables et invariants. Alors, nous ne pouvons rien conclure. Donc, l'application de l'analyse fractale sur les ondelettes du signal de la tension ne donne malheureusement pas d'information fiable sur l'état de surface de l'isolateur.

V.2.3. Etude de la DF des ondelettes appliquée sur le signal de charge

Nous étudions dans ce cas, l'influence de la conductivité volumique (10,1, 1,2, 0,71, 0,19 et 0,01 mS/cm) dans les cas uniforme et non-uniforme sur la DF des ondelettes appliquées sur le signal de la charge pour les trois concentrations en Kaolin (40, 100 et 200 g/l). Les résultats des DF obtenues sont exposés sur les figures V.9 et V.10.

V.2.3.1. Pollution uniforme

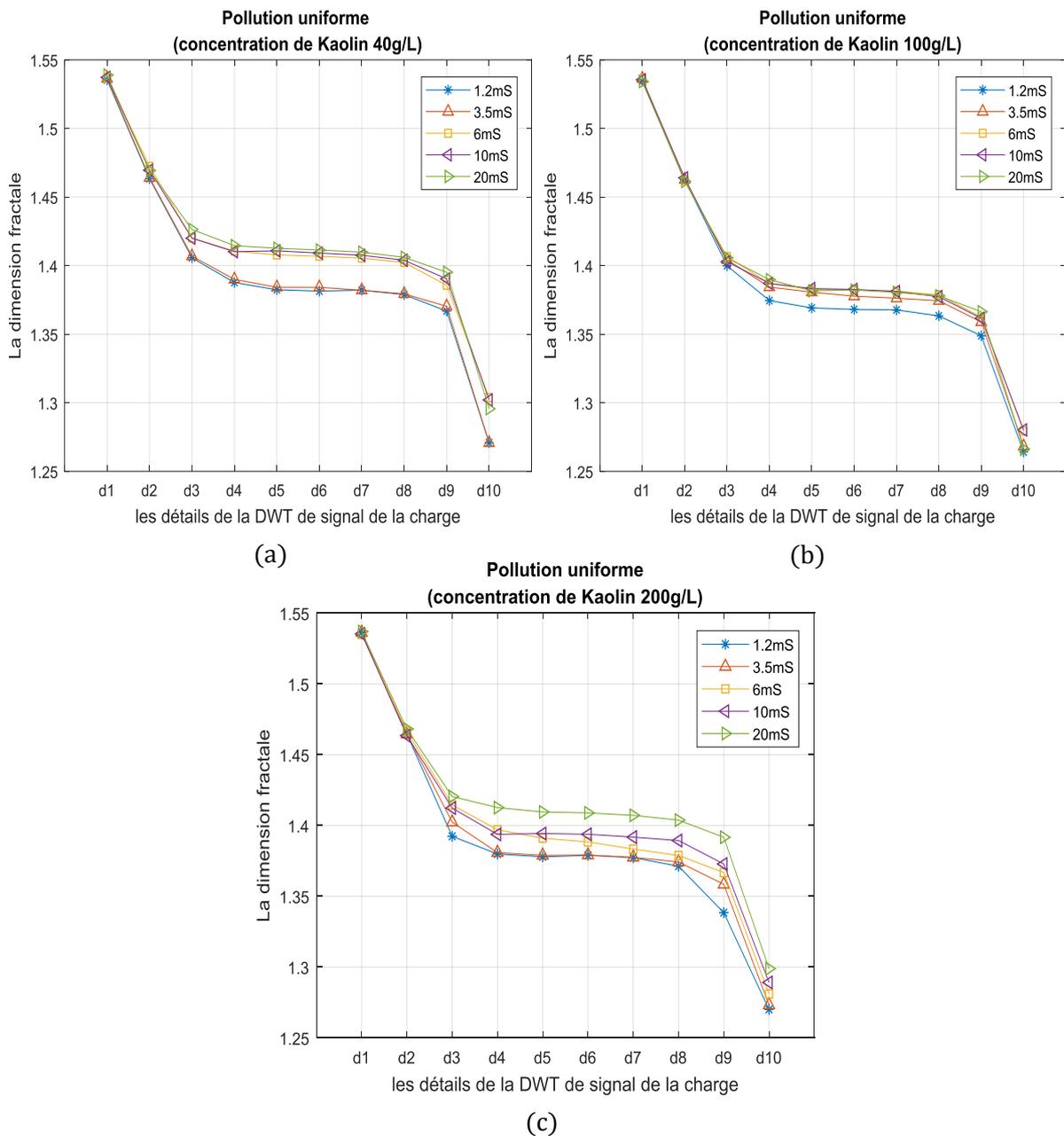


Figure V.9. DF des ondelettes appliquées sur le signal de la charge pour les conductivités dans le cas uniforme

La DF diminue en fonction de détail pour tous les signaux de la charge, la diminution est rapide pour les trois premiers détails, alors qu'elle est lente pour les six derniers, puis elle est rapide pour le détail dix. Le premier détail donne des DF très proche de celle du signal lui-même.

Nous avons remarqué que les courbes sont très proches pour les trois premiers détails, légèrement séparées pour les restes. En comparant la DF de chaque détail en fonction de la conductivité, on trouve que la dimension la plus élevée est celle de la conductivité la plus sévère (20 mS/cm).

V.2.3.2. Pollution non-uniforme

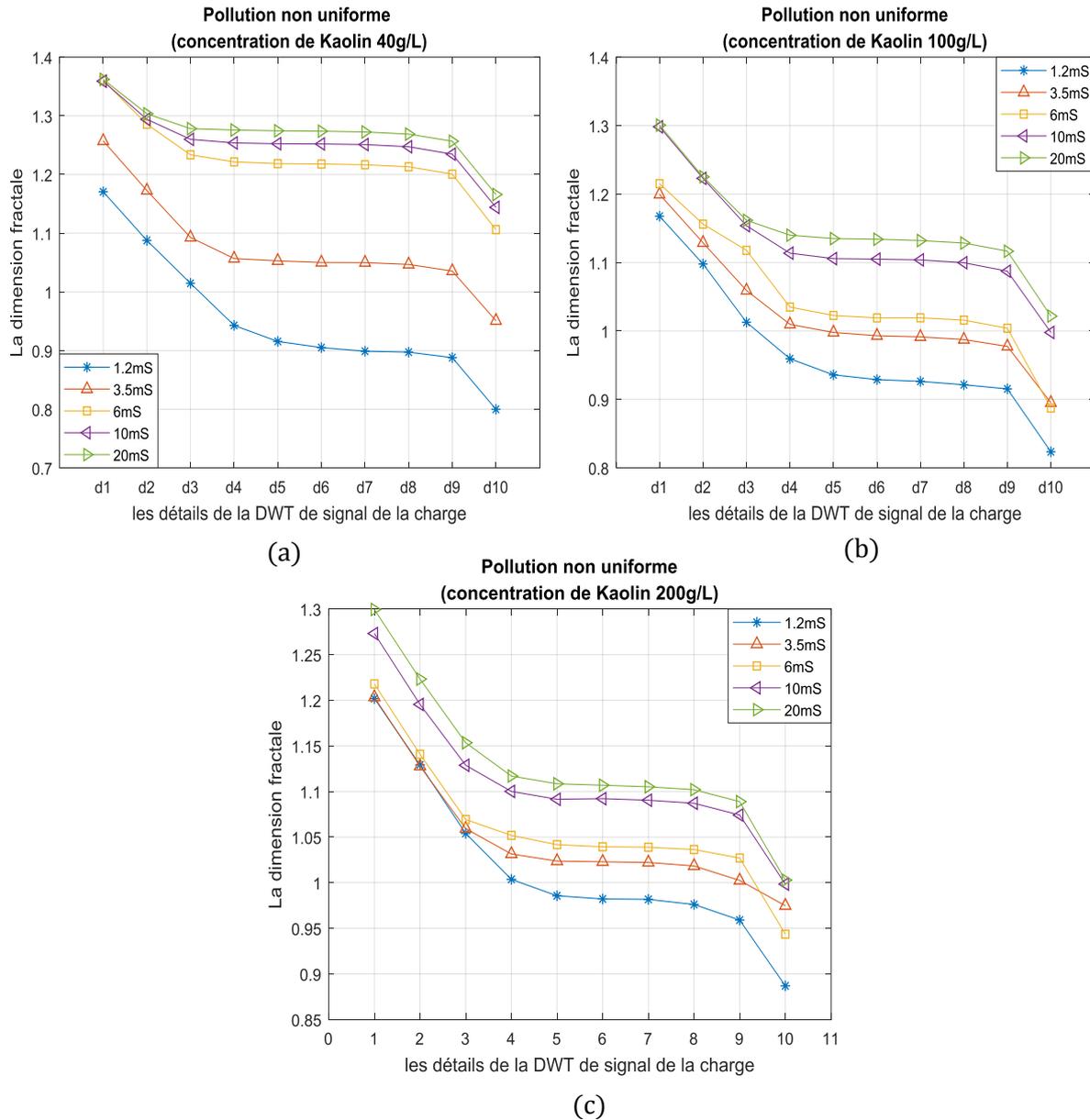


Figure V.10. DF des ondelettes appliquées sur le signal de la charge pour les conductivités dans le cas non-uniforme

La DF diminue en fonction de détail pour tous les signaux de la charge, la diminution est rapide pour les trois premiers détails, alors qu'elle est lente pour les six derniers, puis elle est rapide pour le détail dix. Le premier détail donne des DF très proche de celle du signal lui-même.

même, car le premier détail contient le plus d'information sur le signal. Ceci est en accord avec la théorie des ondelettes, car le premier détail représente le signal en haute fréquence.

Pour le cas non-uniforme, nous voyons bien que les courbes sont différenciées. En comparant la DF de chaque détail en fonction de la conductivité, on trouve que la dimension la plus élevée est celle de la conductivité la plus sévère (20 mS/cm). Donc, nous constatons pour la dimension des détails obtenus par la transformée en ondelettes discrète (DWT) qu'il y'a une relation de corrélation directe avec la pollution (conductivité).

Conclusion

Pour clore ce chapitre, nous pouvons dire que la DF de la transformée en ondelettes permet de corriger certains manques et insuffisances de la DF appliquée directement sur le signal étudié.

Les détails obtenus lors de la décomposition du signal de courant de fuite par la DWT nous donnent une vue plus large sur la variation de notre signal au niveau des hautes et basses fréquences. La DF du premier détail (D1) est le plus proche du signal lui-même. Ceci est dû au fait que le D1 est la représentation en haute fréquence. Il est donc le détail qui contient le plus d'informations sur le signal de courant de fuite.

Le calcul de la DF sur la transformée en ondelettes du signal de la tension appliquée ne donne aucun résultat, pour n'importe quelle configuration de pollution.

Concernant le signal de la charge, la DF du signal temporel de la charge est inefficace dans le cas uniforme. Dans le cas non-uniforme, la DF doit être appliquée sur la représentation en ondelettes de la charge.

De ce fait, l'ondelette, de part sa représentation haute fréquence du détail D1, permet d'extraire des données intrinsèques au signal temporel. L'application de la DF sur ces données, permet de faire le diagnostic de l'état de surface de l'isolateur pollué.

CONCLUSION GENERALE

En vue de diagnostiquer avec fiabilité l'état de surface des isolateurs pollués, nous avons mis en pratique, une nouvelle méthode de traitement de signal. Cette méthode de calcul se base sur un algorithme inédit que nous avons mis en œuvre, pour calculer l'un des paramètres les plus importants de l'étude fractale, à savoir, la dimension fractale (DF).

De ce fait, nous avons élaboré un algorithme de calcul de la DF sur la base d'un signal temporel donné. Puis, nous avons utilisé cet algorithme sur les signaux du courant de fuite, de la tension appliquée et la charge. Par la suite, nous avons d'abord traités les signaux étudiés par une décomposition en ondelettes discrètes. Puis, nous avons appliqué l'algorithme de calcul de la DF sur le détail haute fréquence (D1) de cette décomposition.

Dans un premier lieu, l'étude du signal du courant de fuite (que ce soit dans le cas uniforme ou non-uniforme), nous a permis de conclure que la DF de celui-ci augmente en fonction de la tension appliquée et du niveau de contamination (conductivité de la solution polluante, ou largeur de la couche de pollution).

Il est intéressant de noter que dans le cas de la pollution non-uniforme, la DF augmente en fonction de la valeur efficace de la tension appliquée, ainsi que de la largeur de la couche polluante. La DF est toujours plus grande dans le cas où la couche polluée est disposée du côté de l'électrode sous tension, que dans les deux autres dispositions, sauf pour la tension de $3 \text{ kV}_{\text{eff}}$ et pour les largeurs de la couche polluante de 5 et 10 cm, les DF sont relativement très proches.

Aussi, toujours dans le cas non-uniforme, nous avons pu conclure que le cas le moins rigide, du point de vue isolation et prévention du contournement est celui où la couche polluée est disposée du côté haute tension. Alors que le cas le plus rigide, est quand la couche polluée est au milieu de l'isolateur.

En deuxième lieu, cet algorithme, s'est montré inefficace quand il est appliqué directement à la tension appliquée. En effet, aucune variation importante de la DF n'a été observée, peu importe le niveau de tension ou du degré de pollution.

En vue d'apporter une solution à l'inefficacité de la DF quand elle est utilisée sur le signal de la tension appliquée, nous avons pensé à utiliser la transformée en ondelette pour décomposer le signal de la tension appliquée en 10 détails. Puis, sur ces détails, le calcul de la DF sera accompli.

Dès lors, il est important de noter que le détail le plus représentatif est celui correspondant à l'intervalle haute fréquence (D1) de la transformée en ondelette. Car, nous avons constaté que le premier détail donne des DF très proche de celle du signal lui-même, Ceci est dû au fait que le détail D1 (haute fréquence) représente le mieux le signal de base. De ce fait, la DF sera calcul sur la base de ce signal.

Malheureusement, d'après nos résultats, le calcul de la DF du D1 du signal de la tension appliquée ne donne pas de résultats. De ce fait, le signal de la tension appliquée est considéré comme infructueux pour le diagnostic de l'état de surface d'un isolateur, à travers l'analyse fractale.

En dernier lieu, nous avons étudié le signal de la charge, où sa DF augmente en fonction de la tension appliquée et du niveau/largeur de la pollution, quel que soit le type de la pollution (uniforme ou non-uniforme), mais elle reste presque constante en fonction de la conductivité dans le cas uniforme. Cependant, l'inverse est observé si la transformée en ondelettes est appliquée. En effet, la DF du détail D1 de la représentation haute fréquence (D1) du signal de la charge est efficace pour le cas non-uniforme, mais ne donne aucune information dans le cas uniforme.

Pour conclure notre manuscrit, nous pouvons dire qu'en manière générale, la DF est directement proportionnelle à la longueur de la couche de contamination, ou la conductivité de la solution polluante. De ce fait, la DF décrit parfaitement la sévérité de pollution à la surface de l'isolateur.

L'application de la DF sur la transformée en ondelette peut être vue comme amélioration de la DF sur le signal de base directement, plus précisément dans le cas du signal de la charge, pour une pollution non-uniforme.

De ce fait, l'analyse fractale est efficace pour le d'étude de l'état de surface d'un isolateur pollué, si elle est basée sur le signal du courant de fuite. Cependant, la décomposition par ondelette peut s'avérer nécessaire, dépendamment de la nature et disposition de la pollution, si le signal étudié est celui de la charge électrique.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. Kone. Contribution à l'amélioration de la méthode en ligne de mesure de champ électrique pour détecter la présence de défauts internes au sein des isolateurs composites. 153p. Mémoire de fin d'études : la maîtrise en ingénierie : Chicoutimi, Université du Québec : Avril 2015.
- [2] K. Siderakis and M. Dimitropoulou. Insulation Coordination and Pollution Measurements in the Island of Crete. IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Sydney, NSW, Australia, 19-22 July 2015, pp: 951-954, ISBN: 978-1-4799-8903-4.
- [3] A. Tzimas, E. Da Silva, S. M. Rowland, B. Boumeced and M. Queen, M.Michel. Asset Management Frameworks for Outdoor Composite Insulators. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, Vol. 19, Issue 6, pp. 2044-2054.
- [4] S.M. Gubanski, A.Dernfalk, J.Anderson and H.Hillborg. Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators. IEEE Trans. on Dielec. And Insul, October 2007, Vol.14, Issue 5, pp 1065-1080.
- [5] W. Chen, Q. Xia, C. Sun and L. Li. Research on fractal dimension of leakage current for discharge zones dividing and contamination forecasting of insulators. Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering 31(13), May 2011, pp. 121-127.
- [6] W. Chen, W. Wang, Q. Xia, B. Luo and L. Li. Insulator Contamination Forecasting Based on Fractal Analysis of Leakage Current. Energies, vol. 5, Issue. 7, 2012, pp. 2594-2607.
- [7] Chen, W. Yao, C. Sun and C. A. new broadband micro-current transducer for insulator leakage current monitoring system. IEEE Trans. Power Deliv, Vol. 23, 2008, pp. 355-361.
- [8] IEC 60507. Artificial Pollution Tests on High Voltage Insulators to Be Used on AC Systems (a.c.), 2nd ed, IEC: Geneva, Switzerland, 1997. Available online: [http : // webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/mysearchajax?Openform&key=IEC%2060507&sortin g=&start=1&onglet=1](http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/mysearchajax?Openform&key=IEC%2060507&sortin g=&start=1&onglet=1).
- [9] I. Ramirez-Vazquez, J. Ruiz-Pinales and J. Eduardo Salgado-Talavera. Fractal analysis of nano-reinforced silicone rubber insulators evaluated on a tracking wheel. IEEE Trans. on Dielec. And Elect. Insul, June 2014, Vol. 30, No. 4, pp. 21-27.
- [10] International Standard IEC 60587. Electrical materials used under severe ambient conditions - Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion. Third Edition 2007. ISBN: 0 580 10210 6.
- [11] H. O. Peitgen, H. Jurgensa and D. Saupe. Chaos and Fractals: New Frontiers of Science. 2nd edition. New York, NY: Springer, 1992. 214p. ISBN 978-0-387-21823-6.
- [12] Hui, A.; Zheng, J.; Lin, H.; He, B. Wavelet-fractal characteristics of leakage current on HV Insulators. In Proceedings of the 3rd International Conference on Electric Utility

Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing, China, 6–9 April 2008, pp. 732–736.

[13] W. Lu, X. F. Wang and Q. Liu. Fractal Index of Streamer Patterns in Insulating Liquids under Lightning Impulse Voltages. IEEE International Conference on Liquid Dielectrics, Bled, Slovenia, 29 June-3 July 2014, pp. 1-4.

[14] B. Mandelbrot. Les Objets fractals. Forme, hasard et dimension. Paris : Flammarion, 1975. 212p. Champs sciences. ISBN-13: 978-2081246171.

[15] J. de Souza and S. Pires Rostirolla. A fast MATLAB program to estimate the multifractal spectrum of multidimensional data: Application to fractures. Centre Polytechnique de l'Université Fédérale de Parana, Laboratoire d'Analyse des Bassins et Pétro-physique, Brésil, Vol.37, Février 2011. pp. 214-249.

[16] M. Emam. Prédiction des facteurs de risque conduisant à l'Emphysème chez l'homme par utilisation de techniques diagnostiques. 63p. Thèse de doctorat : discipline physique : Paris, Université Paris-sud : 2012.

[17] B. Mandelbrot. The fractal geometry of nature. Centre de recherche Thomas J. Watson, New York, pp. 263, 1982.

[18] K. Falconer. Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Application. Wiley, 2e éd, 2003. 366p. ISBN-13: 978-0470848616.

[19] S. Kyriacos. Réseaux vasculaires : analyse fractale et modélisation de la croissance. 290p. Thèse de doctorat : Sciences Pharmaceutiques : Montréal, Université de Montréal, 1997.

[20] J. Dubois and J. Chaline. Le monde des fractales, la géométrie cachée de la nature. Roanne : ellipses, 2015. 312p. ISBN-13: 978-2729827823.

[21] M. M. Harbaji, A. H. Zahed, S. A. Habboub, M. A. AlMajidi, M. J. Assaf, A. H. El-Hag and N. N. Qaddoumi. Design of Hilbert Fractal Antenna for Partial Discharge Classification in Oilpaper Insulated System. Sensors Journal IEEE, Vol. 17, Issue 4, pp. 1037-1045, ISSN 1530-437X. 15 Feb 2017.

[22] J. Briggs and E. David Peat. Un miroir turbulent - Guide illustré de la théorie du chaos. Paris: Dunod, 1989. 223p. Harper & Row publishers. ISBN: 978-2729603489.

[23] G Cherbit and J. P. Kahane. Fractals : Dimensions non entières et applications. Paris : Elsevier Masson, 1999. 376p. Informatique et Internet ISBN-13 : 978-2225810312.

[24] R. Botet. Les fractales en Physique. Orsay : Laboratoire de physique des solides Technique de l'ingénieur, Avril 2001. pp. 2-3.

[25] M. R. Schroeder. Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise. New York: W.H Freeman & Co, 1991. 448p. Dover Books on Physics. ISBN-13 : 978-0486472041.

- [26] L. Koehl. Conception et réalisation d'un estimateur de dimension fractale par utilisation de techniques. 114 p. Thèse de doctorat, spécialité de productique : automatique et informatique industrielle : Lille, Université des sciences et technologies de Lille, 1998.
- [27] C. Tricot, J. F. Quiniou, D. Wehbi, C. Roques-Carmes and B. Dubuc. Evaluation de la dimension fractale d'un graphe. HAL, Classification Physics Abstracts, Revue Phys Appl, 1988, pp. 111-124.
- [28] N. Richard, B. Augereau, F. Martin and M. Leard. Reconnaissance automatique de texture par analyse fractale. Université de Poitiers, 18-21 septembre, 1995, URA CNRS n°356, pp. 697-700.
- [29] J.F. Gouyet. Physique et structures fractales. Paris : Dunod, juin 1997. 234p. Physique. ISBN-13: 978-2225827778.
- [30] A. P. Pentland, Fractal based description of natural scenes IEEE Trans. PAMI, 1984, N° 6, pp. 661-674.
- [31] F. C. Gu, H. C. Chang and C. C. Kuo. Gas-Insulated Switchgear PD Signal Analysis Based on Hilbert - Huang Transform with Fractal Parameters Enhancement. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, Vol. 20, No. 4, pp 1049-1055.
- [32] W. Zahn and A. Zösch. Characterization of thin film surfaces by fractal geometry. Fresenius Journal of Analytical Chemistry. Vol: 358. Mai 1997. pp. 119-121.
- [33] H.F. Huang, X.L. Song, C. Liu and X.Z. Huai. A novel fractal method for fault diagnosis and signal measurements. School of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, China, 2015.
- [34] D. Amarasinghe, U.Sonnadara, M. Berg and V. Cooray. Fractal dimension of long electrical discharges. Department of Physics, University of Colombo, Colombo 3, Sri Lanka. Division for Electricity and Lightning Research, Uppsala University, Sweden, Journal of Electrostatics 73, December 2015, vol: 127, pp. 33-37.
- [35] A. Dimitrakopoulou-Strauss and L. G. Strauss. Fractal Dimension Based on Box Counting: A New Parameter for the Quantification of Dynamic PET Studies. Medical PET Group - Biological Imaging Clinical Cooperation Unit Nuclear Medicine German Cancer Research Center, Heidelberg, Germany, 2003, pp. 42 – 46.
- [36] A.N. Esgiar and P.K. Chakravorty. Electrocardiogram signal classification based on fractal features. IEEE Computers in Cardiology, 2004, pp. 661-644.
- [37] V. Pean, M. Ouayoun, C.H. Chouard and B. Meyer. A Semi-Continuous Box Counting Method for Fractal Dimension Measurement of Short Single Dimensions Temporal Signals - Preliminary Study. Ear, Nose and Throat Research Laboratory Centre-Hospitalo-Universitaire Sea int-Antoin, Paris – France, 2000, pp. 105-115.
- [38] Q. Fu, C. Li, F. Cai, W. Wang and S. Xiao. Emitter signal sorting based on fractal dimensions of pulse envelope's front edge. IEEE, International Conference on

- Military Communications and Information Systems (ICMCIS), Brussels, Belgium 23-24 May 2016. pp. 1-5.
- [39] B. S. Raghavendra and D. Narayana Dutt. Computing Fractal Dimension of Signals using Multiresolution Box-counting Method. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 37, 2010, pp. 1266-1281.
- [40] M. Katz. Fractals and the analysis of waveforms. *Comput Biol Med* 18, 1988, pp. 145-156.
- [41] D. R. Jevtic and M. P. Paskas. Application of Katz Algorithm for Fractal Dimension in Analysis of Room Impulse Response. *IEEE, Telecommunications Forum (TELFOR)*, 19th, Belgrade, Serbia, 22-24 Nov. 2011, p. 1063-1066.
- [42] T. Higuchi. Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory. *Physica D*, 1988, vol: 31 pp. 277-283.
- [43] F. Garavito, J. Gonzalez, J. Cabarcas, D. Chaparro, I. Portocarrero and A. Vargas. EMG Signal Analysis Based on Fractal Dimension for Muscle Activation Detection Under Exercise Protocol. *IEEE, XXI Symposium On Signal Processing, Images and Artificial Vision (STSIVA)*, Bucaramanga, Colombia, 31 Aug.-2 Sept. 2016, p. 1-5.
- [44] C. K. Smitha and N. K. Narayanan. Analysis of fractal dimension of EEG signals under mobile phone radiation. *IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)*, Kozhikode, India, 19-21 Feb. 2015, p. 1-5.
- [45] Liu Jiazhao, Ye Weixiang, Zhang Wei, Wang Cheng and Liu Guohua. Design and implementation of a fuzzy control filtering approach based on the fractal dimension of the SPR signal. *IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing*, KunMing, China 5-8 Aug. 2013, p. 1-6.
- [46] B. Dubuc and S. Dubuc. Error bounds on the estimation of fractal dimension. *SIAM J Numer Ana*, 1996. pp. 602-626.
- [47] S. F. Fraga and J. R. Mondragón. Comparison of Higuchi, Katz And Multiresolution Box-counting Fractal Dimension Algorithms For EEG Waveform Signals Based On Event-Related Potentials. *Technical-scientific biannual publication, Universidad EIA, Envigado (Colombia)*, 2017, Vol. 14, Issue n° 27, pp. 73-83
- [48] T. Kapitaniak. *Chaos for Engineers theory, application, and control*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000, 144 p. Mathematics / Computational Methods of Engineering. ISBN: 978-3-642-57143-5.
- [49] Claudia Secrieru. *Applications de l'analyse fractale dans le cas de ruptures Dynamiques*. 256p. Thèse de doctorat : Sciences de l'ingénieur [physics] : Paris, Arts et Métiers ParisTech, 2009.
- [50] C. Tricot. *Courbes et Dimension Fractale : calcul de dimension de graphe*. Berlin: Springer, 1999. 377 p. Measure and Integration. ISBN: 978-3-540-65504-6.

- [51] S. Shoupeng and Q. Peiwen. A Fractal dimension Based Signal Processing Technique and Its Use for Nondestructive Testing. Springer, 2007, Vol. 43, Issue4, pp. 270-280.
- [52] S. Harrouni. New method for estimating the fractal dimension of discrete temporal signals. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, 2008, p. 2497-2502.
- [53] M. A. Douar and M. C. Bouzidi. Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur pollué à l'aide des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée. 190 p. Mémoire de Projet de Fin d'Etudes : Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 2009.
- [54] I. Harzelli and Y Maanani. Mesure du courant de fuite et de la charge électrique d'un isolateur pollué de haute tension. Caractérisation de son état de surface en utilisant la transformée en ondelette. 159 p. Mémoire de Projet de Fin d'Etudes : Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 2011.
- [55] M. A. Douar, A. Mekhaldi and M. C. Bouzidi. Flashover Process and Frequency Analysis of the Leakage Current on Insulator Model under non-Uniform Pollution Conditions. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, August 2010, Vol. 17, Issue. 4, pp. 1284-1297.
- [56] A. K. Chaou. Techniques de diagnostic et de classification de l'état de surface d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz. 113 p. Thèse de doctorat : Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 29 Octobre 2015.
- [57] X. Zhou, C. Zhou, and I. J. Kemp. An Improved Methodology for Application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. , 2005, Vol. 12, pp. 586-594.
- [58] M.Solanki, Y.Song, S.Potts and A. Perks. Transient Protection of Transmission Line Using Wavelet Transform. Seventh Intern. IEEE Conf. on Developments in Power System Protection, Amsterdam, Netherlands, 9-12 April 2001, p. 299–302.
- [59] F. Truchetet. Ondelettes pour le signal numérique. Paris : Editions Hermes, janvier 1998. 156 p. Traitement du signal. ISBN: 978-2866016722.
- [60] K. Dinesh, S. Ashwin, V. Harish, E. VarathKanth, C. Venkatasashaiah and R. Sarathi. Understanding the surface condition of Insulation Material Using Wavelets. CBIP International Conference in Maintenance Technologies of EHV Transmission Lines, New Delhi, India, 29-30 April 2003.
- [61] M. Weeks. Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets. Burlington: Jones and Bartlett Publishers, 2010. 492p. Digital Design. ISBN: 0-9778582-0-0.
- [62] L. Qin, G. Cao, X. Zhang, D. Qiu and G. Wu. Study on the Fractal Characteristics of the Leakage Current of Composite Insulators. Gaoya Dianqi/High Voltage Apparatus, August 2017, Vol. 53, Issue. 8, pp. 117-122.

[63] M. Bouhaouche and A. K. Chaou. Diagnostic de l'état de surface d'un isolateur pollué de haute tension en utilisant les méthodes de traitement de signal. 188p. Mémoire de Projet de Fin d'Etudes : Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 2012.