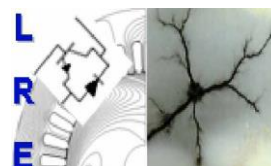


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Thèse de Doctorat

Présentée par

Mr MAADJOUDJ Djamal
Ingénieur /Master en Electrotechnique ENP
Pour l'obtention du titre de
Docteur Troisième Cycle (D/LMD) en Electrotechnique

Thème

Comportement des isolateurs de haute tension sous pollution désertique

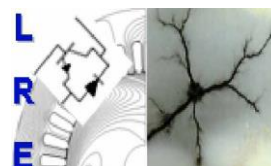
Président :	Boubakeur Ahmed	Professeur à l'ENP, Alger
Rapporteurs :	Mekhaldi Abdelouahab	Professeur à l'ENP, Alger
	Teguar Madjid	Professeur à l'ENP, Alger
Examineurs :	Hellal Abdelhafid	Professeur à l'ENP, Alger
	Moulai Hocine	Professeur à l'USTHB, Alger
	AILAM Elhadj	Professeur à l'UKM, Aïn Defla

ENP 2020

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



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Thèse de Doctorat

Présentée par

Mr MAADJOU DJ Djamal
Ingénieur /Master en Electrotechnique ENP
Pour l'obtention du titre de
Docteur Troisième Cycle (D/LMD) en Electrotechnique

Thème

Comportement des isolateurs de haute tension sous pollution désertique

Président :	Boubakeur Ahmed	Professeur à l'ENP, Alger
Rapporteurs :	Mekhaldi Abdelouahab	Professeur à l'ENP, Alger
	Teguar Madjid	Professeur à l'ENP, Alger
Examineurs :	Hellal Abdelhafid	Professeur à l'ENP, Alger
	Moulai Hocine	Professeur à l'USTHB, Alger
	AILAM Elhadj	Professeur à l'UKM, Aïn Defla

ENP 2020

ملخص - يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير تلوث الصحراء على سلوك نموذج مسطح لعازل كهربائي HT . ركزنا على تأثير كمية الرمل الموصوفة ب كثافة المادة غير القابلة للذوبان (NSDD)، عرض وموضع الطبقة الملوثة على عملية الاحتاطة. ولهذا الغرض، فإننا نستخدم تحليل حجم التيار المتسرب وارتفاعه (LC) كمؤشر لسلوك العازل فيما يتعلق بكل من مستوى التلوث ونشاط التفريغ الكهربائي على سطح العازل، خاصة بالنسبة لهذا النوع من التلوث الصحراوي الجزائري. يسمح التحليل الدقيق لمقاطع الفيديو المسجلة، التي تم تصويرها بواسطة كاميرا رقمية، بفحص تطور الأفراس الكهربائية بصرياً، إلى غاية الوميض الكامل، وفقاً للجهود المطبق. وقد تم التحقق التوافقيات غريبة والمكون الأساسي لتمييز حالة سطح عازل. وعلاوة على ذلك تم اعتماد تقنية تحويل الموجات لدراسة خصائص الزمنية للترددات ولحساب الانحراف المعياري (STD) للمكونات التوافقية المختلفة لـ LC. في الحالة التلوث المنتظم، تمثل STD لتفاصيل الترددات المنخفضة، D9، D10، D11 على التوالي التاسع العشر والحادي عشر المستخرج من LC، مؤشراً جيداً لمستوى التلوث. في حالة التلوث غير المنتظم، تظهر STD للتفاصيل D11، و STD من تفاصيل الترددات العالية وجود علاقة جيدة مع عرض طبقة ملوثة ونشاط التصريفات الكهربائية. تطبق مخطط التكرار (RP) على المكونات الأكثر أهمية التي تم العثور عليها بواسطة تقنية الموجات، لإعطاء معلومات إضافية عن الحالة السطحية للعازل.

الكلمات المفتاحية: التلوث الصحراوي، المادة غير القابلة للذوبان، عملية الاحتاطة، التيار المتسرب، تحويل فوري، تحويل الموجات المنفصلة، مخطط التكرار،

ABSTRACT_ The present work aims to investigate the effect of the desert pollution on an insulating plan model behavior. We focused on the effect of the sand quantity in term of non-soluble deposit density (NSDD), the width and the position of the polluted layer on the flashover process. For this purpose, we use the magnitude and frequency analysis of the leakage current (LC) as indicator of the insulator behavior with regard to both of the pollution level and the electrical discharges activity on the insulator surface, particularly for this kind of Algerian desert pollution. Careful analysis of recorded videos, filmed by digital camera, allows us to examine visually the development of the arcs, until total flashover, according to the applied voltage. The odd harmonics and the fundamental component have been investigated to characterize the insulator surface state. Furthermore, a wavelet transform technique has been adopted to study the frequency-time characteristics and to calculate the standard deviation (STD) of different harmonic components of LC. In the uniform case, the STD of low frequency details, D9, D10 and D11, respectively the ninth, the tenth and the eleventh details extracted from LC, represent a good indicator of the pollution level. In the non-uniform case of pollution, the STD of detail D11, and the STD of high frequency details show a good correlation with polluted layer width and the activity of the electric discharges. The Recurrent Plot (RP) applied on the components the most significant found by the wavelet technique, to give additional information on the surface state of the insulator.

Key words: desert pollution, sand quantity, non-soluble deposit density, flashover process, leakage current, fast Fourier transform, transform, wavelet transform, Recurrence plot.

Résumé_ Le présent travail a pour objectif d'examiner l'effet de la pollution désertique sur le comportement d'un modèle plan isolant. Nous nous sommes concentrés sur l'effet de la quantité de sable en termes de densité de dépôt non soluble (NSDD), la largeur et la position de la couche polluée sur le processus de contournement. Pour ce faire, nous utilisons l'amplitude et l'analyse fréquentielle du courant de fuite (LC) comme indicateur du comportement de l'isolant vis-à-vis du niveau de pollution et de l'activité des décharges électriques sur la surface de l'isolateur, en particulier pour ce type de pollution dans le désert algérien. Une analyse minutieuse des vidéos enregistrées, filmées par un appareil photo numérique, nous permet d'examiner visuellement l'évolution des arcs, jusqu'au contournement total en fonction de la tension appliquée. Les harmoniques impaires et le composant fondamental ont été étudiés pour caractériser l'état de surface de l'isolateur. En outre, une technique de transformation en ondelettes a été adoptée pour étudier les caractéristiques fréquence-temps et calculer l'écart type (STD) de différentes composantes harmoniques de LC. Dans le cas uniforme, les STD des détails basse fréquence, D9, D10 et D11, respectivement les neuvième, dixième et onzième détails extraits de LC, représentent un bon indicateur du niveau de pollution. Dans le cas de pollution non uniforme, la STD du détail D11 et la STD des détails haute fréquence montrent une bonne corrélation avec la largeur de la couche polluée et l'activité des décharges électriques. Le tracé récurrent (RP) applique sur les composants les plus significatifs trouvés par la technique des ondelettes, pour donner des informations supplémentaires sur l'état de surface de l'isolant.

Mots clés : pollution désertique, quantité de sable, densité des dépôts non-solubles, processus de contournement, courant de fuite, transformée de Fourier, transformée en ondelettes, Récurrence plot.

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah, de m'avoir donné la force d'aller jusqu'au bout.

je tiens à remercier Messieurs **Abdelouahab Mekhaldi** et **Madjid Tegar**, Professeurs à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour avoir accepté de diriger et de suivre ce travail avec disponibilité, patience et bienveillance.

Je suis très honorée que Monsieur **Ahmed Boubakeur** Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, ait accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Aussi, je tiens à remercier Monsieur **Abdelhafid Hellal**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, Monsieur **Hocine Moulai**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, et Monsieur **Elhadj AILAM** Professeur à l'Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, d'avoir accepté d'examiner mes travaux.

Je tiens aussi à remercier tous les enseignants ayant contribué à ma formation et ce depuis le tronc commun jusqu'à la dernière année de graduation.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

À mes très chers parents, pour leur soutien et la patience dont ils ont fait preuve durant toutes les années de ma formation ;

À ma grande famille ;

Ainsi qu'à tous les électrotechniciens de ma promotion 2014 ;

À tous ceux qui m'aiment et qui me souhaitent le bonheur ;

Djamal

Table des matières

Résumé	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Introduction Générale	12
 Chapitre I Généralité sur la pollution des isolateurs	
I.1 Introduction	16
I.2 Processus de contournement sous pollution	17
I.3 Courant de fuite	18
I.4 Formation de la couche de pollution	19
I.5 Degré de pollution	20
I.6 Mesure de l'ESDD et du NSDD	21
I.6.1 Densité du dépôt de sel équivalent (ESDD)	21
I.6.2 Densité du dépôt non soluble (NSDD)	21
I.6.3 Conductivité surfacique	22
I.7 Analyse granulométrique	22
I.8 Analyse chimique des polluants	23
I.9. Caractéristiques de la pollution désertique	24
I.9.1 Formation de la couche de pollution dans les régions désertiques	24
I.9.2 l'analyse chimique et physique de sable désertique	25
I.9.3 Modèle de la couche de pollution	26
I.9.4 Mouillage de la couche de pollution	28
I.10 La Surveillance de l'état surfacique de l'isolateur à l'aide du courant de fuite	29
I.11 Dispositif expérimental	30
I.11.1 Introduction	30
I.11.2 Dispositif expérimental.....	31
I.11.3 Modèle expérimental	32
I.11.4 Tension délivré par le transformateur	33
I.11.5 Préparation de l'objet d'essais	34
I.11.6 Préparation de la couche polluante	34
I.11.7 Méthode de pulvérisation	36
I.11.8 l'enregistrement du phénomène contournement	37
I.11.9 Mesure du courant de fuite	38
I.12 Conclusion	38
 Chapitre II Etude du phénomène de contournement	
II.1 Introduction	41
II.2 Mécanisme du contournement.....	41
II.2.1 Cas de pollution uniforme	42
II.2.2 Cas de Cas de pollution non-uniforme	48
II.3 Etude de la tension de contournement.....	53
II.3.1 Cas de pollution uniforme	54
II.3.2 Cas de Cas de pollution non-uniforme	55
II.4 Conclusion	56
 Chapitre III Etude du courant de fuite	
III.1 Introduction	59
III.2 Courant de fuite	59
III.3 Forme de l'onde du courant de fuite	62

III 3.1 Cas de pollution uniforme	63
III 3.1 Cas de pollution Non-uniforme	65
III.4. Analyse fréquentielle du courant de fuite.....	68
III.4.1 Transformation de Fourier	69
III.4.1.1 Cas de pollution uniforme	69
III.4.1.2 Cas de pollution Non-uniforme	71
III.4.2 Transformation d'ondelettes	74
III.4.2.1 La localisation temps-fréquence	74
III.4.2.2 Transformation d'ondelette discrète	76
III.4.2.3 Analyse multi-résolution	76
III.4.2.4 Calcul sur les composantes fréquentielles.....	77
III.4.3.1 Application sur les signaux du courant de fuite pour le cas d'une pollution uniforme.....	78
III.4.3.2 Application sur le courant de fuite pour le cas d'une pollution Non-uniforme.....	81
III.5 Conclusion	86

Chapitre IV Technique de la Récurrence Plot

IV.1 Introduction	89
IV.2 Mesure de récurrence distribuée dans le temps	89
IV.3 Récurrence Plot Croisée.....	90
IV.4 Choix des paramètres m , τ	91
IV.5 Choix du paramètre ε	91
IV.6 Choix de la norme ($\ \cdot\ $)	91
IV.7 Structures dans la Récurrence Plot.....	92
IV.8 Application de la RP et CROSS-RP sur le signal du courant de fuite et la tension appliquée	94
IV.8.1 Cas d'une couche de pollution uniforme.....	95
IV.8.2 Cas d'une couche de pollution Non-uniforme	97
IV.8.3 Application de la cross-récurrence plot au signal du courant de fuite et à la tension appliquée	99
IV.9 Application de la RP sur les composantes hautes fréquences.....	102
IV.10 Récurrence Quantification Analysis du diagramme de RP.....	106
IV.10 Les mesures de la RQA.....	107
IV.10.1 Récurrent rate	108
IV.10.2 Déterminisme	108
IV.10.3 Divergence	108
IV.10.4 Entropie	108
IV.10.1 Tendence	109
IV.10.1 Laminarité	109
IV.10.1 Trapping	110
IV.10.1 Application de la récurrence plot quantification Temps de Récurrence de l'Entropie (RTE).....	110
IV.10.1 Application sur les diagrammes de RP du signal du courant de fuite	110
IV.10.1 Application sur les diagrammes de CRP du signal du courant de fuite	111
IV.10.1 Application de RQA sur les diagrammes de RP des composantes hautes fréquences	114
IV.10.1 Conclusion	116

Liste des Figures

Figure I.1.1. Processus de contournement sous pollution	17
Figure I.1.2. flux rotatif de l'air dans l'isolateur	19
Figure I.1.3. Relation entre NSDD / ESDD et la sévérité de la pollution pour l'isolateurs (a) capot et tige (b) isolateur longue tige [8]	20
Figure I.1.4. Une tamiseuse à vibrations de laboratoire, équipée ici pour un tamisage humide .	23
Figure I.1.5. Accumulation de couche de contamination sur la surface de l'isolant avec une période d'exposition dans le désert pour différentes sections de ligne	25
Figure I.1.6. Variation de la teneur en sel soluble avec la taille du grain d'un échantillon de sol dans le désert	26
Figure I.1.7. Répartition des de ESDD sur la ligne de fuite de l'isolateur anti- brouillard	27
Figure I.1.8. Répartition des ESDD sur la ligne de fuite de l'isolateur de profil aérodynamique..	27
Figure I.1.9. Variation quotidienne typique de la température ambiante et de la température de l'isolateur dans le désert	28
Figure I.1.10. Variation du courant de fuite avec l'humidité relative avec et sans sous-refroidissement	29
Figure II.2.1. Montage expérimental	32
Figure II.2.2 Modèle expérimental	33
Figure II.2.3. La tension appliquée et son spectre fréquentiel	33
Figure II.2.4. Couche de pollution pour une largeur de 15 cm.	36
Figure II.2.5. Différentes configurations de pollution pour le cas non-uniforme	36
Figure II.2.6. Méthode de pulvérisation dans le cas d'une pollution uniforme	37
Figure II.2.7. Caméra numérique NIKON 4K Ultra HD model COOLPIX B700...	37
Figure II.2.8. Oscilloscope numérique GW INSTEK 3504	38
Figure II.9. Etapes du contournement dans le cas d'une couche de pollution uniforme pour NSDD de 0.01 g/cm ²	43
Figure II.10. : Etapes du contournement dans le cas d' une couche de pollution uniforme pour NSDD de 0.05 g/cm ² ...	44
Figure II.11. Etapes du contournement dans le cas d' une couche de pollution uniforme pour NSDD de 0.01 g/cm ²	45
Figure II.12. Etapes du contournement dans le cas uniforme pour NSDD de 0.05 g/cm ²	46
Figure II.13. Différentes étapes du contournement dans le cas d' une couche de pollution uniforme pour NSDD de 0.05 g/cm ²	47
Figure III.1. : Différentes étapes du contournement dans le cas de la largeur de la bande de pollution située du côté HT de 17 cm	49
Figure III.2. Différentes étapes du contournement dans le cas de la largeur de la bande de pollution située du côté HT de 20 cm,.....	50
Figure III.3. Différentes étapes du contournement dans le cas de la largeur de la bande de pollution située du côté HT de 25cm	51
Figure III.4. Différentes étapes du contournement dans le cas de la largeur de la bande polluée située du côté terre de 25 cm	52
Figure III.5. Différentes étapes du contournement dans le cas de la largeur de la bande propre est située au milieu de 25 cm	53
Figure III.6. Tension de contournement pour différentes valeurs de NSDD pour deux échantillons de sable	54
Figure III.7. Tension du contournement en fonction de largeur de la couche polluée pour deux positions côté HT et côté terre (GR).	56
Figure II.8. Tension de contournement en fonction de largeur de la couche polluée située au milieu avec le cas où la bande propre est située au milieu.	56
Figure III.1. Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs de NSDD et pour deux échantillons de sable	60

Figure III.2. Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs de NSDD et pour deux échantillons de sable de la région de Oued Souf.....	61
Figure III.3. Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs de la couche polluée	62
Figure III.4. Forme d'onde du courant de fuite pour différentes valeurs de NSDD pour une tension appliquée de 10 kV	63
Figure III.5. Forme d'onde du courant de fuite pour différentes valeurs de NSDD à 50 kV de tension appliquée	64
Figure III.6. Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution du côté HT	66
Figure III.7. Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution du côté terre.....	66
Figure III.8. Courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée située au milieu.....	67
Figure III.9. Courant de fuite pour différentes largeurs de la bande propre située au milieu, ...	68
Figure III.10. Spectre fréquentiel du courant de fuite pour différentes valeurs des NSDD..	70
Figure III.11. Spectre fréquentiel du courant de fuite pour différentes valeurs des NSDD pour une tension appliquée de 50 kV.	71
Figure III.12. Spectre fréquentiel du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluante située du côté HT	72
Figure III.13. Spectre fréquentiel du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluante située du côté terre	73
Figure III.14. Spectre fréquentiel du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluante située au milieu	73
Figure III.15. fenêtrage de la transformation de Fourier	74
Figure III.16. (a) fenêtre de Fourier (b) ondelette mère.....	75
Figure III.17. Rectangle temps-fréquence de deux ondelettes.....	75
Figure III.18. Diagramme de décomposition multi-résolution.....	76
Figure III.19. Déviation Standard en fonction du niveau de décomposition pour différentes valeurs de NSDD (a) 10 kV, (b) 30 kV.....	78
Figure III.20. Caractéristique temporelle du détail D11 pour différentes valeurs de NSDD (a) 0.01 g/cm ² , (b) 0.02 g/cm ² , (c) 0.03 g/cm ² , (d) 0.04 g/cm ² , (e) 0.05 g/cm ²	79
Figure III.21. Spectre fréquentiel du détail D11 pour différentes valeurs de NSDD (a) 0.01 g/cm ² , (b) 0.02 g/cm ² , (c) 0.03 g/cm ² , (d) 0.04 g/cm ² , (e) 0.05 g/cm ²	79
Figure III.22. Déviation Standard en fonction du niveau de décomposition pour différentes valeurs de NSDD et pour une tension appliquée de 50 kV.....	80
Figure III.23. Caractéristique temporelle du détail D11 pour différentes valeurs de NSDD (a) 0.01 g/cm ² , (b) 0.02 g/cm ² , (c) 0.03 g/cm ² , (d) 0.04 g/cm ² , pour une tension appliquée de 50kV.	81
Figure III.24. spectre fréquentiel du détail D11 pour différentes valeurs de NSDD (a) 0.01 g/cm ² , (b) 0.02 g/cm ² , (c) 0.03 g/cm ² , (d) 0.04 g/cm ² , (e) 0.05 g/cm ² pour une tension appliquée de 50 kV.....	81
Figure III.25. Déviation Standard en fonction du niveau de décomposition pour différentes largeurs de la couche polluée située du côté pollué HT, pour une tension appliquée de 30 kV....	82
Figure III.26. Caractéristique temporelle du détail D11 pour différentes largeurs de la couche polluée avec des valeurs de NSDD et pour une tension appliqué de 30 kV (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm, (e) 25 cm.....	82
Figure III.27. Spectre fréquentiel du détail D11 pour différentes largeurs de la couche polluée (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20cm, (e) 25 cm , pour une tension appliqué de 30 kV.....	83
Figure III.28. Caractéristique temporelle de détail D1 pour différentes largeur de la couche pollué situé dans le côté HT (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm, (e) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.....	84
Figure III.29. Caractéristique temporelle de détail D6 pour différentes largeur de la couche pollué situé dans le côté HT (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm, (e) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.....	84

Figure III.30. Déviation Standard en fonction du niveau de décomposition pour différentes largeurs de la couche polluée (a) couche polluée côté terre, (b) couche polluée située au milieu, pour une tension appliquée de 30 kV.....	85
Figure III.31. Caractéristique temporelle de détail D1 pour différentes largeur de la couche pollué situé dans le côté GR (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm, (e) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.....	85
Figure III.31. Caractéristique temporelle de détail D1 pour différentes largeur de la couche pollué situé dans le milieu (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm, (e) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.	86
Figure IV.1. Trois normes couramment utilisées pour le voisinage avec le même rayon autour d'un point (point noir) sont illustrées de manière exemplaire pour l'espace de phase bidimensionnel : (A) norme L1, (B) norme L2 et (C) norme L_{∞}	92
Figure IV.2. Structures des RP de différents signaux (a)sinusoïdal (b) signal sinusoïdal avec la présence de la troisième harmonique, (c) signal sinusoïdal ave la présence de la cinquième harmonique.....	93
Figure IV.3. Typologie caractéristique des tracés de récurrence (a) homogène (bruit blanc uniformément réparti), (b) dévié (carte logistique corrompue par un terme à augmentation linéaire (c) perturbé (mouvement brownien) [60].....	94
Figure IV.4. Diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite pour différentes valeurs de NSDD (a) cas propre, (b) 0.01 g/cm ² , (c) 0.02 g/cm ² , (d) 0.03 g/cm ² , (e) 0.04 g/cm ² , (f) 0.05 g/cm ²	95
Figure IV.5. Diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite pour différentes valeurs de NSDD (a) cas propre, (b) 0.01 g/cm ² , (c) 0.02 g/cm ² , (d) 0.03 g/cm ² , (e) 0.04 g/cm ² , pour une tension appliquée de 50 kV.....	97
Figure IV.6. Diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée (a) 5 cm, (b) 20 cm, 25 cm, située du côté HT.....	98
Figure IV.7. Diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée (a) 5 cm, (b) 20 cm, 25 cm, située du côté terre.....	99
Figure IV.8. Diagramme de Cross-récurrence plot appliquée au signal du courant de fuite et à celui de la tension appliquée, pour différentes valeurs de NSDD (a) cas propre (b) 0.01 g/cm ² , (c) 0.02 g/cm ² (d) 0.03 g/cm ² , (e) 0.05 g/cm ²	100
Figure IV.9. Diagramme de la Cross-récurrence plot appliqué au signal du courant de fuite et de la tension appliquée, pour le cas d'une couche de pollution non-uniforme avec différentes largeurs de la couche polluée (a) 5 cm, (b) 20 cm, (c) 25 cm.....	102
Figure IV.10. RP appliquée au détail D3 du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée située du côté HT (a) 10 cm, (b) 15 cm, (c) 20 cm, (d) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.....	103
Figure IV.11. RP appliquée au détail D6 du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée située du côté HT (a) 10 cm, (b) 15 cm, (c) 20 cm, (d) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.....	104
Figure IV.12. RP appliquée au détail D3 du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée située du côté terre (a) 10 cm, (b) 15 cm, (c) 20 cm, (d) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.....	105
Figure IV.13. RP appliquée au détail D3 du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée située au milieu (a) 10 cm, (b) 15 cm, (c) 20 cm, (d) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.....	106

Liste des Tableaux

Tableau I.1. L'équivalent NSDD et ESDD de différentes quantités de sable (NAMMA).....	35
Tableau I.2. L'équivalent NSDD et ESDD de différentes quantités de sable (Oued Souf).....	35
Tableau III.1. Bandes fréquentielles des détails de la décomposition du courant de fuite par la DWT.....	77
Tableau IV.1. différents paramètres de (RQA) pour le cas uniforme.....	111
Tableau IV.2. différents paramètres de (RQA) pour le cas non-uniforme.....	112
Tableau IV.3 différents paramètres de CRQ pour le cas non-uniforme	113
Tableau IV.4. différents paramètres de (RQA) des détails hautes fréquences pour le cas non-uniforme.....	115



Introduction générale

La capacité de production installée a progressivement augmenté au fil des ans, et le transport de ses grands blocs d'énergie électrique sur de longues distances devient crucial pour répondre à la demande croissante en énergie électrique. La configuration des systèmes de transmission électrique varie selon les régions et / ou le niveau de la tension de transport. De plus, il est difficile de choisir une forme d'isolation présentant des performances satisfaisantes en raison de certains facteurs d'influence et de contraintes diverses.

Dans les régions désertiques, les isolateurs des lignes de haute tension sont souvent recouverts par le sable, en particulier pendant les périodes de tempête de sable. Les particules de sable portées par ces tempêtes s'accumulent progressivement sur les isolateurs, et forment une couche de pollution. Cependant, suite aux visites effectuées sur le terrain, différentes recherches ont été effectuées dans les laboratoires pour étudier les différents aspects de la pollution et les conditions météorologiques désertiques. Les chercheurs se sont intéressés à étudier le processus de la formation, de la composition physico-chimique de la couche polluée et de l'interaction avec les conditions météorologiques [1- 5].

La pollution n'engendre pas de dégradation de la rigidité diélectrique des isolateurs lorsqu'elle est sèche [1]. Cependant, son humidification provoque la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique caractéristique du phénomène de pollution [2]. Un courant de fuite sur la surface de l'isolateur crée un échauffement (par effet joule) de la couche de pollution, et par conséquent l'assèchement partiel de cette dernière. En mesurant la tension le long de la chaîne, une partie importante de cette tension se trouve reportée sur la bande sèche de la pollution [10]. Si la valeur locale du champ électrique créée par cette tension dépasse un certain seuil, un arc électrique partiel pourra apparaître [6]. Sous certaines conditions, cet arc peut s'allonger jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur. Dans les régions désertiques, la plupart des déclenchements enregistrés sur les lignes de haute tension sont causés par le contournement des isolateurs recouverts par le sable [2].

Ces contournements peuvent provoquer la détérioration de la surface de l'isolateur, et par conséquent l'ensemble de l'installation électrique pourra être mise hors service [7]. La complexité de ce phénomène impose aux chercheurs d'effectuer plus d'expériences en laboratoires ou in situ, sous des conditions de pollution artificielles et/ou naturelles afin de mieux comprendre le mécanisme. Toutefois, les méthodes d'essais sur site sont les plus intéressantes mais nécessitent plusieurs années pour permettre une étude convenable du comportement de l'isolateur [8].

L'étude du phénomène de décharge a pour objectif de prédire le moment exact du contournement en essayant de fixer des critères de diagnostic convenables [7, 9]. A cet effet, le signal du courant de fuite est une source d'informations capitale pour caractériser l'état de surface des isolateurs [11-16]. Le signal de la tension appliquée peut être également pris en considération pour estimer l'état de surface de l'isolateur [11]. C'est pourquoi nous proposons d'analyser simultanément les deux signaux en vue de comprendre le comportement électrique de l'isolateur, ainsi que l'effet des décharges électriques sur la conductivité du milieu, en particulier l'évaporation causée par l'augmentation de la température sur la surface isolante.

Le présent travail porte sur l'étude du comportement d'un modèle d'isolateur soumis à une pollution désertique humidifiée sous tension alternative 50 Hz. La distance inter-électrodes du modèle expérimental est de 29,2 mm. Cette distance correspond à la ligne de fuite de l'isolateur capot et tige 1512L exploité par SONEGAS dans certaines régions

désertiques Algériennes. L'agent polluant (sable) utilisé lors de l'expérimentation a été prélevé de différentes régions du désert algérien.

Nous nous sommes intéressés à l'étude de l'impact de la pollution dans les différents cas de configurations uniforme et non-uniforme (discontinue) sur le comportement de l'isolateur. Différentes quantités de sable ont été appliquées pour le cas de la pollution uniforme. Par ailleurs, pour la pollution non-uniforme, diverses largeurs et positions de la couche de pollution ont été adoptées. Ce travail constitue une contribution à la description des performances électriques de l'isolateur, en exploitant principalement le développement des décharges électriques jusqu'au contournement, ainsi que l'analyse des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée. Cette analyse permettra d'extraire des informations sur l'état surface de l'isolateur concernant le niveau de pollution, la largeur de la couche polluée et la présence ou pas d'une activité des décharges électriques. Nous utilisons plusieurs méthodes de traitement de signal appliquées au signal du courant de fuite en considérant celui de la tension comme référence, à savoir la Transformée de Fourier, la Transformée d'ondelettes, et la Récurrent plot.

Afin de bien mener notre étude, nous avons subdivisé notre travail en quatre (04) chapitres distincts.

Dans le premier chapitre, nous présentons quelques définitions relatives à la pollution des isolateurs de haute tension. Nous exposons les principales phases de contournement sous pollution, qui commence par la formation de la couche de pollution, son humidification, l'apparition des phénomènes électriques et se termine par l'apparition du contournement total. Nous illustrons les différentes méthodes et mesures utilisées pour décrire et suivre la sévérité de chaque type de pollution. Aussi, nous présentons les caractéristiques de la pollution désertique, y compris la formation et la composition physique et chimique de la couche de pollution et l'interaction avec les conditions météorologiques désertique (température et l'humidité) basé sur des résultats effectués par des chercheurs [1-5] dans le domaine.

Dans la deuxième partie du premier chapitre, nous présentons les équipements ainsi que les techniques expérimentales adoptées au laboratoire de haute tension pour mener à bien les essais expérimentaux.

Le deuxième chapitre traite les caractéristiques de contournement sous pollution désertique sous différentes configurations de pollution. Nous étudions l'influence de deux types de pollutions, pollution uniforme avec différentes quantités de sable en terme de NSDD et pollution non-uniforme avec différentes largeurs de la couche polluée placée en différents endroits par rapport aux électrodes sur l'isolant : pollution côté électrode HT, pollution côté électrode terre, ou bien au milieu, le comportement de l'isolateur en général et sur l'activité des arcs partiels en particulier.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les différents résultats expérimentaux concernant les formes d'ondes du courant de fuite pour chaque configuration de pollution, et les différentes méthodes de traitement de signal utilisées pour analyser le signal du courant de fuite. Nous commençons par la méthode de la Transformée de Fourier qui permet d'extraire les contenus harmoniques du signal. En effet, nous allons nous baser, entre autres, sur le contenu harmonique y compris la composante fondamentale et des composantes harmoniques impaires pour caractériser l'état surfacique de l'isolateur. La deuxième

technique et la transformée en ondelettes discrète nous permet de décomposer le signal du courant de fuite en une somme des signaux de différentes bandes fréquentielles. La déviation standard est calculée pour chaque composante pour trouver les composantes les plus significatives permettant le diagnostic de l'état surfacique de l'isolateur.

Dans le quatrième chapitre, on utilise une autre méthode de traitement de signal, La méthode de Récurrent Plot (RP) et sa quantification. La récurrence plot est appliquée sur le courant de fuite et les différentes composantes fréquentielles les plus significatives trouvées par la méthode des ondelettes. Nous nous basons sur la variation des caractéristiques de la structure de RP, la typologie (homogène, périodique, Drifts, Disruptif) et les textures (les points isolés, les lignes diagonales et les lignes verticale/horizontales...), pour étudier le comportement des signaux de courant de fuite et leurs composantes fréquentielles, ce qui revient à obtenir des informations sur l'état surfacique de l'isolateur, le niveau de pollution, l'activité des décharges électriques.

Nous terminons par une conclusion générale représentant une synthèse globale des principaux résultats ainsi obtenus.



Chapitre I

Pollution des isolateurs de haute tension et techniques expérimentales

I-1 Généralités sur la pollution des isolateurs

I-1-1 Introduction :

Le rôle fondamental des isolateurs de haute tension est de garantir une fixation correcte des conducteurs de lignes aux structures de support mises à la terre. À cet égard, les isolateurs jouent deux rôles essentiels : le premier rôle est d'assurer l'intégrité électrique du système, dans diverses conditions météorologiques, en résistant aux contraintes électriques associées à la tension du système ainsi qu'aux surtensions temporaires et des commutations associées. Bien que les attaques directes dues à la foudre ne puissent être pratiquement éliminées, elles peuvent certainement être gérées à des niveaux acceptables [17]. Le deuxième rôle est de maintenir l'intégrité mécanique du système en résistant aux contraintes mécaniques liées au poids des conducteurs et aux contraintes excessives associées au givrage, à la charge du vent, aux conditions de conducteur brisé, etc.

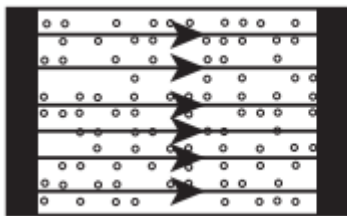
Les isolateurs des lignes de haute tension doivent fonctionner dans une large gamme des conditions de service [18]. De nombreuses contraintes agissent sur les isolateurs dans diverses combinaisons. Certaines de ces contraintes changent radicalement dans les conditions de pollution. L'humidification d'un dépôt polluant accumulé sur la surface d'isolateur engendre la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique caractéristique du phénomène de pollution. La nature de la pollution dépend hautement des facteurs géographiques et climatiques de la région. Les diverses sources de pollution les plus fréquemment observées sur les isolateurs peuvent être regroupées selon leur origine. Par exemple, l'environnement marin est situé dans les régions côtières qui mettent dans l'atmosphère les éléments Na, Cl, Mg, K et d'autres sels marins. L'environnement industriel comprend des sources de pollutions solubles émanant des centrales électriques utilisant le charbon ou le pétrole, les aciéries, les raffineries ou les sources de poussières inertes telles que les carrières et les cimenteries. L'environnement désertique comprend un contenu inerte provenant du sable et avec un certain degré de sel dans certaines régions [19].

Pour bien détailler le phénomène de la pollution des isolateurs, nous présentons dans ce chapitre une synthèse bibliographique se rapportant aux divers aspects de la pollution des isolateurs. Il est maintenant reconnu que le mécanisme de contournement sous pollution se caractérise par différentes étapes : accumulation d'une couche de contamination, mouillage de l'isolateur, courant de fuite, formation d'arcs en bande sèche et extension éventuelle de tels arcs pour couvrir l'ensemble du trajet de fuite. Nous présentons aussi quelques caractéristiques de la pollution désertique, telles que la formation de la couche de pollution sur la surface de l'isolateur, l'analyse physique et chimique du sable et l'interaction avec les conditions météorologiques, telle que la température et l'humidité.

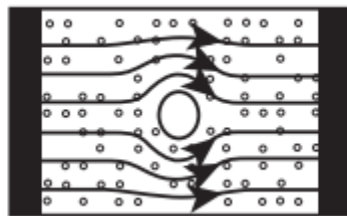
I-1-2 Processus de contournement sous pollution :

D'une façon générale, le contournement sous pollution peut être schématisé par les phases suivantes [20] :

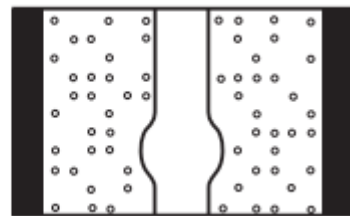
1. L'isolateur se recouvre d'une couche de pollution constituée de sels solubles et d'acides ou de bases dilués. Si la pollution se dépose sous forme d'une couche électrolytique liquide, les phases (c) à (f) peuvent avoir lieu immédiatement. Par contre si la pollution n'est pas conductrice lorsqu'elle est sèche, un processus d'humidification est nécessaire.
2. La surface de l'isolateur pollué est humidifiée, soit complètement, soit partiellement par du brouillard, de la bruine, une pluie légère, une neige ou une glace fondante.
3. Lorsqu'un isolateur sous tension est couvert d'une couche polluante conductrice, des courants de fuite s'écoulent à sa surface et leurs effets thermiques commencent à assécher certaines zones de la couche polluante.
4. Le séchage de la couche de pollution n'est jamais uniforme. Par endroits, la couche de pollution est interrompue par des zones sèches qui arrêtent l'écoulement du courant de fuite.
5. La tension appliquée aux zones sèches qui peuvent n'avoir que quelques centimètres de largeur, provoque un claquage dans l'air. Les zones sèches sont court-circuitées par des arcs, électriquement en série avec la résistance de la partie non-sèches de la couche polluante. Il en résulte une impulsion de courant de fuite chaque fois qu'une zone sèche amorce.
6. Si la résistance de la partie non sèche est assez faible, les arcs qui court-circuitent les zones sèches peuvent brûler continuellement et s'étendre le long de l'isolateur, court-circuitant une partie de plus en plus grande de sa surface. Ceci entraîne une réduction de la résistance en série avec les arcs ce qui accroît le courant et permet aux arcs de court-circuiter une partie encore plus grande de la surface de l'isolateur. Finalement, l'isolateur se trouve complètement court-circuité et un défaut à la masse est établi.



(a)



(b)



(c)

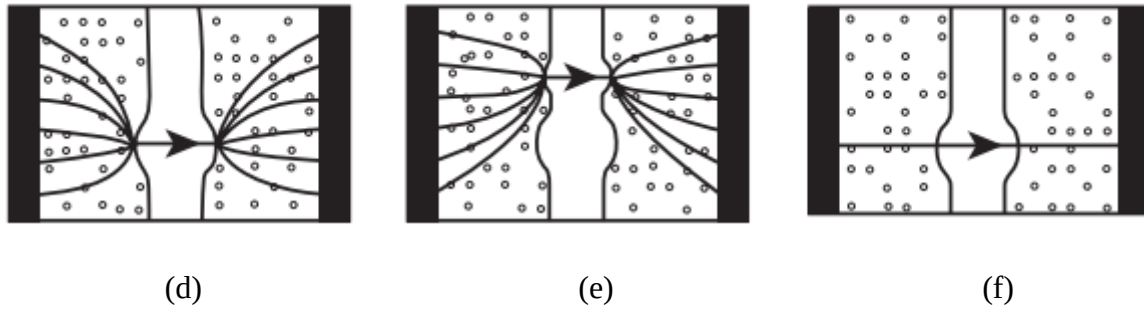


Figure I.1.1 : Processus de formation d'arc sur une surface isolante hydrophile polluée. (a) Flux uniforme de courant de fuite dans la couche d'électrolyte, (b) Le chauffage local du courant de fuite forme une tache sèche, (c) Les taches sèches se développent et fusionnent, formant une bande sèche qui interrompt le courant (d) Un arc local sur une bande sèche crée des régions à forte densité de courant au niveau des racines d'arc (e) Bande sèche se développe aux racines de l'arc jusqu'à ce que le stress électrique est réduit; arc migre latéralement. (f) L'arc se développe le long de la surface de l'électrolyte jusqu'à la longueur critique, menant à un contournement entre électrodes [21].

I-1-3 Courant de fuite :

Le courant de fuite circule lorsque le dépôt est rendu conducteur, sous forme de pulsations en raison de la formation de bandes sèches, les amplitudes des impulsions augmentant à mesure que la conductance de la surface augmente. Si le niveau de la conductance est suffisamment élevé pour permettre aux décharges de se propager, le contournement devient probable : ce niveau dépend de la longueur du chemin de fuite de l'isolateur.

Le courant de fuite est induit par la tension de service et est mesuré au niveau de l'extrémité mise à la terre de l'isolateur. On peut recourir à trois méthodes différentes de mesure du courant de fuite [22] :

1. Le comptage d'impulsions de courant de fuite consiste à enregistrer sur une période donnée le nombre d'impulsions dépassant une certaine amplitude pour un isolateur fonctionnant à sa tension de service. Cette méthode se sert du fait que les impulsions de courant de fuite précèdent généralement la phase ultime de contournement sous pollution, la fréquence mais aussi l'amplitude des impulsions augmente avec l'imminence du contournement.
2. La méthode du courant de fuite (I_h) consiste à enregistrer la crête du courant de fuite la plus élevée pendant une période donnée sur un isolateur continuellement soumis à sa tension de service. Cette valeur indique de manière satisfaisante si un isolateur est proche du contournement et par là même avoir une estimation de la sévérité de pollution du site.

4. La méthode la plus utilisable maintenant est l'enregistrement de la forme d'onde du courant de fuite sur un oscilloscope, ce qui peut nous donner des informations importantes sur l'état de surface de l'isolateur.

I-1-3 Formation de la couche de pollution :

La couche de pollution se forme lorsque des particules en suspension dans l'air se déposent progressivement sur la surface de l'isolateur. Les principaux processus qui transportent les matériaux sur les surfaces des isolants sont les forces gravitationnelles, l'attraction électrostatique de particules chargées électriquement, la migration diélectrophorétique de particules de haute permittivité dans des régions à forte divergence de champ électrique, l'évaporation des solutions ou de suspensions et le blocage aérodynamique. Le dernier est entièrement prédominant en importance [23].

Lorsque de l'air contenant des particules en suspension s'écoulent vers un isolant, l'efficacité avec laquelle l'isolant capte les particules dépend de la forme de l'isolant, de la taille et de la densité des particules et de la vitesse d'écoulement.

Le flux rotatif de l'air dans l'isolateur génère une action cyclonique, qui pousse les particules de sable vers les parois intérieures de l'isolateur. De nombreuses particules assez petites et de faible densité se déposent ainsi et, de plus dans les circonvolutions de l'isolateur (Figure I.1).

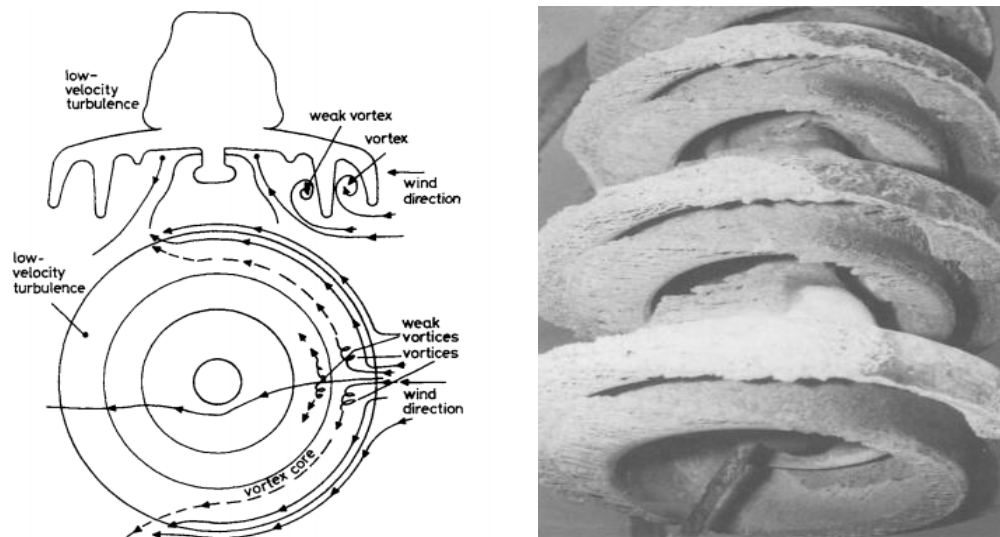


Figure I.1.2 : Le flux rotatif de l'air dans l'isolateur [23]

I-1-3 Degré de pollution :

Une évaluation idéale de la sévérité d'un site, devrait fournir les informations nécessaires au calcul de la probabilité de contournement sous pollution pour un isolateur quelconque installé sur ce site et soumis à la tension spécifiée du réseau [20].

La sévérité de la pollution peut être quantifiée en utilisant le taux de changement de dépôt sur la surface de l'isolateur exposée, chaque zone sur terre est caractérisée par un taux de dépôt différent. Les zones propres sont celles qui ont une combinaison du flux de pollution et la durée d'exposition qui conduit à des dépôts de pollution très faibles de moins de $0,01 \text{ mg/cm}^2$ de dépôt soluble ou $0,1 \text{ mg/cm}^2$ de dépôt non-soluble selon les normes internationales [IEC Standard 60815, 2008] [23].

La mesure de la sévérité de pollution est généralement exprimée en termes de ESDD (densité du dépôt de sel équivalent) et NSDD (densité du dépôt non-soluble équivalent) (mg/cm^2) pour la pollution de type A (les dépôts non-solubles), et en conductivité surfacique ($\mu\text{S/cm}^2$) pour la pollution de type B (les dépôts solubles).

Les niveaux de la pollution dans les sites sont classés selon les normes CEI 60060-1[32] et IEEE STD4 [30], à cinq niveaux de pollution, basées sur les gammes de ESDD et de NSDD caractérisant la sévérité de site ont été définis : (a) très léger, (b) léger, (c) moyen, (d) élevé, (e) très élevé.

Pour les pollutions de type A, les Figures I.2a et I.2b montrent les plages de valeurs ESDD / NSDD correspondant à chaque classe de pollution pour les isolateurs capot et tige à long fut respectivement. Ces valeurs sont déduites des mesures sur le terrain, et des tests de pollution.

Les valeurs maximales peuvent être obtenues à partir des mesures régulières effectuées sur une période minimale d'un an [8].

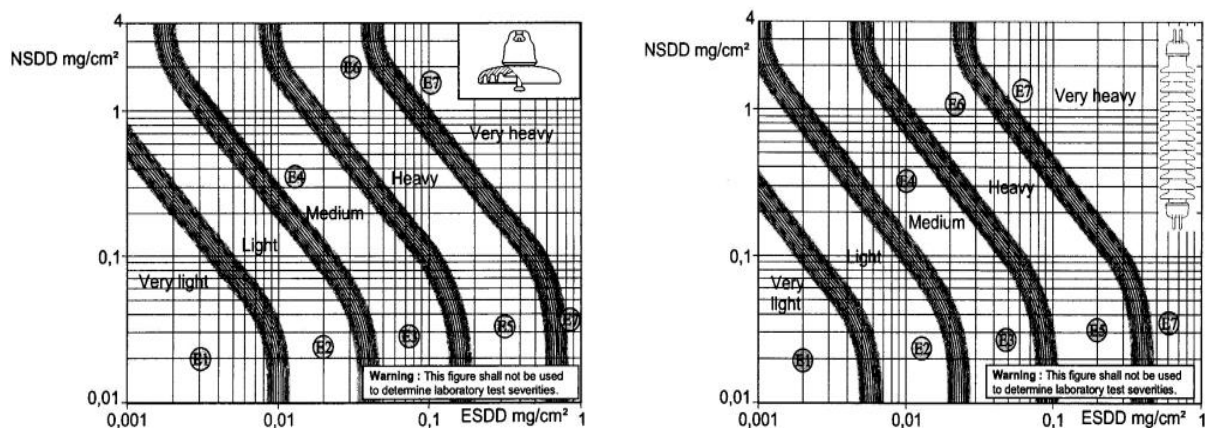


Figure I.1.3 : Relation entre NSDD / ESDD et la sévérité de la pollution pour l'isolateurs (a) capot et tige (b) isolateur à long fut [24].

I-1-4 Mesure de l'ESDD et de NSDD :

La sévérité de la pollution du site peut être déterminée en mesurant à la fois la densité de dépôt de sel équivalent (ESDD), la densité de dépôt de pollution non-soluble (NSDD) et la conductivité surfacique des isolateurs installés dans les stations d'essais. L'analyse chimico-physique des polluants est parfois utile. De plus, ces mesures fourniront des informations directes pour déterminer la ligne de fuite requise de l'isolateur.

Pour normaliser la mesure de la sévérité de pollution du site, il faut que les mesures soient effectuées sur une chaîne d'isolateurs de plusieurs unités :

- Le dépôt est enlevé et soigneusement recueilli à la surface d'un isolateur avec du coton pressé à l'exclusion de toutes pièces métalliques de l'isolateur.
- Les polluants sont ensuite dissous dans l'eau en secouant le coton dans l'eau. L'essuyage doit être répété jusqu'à ce qu'il ne reste plus aucun polluant sur la surface de l'isolateur.
- La suspension obtenue est maintenue sous agitation pendant au moins 2 minutes avant la mesure de sa conductivité volumique σ_θ (S/m) à la température θ (C).

La salinité S_a (en kg / m³) de la pollution est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$S_a = (5.7 \sigma_{20})^{1.03} \quad (I.1)$$

σ_{20} est la conductivité volumique à la température $T = 20$ °C.

I-1-4-1 Densité du dépôt de sel équivalent (ESDD)

La Densité du dépôt de sel équivalent (ESDD) est le dépôt équivalent exprimé en mg de NaCl /cm² de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau.

L'ESDD de la surface de l'isolateur doit être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$ESDD = S_a V/A \quad (I.2)$$

V est le volume d'eau distillée (cm³), A la surface de l'isolateur (cm²).

I-1-4-2 Densité du dépôt non soluble (NSDD)

La densité de dépôt non soluble (NSDD) caractérise la teneur en contaminants non solubles dans une couche de pollution et est normalement exprimée en mg/cm². De plus, les mesures de NSDD sont souvent associées à une analyse physique et / ou chimique de la contamination, ce qui permet d'identifier les sources de pollution.

L'eau contenant des polluants, après avoir mesuré l'ESDD, doit être filtrée à l'aide d'un entonnoir et d'un papier filtre pré-séché et pesé.

La NSDD doit être calculée par l'équation suivant :

$$NSDD = W_{N-S}/A \quad (I.3)$$

W_{N-S} Poids des dépôts insolubles.

I-1-4-3 Conductivité surfacique :

La conductivité surfacique de la couche de pollution est calculée en multipliant la conductance mesurée par le facteur de la forme de l'isolateur. Le facteur de forme est déterminé par les dimensions de l'isolateur et peut être évalué graphiquement en traçant la valeur réciproque de la circonférence de l'isolateur contre la ligne de fuite partielle jusqu'au point compté ; la zone (le domaine) sous cette courbe donne le facteur de forme.

Mathématiquement, le facteur de forme est exprimé comme suit :

$$F = \int_0^L \frac{1}{p(l)} dl \quad (I.4)$$

F est le facteur de forme de l'isolateur, $p(l)$ est la circonférence à la ligne de fuite partielle l le long de la surface, L est la ligne de fuite de l'isolateur.

La conductance superficielle est le rapport du courant de fuite à fréquence industrielle qui traverse l'isolateur, à la tension appliquée ($G=I/V$). La tension utilisée est élevée (environ de 30 kV par mètre de la longueur d'isolateur), mais inférieure à la tension de service et est appliquée pendant quelques périodes seulement.

D'où la conductivité surfacique de l'isolateur est donnée par :

$$K = F.G \quad (I.5)$$

I-1-5 Analyse granulométrique (analyse par tamis)

L'analyse granulométrique d'un sédiment consiste à déterminer la proportion des diverses classes de grosseur de particules (sable, limon, argile, etc.). Le test consiste à classer les différents constituants du grain de l'échantillon à l'aide d'une série de tamis (Figure I.1.4), imbriqués les uns dans les autres (méthode standard NF ISO 565), dont les ouvertures diminuent de haut en bas. Le matériau étudié est placé dans la partie supérieure de l'écran et le classement des grains est obtenu par vibration de la pile de tamis. La quantité de refus cumulée mesurée sur différents écrans et la taille inférieure en bas doivent coïncider avec le poids de l'échantillon introduit dans l'entête de la colonne [18].

Le classement des éléments donné par l'A.I.S.S (association internationale de la science du sol) établi en 1926 est le suivant [42] :

- Argile : pour les éléments inférieurs à 0.002 mm.
- limon fin : entre 0.002 mm et 0.02 mm.
- limon grossier : entre 0.02 mm et 0.05 mm.
- sable fin : entre 0.05 mm et 0.2 mm.
- sable grossier : entre 0.2 mm et 2 mm.



Figure I.1.4 : Une tamiseuse à vibrations de laboratoire

I-1-6 Analyse chimique des polluants :

L'analyse chimique peut être également utilisée pour identifier les composants chimiques des sels solubles. L'analyse chimique des sels solubles est réalisée après la mesure de l'ESDD au moyen d'une chromatographie par échange d'ions (IC), ou d'une spectrométrie analytique à émission optique-plasma (ICP) couplée par induction. Les résultats de l'analyse peuvent indiquer des quantités d'ions positifs, par exemple. Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} et ions négatifs, par ex. Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- .

Le dosage en SiO_2 , Al_2O_3 , SO_3 , MgO , Fe_2O_3 est obtenu par fluorescence aux rayons X. La perte par inflammation est la détermination de la fraction massique perdue par un échantillon lors des calcinations à 1100°C . Aux pertes à 550°C , s'ajoutent celles résultant de la décomposition de divers matériaux (y compris les carbonates) et extraits de la teneur en eau de certains composants tels que les argiles lorsqu'elles se présentent. Cette détermination s'avère

particulièrement utile pour "clorre" les tableaux d'analyse élémentaire. Ensuite, les différents éléments sont sous la forme oxydant [17].

I-1-7 Caractéristiques de la pollution désertique :

Dans les zones désertiques, les dunes de sable s'étendent sur de grandes surfaces et semblent constituer un obstacle à l'infrastructure de développement urbain du désert et à une barrière écologique appelée désertification. Les zones désertiques sont souvent exposées aux tempêtes de sable, en particulier au printemps, presque chaque année. Durant les saisons de tempête de sable, les particules de sable se déposent beaucoup plus rapidement sur les surfaces des isolateurs (plusieurs heures) [16]. La grande différence de températures entre la nuit et le jour permet particulièrement d'augmenter l'humidité relative durant les premières heures de la matinée et donne lieu à la formation de rosée fréquente, ce qui permet d'augmenter le processus d'accumulation de sable sur la surface de l'isolateur et donc de diminuer la rigidité diélectrique des isolateurs de haute tension.

En raison de l'augmentation constante des besoins en énergie et de la nécessité d'exploiter des sources d'énergie distantes, des lignes de transport à haute tension sont de plus en plus construites dans l'environnement désertique. Donc, l'étude des différents aspects de la contamination de l'isolant et celui de l'interaction avec les conditions atmosphériques désertiques est nécessaire. Dans cette section nous présentons quelques caractéristiques de la pollution désertique, telles que la formation de la couche de pollution, l'analyse physico-chimique de sable et l'interaction avec les conditions météorologiques.

I-1-7-1 Formation de la couche de pollution dans les régions désertiques :

La formation de la couche de pollution dans les régions désertiques est un processus progressif et très lent et varie d'une région à l'autre. Cette couche de pollution est le résultat de l'interaction complexe entre l'isolateur et l'environnement désertique. La durée d'exposition est un facteur évident qui affecte l'accumulation de la couche de pollution. En outre, l'auto-nettoyage par le vent et la pluie impose généralement une limite supérieure pour la sévérité de la pollution, mais dépend également de la forme de l'isolateur. Les profilés aérodynamiques ouverts ont une meilleure qualité d'auto-nettoyage que les profilés de chemin de fuite longs avec des nervures profondes. De plus, la fréquence et l'intensité de la formation de rosée influencent l'accumulation de couche [17].

Le taux d'accumulation de la pollution sur les isolateurs dépend clairement de l'emplacement des lignes de transport et du type d'isolateur, comme indiqué à la figure I.5 (les travaux de Rizk et al, 1975) [10]. Il s'agit d'essais réels sur une ligne de transport de 500 kV d'une longueur de 800 km en milieu désertique. La ligne est divisée en quatre sections (section 1, section 2, 3 et section 4) chaque section de 200km, dont chacune a été considérée comme représentant des conditions environnementales distinctes. Environ 150 chaînes d'isolateurs

(2400 isolateurs), ont été démantelées et testées au laboratoire ce qui a permis d'obtenir un des résultats se rapportant à la contamination de l'isolateur durant les différentes saisons et plusieurs observations peuvent être fait [10] :

- D'abord, ces résultats montrent que les différentes sections de l'isolateur ont des taux d'accumulation de la pollution distincts.
- Deuxièmement, l'accumulation de la couche de pollution se fait d'une façon très lente telle que, dans une section, après 30 mois d'exposition, l'isolateur n'a pas encore atteint un niveau de saturation.
- D'autres caractéristiques essentielles de la couche de contamination ont été révélées. Tout d'abord, sur la surface inférieure nervurée, la densité de surface de la contamination était en moyenne de 5 à 10 fois celle de la surface supérieure. En outre, il a été constaté que, en général, les chaînes d'isolateur de traction ont une densité surfacique de contamination moindre de 25 à 30 fois que dans les chaînes d'isolateur de suspension.

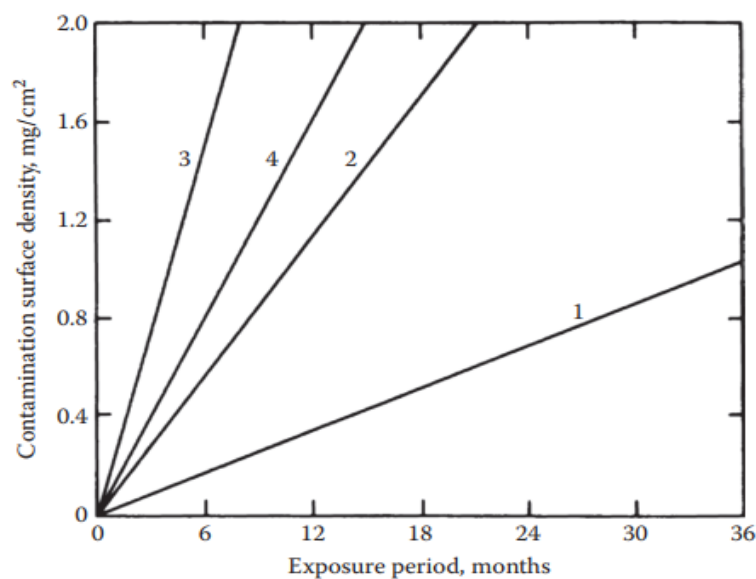


Figure I.1.5 : Accumulation de la couche de contamination sur la surface de l'isolant avec une période d'exposition dans le désert pour différentes sections de ligne (section 1,2, 3 et section 4) [26].

I-1-7-2 Analyse chimique et physique de sable désertique :

L'analyse chimique du polluant provenant de l'isolateur a montré que les sels solubles représentaient 18% en poids, composés principalement de sulfates et de chlorures : $\text{CaSO}_4 \sim 10\%$, $\text{NaCl} \sim 3\%$, and $\text{KCl} \sim 0.5\%$. Cela signifie que pour un dépôt total de $2 \text{ mg} / \text{cm}^2$, atteint en 6 mois d'exposition, correspond à $0,36 \text{ mg/cm}^2$ de sel soluble, ce qui est extrêmement grave. Cette teneur élevée en sels solubles dans le contaminant provenant de l'isolateur était assez surprenante, car l'analyse de la teneur en sel d'échantillons de sable prélevés le long de la ligne à

haute tension (sable provenant des dunes) variait de 1% à 4%. Cette divergence a été expliquée lors de l'analyse de la taille des grains du contaminant provenant de l'isolateur et des échantillons prélevés au niveau du sol [26].

Il a été établi que 95% en poids du contaminant provenant de l'isolateur ont une taille de grain inférieure à 44 μm et que tous les grains ont une taille inférieure à 74 μm . La figure I.6 montre la variation de la teneur en sel soluble en fonction de la taille des grains dans les échantillons de sol prélevés dans le sable du désert. Il est montré que, la teneur globale en sels solubles dans le sable désertique provenant du sol soit de 3,5%. Pour des grains d'une taille supérieure à 100 μm , la teneur en sel est relativement faible. Par contre, pour les petits grains de la taille trouvée à la surface de l'isolateur, la teneur en sel était excessive, la valeur correspondante pour des tailles de grains inférieures à 74 μm atteint 35%. Donc, la salinité élevée du contaminant d'isolateur s'élevant à 18% est donc due à la salinité élevée des particules de sable de faible taille. Ils ont pensé que la différence entre le sel soluble du contaminant naturel à 18% et le sel soluble à 35% des grains en dessous de 74 μm est due au mouillage répété par la rosée et beaucoup moins important par la pluie [26].

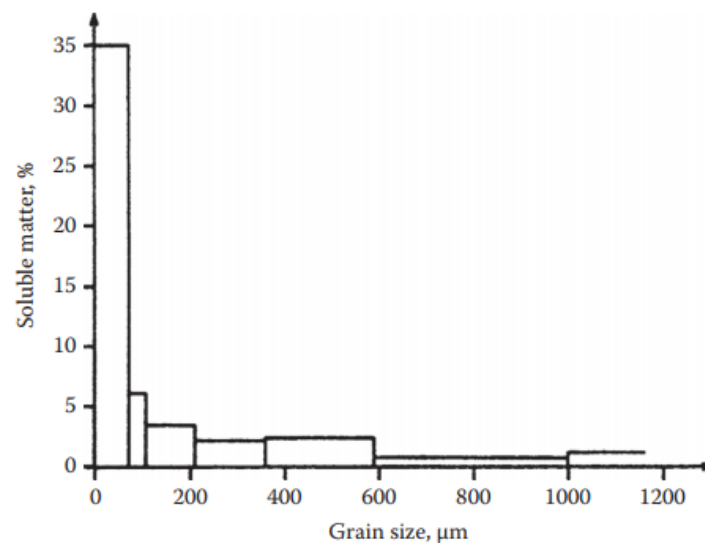


Figure I.1.6 : Variation de la teneur en sel soluble avec la taille du grain d'un échantillon de sol dans le désert [26].

I-1-7-3 Modèle de la couche de pollution

Les processus d'accumulation de pollution sur les isolateurs en service sont très complexes. Les observations de la répartition de la pollution sur des isolateurs installés dans une zone désertique sont illustrées à la Figure I.7 et I.8. Il a souvent été signalé que, pour les isolateurs à capuchon et à goupille en céramique, la densité de surface de la contamination sur la surface côtelée inférieure peut atteindre 5 à 10 fois celle de la surface supérieure [26]. La valeur dépend bien sûr du niveau d'isolant et de l'effet autonettoyant dominant. La figure I.7a montre

la répartition de l'ESDD sur la ligne de fuite de l'isolateur anti- brouillard (figure I.7b) après 24 mois d'exposition en milieu désertique, confirmant ainsi la pollution extrêmement élevée capturée dans le sillon le plus profond, d et e. Le sillon suivant, le point g, était clairement protégé par la première côte.

La figure I.8a montre la répartition de l'ESDD correspondante le long de la ligne de fuite du profil aérodynamique de l'isolant B de la figure I.8b. Il y a encore une pollution extrêmement élevée dans la partie d – e – f de la surface inférieure. Cependant, il est clair qu'en intégrant à la surface, la quantité totale de pollution collectée par le profil aérodynamique sera bien inférieure à celle du profil antibrouillard.

En raison de la surface exposée relativement plus grande de l'isolant aérodynamique - ce qui lui permet de refroidir plus efficacement que celle des autres types d'isolants, cet isolant sera mouillé plus que l'isolant anti- brouillard à surface plus complexe. Par conséquent, les isolateurs aérodynamiques peuvent alors collecter plus de pollution. Il y a aussi la différence dans le nettoyage par le vent des particules de pollution pour les différents profils.

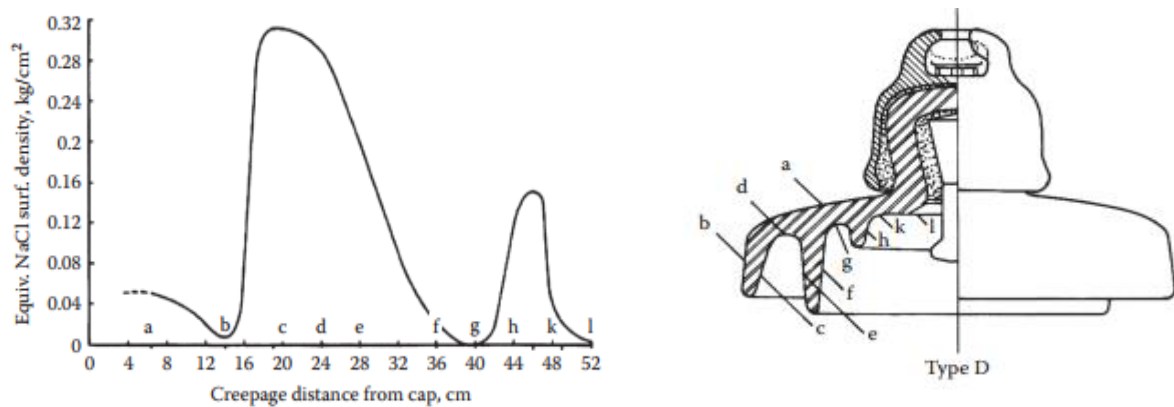


Figure I.1.7 : Répartition des ESDD sur la ligne de fuite de l'isolateur anti- brouillard [26]

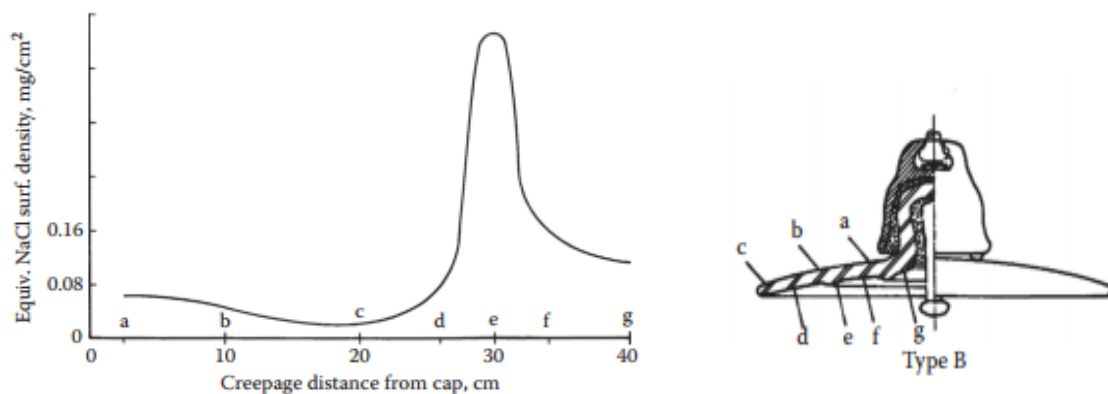


Figure I.1.8 : Répartition des ESDD sur la ligne de fuite de l'isolateur de profil aérodynamique [26].

I-1-7-4 Mouillage de la couche de pollution :

Le mouillage de la couche de contamination est une condition préalable au contournement. Les mécanismes les plus importants pour le mouillage de la couche de pollution sont : l'absorption d'eau de l'air humide due à la nature hygroscopique des contaminants salins, condensation par refroidissement par contact conduisant à la formation de rosée, précipitation sous forme de bruine. Dans les régions désertiques, le mouillage de la couche polluante est dû aux fortes variations de température entre le jour et la nuit. La différence entre les températures maximale et minimale de l'air au cours de la même journée peut atteindre 25 °C. En raison du refroidissement nocturne, l'humidité relative augmente considérablement durant les premières heures de la matinée et donne lieu à la formation de rosée fréquente [26].

La figure I.9 montre une variation quotidienne typique de la température ambiante et de la température de surface de l'isolant des isolateurs en porcelaine à tige et à tige longue dans un environnement désertique.

Le figure montre que tôt le matin, la température de l'isolateur peut chuter en dessous de la température ambiante en raison de l'inertie de l'isolateur. Bien que cette différence de température soit seulement d'environ 2 °C, elle suffira à provoquer la formation de rosée sur la surface de l'isolateur pour une humidité ambiante inférieure à 90%, comme indiqué dans les mesures du courant de fuite de la figure I.10 [28]. Ici, un sous-refroidissement de 2,2 °C entraîne une augmentation très significative du courant de fuite, à partir de l'humidité relative ambiante de 80%. Le point de rosée a été atteint sur la surface de l'isolateur à une humidité relative de 87,5% et la saturation du courant de fuite a été atteinte à 92% d'humidité relative. Il est conclu que, dans un environnement désertique, la sur-réfrigération des isolateurs tôt le matin peut entraîner un mouillage important de la couche de pollution par la formation de rosée, constituant un risque sérieux pour le contournement des isolateurs.

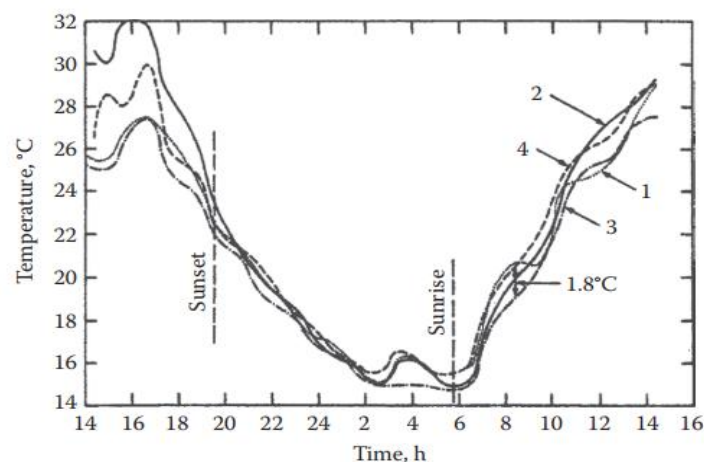


Figure I.1.9 : Variation quotidienne typique de la température ambiante et de la température de l'isolateur dans le désert [26].

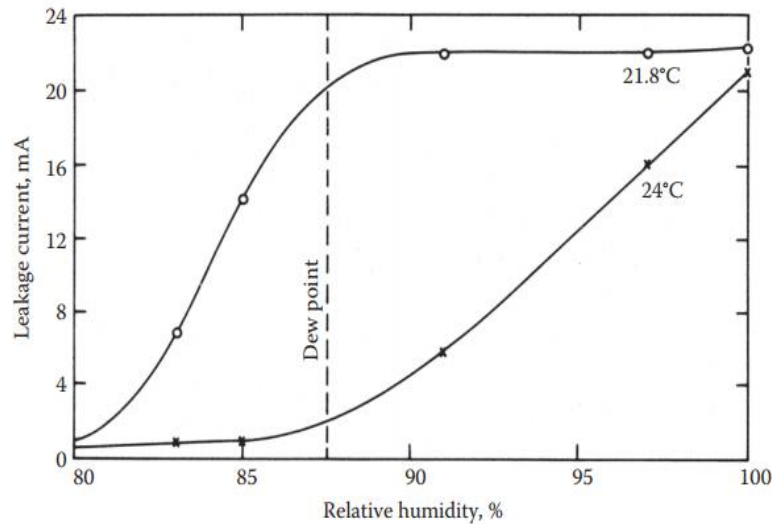


Figure I.1.10 : Variation du courant de fuite avec l'humidité relative avec et sans sous-refroidissement [17].

I-1-9 La Surveillance de l'état surfacique de l'isolateur à l'aide du courant de fuite :

Le courant de fuite de l'isolateur est un moyen pratique d'évaluer les effets combinés de la sévérité de la pollution et de l'état de mouillage des isolateurs lors des tests de laboratoire. Il est également souhaitable de gérer les courants de fuite des isolateurs dans l'environnement extérieur à un niveau bas pour diverses raisons, notamment la perte de puissance, le bruit audible, les interférences électromagnétiques et (dans une moindre mesure) la capacité à anticiper les débordements. Plusieurs systèmes commerciaux surveillent l'accumulation de pollution par l'évolution du courant de fuite et alertent les opérateurs de réseaux électriques lorsque des seuils prédéfinis sont dépassés [7].

Après avoir reçu une indication appropriée des systèmes automatiques, les opérateurs peuvent ensuite dépêcher du personnel de maintenance pour laver les isolateurs. Cela permettra de réduire la fréquence des pannes imprévues dues aux contournements de contamination et d'améliorer la fiabilité. En outre, il est avancé que la surveillance du courant de fuite peut optimiser l'intervalle de temps entre les cycles de lavage, par rapport à un programme fixe [7].

Les courants de fuite peuvent être déduits de l'intensité de l'activité des décharges partielles et de ses signatures ultraviolettes, acoustiques et thermiques associées. Cependant, il est plus fiable de mesurer le courant de fuite directement sur les isolateurs spécialement conçus à cet effet.

Dans des travaux récents, tels que celui de Richards et al. [2003], les auteurs ont effectué des tests d'exposition à long terme sur des isolateurs de distribution du type épingles pré-

contaminés sous différentes conditions, les résultats montrent comment leurs composantes typiques du courant de fuite, basse fréquence et haute fréquence, ont varié d'un cycle à l'autre.

La distorsion dans l'onde sinusoïdale du courant de fuite, peut être modélisée avec le troisième et cinquième contenu harmonique. Cette approche a été exploitée par les chercheurs [20], Richards et al. [21] pour caractériser l'état surfacique de l'isolateur.

I-2 Techniques expérimentaux

I-2-1 Introduction :

Les tests et les mesures de Haute Tension sont essentiels pour évaluer l'adéquation des équipements électriques à leurs spécifications de conception, à leurs exigences de performance pour le système de transmission et de distribution du service public. Cela implique à son tour que des moyens adéquats sont disponibles pour produire les contraintes diélectriques spécifiées, qui peuvent dépasser de loin le niveau de fonctionnement du système d'alimentation, et effectuer des mesures précises pour évaluer les performances du matériel testé [29]. Les spécifications techniques des équipements correspondent aux conditions dépassant la tension de fonctionnement normal du système. Des équipements spéciaux sont donc nécessaires pour produire en laboratoire la tension et le courant requis lors de l'essai des équipements de puissance. Cela est possible en décomposant les paramètres de test de sorte que l'équipement de test puisse produire un paramètre de test tel que la tension alternative ou continue, le courant et la tension d'impulsion à la fois, maintenant ainsi la puissance globale requise à des niveaux acceptables tout en permettant un contrôle adéquat des paramètres de test [29].

Les mesures de tension et de courant dans les tests de haute tension sont difficiles, car les amplitudes sont élevées et elles ne peuvent pas être mesurées directement avec les systèmes de mesures et d'enregistrement conventionnels. En outre, il convient de mesurer et d'évaluer non seulement la valeur de crête, mais également la forme du signal, en particulier pour les tensions et courants d'impulsion, ce qui nécessite un système d'enregistrements adéquat.

Les essais de pollution artificielle dans des laboratoires ou sur le site nécessitent des exigences spécifiques relatives à l'alimentation électrique pour les essais avec tension alternative ayant une capacité suffisante pour maintenir la tension d'essai à un niveau suffisant pendant l'activité des décharges électriques. Des essais en laboratoire sont effectués afin de comparer différents types de matériaux isolants, et d'examiner les performances de ces isolants dans différentes conditions de service sous certains types de contraintes. Plusieurs procédures doivent être suivies durant les essais au laboratoire pour essayer de reproduire les conditions de la région étudiée.

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

I-2-2 Dispositif expérimental

Les essais de mesure du courant de fuite et de la tension de contournement sous pollution désertique, ont été effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique. Ce laboratoire est équipé d'une station d'essais de marque industrielle HEAFELY de fréquence 50Hz. Cette station comprend les équipements suivants (Figure 1) :

- (1) Un transformateur d'isolement 220/220V, 50Hz qui est utilisé pour créer la séparation électrique entre le réseau extérieur de SONEGAS et celui alimentant la plate-forme d'essais du laboratoire. Sachant que l'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un tableau général situé dans le laboratoire, mais à l'extérieur de la plate-forme d'essais Un transformateur de réglage (220V/ 500V) qui permet de régler la tension à l'entrée du transformateur de haute tension.
- (2) Un transformateur de réglage qui permet de régler la tension à l'entrée du transformateur de haute tension. Son primaire est relié au secondaire du transformateur d'isolement. En effet, la tension primaire du transformateur de réglage est de 220V. Sa tension secondaire est variable manuellement à l'aide d'un volant de 0 à 500 V (pleine charge). Sa puissance apparente est de 50 kVA.
- (3) Un diviseur de tension capacitif qui est alimenté par la tension secondaire du transformateur de haute tension et délivre une tension réduite aux bornes de deux voltmètres installés dans le pupitre de commande. Il est composé d'une capacité $C_1=400\ \mu\text{F}$ en série avec une autre capacité C_2 variable dont la combinaison de branchement permet d'obtenir les calibres de mesure : 75kV, 150kV et 300kV.
- (4) L'oscilloscope numérique que nous avons utilisé est de type « GW INSTEK » (Figure 1) dont la bande passante est de 500 MHz. Cet oscilloscope est relié à un PC pour l'acquisition des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée au modèle expérimental.
- (5) Une caméra vidéo numérique NIKON 4K Ultra HD model COOLPIX B700 de 20.9 Méga-pixel, permet de filmer le mécanisme du contournement.
- (6) Des câbles coaxiaux ont été utilisés pour l' acquisition des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée.
- (7) Une résistance de 1 k Ω est insérée entre l'isolateur et la terre pour mesurer le courant de fuite à travers la surface de l'isolateur.

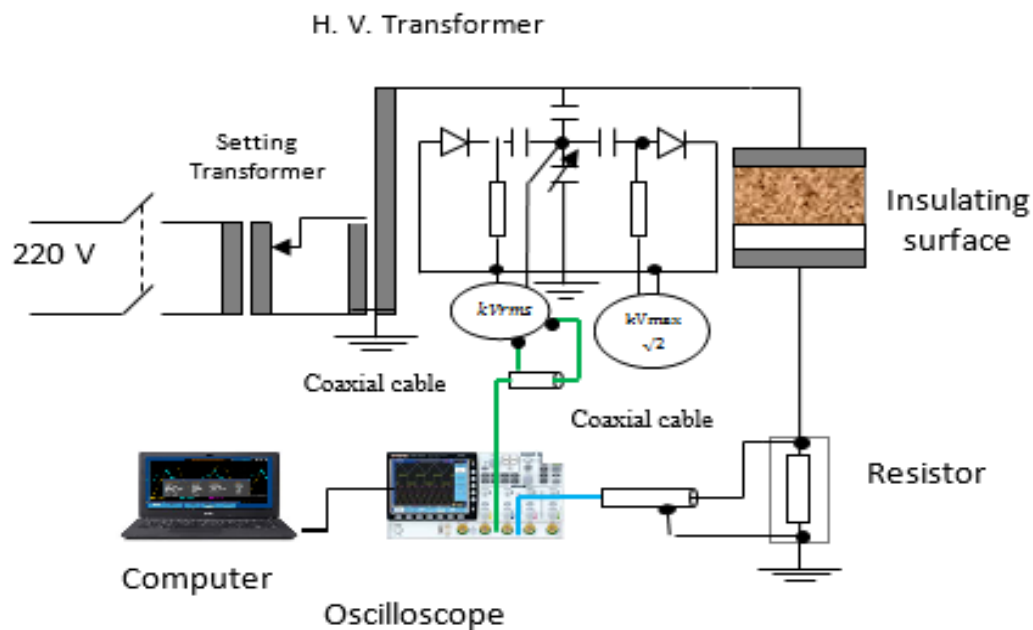


Figure I.2.1 : Montage expérimental

I-2-3 Modèle expérimental

Les essais ont été effectués sur un modèle plan de laboratoire en verre. La distance entre les électrodes est de 29,2 cm représente la ligne de fuite de l'isolateur 1512L, fréquemment utilisé par la société algérienne de Gaz et Énergie Electrique (SONELGAZ) dans les zones désertiques. Le modèle d'isolateur, illustré sur la figure 4, est constitué d'une plaque isolante en verre (50 mm x 50 mm x 5 mm) ayant la propriété de résister à la chaleur due aux décharges électriques.

La plaque est munie de deux électrodes rectangulaires (500 mm x 30 mm) réalisées en papier aluminium dont l'épaisseur est de 2 μm . L'une est mise à la borne haute tension et l'autre est mise à la terre. Les électrodes ont été découpées de manière à ne pas avoir de pointes à leurs extrémités. Lors des essais, la distance inter-électrodes de 292 mm du modèle a été maintenue fixe. Elle correspond à la ligne de fuite de l'isolateur réel de type 1512L. Le choix délibéré du modèle plan est justifié par le fait qu'il a l'avantage de faciliter les observations et les mesures nécessaires à l'analyse des phénomènes mis en jeu.



Figure I.2.1 Modèle expérimental

I-2-4 Tension délivré par le transformateur

La tension délivrée par le transformateur doit être selon les normes IEEE Std 4 [30] et IEC 60060-1 [32] :

- La tension appliquée d'essais doit être une tension alternative
- Fréquence est comprise entre 45 Hz et 65 Hz.
- Le taux de distorsion (THD) de la tension d'essai devrait se situer autour de 5% et le facteur de crête entre 1,344 et 1,485.

La Figure 3 montre la forme d'onde de la tension appliquée délivrée par le transformateur et son spectre de fréquence pour une tension appliquée de 30 kV.

Le spectre fréquentiel montre la prédominance de la composante fondamentale (50 Hz), et la présence des composantes harmoniques dans le signal de la tension. L'amplitude du cinquième harmonique (250 Hz) est la plus importante. Le taux de distorsion harmonique total (THD) est de 4.95 %, et le facteur de crête est de 1.3864.

Selon IEEE Std 519 [25] et CEI 60060-1 [32] (indiquant que la distorsion de la tension de test doit être d'environ 5% et le facteur de crête compris entre 1,344 et 1,485), nos résultats pourraient être acceptés. Par conséquent, la contribution de la distorsion correspondante est négligeable.

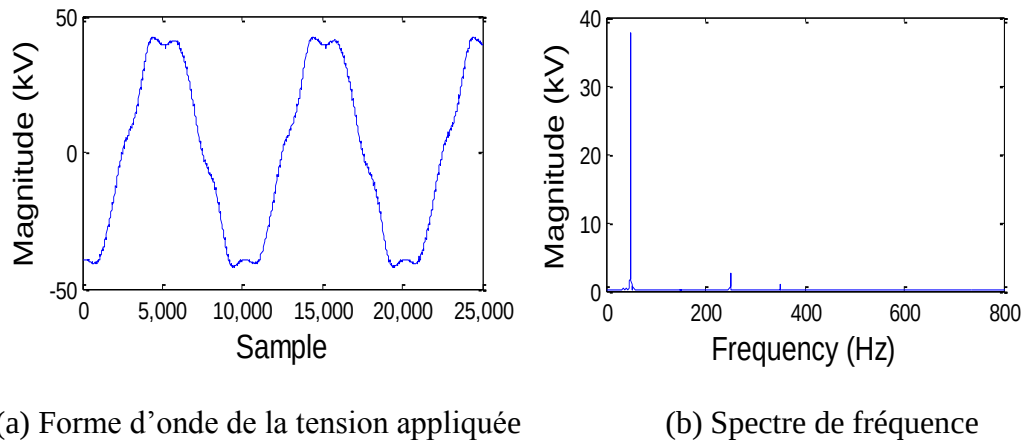


Figure I.2.3 : La tension appliquée et son spectre fréquentiel

I-2-5 Préparation de l'objet d'essais

Le nettoyage de la plaque isolante de verre a été effectué après chaque essai. Tout d'abord, la plaque a été lavée avec de l'eau de robinet, puis elle a été séchée avec des serviettes en papier pour éliminer le maximum d'impuretés déposées. Un deuxième nettoyage a été effectué à l'aide d'un coton imbibé d'alcool chirurgical à 70% afin d'assurer une propreté maximale. Pour préparer les électrodes, des bandes conductrices en aluminium de dimension $500 \times 30 \text{ mm}^2$ ont été découpées. La découpe a été faite soigneusement de manière à éviter la formation de pointes notamment dans les extrémités. Les deux électrodes ont été collées à une distance de 292 mm en utilisant du gasoil, de manière à éviter les vides pouvant engendrer l'apparition des décharges partielles prématurées qui risquent de perturber la qualité de la mesure du courant de fuite. Un troisième nettoyage a été effectué à l'aide d'un coton imbibé d'alcool pour éliminer toute trace du gasoil utilisé lors de l'opération du collage des électrodes. Enfin, un dernier nettoyage du modèle a été réalisé avec un papier absorbant et un séchoir.

Cette procédure de nettoyage a été adoptée pour toutes les configurations étudiées à savoir plaque propre et plaques uniformément et partiellement polluées. A la fin, le modèle de laboratoire a été soulevé à une hauteur de 175 cm du sol. Ceci nous a permis d'éliminer ou du moins de limiter l'effet des capacités parasites qui peuvent altérer la mesure du courant de fuite et de la tension appliquée.

I-2-6 Préparation de la couche polluante :

Pour le cas uniforme, nous avons utilisé deux échantillons de sable prélevés d'une dune d'une hauteur d'environ 20 m. Le premier échantillon a été prélevé à la base de la dune (0 m), ce sable est caractérisé par des grains de taille grossière. Le deuxième échantillon a été prélevé de la crête de la dune (20 cm), ce sable par contre, est caractérisé par des grains de taille fine.

Le sable est distribué sur toute la surface du modèle entre les électrodes. Pour chaque test et cas, nous essayons de reproduire la même couche de pollution la plus uniforme possible. Cette couche de pollution est ensuite humidifiée par pulvérisation d'eau distillée de (2 μ S) à une distance de 0,5 m, cinq fois de chaque côté du modèle en utilisant un pulvérisateur.

Pour prendre en compte l'influence de la quantité de sable sur le comportement de l'isolateur, nous avons considéré cinq quantités différentes (15, 30, 45, 60 and 75 g) de sable, l'équivalent des dépôts solubles (ESDD) et l'équivalent des dépôts non-solubles (NSDD) sont calculés en accordance avec les normes IEC 60815 [31] par les équations (1) et (2). Les résultats sont donnés dans le tableau 1.

$$ESDD = (5.7 \sigma_{20})^{1.03} V / A \quad (1)$$

$$NSDD = W_{N-S} / A \quad (2)$$

Avec σ_{20} : conductivité du sable à T = 20 °C (S / m), A: surface de l'isolant (cm²), V: volume d'eau distillée (cm³), W_{N-S} : poids du dépôt non-soluble (g).

Le tableau montre que la conductivité (ESDD) et la valeur de NSDD (densité de dépôt non soluble), augmente avec l'augmentation de la quantité de sable pour les quatre échantillons de sable, tableau 1 (Région de NAMMA 0 et 20m d'hauteur), tableau 2 (Région de Oued Souf 0 et 20m d'hauteur). La conductivité de chaque quantité est mesurée au laboratoire par conductimètre.

Tableau I.2.1 L'équivalent NSDD et ESDD de différentes quantités de sable (NAMMA)

Quantité de sable	NSDD (g/cm ²)	ESDD (mg/cm ²) (0 m)	ESDD (mg/cm ²) (20 m)
15	0,01	0,15	0,35
30	0,02	0,25	0,54
45	0,03	0,55	0,75
60	0,04	0,76	1,08
75	0,05	0,95	1,5

Tableau I.2.2 L'équivalent NSDD et ESDD de différentes quantités de sable (Oued Souf)

Quantité de sable (g)	NSDD (g/cm ²)	ESDD (mg/cm ²) (0 m)	ESDD (mg/cm ²) (20 m)
15	0,01	0,75	0,817
30	0,02	1,04	1.29
45	0,03	1,35	1,56
60	0,04	1,68	1,92
75	0,05	1,95	2,15

Pour le cas non-uniforme, nous avons considéré cinq largeurs de la couche polluée (5, 10, 15, 20, et 25 cm), et plusieurs positions de la couche polluée, telle que, couche de pollution coté HT, coté terre et au milieu. Le sable est distribué de la même manière que pour le cas uniforme, mais pour ce dernier cas, les bandes propres sont cachées par des plaques de plexiglass.



Figure I.2.4 : Couche de pollution pour une largeur de 15 cm.

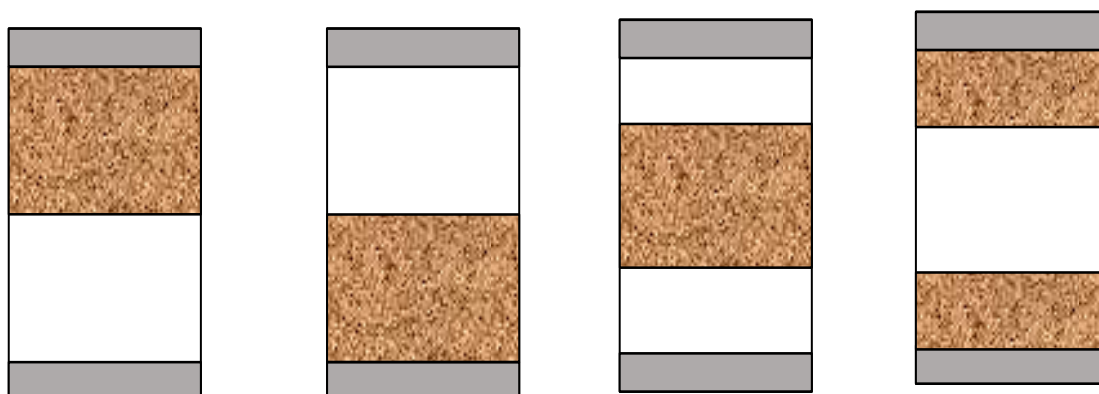


Figure I.2.5 : Les différentes configurations de pollution pour le cas non-uniforme (a) couche de pollution située du côté haute tension (b) couche de pollution située du côté terre (c) couche de pollution située au milieu (d) bande propre située au milieu.

I-2-7 Méthode de pulvérisation

L'humidification de la couche de pollution est réalisée par l'eau distillée de faible conductivité ($2 \mu\text{S/m}$). L'humidification s'effectue par la pulvérisation du modèle plan pollué en utilisant un pulvérisateur.

Les pulvérisations ont été effectuées de chaque côté du modèle expérimental à une distance de 50 cm. Le nombre de pulvérisations est de 5 fois de chaque côté. Les vingt (20) pulvérisations qui ont été appliquées correspondent à un volume de 15 ml. Lors des essais, le nombre ainsi que la position de pulvérisations ont été maintenus invariables. Pour le cas non-uniforme, les bandes propres restent recouvertes par les plaques de plexiglas.

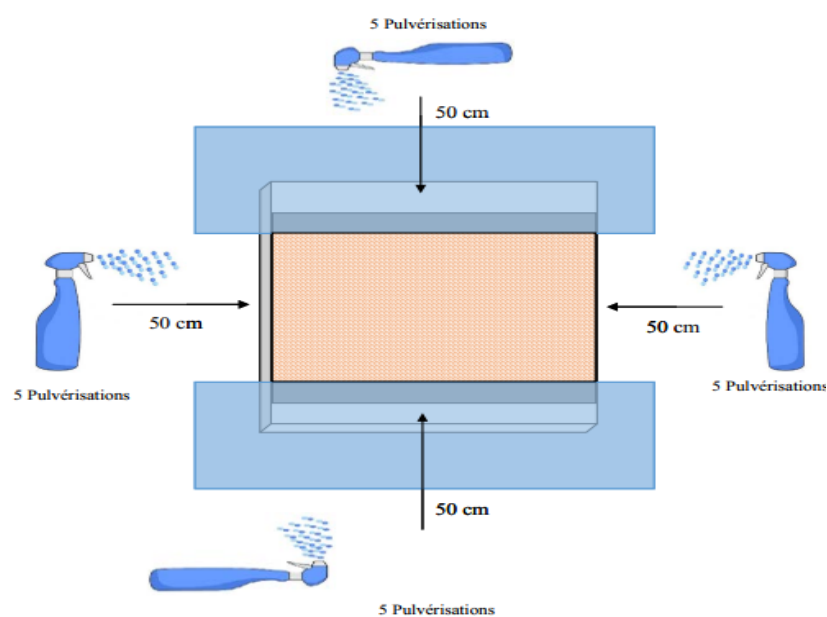


Figure I.2.6 : Méthode de pulvérisation dans le cas d'une pollution uniforme

I-1-8 l'enregistrement du phénomène contournement

L'enregistrement du développement des décharges électriques jusqu'au contournement a été effectué en utilisant une caméra numérique NIKON 4K Ultra HD model COOLPIX B700 (Figure III.10). La caméra est placée à une distance de 4m de l'objet d'essais.

Les vidéos enregistrées nous ont permis de déterminer en fonction de la tension appliquée, les longueurs et le nombre des décharges électriques partielles ainsi que la longueur critique de l'arc effectuant le saut final de contournement, et ce pour toutes les configurations de la pollution (humidifiée) ainsi adoptées. La vidéo enregistrée nous permet aussi de déterminer la tension du contournement de chaque configuration.



Figure I.2.7 : Caméra numérique NIKON 4K Ultra HD model COOLPIX B700

I-1-9 Mesure du courant de fuite

Le courant de fuite a été mesuré par l'intermédiaire de l'onde de la tension captée aux bornes d'une résistance de $1k\Omega$ insérée en série entre l'électrode de basse tension et la terre. Cette onde est acquise à l'aide d'un câble coaxial et ramenée vers l'oscilloscope numérique. Le signal récupéré représente l'image du courant de fuite.

Pour éviter l'influence des parasites dans le signal du courant recueilli, la résistance a été introduite dans une boîte métallique mise à la terre, formant ainsi un écran électrique. L'oscilloscope numérique que nous avons utilisé est de type « GW INSTEK » (Figure III.11) de bande passante 500 MHz. Cet oscilloscope est relié à un PC permettant l'acquisition des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée au modèle expérimental.



Figure I. 2.8 : Oscilloscope numérique GW INSTEK 3504.

I-3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse générale des différents aspects de la pollution et les mécanismes de contournement sous pollution ainsi que les différents paramètres pour décrire la sévérité de pollution. Il en ressort que la pollution est un facteur déterminant dans le dimensionnement des isolateurs et que la connaissance du degré de pollution est également une condition indispensable pour un dimensionnement convenable. En effet, même bien choisie, une isolation n'est encore pas à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer ; le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant, d'où la nécessité de pouvoir protéger les installations existantes contre de nouvelles sources de pollution éventuelles. Nous avons présenté aussi une synthèse sur la pollution désertique, tel que la formation de la couche de pollution et son l'interaction avec les conditions météorologique.

Dans la deuxième section de ce chapitre, nous avons décrit les techniques expérimentales ainsi que les différents dispositifs utilisés lors des essais au laboratoire. Ainsi nous avons présenté la station d'essais, le modèle expérimental, les méthodes relatives à la préparation, les différentes configurations de pollution adoptées, et la pulvérisation ainsi que les mesures de la conductivité, de la tension de contournement, du courant de fuite, du déphasage courant-tension.



Chapitre II

Etude du phénomène de contour- nement

II-1 Introduction

L'analyse, et la compréhension des phénomènes de décharges surfaciques sur des isolants propres ou contaminés par la pollution ou le givre est d'une importance capitale pour l'emplacement des lignes électriques et l'optimisation de la chaîne d'isolement dans les réseaux électriques externe. Cela nécessite des investigations sur plusieurs fronts : étude de la nature physique de la décharge et son interaction avec le dépôt de pollution, estimation de l'étude des mécanismes d'élongation de la décharge, influence de la nature du dépôt sur le phénomène. La constitution chimique et physique de la de pollution affectent les performances de contournement des isolants, et leur recherche a une signification à long terme [35]. Ils existent plusieurs méthodes utilisées pour suivre et détecté ce phénomène.

Il est maintenant reconnu que le mécanisme de contournement des isolateurs pollués se caractérise par différentes étapes : accumulation de la couche de contamination, mouillage de l'isolateur, courant de fuite, formation d'arcs au niveau de la bande sèche et extension éventuelle de tels arcs pour couvrir l'ensemble de la ligne de fuite [36].

Des décharges partielles se produisent aux endroits où la contrainte électrique dépasse la limite du matériau isolant. Ces limites dépendent de différents paramètres tels que le type de matériau, température, pression, durée du stress, pureté, etc. Dans tous les cas, le déclenchement de décharges partielles à une tension appliquée donnée montre qu'au moins localement une limite de résistance a été atteinte. En fonction du matériau isolant, le niveau de tension auquel des décharges partielles se produisent et la quantité de charges permettent de tester les performances et la qualité de l'isolation sur la base des valeurs expérimentales.

II-3 Mécanisme du contournement :

L'étude du processus de contournement permet de définir l'évolution des décharges électriques et la rigidité électrique de l'isolateur. Le processus de contournement est fortement affecté par les propriétés de la surface de l'isolant comprenant les matériaux de fabrication (verre, caoutchouc, ...) et le type de pollution cumulée sur la surface de l'isolateur.

Ce chapitre traite les caractéristiques de contournement d'un modèle plan d'isolateur sous pollution désertique et sous tension alternative 50 Hz. Nous étudions l'influence de deux types de pollutions, pollution uniforme avec différentes quantités de sable en terme de NSDD et pollution non-uniforme avec différentes largeurs de la couche polluée placée en différents endroits par rapport aux électrodes sur l'isolant : pollution côté électrode HT, pollution côté électrode terre, ou bien au milieu, le comportement de l'isolateur en général et sur l'activité des arcs partiels en particulier.

Pour suivre l'évolution des décharges électriques jusqu'au contournement des surfaces isolantes propres et uniformément ou partiellement polluées, nous avons utilisé une caméra numérique NIKON 4K Ultra HD. Une analyse attentive des vidéos enregistrées, nous a permis d'examiner visuellement le développement ainsi que l'évolution des arcs en fonction de la tension appliquée.

Durant tous nos essais effectués au niveau du laboratoire, nous avons constaté deux modes de contournement. Le contournement direct dont le saut final apparaît directement sans aucune manifestation lumineuse visible au préalable. Le contournement indirect dont plusieurs phases peuvent être distinguées, leur existence et leurs caractéristiques tels que

l'initiation des arcs électriques, l'élongation d'arcs, et l'arc critique dépendent notamment du niveau de la tension appliquée et de la configuration de la pollution telle que la quantité de sable utilisé (NSDD), le type de sable utilisé et la largeur et la position de la couche de pollution.

II-2-1 Cas de pollution uniforme

Les figures 2 et 3 présentent les étapes de contournement pour deux valeurs différentes de NSDD : 0.01g/cm^2 et 0.05g/cm^2 respectivement. Le processus du contournement est le résultat d'une évolution des décharges électriques suite à une augmentation progressive de la tension appliquée que l'on peut décrire par plusieurs étapes.

L'initiation des décharges électriques sur la couche de pollution uniforme se fait sur les deux électrodes (HT et GR) à 70 kV pour NSDD de 0.01 et 52 kV pour NSDD de 0.05 g/cm. Ces décharges causent ainsi une évaporation progressive de la couche de pollution humidifiée due à la chaleur dégagée par effet Joule. Cette évaporation donne naissance à d'autres zones sèches qui vont être à leurs tours sièges à de nouveaux arcs électriques (Figure 2b) à 76 kV et (Figure 3b) à 54 kV. En effet, aux premières étapes du processus, de nombreux arcs partiels prennent naissance. Avec l'augmentation de la tension, les arcs commencent à disparaître de telle sorte qu'un seul arc dominant persiste (Figure 2c) à 88 kV (0.01 g/cm^2) et (Figure 3c) à 58 kV (0.05 g/cm^2). Par conséquent, au fur et à mesure qu'on se rapproche du contournement, à l'exception d'un seul et unique arc, tous les autres arcs disparaissent.

Le développement de cet arc s'effectue par les deux cotées (électrodes HT et GR) jusqu'à la longueur critique (Figure II.2d) à 88 kV et (Figure 3c) à 60 kV. La tension correspondante est dite tension critique de contournement. L'étape finale du processus du contournement suit directement l'étape de l'arc critique.

La longueur d'arc électrique principal est représentée par l'arc venant du côté haute tension et de l'autre venant du côté terre (GR). La longueur de l'arc augmente d'une manière rapide avec la tension d'essais. Cette longueur est faible avec l'initiation du processus du contournement. Pour une tension appliquée de 52 KV la longueur d'arc il est d'environ de 5 cm pour NSDD de 0.05 g/cm^2 et de 0 cm pour la valeur de NSDD de 0.01 g/cm^2 . Pour une tension appliquée de 58 KV la longueur d'arc est atteinte son état critique pour la valeur de 0.05 g/cm^2 , sa longueur est d'environ de 19 cm, et de 0 m pour NSDD de 0.01 g/cm^2 . À la de 70 KV de tension appliquée, l'initiation des premières arcs de longueur 3 cm pour 0.01 g/cm^2 , cette longueur atteint une longueur critique de 14 cm pour une tension de 88 KV.

La longueur d'arc critique est d'environ égale à $1/3$ et à $2/3$ de la ligne de fuite du modèle (29,2 cm) pour la NSDD la plus faible (0.01 g/cm^2) et la plus haute (0.05 g/cm^2) respectivement. D'une manière générale, on peut dire que la longueur d'arc critique est comprise entre $1/3$ et $2/3$ de la distance entre électrodes, comme déjà obtenu par d'autres chercheurs [14, 15]. Notons que la longueur d'arc critique mesurée sera constituée de deux arcs partiels. Le premier arc vient de l'électrode HT et la deuxième de l'électrode GR. Finalement, le contournement total du modèle plan, résulte de l'interconnexion de l'arc venant du côté haute tension et celui venant du côté terre générant un arc reliant les deux électrodes et formant ainsi un canal dans l'air permettant le passage d'un courant de fuite. Le contournement total s'effectue à 94 kV pour NSDD de 0.01 g/cm^2 , et à 62 kV pour NSDD de 0.05 g/cm^2 . Ces ten-

sions de contournement permettent de donner la rigidité électrique de l'isolateur sous ces conditions de pollution.

Il est à constater que dans le cas de la quantité de sable la plus importante (soit 0.05 g/cm^2), l'apparition des arcs et leur élongation jusqu'au contournement ont été obtenus à des tensions plus faibles que celles relevées lors de l'application de la plus faible quantité du sable (0.01 g/cm^2). Ceci est évident car la conductivité volumique augmente avec l'augmentation de la quantité de sable humidifiée (NSDD).

D'autres caractéristiques peuvent être remarquées sur le mécanisme du contournement durant son évolution en fonction de la tension appliquée ; celles-ci concernent notamment le changement de couleur des arcs qui apparaissent sur la surface de l'isolateur. L'initiation du phénomène de contournement par un nombre important d'arcs est caractérisée par la couleur violée, puis, pour les longueurs importantes de l'arc électrique ainsi que pour l'arc correspondant au contournement total, la couleur devient orange.

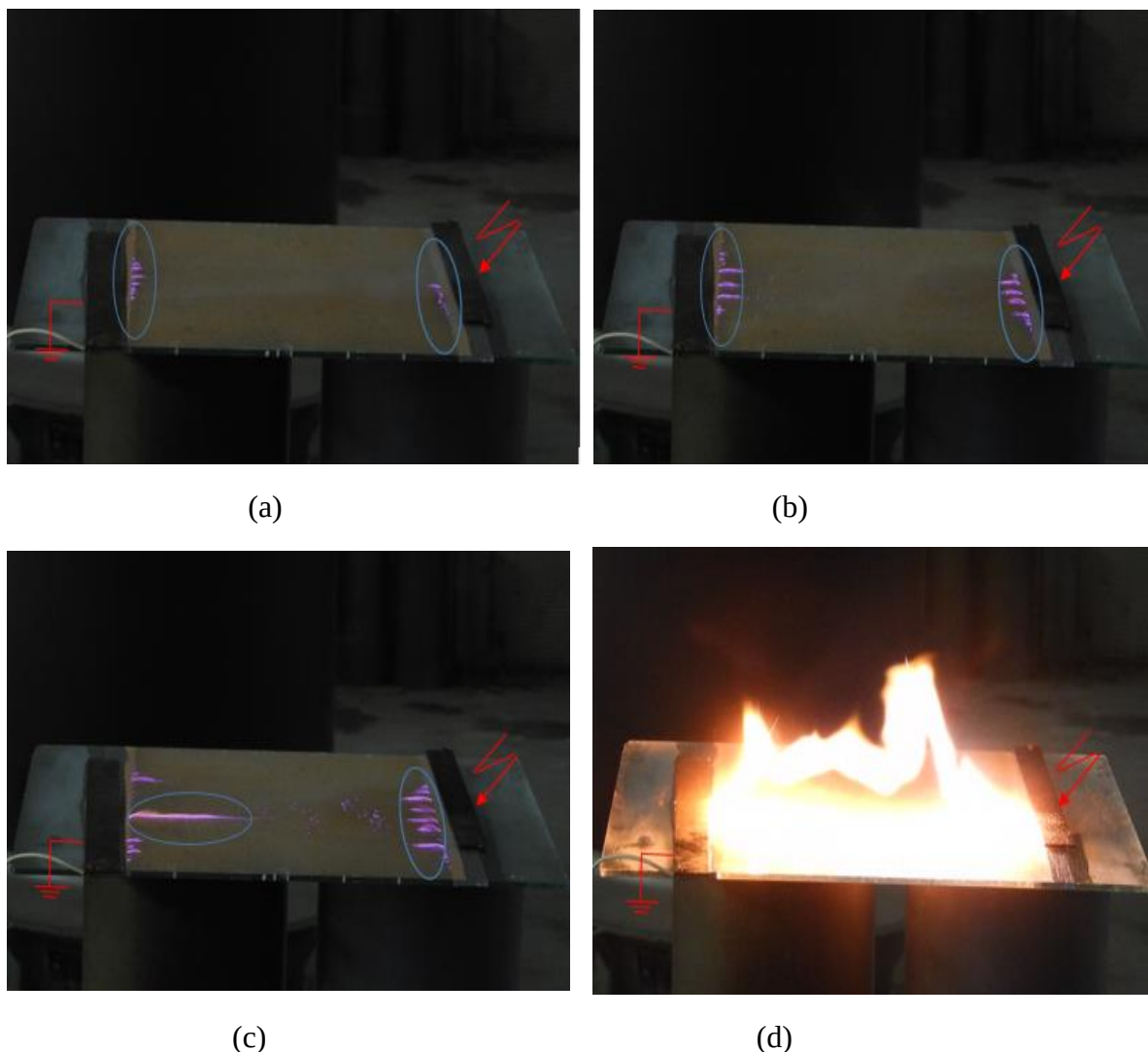
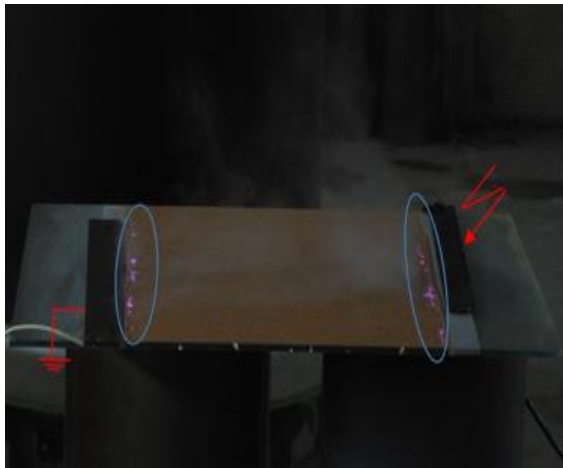
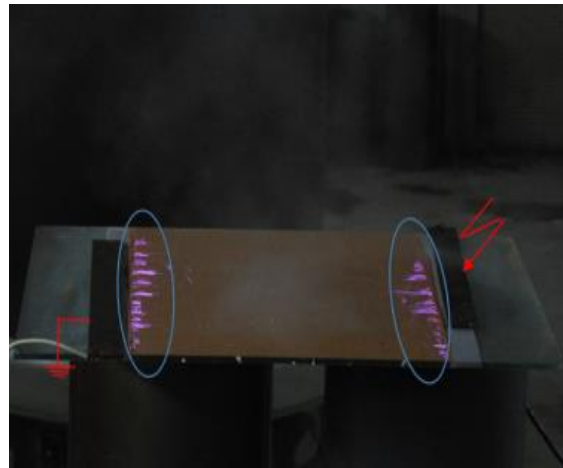


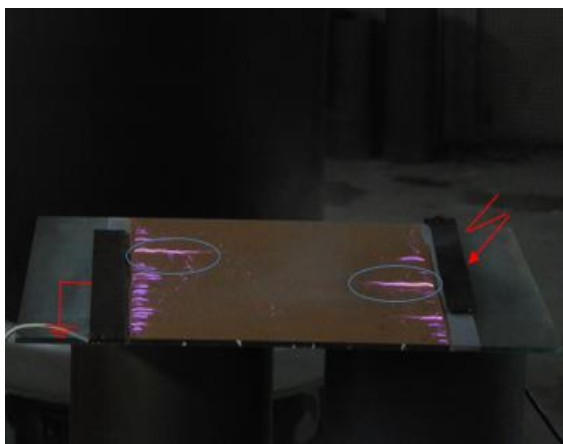
Figure II. 1 : Etapes du contournement dans le cas d'une couche de pollution uniforme pour NSDD de 0.01 g/cm^2 (a) Apparition de petits arcs (70 kV), (b) augmentation du nombre d'arcs (76kV), (c) Elongation de l'arc principal (88 kV), (d) Contournement total (94 kV), niveau 20 m de la dune de la région de NAAMA.



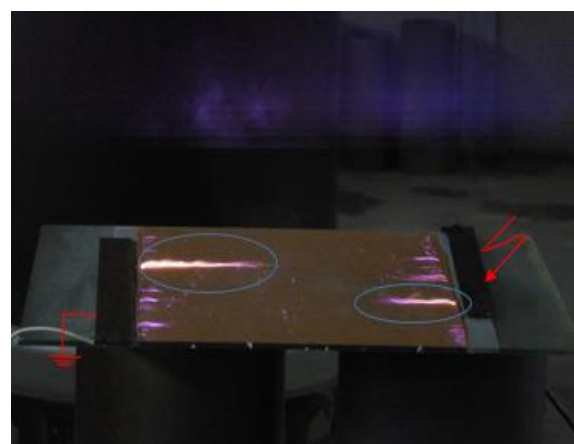
(a)



(b)



(c)



(d)



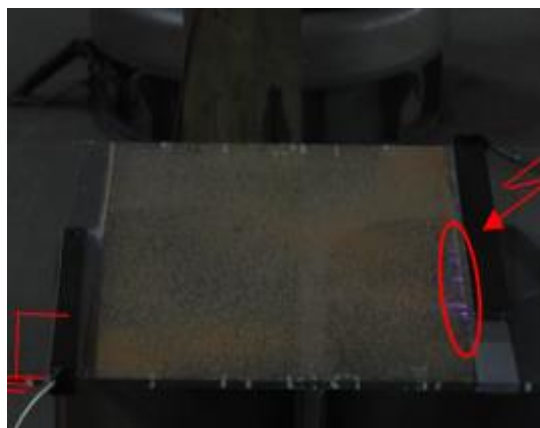
(e)

Figure II.2 : Etapes du contournement dans le cas d' une couche de pollution uniforme pour NSDD de 0.05 g/cm^2 (a) Apparition de petits arcs (52 kV), (b) augmentation du nombre d'arcs (54 kV), (c) Elongation de l'arc principal (58 kV), (d) arc critique (60 kV) (e) Contournement total (62 kV), niveau 20 m de la dune de la région de NAAMA.

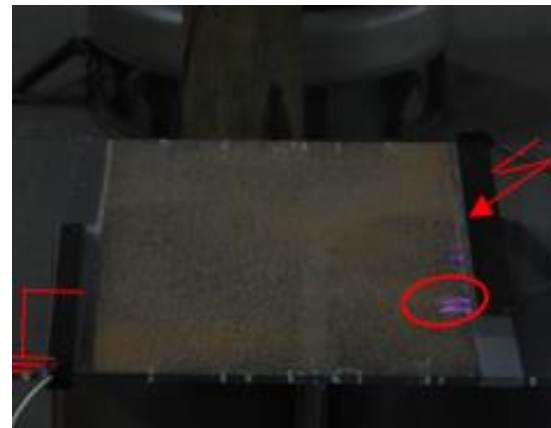
Afin de mieux évaluer l'influence de la composition chimique et physique de sable (la taille des grains de sable) sur le contournement, nous avons étudié le processus du contournement pour deux valeurs de NSDD 0.01 et 0.05 g/cm², pour un échantillon de sable prélevé au niveau du sol d' une dune de sable (0 m) et à une hauteur de 20 m de la même dune de la région de NAAMA. Ce sable est caractérisé par des grains grossiers dont la conductivité mesurée au Laboratoire est faible, ce qui voudra dire que leur contenu en sels solubles est faible.

Les figures III.3 et III.4 représentent les processus de contournement pour deux valeurs de NSDD (0.01 et 0.05 g/cm²) dans le cas d'un sable à grains grossiers (région de Naama). Pour une valeur faible de NSDD (0.01 g/cm²), le processus du contournement commence par l' initiation d' un nombre faible d' arcs du côté de l'électrode HT (Figure II.3a) sous une tension appliquée de 95 kV. L'élongation de ces arcs est très faible et n'excède pas une longueur de 3 cm (Figure II.3b) pour une tension appliquée de 100 kV. Le contournement total s'effectue à une tension de 110 kV (Figure II.3c).

Pour une valeur élevée de NSDD (0.05 g/cm²), pour le même sable de la même région, le processus du contournement est caractérisé par l' initiation d'arcs assez nombreux au niveau des deux électrodes (HT et terre) sous une tension appliquée de 56 kV (Figure II.4a). Le nombre de ces arcs est relativement faible comparé au cas du sable caractérisé par des grains fins (niveau 20 m) et où l'initiation du processus de contournement est caractérisé par un nombre d'arcs plus important (Figure II.2a) pour une même valeur de NSDD et avec une valeur de tension appliquée plus faible (52 kV). Avec l'augmentation de la tension appliquée la longueur d'arc principale augmente et atteint une longueur de 8 cm pour une tension appliquée de 62 kV (Figure II.4b). L'arc critique atteint une valeur maximale d'environ 15 cm pour une tension de 64 kV (Figure II.4c), inférieure à celle du sable à grains fins (20 m) pour lequel il atteint une valeur de 19 cm pour une tension de 60 kV. Le contournement total apparaît à une tension de 66 kV.



(a)

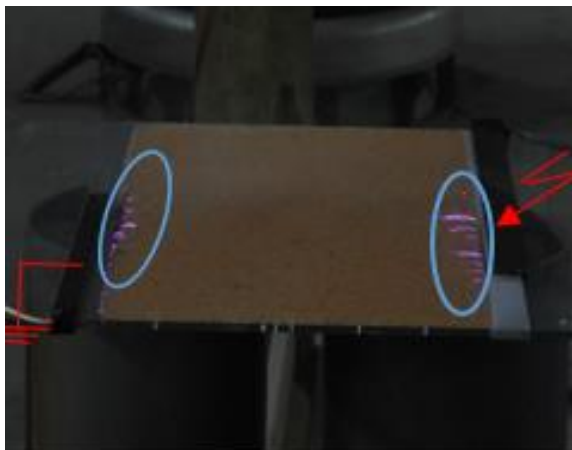


(b)

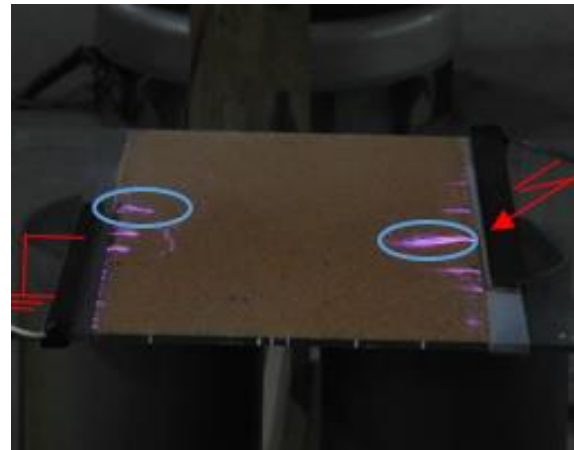


(d)

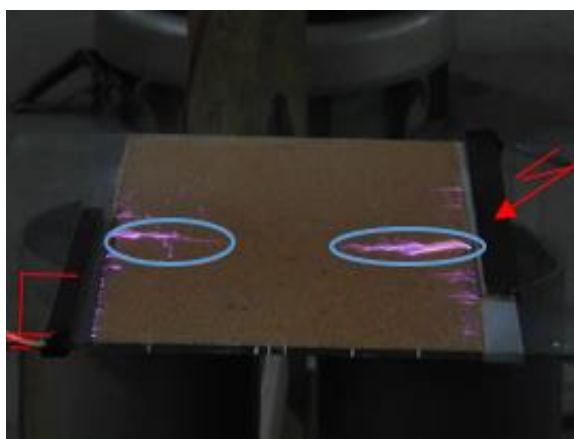
Figure II.3 : Etapes du contournement dans le cas d' une couche de pollution uniforme pour NSDD de 0.01 g/cm^2 (a) Apparition de petits arcs (95 kV) (b) élongation faible de ces arcs (100 kV) (c) contournement totale (110 kV), niveau 0 m d'une dune de la région de NAAMA.



(a)



(b)



(c)



(d)

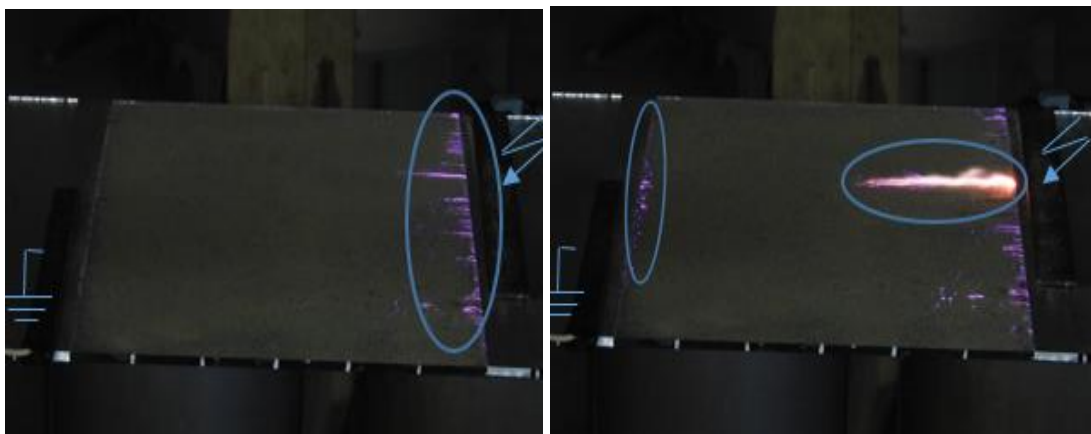
Figure II.4 : Etapes du contournement dans le cas uniforme pour NSDD de 0.05 g/cm^2 (a) Apparition de petits arcs (56 kV), (b) Elongation de l'arc principal (62 kV), (c) arc critique (64 kV) (e) (d) Contournement total (66 kV), niveau 0 m d'une dune de la région de NAAMA.

Un autre type de sable a été étudié pour voir son influence sur le processus du contournement. Ce sable a été prélevé de la région de Oued Souf d'une dune de 25 m. Il est caractérisé par des grains de sable très fins et très conducteurs (valeur de la conductivité). En effet, cette région est caractérisée par la présence de Sabkhat (sols salés) très riche de sel NaCl qui est un sel très soluble en présence de l'humidité.

La figure II.5 montre le processus du contournement en fonction de la tension appliquée pour une valeur de NSDD de 0.03 g/cm^2 de ce sable prélevé de la région de Oued Souf, le mécanisme de contournement est caractérisé par une initiation intense d'arcs le long de l'électrode HT sous une tension faible de 25 kV. Dans ce cas, nous remarquons que le courant de fuite est très important (sable fin), ce qui prouve que sa conductivité est très importante. En effet, cette région est connue par le fait qu'elle soit riche en sel (NaCl). Ceci donne naissance à une forte évaporation de la couche de pollution se trouvant au niveau des électrodes, d'où la formation d'arcs dans cette zone sèche.

L'élongation de l'arc principal est caractérisée par une importante énergie à cause de l'intensité élevée du courant de fuite, il atteint une longueur de 15 cm pour une tension appliquée de 32 kV. L'arc critique atteint une longueur très importante, environ 27 cm, pour une tension appliquée de 35 kV, le contournement total de l'isolateur s'effectue à une tension très faible de 38 kV.

Les caractéristiques du contournement (intensité des arcs, l'élongation de l'arc principal, et le contournement total) dépendent beaucoup des caractéristiques physique et chimique du sable (taille des grains et sa conductivité). Ces mêmes résultats ont été confirmés par plusieurs autres chercheurs [3,5]. La dépendance conjointe entre les caractéristiques physique et chimique du sable sur l'intensité du courant de fuite qui à son tour influence sur l'intensité des arcs électriques et leurs propagations sur la surface de l'isolateur. En effet, l'augmentation du courant de fuite accentue l'effet d'évaporation de la couche de pollution, ce qui permet d'augmenter les zones sèches qui sont le siège d'autres arcs.



(a)

(b)

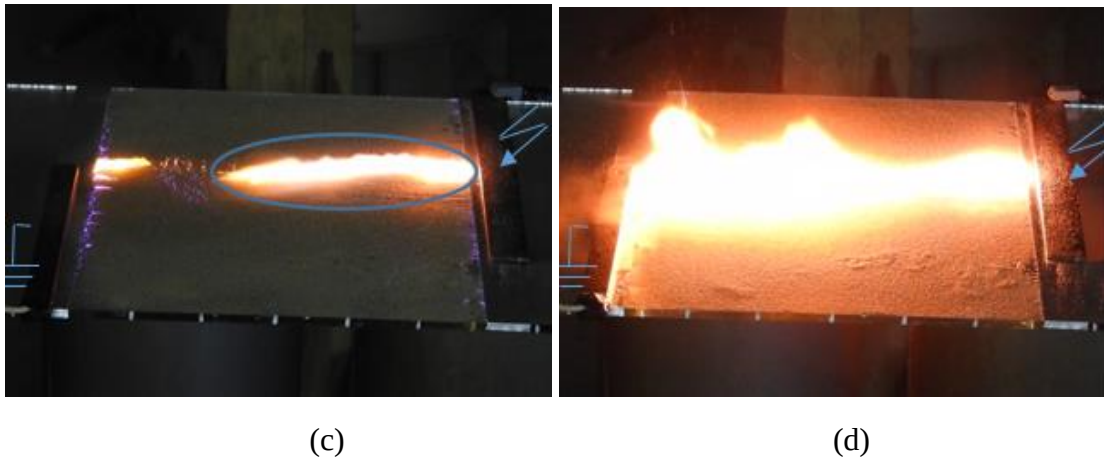


Figure II.5 : Différentes étapes du contournement dans le cas d' une couche de pollution uniforme pour NSDD de 0.05 g/cm^2 (a) Apparition de petits arcs (25 kV), (b) Elongation de l'arc principal (32 kV), (c) arc critique (35 kV) (e) (d) Contournement total (38 kV), niveau 20 m d'une dune de la région de Oued souf.

II-2-2 Cas de pollution non-uniforme

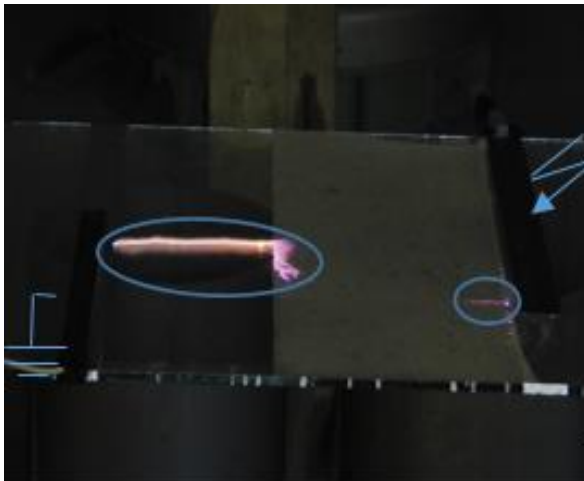
Pour mieux comprendre le mécanisme du contournement des isolateurs pollués, et les positions des zones d'apparition d'arcs, ainsi que la tension d'apparition de ces d'arcs, nous avons étudié plusieurs configurations de pollution, à savoir la largeur et la position de la couche polluée où nous avons considéré les emplacements de la couche polluante suivants : coté haute tension, coté terre et au milieu de l' isolant. On commence par étudier l'influence de la largeur pour une couche de pollution située du côté haute tension. Pour bien voir l'influence des couches polluantes, on utilise le sable prélevé de la région de Oued SOUF qui est un sable caractérisé par des grains des tailles fines très conductrices.

Nous avons constaté lors des essais que pour les trois premières valeurs de la largeur de la couche polluée (5, 10 et 15cm), le contournement se fait directement sans apparition préalable d'arcs partiels. Cependant, pour les largeurs suivantes soient 20 et 25cm, le contournement s'effectue par étapes, c'est-à-dire par d' abord l' initiation des décharges partielles au niveau de la bande propre.

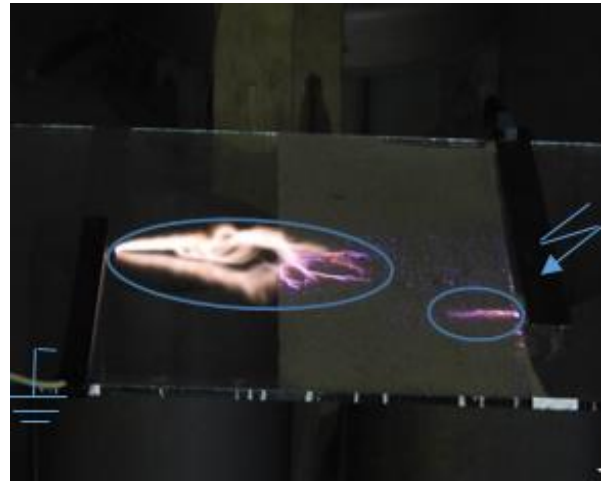
Dans le but de trouver la largeur critique de la bande de pollution humidifiée à partir de laquelle le contournement commence à s'effectuer par apparition de décharges préliminaires, nous avons jugé utile de faire varier la largeur de la bande de pollution entre 15 et 20cm.

A cet effet, nous avons refait les essais pour une largeur de 16 et 17cm. Il s'est avéré que le contournement se déroule directement pour le premier cas (16cm), et par étapes dans le second (17cm) ; la largeur critique de la pollution humidifiée est donc de 17cm. Pour résumer, nous pouvons dire que le contournement se produit directement sans apparition préalable des décharges partielles lorsque la largeur de la bande propre atteint 45% de la distance inter-électrodes du modèle de laboratoire. Un pourcentage comparable (entre 33-38%) a été obtenu par d'autres auteurs [1, 21, 50] utilisant une solution saline ; la différence pourrait être due à la nature de la pollution.

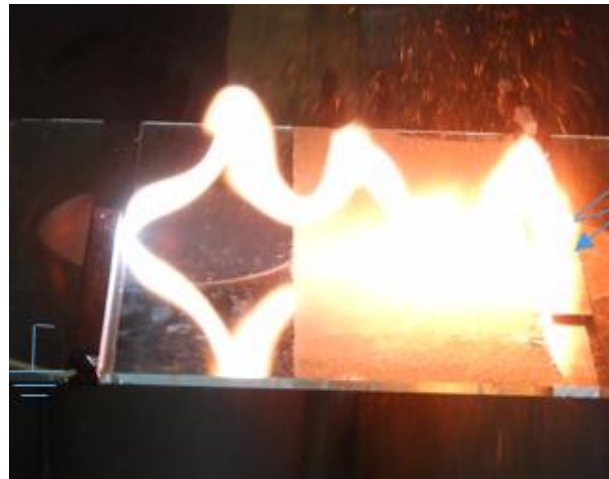
Les figures II.6 à II.8 présentent le processus de contournement (par étapes) correspondant à une largeur de la couche de pollution de 17, 20 et 25 cm respectivement. Ces figures montrent qu'avec l'augmentation de la tension appliquée, nous avons observé en premier lieu la naissance subite d'un seul et unique arc électrique le long de la bande propre établie du côté terre (Figures II.6(a), II.7(a), et II.8(a)). La tension d'initiation de cet arc est de 62kV, 50 kV et 30kV respectivement pour la largeur de la bande polluée de 17, 20 et 25 cm. Nous notons également que ces arcs disparaissent et réapparaissent rapidement d'une manière continue le long de la couche propre. En augmentant davantage la tension, nous avons enregistré l'apparition de nombreux arcs électriques (certains fixes et d'autres non localisés), cette fois-ci sur la bande polluante située du côté de l'électrode HT. Le nombre d'arcs augmente avec la largeur de la bande polluante (Figures II.7 (b) et II.8(b)). Ces arcs s'allongent, donc leurs longueurs augmentent avec l'accroissement de la tension appliquée (Figures II.6 (b), II.7 (b) et II.8 (b) et (c)). Cependant, au fur et à mesure qu'on se rapproche du contournement, à l'exception d'un seul et unique arc, tous les autres arcs disparaissent. Similairement au cas de la pollution uniforme humidifiée, cet arc évolue jusqu'à provoquer le contournement total de la surface isolante partiellement polluée. Juste avant le contournement, l'arc principal reste collé à la surface isolante (Figures II.6(c), II.7(c) et II.8(d)). Cependant, l'arc de contournement sera constitué de deux arcs partiels. Le premier correspond à la bande propre (Figures II.7(d) et II.8(d)). Il se fait plutôt dans l'air. Le deuxième correspond à la bande de pollution. Il reste collé à cette couche si cette dernière demeure humide (Figures II.7(d) et II.8(d)) et il peut se faire dans l'air suite à l'assèchement total de celle-ci (Figure II.8(e)). Notons que les longueurs critiques obtenues de l'arc pour les largeurs de pollution de 17cm, 20cm et 25cm sont respectivement 15cm, 16cm et 20cm soit 51%, 55% et 68% de la ligne de fuite du modèle d'isolateur.



(a)

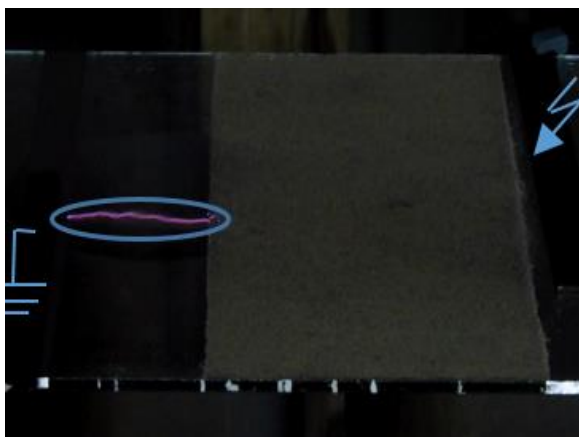


(b)

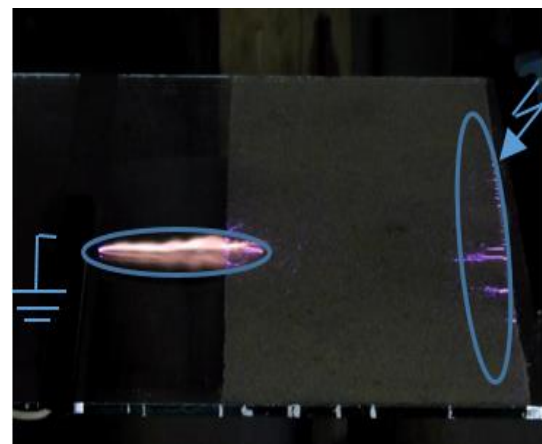


(c)

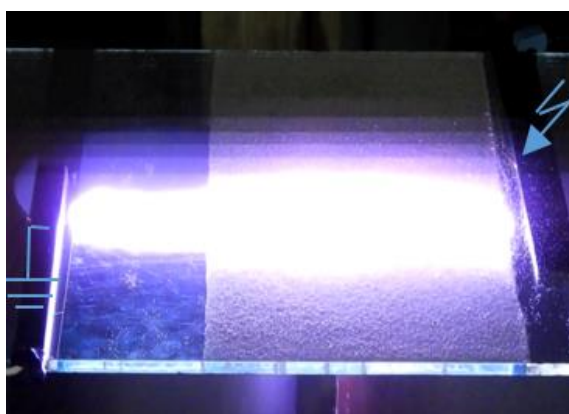
Figure II. 6 : Différentes étapes du contournement dans le cas de la largeur de la bande de pollution située du côté HT de 17 cm, (a) Apparition de l'arc qui court-circuite la bande propre (62kV), (b) Elongation de l'arc dans la bande polluée et formation de nombreux arcs (64kV), (c) Contournement (68kV), niveau 20 m d'une dune de la région de Oued souf.



(a)



(b)



(a)



(b)

Figure 7.II : Différentes étapes du contournement dans le cas de la largeur de la bande de pollution située du côté HT de 20 cm, (a) Apparition de l'arc qui court-circuite la bande

propre (50kV), (b) Elongation de l'arc dans la bande polluée et formation de nombreux arcs (58kV), (c) Pré-contournement, (d) Contournement (60kV), niveau 20 m d'une dune de la région de Oued souf.

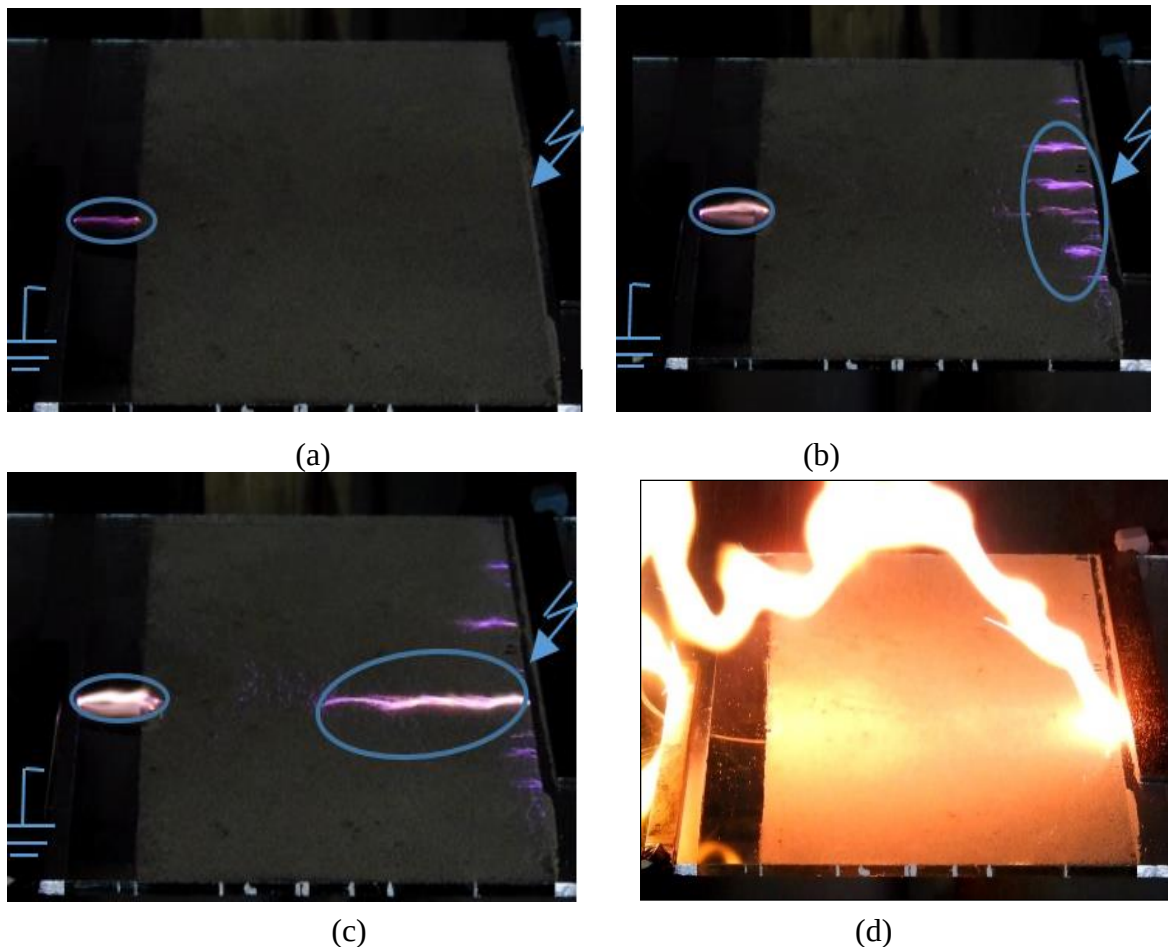


Figure II.8 : Différentes étapes du contournement dans le cas de la largeur de la bande de pollution située du côté HT de 25cm, (a) Apparition de l'arc qui court-circuite la bande propre (30 kV), (b) Elongation de l'arc dans la bande polluée et formation de nombreux arcs (40 kV), (c) Longueur critique de l'arc, (d) Contournement totale (50 kV), niveau 20 m d'une dune de la région de Oued souf.

Afin mieux évaluer l'influence de la position de la couche polluante sur le processus du contournement, nous avons présenté le processus du contournement de deux autres configurations de pollution, l'une lorsque la couche de pollution est située du côté terre et l'autre lorsque la bande propre est située au milieu.

Dans ces cas, le processus du contournement commence par l'initiation des premiers arcs au niveau des bandes propres. Des arcs apparaissent sur la bande propre située coté HT pour une tension appliquée de (34 kV) et dans le milieu à (36 kV) pour la deuxième configuration. Avec l'augmentation de la tension appliquée, nous constatons l'apparition des arcs au niveau de la couche de pollution. Pour la couche de pollution située du côté terre (64 kV), et sur les deux côtés HT et terre à 46 kV pour la bande propre située au milieu, l'apparition de ces arcs est due à l'effet de l'évaporation de la couche de pollution au niveau des électrodes haute tension et terre. L'élongation d'arcs s'effectue dans les côtés pollués, donc l'arc prin-

principal est constitué par deux arcs pour le cas de la couche de pollution située du côté terre (l'arc qui court-circuite la bande propre et l'arc dans le côté pollué), et trois arcs pour la bande propre située au milieu, l'un dans la bande propre et les deux autres sur les bandes polluées.

Les longueurs de l'arc principal pour ces cas varie d'une longueur minimale représentée par la largeur de la bande propre (4.2 cm) pour les deux configurations ; cette longueur atteint une valeur critique (avant le contournement total) de 17 cm pour le cas de la couche de pollution située du côté terre et d'environ 20 cm pour le deuxième cas.

Le contournement total est le résultat de l'interconnexion des arcs partiels se développant à partir du côté haute tension avec les arcs court-circuitant les bandes propres pour former un seul arc qui relie l'électrode HT et celle de terre, pour une tension de 54 kV pour la deuxième configuration (figure II.9d) et de 56 kV pour la troisième (figure II.10d) configuration.

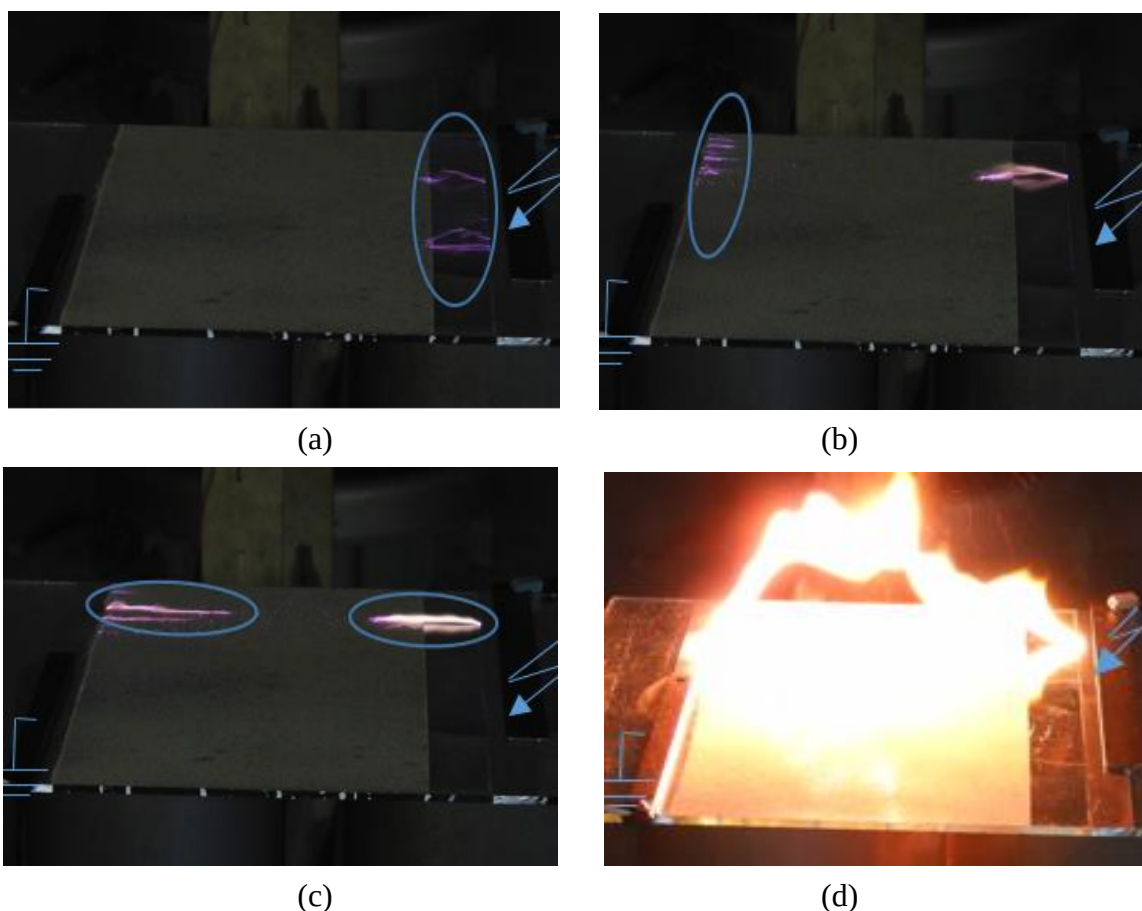


Figure II.9 : Différentes étapes du contournement dans le cas de la largeur de la bande polluée située du côté terre de 25 cm, (a) Apparition de l'arc qui court-circuite la bande propre (34 kV), (b) Elongation de l'arc dans la bande polluée et formation de nombreux arcs (46 kV), (c) Longueur critique de l'arc, (52) (d) Contournement totale (54 kV), niveau 20 m d'une dune de la région de Oued souf.

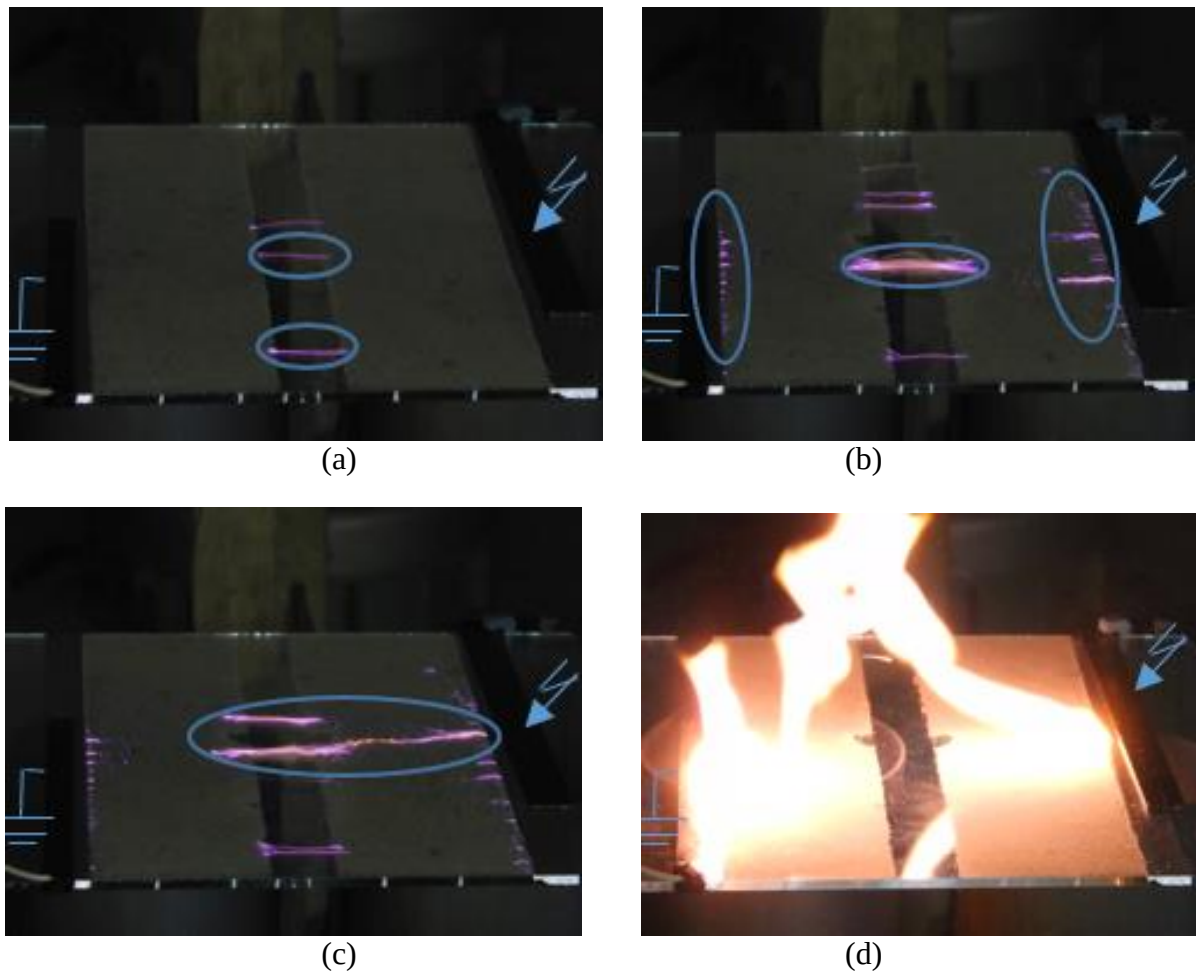


Figure II.10 : Différentes étapes du contournement dans le cas de la largeur de la bande propre est située au milieu de 25 cm, (a) Apparition de l'arc qui court-circuite la bande propre (36 kV), (b) Elongation de l'arc dans la bande polluée et formation de nombreux arcs (46 kV), (c) Longueur critique de l'arc, (54 kV) (d) Contournement totale (56 kV), niveau 20 m d'une dune de la région de Oued souf.

II-3 Etude de la tension de contournement

La tension de contournement représente la tension nécessaire pour avoir un arc reliant les deux électrodes. La tension de contournement est un paramètre primordial pour définir la rigidité diélectrique du modèle de l'isolateur. Cette mesure permet non seulement de déterminer l'impact de la configuration du modèle sur la rigidité diélectrique de celui-ci, mais aussi de déterminer les paliers des tensions à appliquer pour l'enregistrement du courant de fuite. Il est donc nécessaire de connaître celle-ci pour éviter qu'il y ait risque de contournement durant nos essais de mesure de courant pour protéger les équipements de mesure. La répartition de la pollution (uniformité, discontinuité, épaisseur) joue un rôle majeur sur les conditions critiques du contournement.

La mesure de la tension de contournement a été effectuée pour chaque configuration de pollution à l'aide du voltmètre électrostatique, donnant la valeur de la tension en kilovolts efficace.

II-3-1 Cas de pollution uniforme

La tension de contournement a été mesurée pour le cas de pollution uniforme, pour quatre échantillons de sable, deux ont été prélevés de la région de Namma à 0 m, et à 20 m d'une dune (figure 11a), et les autres de la région de Oued souf aux mêmes niveaux de prélèvement, c'est-à-dire à 0 m et à 20 m d'une dune (figure 11b). Les essais de la tension de contournement sont répétés plusieurs fois. La tension de contournement pour le cas propre et sec a été aussi mesuré (120 kV), pour le but de voir l'influence de l'augmentation de la quantité de sable (NSDD) sur la rigidité électrique de l'isolateur.

Les Figures 5 montrent que la tension de contournement moyenne pour les quatre échantillons de sable diminue avec l'augmentation de la quantité de sable utilisé (NSDD). Avec l'augmentation de la quantité de sable, nous remarquons que la tension de contournement diminue graduellement pour les deux échantillons de sables, des valeurs de 105 kV et 96 kV pour la NSDD de 0.01 g/cm² à des valeurs 66 kV et 62kV pour NSDD de 0.05 g/cm respectivement pour l'échantillon de (0m) et l'échantillon de (20 m). Ces résultats montrent que la rigidité électrique de l'isolateur se dégrade de 50 %, (la tension de contournement pour le cas propre est de 120 kV, et environ de 60 kV pour une quantité de sable de 0.05 g/cm²).

Concernant l'influence de la nature du sable, nous avons constaté que la tension de contournement du sable prélevé de la crête de la dune (20 m) est inférieure à celle du sable prélevé de la base de la dune pour deux les régions, et par rapport aux deux régions, la tension de contournement pour le cas du sable prélevé de la région de Oued Souf est beaucoup plus faible celle en utilisant le sable prélevé de la région de Naama. Le sable prélevé de la crête de la dune (20 m) est caractérisé par des grains de tailles fines très conductrices au vu des valeurs de courant des fuites obtenues (leur contenu de sels est important), pour le cas de la région d'Oued Souf.

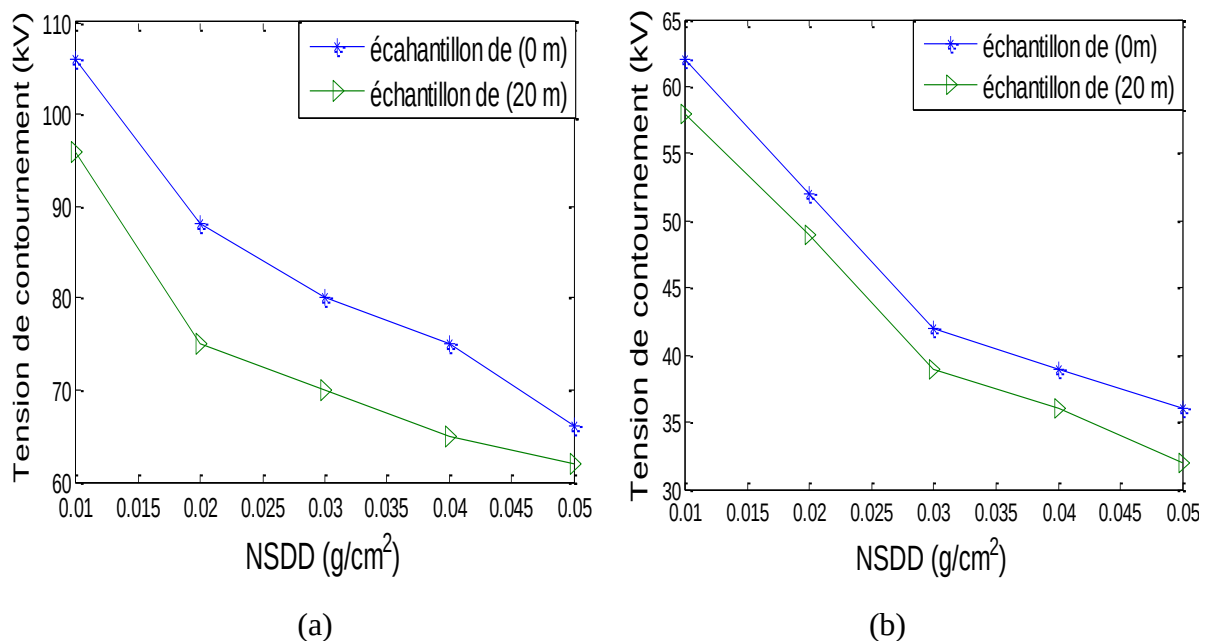


Figure II. 11 : Tension de contournement pour différentes valeurs de NSDD pour deux échantillons de sable (0 m) et (20 m) et pour deux région (a) Naama (b) Oued souf.

II-3-2 Cas de pollution non-uniforme

Pour le cas non-uniforme nous avons étudié l'influence de la largeur et du positionnement de la couche de pollution sur la surface de l'isolant sur la rigidité électrique de l'isolateur (tension du contournement). Quatre positionnements de la couche de pollution ont été étudiés, une couche de pollution située du côté haute tension, une autre du côté terre, une autre au milieu et enfin une bande propre au milieu de l'isolant. Pour ces essais, nous avons utilisé une quantité de sable représentée par la densité des dépôts non-solubles (NSDD) de 0.03 g/cm^2 . L'humidification a été appliquée en utilisant l'eau distillée dont la conductivité volumique est de $2 \text{ }\mu\text{S/cm}$. La méthode de pulvérisation ressemble à celle du cas uniforme, en recouvrant la bande propre par des plaques. L'essai de mesure de la tension de contournement est répété cinq fois.

Les figures 10 et 11 représentent la tension de contournement pour quatre configurations de pollution, couche de pollution située du côté haute tension, puis du côté terre (figure 10), puis couche de pollution située au milieu, et enfin bande propre située au milieu. Comme la tension de contournement dépend de la rupture des zones sèches (les bandes propres), pour toute configuration, nous constatons que la tension de contournement diminue avec la croissance de la largeur de la couche polluée (diminution de la largeur des bandes propres).

Ces résultats étaient prévisibles, car l'augmentation de la largeur de la couche polluée provoque la diminution de l'impédance équivalente totale vue des électrodes, engendrant ainsi la dégradation de la tenue diélectrique du système. Notons que l'impédance de la bande propre est très importante, et l'impédance de la couche polluée est faible, donc la diminution de la largeur de la bande propre et l'augmentation de la largeur de la couche de pollution diminue l'impédance équivalente de l'isolateur.

En outre, pour la première configuration, la position de la couche de pollution n'influence pas sur la tension du contournement, qui est caractérisée par une même rigidité électrique (figure II.12). Pour les deux dispositions de la deuxième configuration (figure II.13), cette figure montre une légère augmentation de la tension de contournement pour le cas de la longueur de la couche polluée dépasse 50 % de la ligne de fuite totale de l'isolateur. La rigidité électrique de la première disposition (couche de pollution au milieu) est supérieure à celle de la disposition où la bande propre se trouve au milieu.

Ces résultats confirment la constatation faite par H. Streubel [38], lorsqu'il a trouvé que la tension de contournement présente un minimum quand la distance inter électrodes est couverte par une couche hautement résistive. Ce minimum, observé également par d'autres chercheurs [10] pour des longueurs différentes de la couche discontinue de la pollution selon la nature des contraintes appliquées, correspondrait au cas le plus favorable à la formation rapide des arcs électriques et donc à un contournement plus probable.

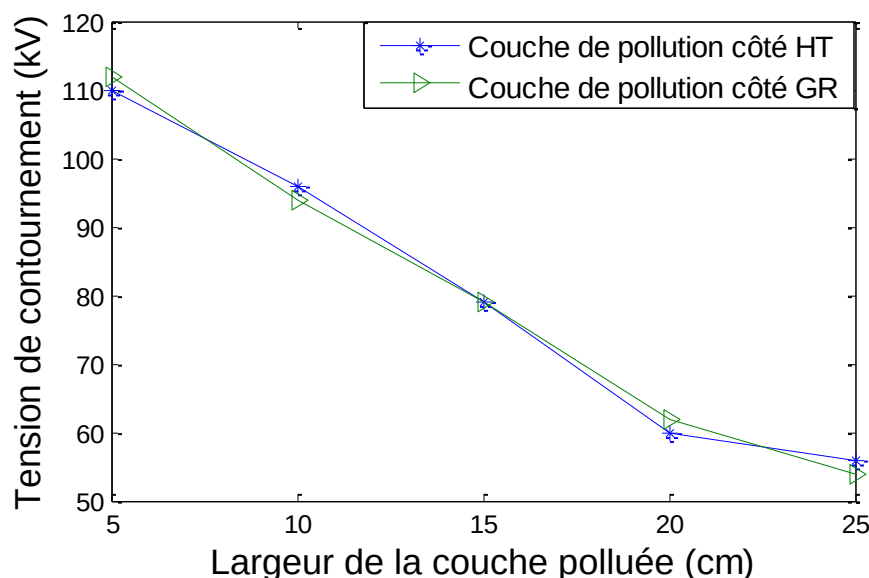


Figure II.12 : La tension du contournement en fonction de largeur de la couche polluée pour deux positions côté HT et côté terre (GR).

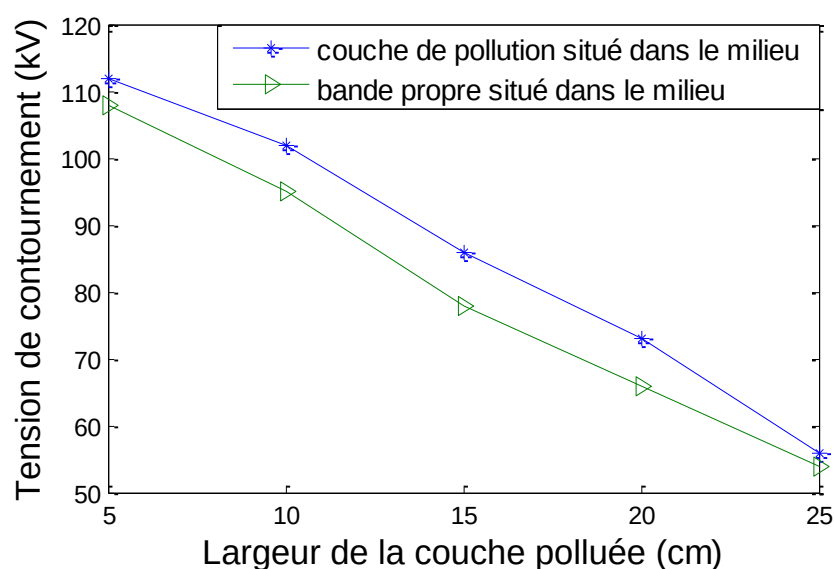


Figure II.13 : La tension de contournement en fonction de largeur de la couche polluée située au milieu avec le cas où la bande propre est située au milieu.

II-4 Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus nous permettent une meilleure compréhension de la corrélation qui peut exister entre la sévérité de pollution et l'activité des arcs partiels sur des surfaces isolantes polluées. Durant tous nos essais effectués au niveau du laboratoire, nous avons constaté deux modes de contournement. Le contournement direct dont le saut final apparaît directement sans aucune manifestation lumineuse visible au préalable. Le contournement indirect dont plusieurs phases peuvent être distinguées, leur existence et leurs caractéristiques dépendent notamment du niveau de la tension appliquée et de la configuration de la pollution (position et largeur de la bande propre).

Les différentes étapes conduisant au contournement du modèle plan de l'isolateur sont fortement influencées par la quantité et le type du sable polluant pour le cas uniforme, et par la largeur et la position de la bande polluante pour le cas non-uniforme. Toutefois, la position de cette dernière n'a aucun effet si celle-ci est placée du côté de l'électrode haute tension ou bien du côté de l'électrode terre. Il a été démontré expérimentalement que le modèle plan a la même rigidité diélectrique pour les deux configurations de la bande propre.

1- Pour le cas de la pollution uniforme l'initiation et l'élongation d'arcs s'effectuent par les deux électrodes (haute tension et terre), et l'initiation et l'élongation jusqu'au contournement total s'effectue à des tensions plus basses avec l'augmentation du niveau de la pollution (NSDD). Pour les cas propre et faible niveau de pollution, le processus du contournement apparaît directement sans des étapes initiales.

2- Pour le cas non-uniforme, nous avons étudié plusieurs configurations, telles que l'utilisation de cinq largeurs différentes, et trois positions différentes de la couche de pollution. Le processus du contournement s'effectue sans aucune apparition des étapes initiales pour les largeurs des couches polluées inférieures à 15 cm, quel que soit la configuration considérée. Pour les largeurs de la couche de pollution supérieures à 15 cm (20 cm et 25 cm), le processus du contournement s'effectue par plusieurs étapes inclure : les premiers arcs apparaissent au niveau des bandes propres et l'élongation va au-delà, dans la couche polluée, et la dernière étape représentée par le contournement totale de l'isolateur.

La tension de contournement permet de donner les informations sur la rigidité des isolateurs sous différentes configurations de la pollution.



Chapitre III

Etude du courant de fuite

III-1 Introduction

Dans toutes les études de diagnostics des isolateurs de haute tension, le courant de fuite traversant la couche de pollution sur la surface de l'isolateur est le paramètre le plus important qui donne des informations sur le comportement de l'isolateur ainsi que l'activité des décharges électriques pouvant avoir lieu sur sa surface. Ce courant est la superposition de trois composantes : le courant de polarisation, le courant d'ionisation et le courant de conduction. Le premier est le résultat de la réponse diélectrique intrinsèque au champ électrique appliqué. Le second est créé par les décharges partielles corona et instables qui apparaissent à la surface de l'isolateur, et le dernier est dû à la présence d'une couche de pollution conductrice sur la surface de l'isolateur [2].

Par conséquent, les mesures du courant de fuite sont largement utilisées à travers le monde dans le but de surveiller et d'étudier la pollution d'un site, et en particulier l'état de surface des isolateurs de haute tension ou tout autre type de matériaux diélectriques. Ces mesures sont effectuées aussi bien en laboratoires que dans le site même. Elles peuvent aussi être utilisées pour évaluer le degré de sévérité de la pollution des isolateurs, évaluer la conductivité de la pollution du site [2, 5] ainsi que la rigidité diélectrique de la surface de l'isolant [12, 41].

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux résultats expérimentaux obtenus au laboratoire et en particulier les formes d'ondes du courant de fuite et de la tension appliquée obtenues dans les différents cas de configurations de pollution étudiés, uniforme et non uniforme, et ceci en considérant différentes valeurs de la NSDD. Les deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée sont enregistrés simultanément, et ceci pour noter dans les différents cas étudiés le déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite. L'analyse du signal du courant de fuite et aussi effectuée dans le domaine fréquentiel et temporel en utilisant deux principales méthodes, la transformée de Fourier et la transformée d'ondelette. Les différents paramètres obtenus grâce à ces méthodes, sont le contenu harmonique, l'amplitude et le taux de distorsion, la variation temporelle des composantes harmoniques ainsi que leur déviation standard (STD). Nous allons nous baser sur ces paramètres pour caractériser l'état de surface de l'isolateur, c'est à dire le niveau de pollution, la largeur et la position de la couche polluante ainsi que l'activité des décharges électriques sur la surface de l'isolateur.

III-2 Courant de fuite :

La Figure III.1 représente l'évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour différentes valeurs de NSDD et pour deux échantillons de sable différents. L'un est prélevé à la base d'une dune (la hauteur est de 0 m, Figure IV.1a) et l'autre de la crête d'une dune (environ à 20 m, Figure IV.1b). Nous avons constaté, en général, que le courant de fuite augmente presque d'une manière linéaire avec l'augmentation de la tension appliquée pour différentes valeurs de NSDD. Cette augmentation du courant de fuite est due à l'augmentation de la conductivité surfacique de l'isolateur. En effet, l'augmentation de la quantité de sable (NSDD) humidifié s'accompagne par l'augmentation de la conductivité surfacique de l'isolateur.

En outre, on remarque que le courant de fuite pour le cas de sable prélevé de la crête de la dune (20 m) est plus important comparé à celui prélevé de la base de la dune (0 m). Le

sable de niveau (0m) de la dune est caractérisé par des grains grossiers et le sable prélevé de la crête de la dune est caractérisé par des grains fins. Ces résultats montrent que la conductivité de sable de grains fins est plus conductrice que celle du sable à grains grossiers. Ces résultats ont été obtenus aussi par plusieurs autres chercheurs [1, 37, 42]. Ces résultats, qui concernent la pollution désertique, ont été obtenus aussi bien au Laboratoire que sur site. Ils ont, en effet, trouvé que le sable à grains fins contenait une quantité de sels solubles plus importante que pour le sable à grains grossiers.

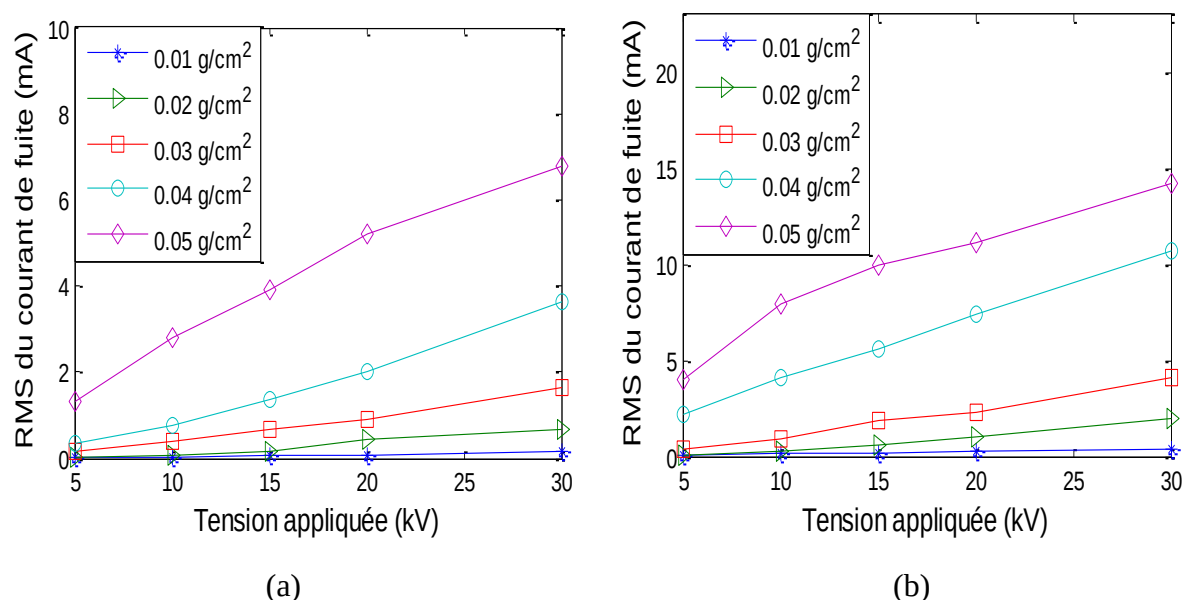


Figure III.1 : Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs de NSDD et pour deux échantillons de sable (a) niveau 0 m de la dune (b) niveau 20 m de la dune, région de Naama.

Afin d'étudier l'influence de la nature du sable, nous avons choisi deux niveaux différents pour le prélèvement de nos échantillons de sable dans la région de Oued Souf. Les premiers échantillons ont été prélevés au niveau 0 m d'une dune de sable, les autres à un niveau approximatif de 20 m de la même dune. Le sable prélevé de la région de Oued Souf est caractérisé par une couleur blanche-jaune, très riche en sel (NaCl), donc est très conducteur.

Nous avons mesuré le courant de fuite correspondant aux deux types d'échantillons. Dans les deux cas de figures III.2, les résultats obtenus montrent que le courant de fuite augmente avec la quantité de sable utilisée (NSDD) ainsi qu'avec la tension appliquée. Nous avons également trouvé que le courant de fuite obtenu pour les échantillons de sable prélevés au niveau de la crête de la dune (à 20 m d'altitude) est plus important que celui obtenu avec les échantillons prélevés. En outre, le courant de fuite de ces échantillons de sable (Oued Souf) est très important comparé à celui de la région de Naama, ce qui montre en effet que la conductivité du sable de cette région désertique est importante. Le sable prélevé de la région de Naama est caractérisé par un sable de couleur rouge de faible conductivité.

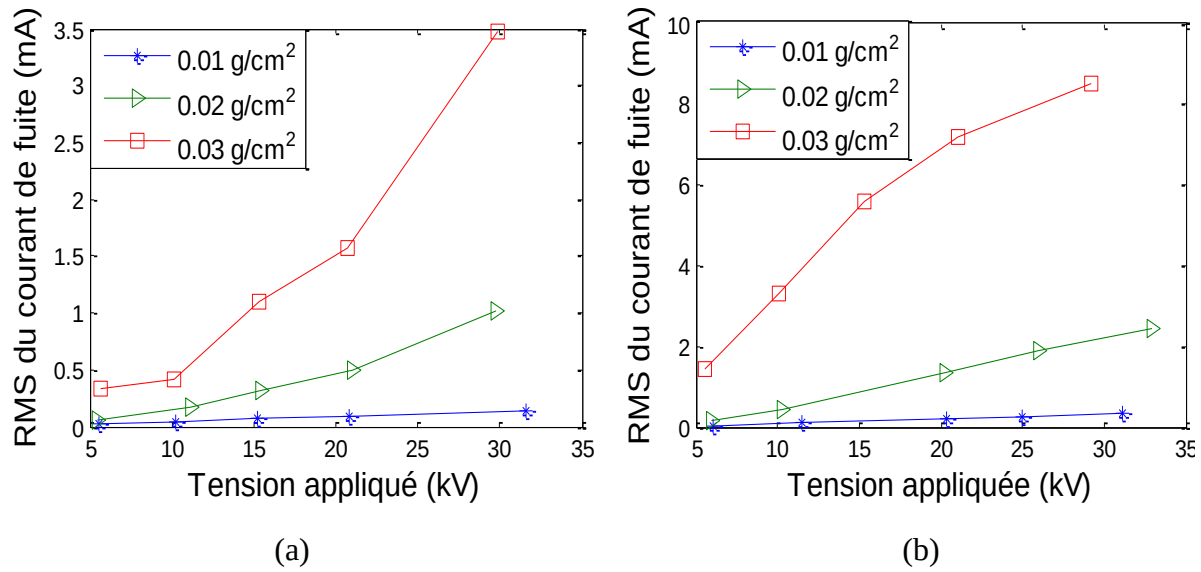


Figure III.2 : Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs de NSDD et pour deux échantillons de sable (a) niveau 0 m de la dune (b) niveau 20 m de la région de Oued Souf pour le cas uniforme.

Pour le cas de pollution non-uniforme, nous avons mesuré le courant de fuite pour cinq largeurs différentes de la couche de pollution, lorsque celle-ci est située du côté haute tension, en utilisant trois différentes densités de sable (NSDD) pour chaque largeur de pollution.

La figure III.3 montre la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs de la couche de pollution et pour trois valeurs de NSDD 0.01, 0.03 et 0.05 g/cm². Pour le cas d'une NSDD de 0.01 g/cm², le courant de fuite augmente linéairement avec la tension appliquée. Pour les valeurs de NSDD de 0.03 et 0.05 g/cm², le courant de fuite augmente linéairement pour les largeurs 5, 10, 15 et 20 cm de la couche polluée et d'une façon non-linéaire pour la largeur de la couche polluée de 25 cm. Cette non-linéarité est due à l'apparition intense de décharges électriques partielles (arcs) pour cette largeur de la couche polluante (25 cm). Ces arcs court-circuitent la bande propre, et ceci augmente le comportement résistif de l'isolateur. L'augmentation du comportement résistif engendre une augmentation importante du courant de fuite. En Outre, le courant de fuite augmente avec l'augmentation avec la densité de sable utilisé pour les largeurs de la couche polluée importantes (20 et 25 cm). A titre d'indication, pour la largeur de la couche polluée de 25 cm et pour une tension appliquée de 30 kV, la valeur du courant de fuite est d'environ 150 μ A pour une valeur de NSDD de 0.01 g/cm², de 320 μ A pour une NSDD de 0.03 g/cm² et de 950 μ A pour une valeur de NSDD de 0.05 g/cm. Avec l'apparition des arcs court-circuitant la bande propre, le comportement capacitif de l'isolateur diminue, donc son impédance diminue aussi considérablement. Dans ces cas, l'effet de la couche polluante devient plus important. En effet, plus la densité surfacique du sable (NSDD) augmente plus la valeur du courant de fuite augmente aussi. Par conséquent, la valeur de NSDD affecte le courant de fuite lorsque les couches de pollution sont trop larges et que la tension appliquée est suffisamment importante pour l'apparition des décharges partielles au niveau de la bande propre.

Les mêmes résultats ont été trouvés par plusieurs chercheurs [41,43]. Ces derniers ont étudié l'effet de la conductivité surfacique sur le comportement de l'isolateur, montrant que la

valeur de la conductivité affecte le courant de fuite lorsque la largeur de la couche conductrice et la tension appliquée sont suffisamment importantes.

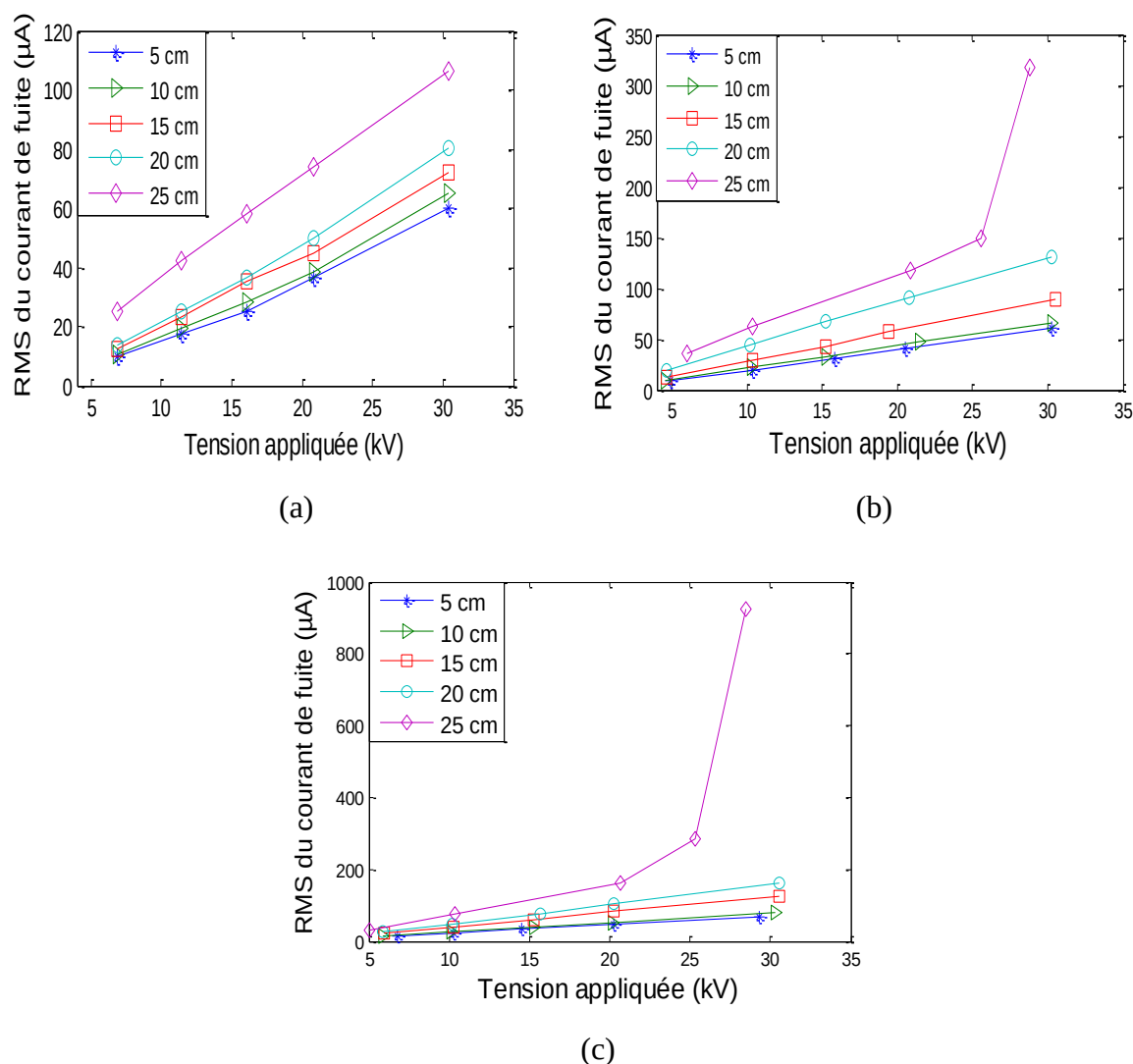


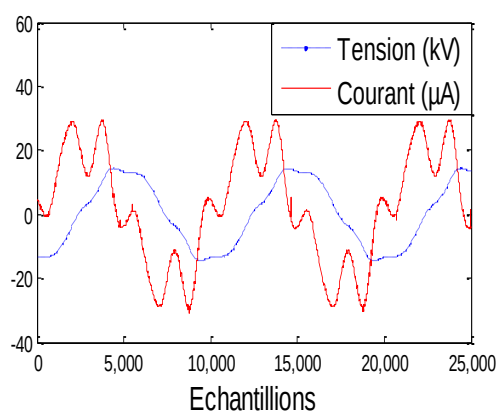
Figure III.3 : Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs de la couche polluée et pour Trois valeurs de NSDD (a) 0.01 g/cm², (b) 0.03 g/cm², (c) 0.05 g/cm²

IV-3 Forme de l'onde du courant de fuite :

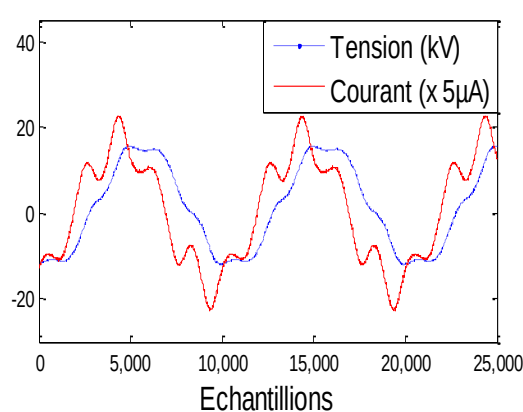
Dans cette section nous présentons les formes d'ondes du courant de fuite et de la tension appliquée enregistrées pour chaque configuration de pollution. Nous nous sommes intéressés à suivre leur évolution ainsi que le déphasage entre les deux signaux en fonction de la quantité de sable constituant la couche de pollution, donc de l'augmentation de la SNDD, dans le cas de la pollution uniforme, et en fonction de la largeur et de la position de la couche de pollution pour le cas de pollution non-uniforme et ceci en présence ou en l'absence de décharges superficielles.

IV-3-1 Cas de pollution uniforme

Les Figures III.4 b-f représentent les formes d'ondes du courant de fuite et de la tension appliquée pour le cas de pollution uniforme avec différentes valeurs de NSDD (0.01, 0.02, 0.03, 0.04 and 0.05 g/cm²), sous une tension appliquée de 10 kV. Le Figure IV.4a représente la forme du courant de fuite pour le cas propre. Nous remarquons que le courant de fuite, dans ce cas, est en avance par rapport à la tension appliquée, ce qui montre un comportement hautement capacitif du modèle de l'isolateur. En plus, chaque alternance de l'onde du courant de fuite prend la forme de « M » déformé. Cette déformation du courant de fuite est due à l'amplification des harmoniques de tension appliquée à cause de l'effet capacitif de l'isolateur dans le cas propre [3]. Plus la quantité de sable augmente (NSDD), plus la forme d'onde du courant de fuite devient moins déformée à cause de la diminution du caractère capacitif du modèle (Figure III.4b et III.4c). En fait, l'augmentation de la quantité de sable engendre l'accroissement de la conductivité volumique et donc de celle superficielle de la pollution humidifiée. Ceci a pour conséquence d'augmenter les porteurs de charges, ce qui facilite le passage du courant de fuite à travers la couche de sable humidifiée. Il y a également une diminution du déphasage entre le courant et la tension, indiquant une augmentation du comportement résistif du modèle (Figure III.4b and III.4c). Il est à noter que pour une NSDD de 0.03 g/cm², le signal du courant de fuite devient pratiquement similaire et en phase avec le signal de la tension appliquée (Figure III.4d and III.4e III.4f). Dans ces cas, le comportement de l'isolateur devient hautement résistif, conduisant à une augmentation importante de l'amplitude du courant de fuite (de quelques dizaines de μ A pour 0.01 g/cm² à quelques mA pour 0.03 g/cm²). Pour une NSDD de 0.03 g/cm², le comportement résistif du modèle est caractérisé par une faible impédance. Cela conduit à une augmentation significative de la valeur du courant de fuite avec l'augmentation de la valeur de NSDD (environ de 4 mA pour une NSDD de 0.03 g/cm² et environ de 8 mA pour une NSDD de 0.05 g/cm²).



(a)



(b)

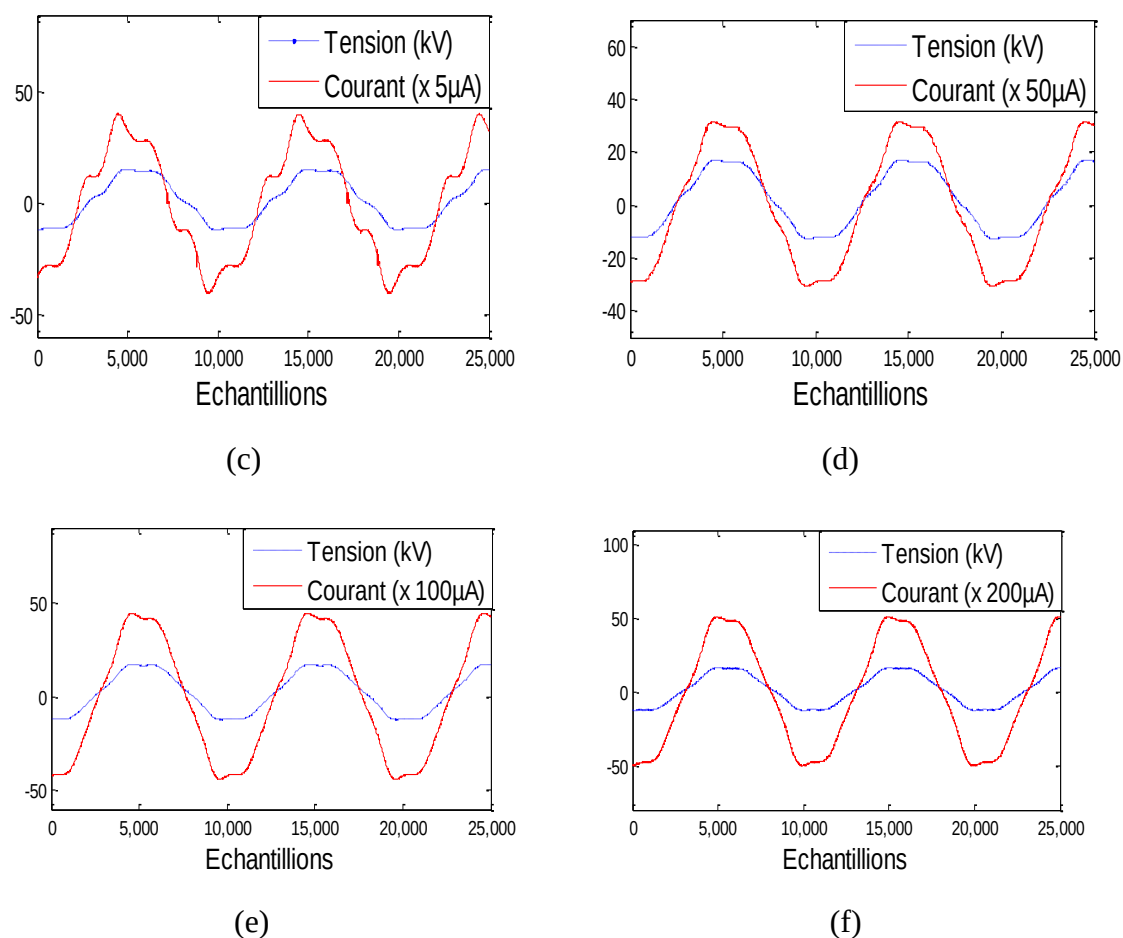


Figure III.4 : Forme d'onde du courant de fuite pour différentes valeurs de NSDD pour une tension appliquée de 10 kV : (a) cas propre, (b) 0.01 g/cm², (c) 0.02 g/cm², (d) 0.03 g/cm², (e) 0.04 g/cm², (f) 0.05 g/cm².

Le Figure III.5 représente les formes d'ondes du courant de fuite pour une tension appliquée de 50 kV pour différentes valeurs de NSDD. A cette tension, la forme d'onde du courant de fuite est accompagnée par des impulsions qui annoncent l'apparition d'arcs sur la surface du modèle pollué. L'intensité de ces impulsions augmente avec l'augmentation de la valeur de NSDD et donc de l'augmentation de la valeur de courant de fuite. L'augmentation de la valeur du courant de fuite accentue la vaporisation de la couche polluée ce qui engendre l'apparition d'autres zones sèches qui vont être à leur tour le siège à de nouveaux arcs électriques [9,10].

Pour une valeur de NSDD de 0.04 g/cm², la forme d'onde du courant de fuite est très déformée et devient non-périodique, et s'accompagne d'intenses impulsions indiquant l'apparition d'arcs partiels sur la surface de l'isolateur.

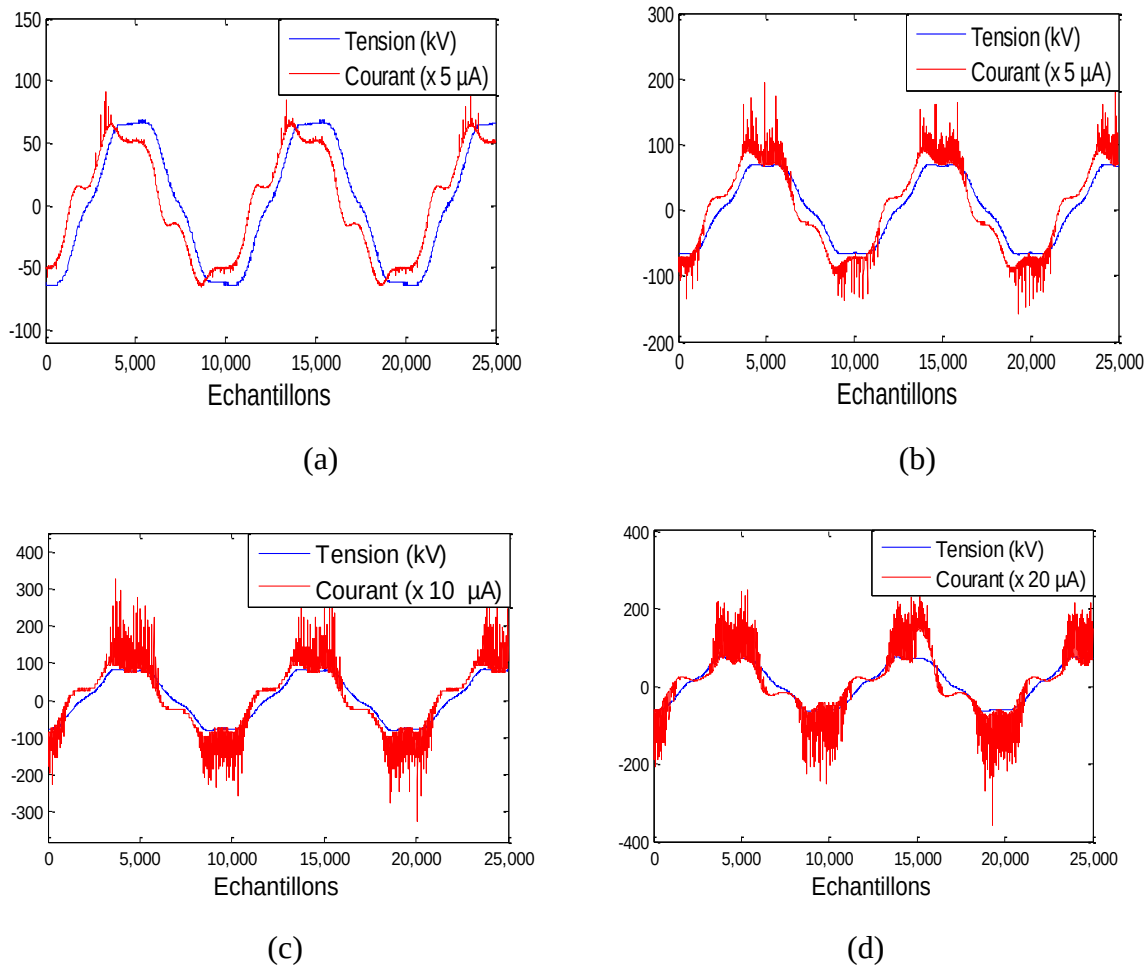


Figure III.5 : Forme d'onde du courant de fuite pour différentes valeurs de NSDD à 50 kV de tension appliquée (a) cas propre, (b) 0.01 g/cm², (c) 0.02 g/cm², (d) 0.04 g/cm².

IV-3-2 Cas de pollution non-uniforme

Comme l'apparition des arcs électriques s'effectue dans les zones sèches, nous avons mesuré le courant de fuite pour quatre configurations différentes de pollution en termes de variation de la position et de la largeur de la zone propre (zone propre côté HT, côté terre et au milieu), pour voir l'influence de la position des arcs électriques sur la forme d'onde du courant de fuite.

Les Figures III.6, 7 et 8 représentent les formes d'ondes du courant de fuite correspondant à différentes largeurs de la couche polluée (5, 10, 15, 20 et 25 cm) et à trois positions de la couche polluée, coté électrode HT (Figure III.6), coté électrode de terre GR (Figure III.7), et au milieu (Figure III.8). La forme d'onde du courant de fuite est très déformée en raison de l'effet capacitif des bandes propres. Cette déformation est suivie par de petites impulsions. Ces impulsions indiquent une activité des décharges partielles sur la surface polluée de l'isolateur.

Le nombre et l'amplitude de ces impulsions augmentent avec l'augmentation de la largeur de la couche polluée, sont très faibles pour les largeurs de la couche polluée de 5, 10 et 15 cm (Figure III.6a-c, Figure III.7a-c, Figure III.8a-c) et plus intenses pour les largeurs des couches polluées de 20 cm et 25 cm (Figure III.6d-e, Figure III.7d-e, Figure III.8d-e), qui

indiquent l'initiation des arcs au niveau des bandes propres. L'apparition de ces arcs est montrée dans les figures de contournement (Figures II.8a et II.9a). L'apparition de ces arcs s'accompagne par d'intenses impulsions sur l'onde du courant de fuite.

En outre, ces impulsions apparaissent sur l'alternance négative du courant de fuite pour le cas de couche polluée située du côté de l'électrode HT (Figure III.6), sur l'alternance positive du courant de fuite pour le cas de la couche polluée située du côté GR (Figure III.7), et sur les deux alternances négative et positive pour le cas de la couche polluée située au milieu (Figure III.8). Ces résultats indiquent la position des décharges sur la surface de l'isolateur.

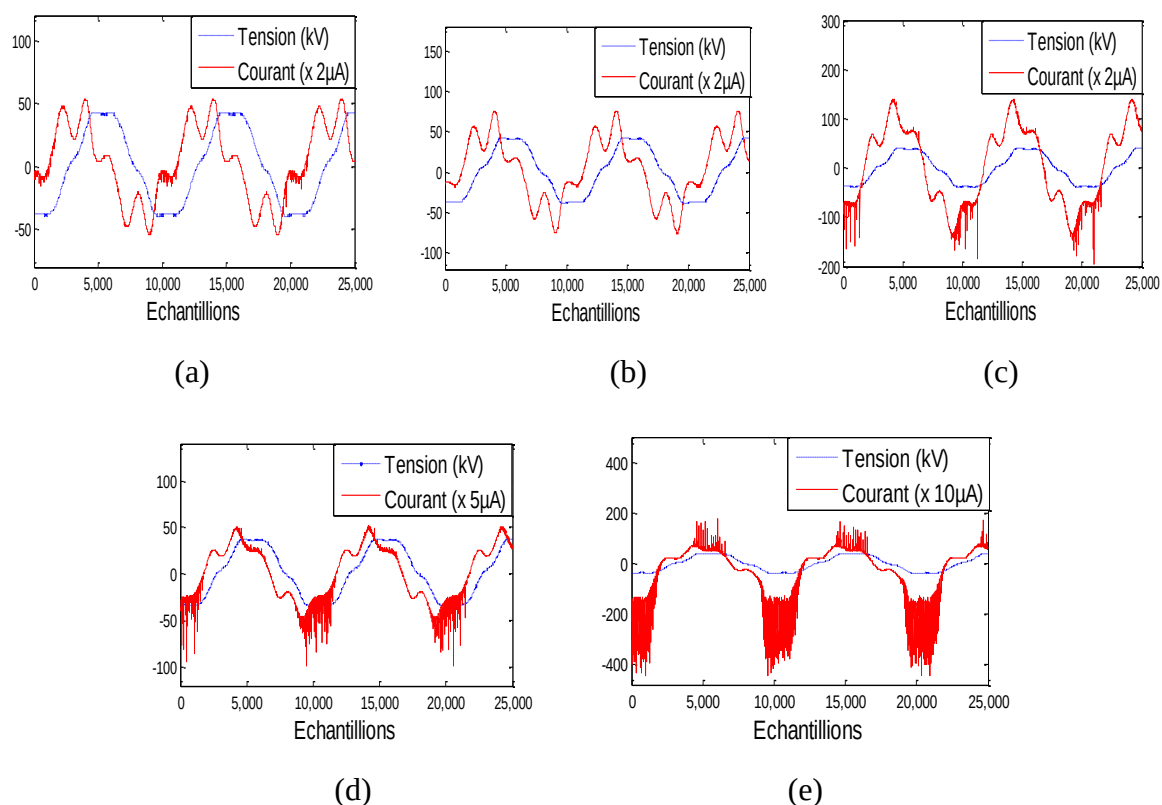
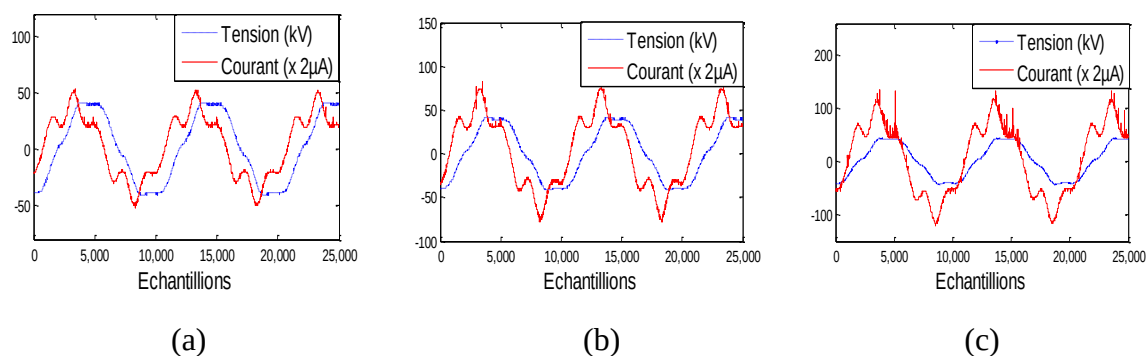


Figure III.6 : Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution du côté HT (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm, à 30 kV.



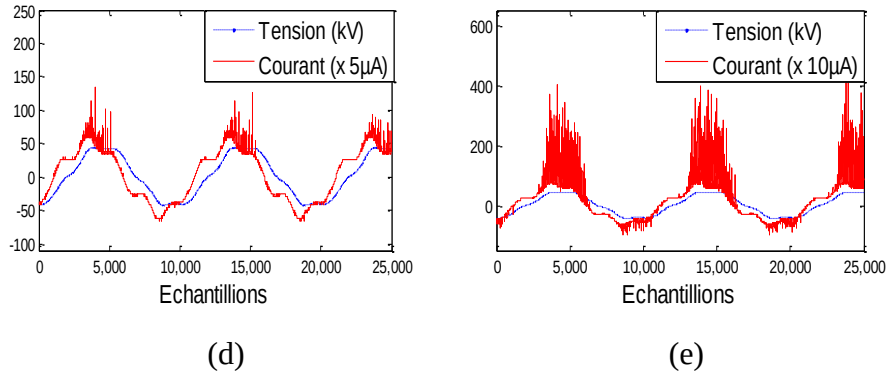


Figure III.7 : Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution du côté terre (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm, à 30 kV.

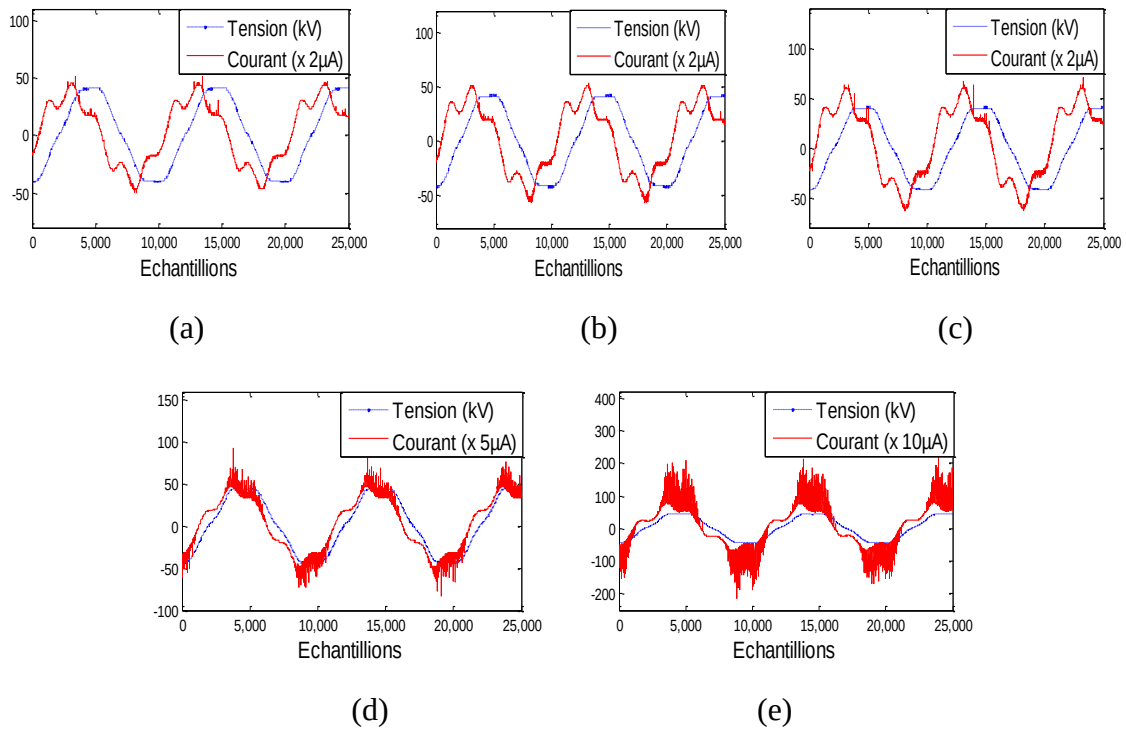


Figure III.8 : Courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée située au milieu (a) couche de 5 cm, (b) couche de 10 cm, (c) couche de 15 cm, (d) couche de 20 cm, (e) couche de 25 cm.

Afin de mieux comprendre l'influence de la position de la bande propre sur l'apparition des impulsions sur l'onde du courant de fuite, on ajoute une autre configuration de pollution où la position de la bande propre est située au milieu. Dans les Figures III.9 du courant de fuite, les formes de l'onde du courant de fuite sont accompagnées par de faibles impulsions. En fixant une la largeur de 25 cm de la couche de pollution, et en considérant les quatre configurations, nous remarquons que le nombre d'impulsions et leur intensité est très important dans les trois premières configurations (côté HT, côté terre et couche de pollution au milieu), tandis que ce nombre devient faible pour le dernier où la bande propre est située au milieu (où la somme des largeurs des deux couches de pollution se trouvant des deux côtés des électrodes est égale à 25 cm). Pour ce dernier cas, ces impulsions sont dues à la formation des zones sèches au niveau des électrodes HT et terre suite à l'effet de l'évaporation de la

couche polluée. Donc l'activité des décharges électriques est plus importante au niveau des électrodes à cause de l'intensité importante du champ électrique.

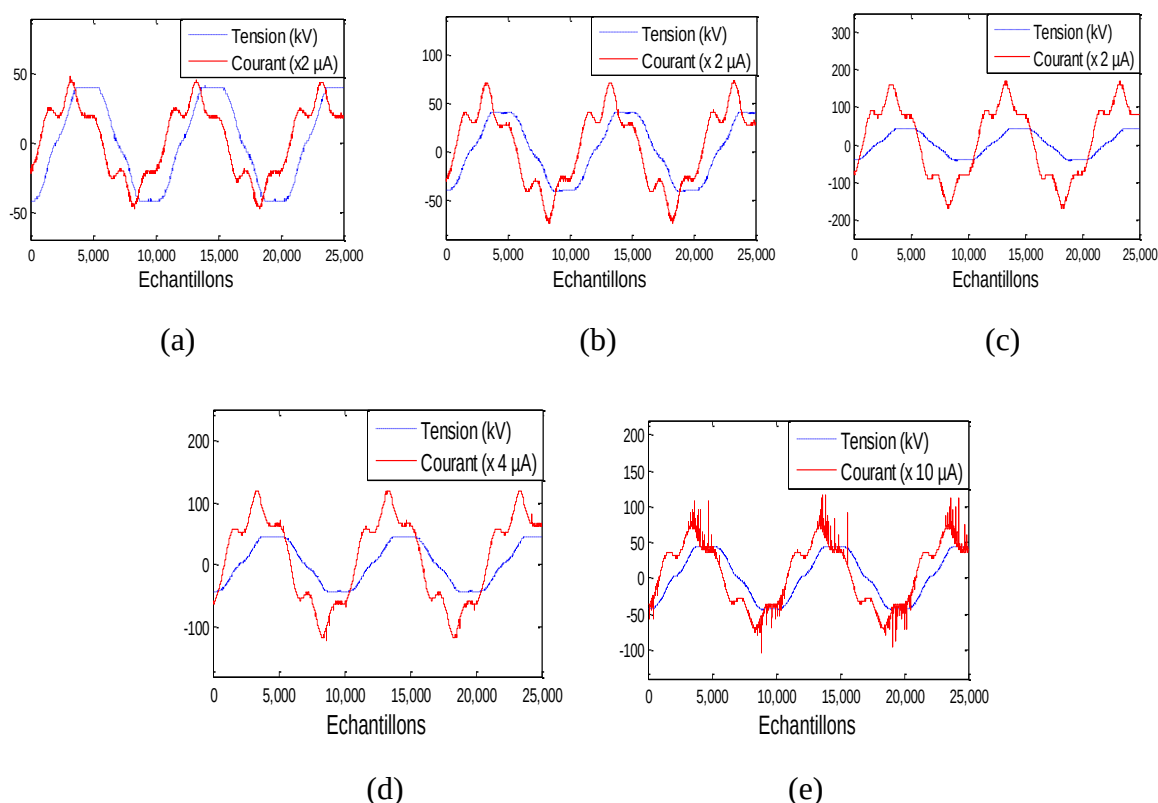


Figure III.9 : Courant de fuite pour différentes largeurs de la bande propre située au milieu (a) couche de 5 cm, (b) couche de 10 cm, (c) couche de 15 cm, (d) couche de 20 cm, (e) couche de 25 cm.

III-4 Analyse fréquentielle du courant de fuite :

La détection et la classification des formes d'onde des systèmes de puissance sont des sujets importants dans l'étude de la qualité d'énergie et de la compréhension d'un point de vue physique et mathématique des propriétés spectrales d'un signal changeant avec le temps. Les formes d'onde générées dans diverses conditions de fonctionnement sont caractérisées par leurs caractéristiques temps-fréquence. La localisation et l'identification de ces caractéristiques aux échelles de temps et de fréquence sont donc très importantes [45].

La répartition de l'énergie du signal dans le domaine fréquentiel a fait de la décomposition du signal un problème important. Le concept de base consiste à diviser le spectre du signal en ses sous-spectres ou sous-bandes fréquentielles, puis à traiter ces sous-spectres séparément dans le but recherché, du point de vue de leur contenu énergétique, que méritent une priorité élevée pour un traitement ultérieur. Par exemple, pour un signal qui varie lentement, il aura principalement des composantes de basse fréquence qui contiennent la plus grande partie de l'énergie totale du signal, et pour les signaux variant rapidement les composantes hautes fréquences contiennent la plus grande partie de l'énergie [45].

La décomposition du spectre du signal en sous-bandes fournit la base mathématique de deux caractéristiques importantes et souhaitables dans le traitement du signal, la surveillance

de l'énergie des composantes fréquentielles et la décomposition multi-résolution du signal [12]. Un grand nombre des techniques d'analyse de signal a été proposé et appliqué sur le signal du courant de fuite et plusieurs paramètres et informations ont été extraits. Ces techniques nous permettent d'obtenir principalement les grandeurs électriques de base, le courant et la tension appliquée, avec la valeur maximale, la valeur efficace, le déphasage. Ces données vont nous permettre d'obtenir des informations standard sur le comportement de l'isolateur. La décomposition du signal du courant de fuite en différentes composantes peut aussi donner des informations supplémentaires sur l'état surfacique de l'isolateur telles que, le suivi de la sévérité de pollution, et la détection de la présence d'activité de décharges électriques sur la surface de l'isolateur.

Trois méthodes de traitement de signal ont été utilisées, la transformation de Fourier, la transformation d'ondelette et la Récurrence plot. Ces méthodes sont appliquées sur le signal du courant de fuite pour les différentes configurations de pollution étudiées.

III-4-1 Transformation de Fourier

La transformée de Fourier est l'outil mathématique standard pour le traitement de signal. Elle permet d'extraire le spectre fréquentiel en termes de la superposition d'un nombre infini d'ondes sinusoïdales. Chaque composante fréquentielle est caractérisée par une amplitude et une phase.

La transformation de Fourier est donnée par l'équation :

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad (\text{III. 1})$$

Où $x(n)$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, est le signal dans le domaine temporel et $X(k)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, la représentation du signal $x(n)$ dans le domaine fréquentiel, N est le nombre d'échantillons du signal.

Dans cette section, nous nous basons sur le spectre harmonique du courant de fuite, pour caractériser le comportement électrique de l'isolateur. Nous nous intéresserons aux amplitudes de la composante fondamentale et celles des composantes harmoniques (particulièrement la troisième le cinquième et le septième), pour caractériser l'état surfacique de l'isolateur, tel que le comportement capacitif, le comportement résistif et la présence des décharges électriques sur la surface de l'isolateur.

III-4-1-1 Cas de pollution uniforme

Les Figures 10a-f montrent le spectre fréquentiel du courant de fuite pour différentes valeurs de NSDD. Les figures montrent que le spectre fréquentiel révèle l'existence des composantes harmoniques impaires 5^{ème} (250 Hz), 7^{ème} (350 Hz), y compris la composante fondamentale.

L'amplitude du cinquième harmonique est plus importante que celle du septième harmonique. Pour le cas propre et le cas des faibles NSDD de 0.01 et 0.02 g/cm², l'amplitude du cinquième harmonique est plus significative (Figure 10a 10b 10c), tel que le rapport entre leur amplitude et l'amplitude de la composante fondamentale représente environ 1/4 à 1/5. L'importance significative du cinquième harmonique nous permet de l'utiliser comme Indicateur du comportement capacitif de l'isolateur. Avec l'augmentation des NSDD de 0.03 à 0.05 g/cm², le comportement résistif de l'isolateur augmente aussi, et l'onde du courant de

fuite devient similaire à celle de la tension appliquée. Dans ces cas, juste la composante fondamentale est dominante (Figure 10d, 10e and 10f), le rapport entre le cinquième harmonique et le fondamental est très faible (1/25).

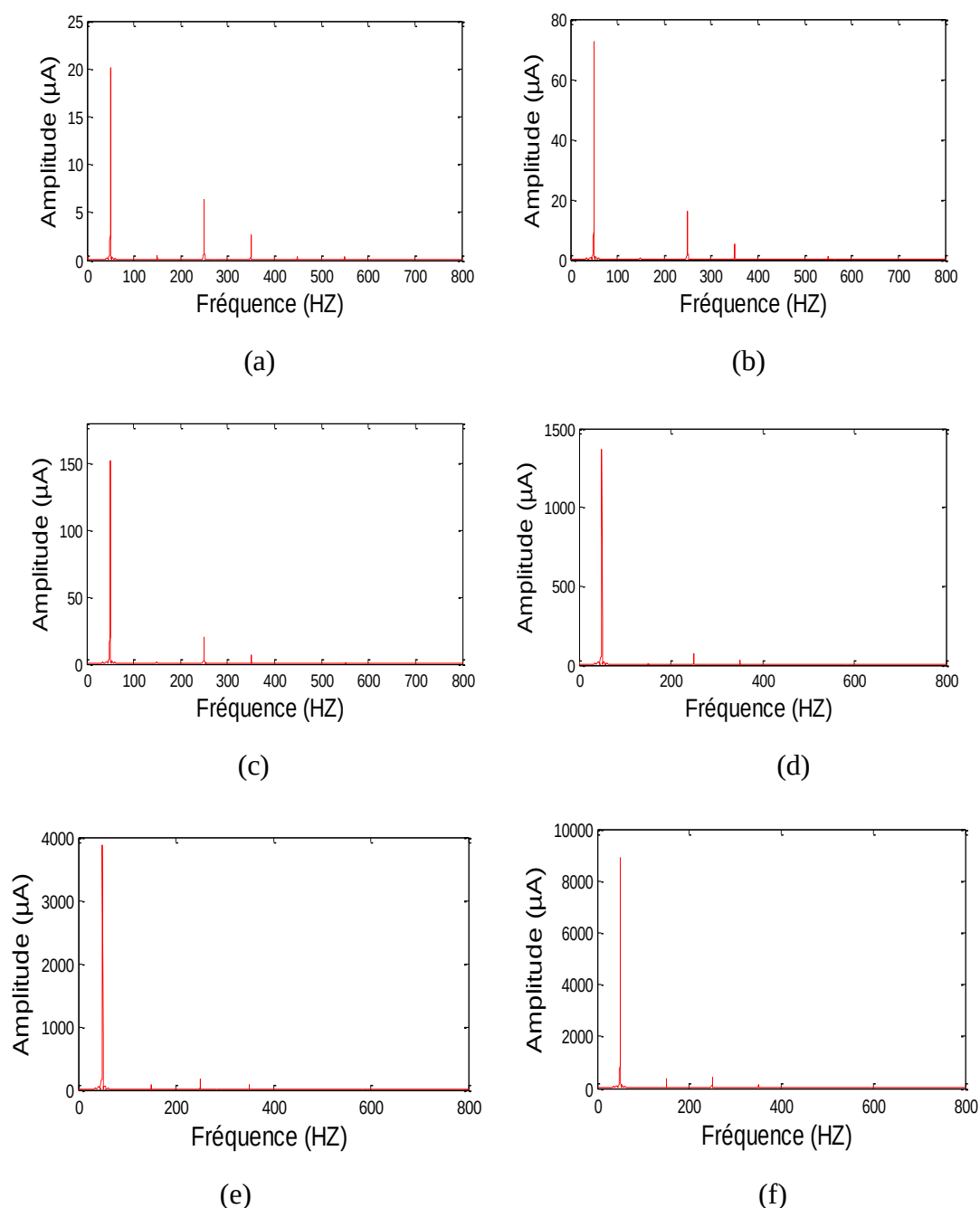


Figure III.10 : Spectre fréquentiel du courant de fuite pour différentes valeurs des NSDD (a) 0 g/cm^2 , (b) 0.01 g/cm^2 , (c) 0.02 g/cm^2 , (d) 0.03 g/cm^2 , (e) 0.04 g/cm^2 , (f) 0.05 g/cm^2 .

La Figure III.11 représente le contenu fréquentiel du courant de fuite pour différentes valeurs des NSDD, sous une tension appliquée de 50kV. A partir de cette tension, les arcs commencent à apparaître sur la surface de l'isolateur. Le spectre fréquentiel montre la présence des harmoniques impaires et de la composante fondamentale. Nous observons une augmentation d'amplitude du troisième harmonique par rapport aux autres (cinquième et septième harmoniques) avec l'augmentation de la valeur des NSDD. Cette importante

augmentation de cet harmonique est due à l'apparition de décharges partielles sur la surface de l'isolateur. Ce résultat où l'apparition d'arcs électriques s'accompagne par une augmentation importante de l'amplitude du troisième harmonique a été trouvé aussi par plusieurs autres chercheurs [11, 13, et 51]. L'amplitude du troisième harmonique est donc très importante et très significative pour le cas des NSDD élevées telles que pour la valeur de 0.04 g/cm^2 dans notre cas.

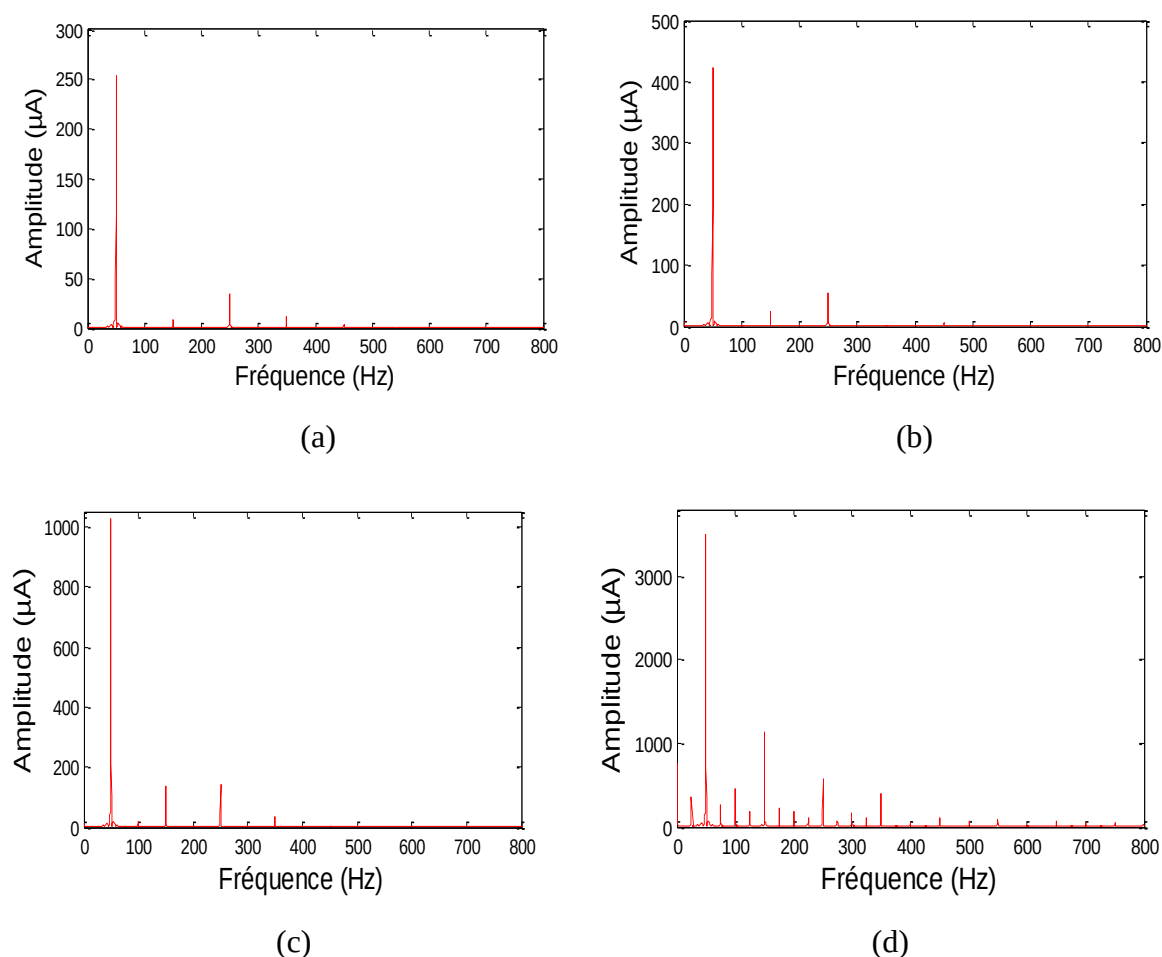


Figure III.11 : Spectre fréquentiel du courant de fuite pour différentes valeurs des NSDD (a) 0.01 g/cm^2 , (b) 0.02 g/cm^2 , (c) 0.03 g/cm^2 , (d) 0.04 g/cm^2 pour une tension appliquée de 50 kV.

III-4-1-2 Cas de pollution non-uniforme

Les Figures III.12, III.13, et III.14 représentent le spectre fréquentiel du courant de fuite pour différentes positions et largeurs de la couche polluée. Les figures montrent que le spectre fréquentiel révèle l'existence des composantes harmoniques impaires 3^{ème} (150 Hz), 5^{ème} (250 Hz) et 7^{ème} (350 Hz), avec la présence aussi de la 2^{ème} composante (100 Hz), en plus de la composante fondamentale.

Pour les cas des couches de pollution situées du côté HT et côté terre (GR), nous remarquons la présence de deux harmoniques, le cinquième et le septième harmonique pour les largeurs de la couche polluée de 5, 10, 15, et 20 cm, et dont l'amplitude de ces harmoniques augmente avec l'augmentation de la largeur de la couche polluée. Pour le cas où la couche de pollution

est située au milieu de l'isolateur, le spectre fréquentiel contient juste le cinquième harmonique qui augmente aussi avec l'augmentation de la largeur de la couche polluée. Pour la couche de pollution de 25 cm de largeur, il y a apparition d'autres composantes harmoniques dans le spectre fréquentiel tel que le deuxième harmonique (Figure III.12e, Figure III.13e). Notons que le cas de la couche de pollution de 25 cm est caractérisé par une apparition intense de décharges électriques. En effet, nous remarquons l'apparition d'arcs sur la surface de la bande propre pour une tension appliquée proche de 30kV comme montré dans les figures du processus du contournement Figure II.4a, II.5a et III.6a. Pour la couche de pollution située du côté HT et du côté terre, le spectre fréquentiel montre l'apparition des 2^{ème} (100 Hz) et 3^{ème} (150 Hz) harmoniques caractérisés par une importante amplitude (Figure III.12e et III.13e). Tandis que pour le cas de la couche de pollution située au milieu de l'isolant, le spectre fréquentiel montre l'apparition du troisième harmonique avec une importante amplitude (Figure III.14e). Dans différents travaux de recherches effectués dans ce domaine, le troisième harmonique est considéré comme un indicateur de la présence d'intenses décharges électriques sur la surface isolante [12,13].

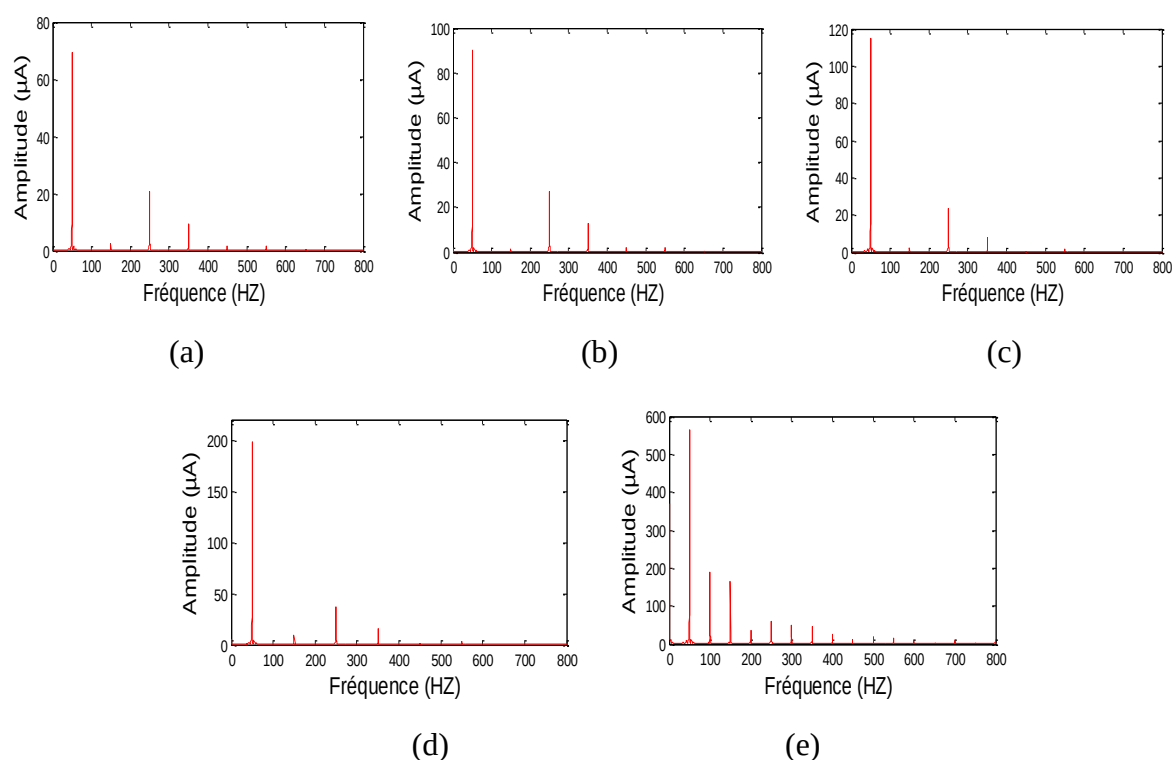


Figure III.12 : Spectre fréquentiel du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluante située du côté HT (a) couche de 5 cm (b) couche de 10 cm, (c) couche de 15 cm, (d) couche de 20 cm, (e) couche de 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.

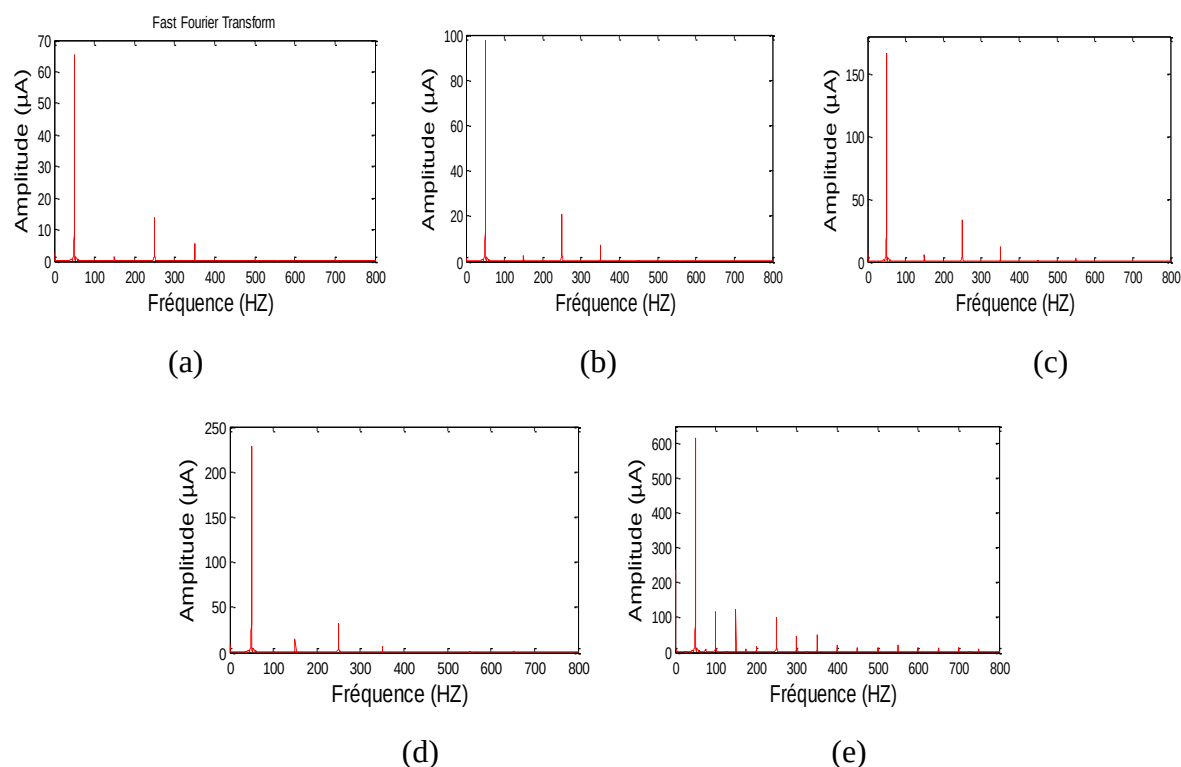


Figure III. 13 : Spectre fréquentiel du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluante située du coté terre (a) couche de 5 cm (b) couche de 10 cm, (c) couche de 15 cm, (d) couche de 20 cm, (e) couche de 25 cm, pour une tesnion appliqué de 30 kV.

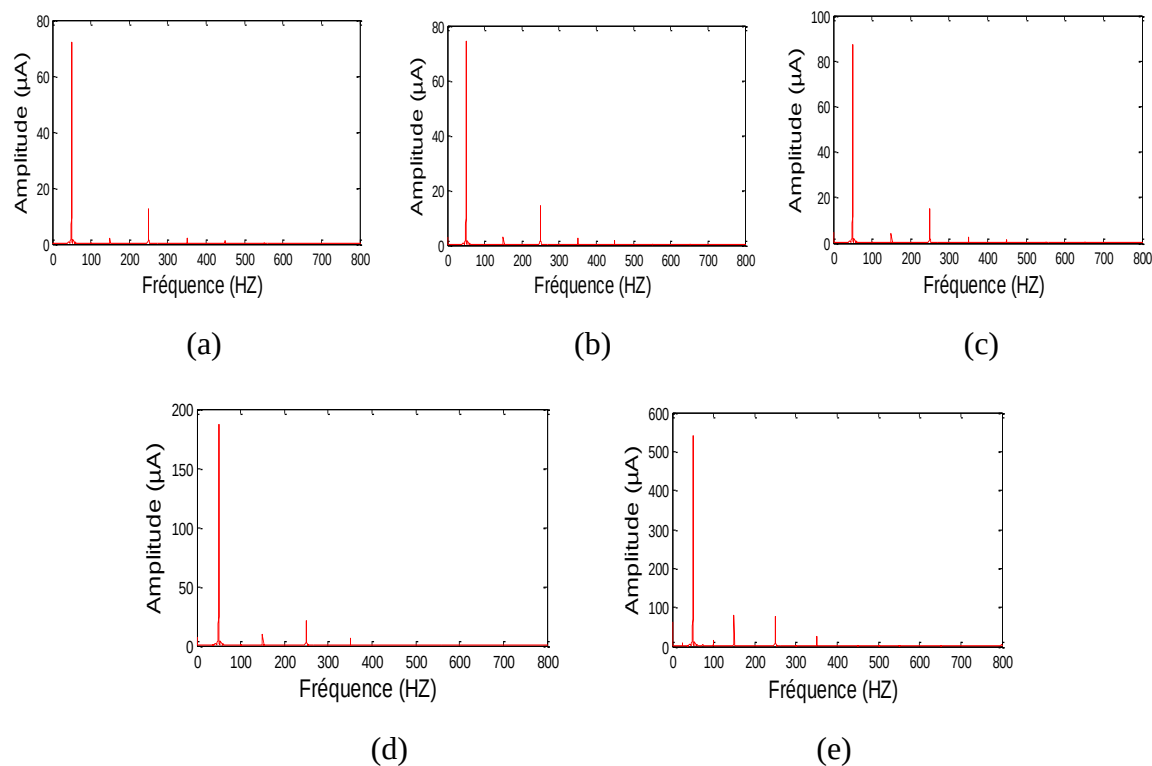


Figure III.14: Spectre fréquentiel du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluante située au milieu (a) couche de 5 cm (b) couche de 10 cm, (c) couche de 15 cm, (d) couche de 20 cm, (e) couche de 25 cm, pour une tesnion appliqué de 30 kV.

III-4-2 Transformation d'ondelettes :

La plupart des signaux ne sont pas stationnaires dans l'évolution de leurs caractéristiques (statistiques, fréquentielles, temporelles, spatiales) où réside l'essentiel de l'information qu'ils contiennent. Les signaux vocaux et les images sont à ce titre exemplaire. L'analyse de Fourier propose une approche globale du signal, et toute notion de localisation temporelle (ou spatiale pour des images) disparaît dans l'espace de Fourier [45]. La transformée en ondelettes permet une résolution bidimensionnelle appelée plan temps-fréquence.

L'analyse par la technique des ondelettes fournit de meilleurs résultats pour le traitement local qui a pour objectif de détecter les points de discontinuités ou les zones déformées du signal, composantes produites par des phénomènes transitoires, variables dans le temps et non stationnaires, qui sont souvent de hautes fréquences [46].

III-4-2-1 La localisation temps-fréquence

La transformation de Fourier est l'outil standard qui donne la représentation fréquentielle d'un signal donné, mais l'absence totale de l'information concernant la localisation temporelle (par exemple des éclats à haute fréquence ne peuvent pas être lus au loin facilement par la transformation du Fourier). La localisation-temporelle peut être réalisée par le premier fenêtrage du signal f (fenêtrage de Fourier). Le principe de la fenêtre de Fourier est de découper le signal en des tranches bien localisées par une fenêtre de largeur fixe (la fenêtre est translate sur le signal), et puis de prendre sa transformée de Fourier [47]. La transformation de fenêtre de Fourier est donnée par l'équation suivante en termes de la translation de la fonction analysante (fenêtre) :

$$TF(f(w, t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int f(s) ds g(s - t) e^{-jws} \quad (III.2)$$

La fenêtre de Fourier représente la technique standard pour la résolution temps-fréquence d'un signal. La transformation discrète est la plus utilisée dans le domaine du traitement de signal.

$$TF_{m,n}^w(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int f(s) ds g(s - nt_0) e^{-jmw_0s} \quad (III.3)$$

Avec $t=nt_0$, $w=n w_0$, g est la fenêtre analysante, $TF_{m,n}^w(f)$ représente les coefficients de Fourier de $f(s) g(s-nt_0)$, s est la largeur de la fenêtre.

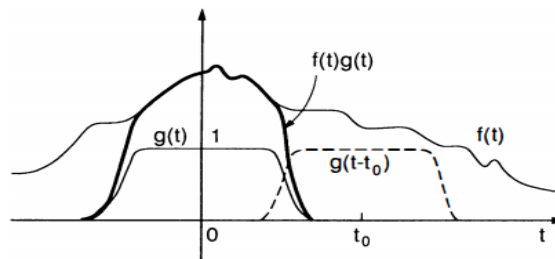


Figure III.15 fenêtrage de la transformation de Fourier

Comme la transformation de fenêtrage de Fourier, la transformation en ondelettes peut mesurer les variations temps-fréquence des composants spectraux, avec quelques différences importantes dans la résolution temps-fréquence [45]:

- La première différence entre l'ondelette (l'ondelette analysante caractérise la transformation d'ondelette) et la fenêtre de Fourier est dans les crêtes des fonctions analysantes (figure III.16).
- Les fonctions $g^{w,t}$ est Indépendante de la fréquence (w) (la fenêtre de Fourier est constante), $g^{w,t}$ de haute fréquence et de basse fréquence ont la même largeur.
- $\psi^{a,b}$ ont les temps-fréquence adaptés à leur fréquence, $\psi^{a,b}$ de hautes fréquences sont très étroites, tandis que $\psi^{a,b}$ de basses fréquences sont très larges.
- Pour le fenêtrage de Fourier, il y a seulement la translation de la fonction analysante, et pour la transformation d'ondelette est exprimée en termes de dilatations et de translations de la fonction analysante (ondelette).

La transformation d'ondelette continue est donnée par l'équation :

$$TW(f) = |a|^{-1/2} \int f(t) dt \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.4})$$

Ψ est appelée ondelette mère, a une moyenne nulle et possède un certain degré de régularité et dont le support est fini [13]. L'ondelette mère ψ génère une famille d'ondelettes dilatées et translatées et est donnée par :

$$\psi_t^{a,b} = \psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (\text{III.5})$$

Le facteur d'échelle 'a' (s dans le figure 17) détermine l'amplitude et la durée de l'ondelette dilatée pour s'assurer que chacune d'elles a la même énergie, et le facteur de décalage 'b' correspond à une translation d'ondelette mise à l'échelle dans le domaine temporel (Figure III.17).

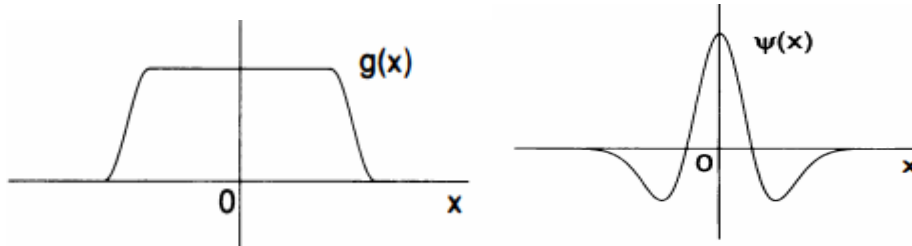


Figure III.16 : (a) fenêtre de Fourier (b) ondelette mère

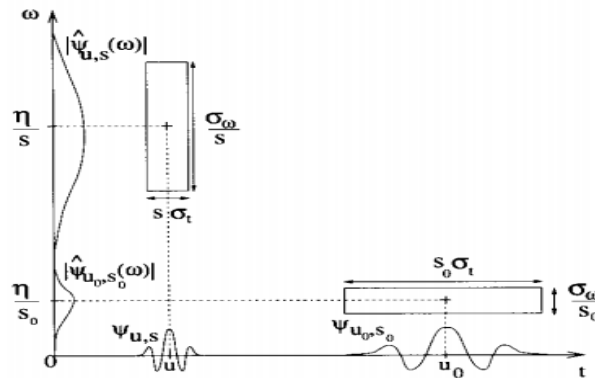


Figure III.17 : Rectangle temps-fréquence de deux ondelettes,

III-4-2-2 Transformation d'ondelette discrète :

Pour le cas discrète le signal et les paramètres de dilatation a et de translation b ne prend que des valeurs discrètes. Pour a le paramètre de dilatation est donné par $a = a_0^m$, $a_0 > 1$, tel que m peut prendre des valeurs entières positives et négatives. Les différentes valeurs de m correspondent aux différentes largeurs de l'ondelette.

Le paramètre b de translation dépend de la valeur de m : pour les ondelettes étroites (hautes fréquences) sont translatées par faibles pas afin de couvrir la gamme du temps, tandis que pour les ondelettes larges (basses fréquences), l'ondelette est translatée par larges pas. Lorsque la largeur est proportionnelle à a_0^m le meilleur choix pour discrétiser la valeur de b est $b = nb_0 a_0^m$.

La transformation en ondelettes discrète est donnée comme suit :

$$DWT(f) = \langle f, \Psi_{n,m} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n f(n) \Psi\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (\text{III.6})$$

Ψ , est l'ondelette mère, m et n indiquent la localisation de fréquence et la localisation temporelle, a_0^m et $nb_0 a_0^m$ sont les paramètres de dilatation et de translation. $DWT(f)$ représentent les coefficients d'ondelettes.

III-4-2-3 Analyse multi-résolution

La transformée en ondelettes discrète (DWT) peut être obtenue en utilisant la décomposition multi-résolution (MRA) du signal. Pour quelques choix très spéciaux de Ψ , a_0 et de b_0 , $\Psi_{n,m}$ constituent une base orthogonale dans $L(R^2)$. En particulier, si nous choisissons les valeurs de $a_0=2$, et $b_0=1$. Dans ce cas les ondelettes (Ψ) sont caractérisés par une bonne propriété de localisation de temps-fréquence, tels que :

$$\Psi_{n,m}(x) = 2^{-m/2} \Psi_{n,m}(2^{-m} x - 2) \quad (\text{III.7})$$

Tel que $\Psi_{n,m} = [2^m n, 2^m(n+1)]$. Dans ces conditions, on peut montrer que la fonction Ψ par dilatations et translations engendre une base orthonormée $\Psi_{n,m}$ dans $L(R^2)$.

Un espace d'approximation $V_j(g_j[n])$ multi-résolution se décompose en un espace de résolution plus basse (approximation) $V_{j+1}(g_{j+1}[n])$ et un espace de détails $W_{j+1}(h_{j+1}[n])$. Alors que la décomposition en ondelettes se contente de décomposer les espaces d'approximations et garde intacts les espaces de détails. La décomposition en paquets d'ondelettes opère encore sur les espaces de détails pour en déduire de nouvelles bases.

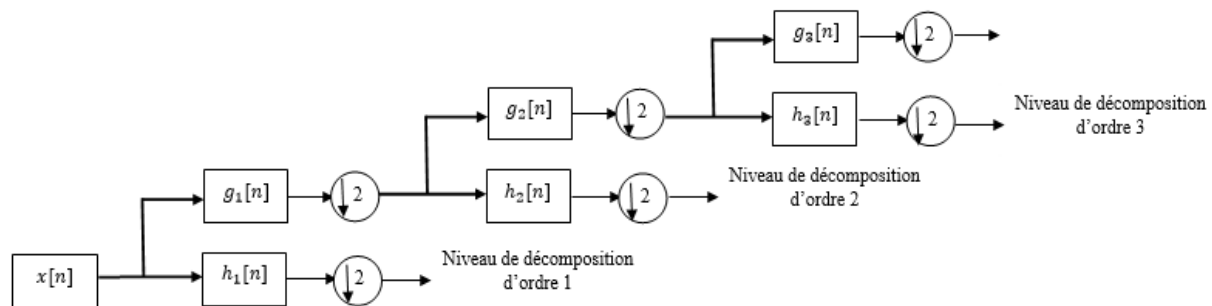


Figure IV.18 : Diagramme de décomposition multi-résolution

Dans MRA, le signal du domaine temporel est passé par une série de filtres passe-haut (HPF) et passe-bas (LPF). Le filtre passe-bas qui donne des composantes basses fréquences s'appelle approximation et le filtre passe-haut donne des composantes hautes fréquences et qui sont les détails. L'approximation engendrée par la première décomposition est soumise à une deuxième décomposition par double filtres, ce processus est répété jusqu'à ce que la résolution souhaitée soit atteinte [48].

Le niveau de décomposition du signal dépend de la fréquence d'échantillonnage du signal (f_s) et du choix de l'ondelette mère. Dans notre travail, nous avons utilisé l'ondelette Daubechies4 caractérisée par une bonne résolution fréquentielle et est plus adaptée aux phénomènes transitoires tels que les impulsions des décharges électriques sur le courant de fuite. Pour la décomposition du signal LC, les bandes de fréquences sont données dans le tableau 2.

Tableau 2 : Bandes fréquentielles des détails de la décomposition du courant de fuite par la DWT.

Détails (D_i) de la décomposition par la DWT	Bandes fréquentielles (kHz)
D_1	250-125
D_2	125-62,5
D_3	62,5-31,25
D_4	31,25-15,62
D_5	15,62-7,812
D_6	7,812-3,906
D_7	3,906-1,953
D_8	1,95-0,97
D_9	0,976-0,488
D_{10}	0,488-0,244
D_{11}	0,244-0,122

III-4-2-3 Calcul sur les composantes fréquentielles :

La répartition de l'énergie du signal dans le domaine fréquentiel a fait de la décomposition du signal un problème important. Cette simplification n'est pas seulement liée à la simplicité mathématique, mais également à la réalisation très réelle et pratique que l'hypothèse stationnaire et raisonnable sur un court segment d'un signal d'une seule dimension ou sur un petit bloc dans un réseau de deux dimensions. Différentes valeurs peuvent être calculées pour chaque composante fréquentielle d'un signal donné, tel que la valeur moyenne, la valeur maximale, et l'écart type (déviations standard). Ces valeurs nous aident à trouver la composante la plus significative pour décrire l'évolution d'un système physique.

Dans cette section, nous calculons pour chaque détail D_i la déviation standard (STD) afin de trouver les composants les plus significatifs surveillant le niveau de pollution en termes de NSDD, la largeur de la couche polluée et l'intensité des décharges électriques.

La déviation standard (STD) montre la dispersion des valeurs du détail du courant de fuite de sa valeur moyenne, et qui peut être définie comme la distribution d'énergie de la distorsion du signal [11]. La STD pour les différents détails est calculé par :

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{j=N_i} (D_i(j) - \mu_i)^2} \quad (III.8)$$

III-4-2-1 Application sur les signaux du courant de fuite pour le cas d'une pollution uniforme :

Pour le cas d'une pollution uniforme, le courant de fuite est décomposé en onze composantes fréquentielles (détails). Chaque composante est caractérisée par une bande fréquentielle différente (des composantes hautes fréquences et des composantes basses fréquences). La déviation standard et la valeur moyenne sont calculées pour chaque composante et pour différentes valeurs de NSDD.

La Figure IV.19 montre la variation de la STD en fonction du niveau de décomposition, pour toutes les valeurs NSDD et pour deux tensions appliquées, à savoir 10 kV (figure IV.19a) et 30 kV (figure IV.19b). Nous remarquons sur ces figures que la STD des détails D9 (976-488 Hz), D10 (488 - 244 Hz) et D11 (244 - 122 Hz) sont les seuls détails significatifs, ils augmentent avec l'augmentation de NSDD. Cette augmentation est plus significative pour le détail D11. Le détail D10 peut contenir le cinquième harmonique (250 Hz) et le septième harmonique (350 Hz) et le détail D11 (244 - 122 Hz) peut contenir le troisième harmonique (150 Hz) et le cinquième harmonique (250 Hz). Les 3^{ème}, 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques représentent les composants les plus significatifs dans la forme d'onde du courant de fuite, comme le montre la Figure 10 obtenue dans le cas d'une pollution uniforme.

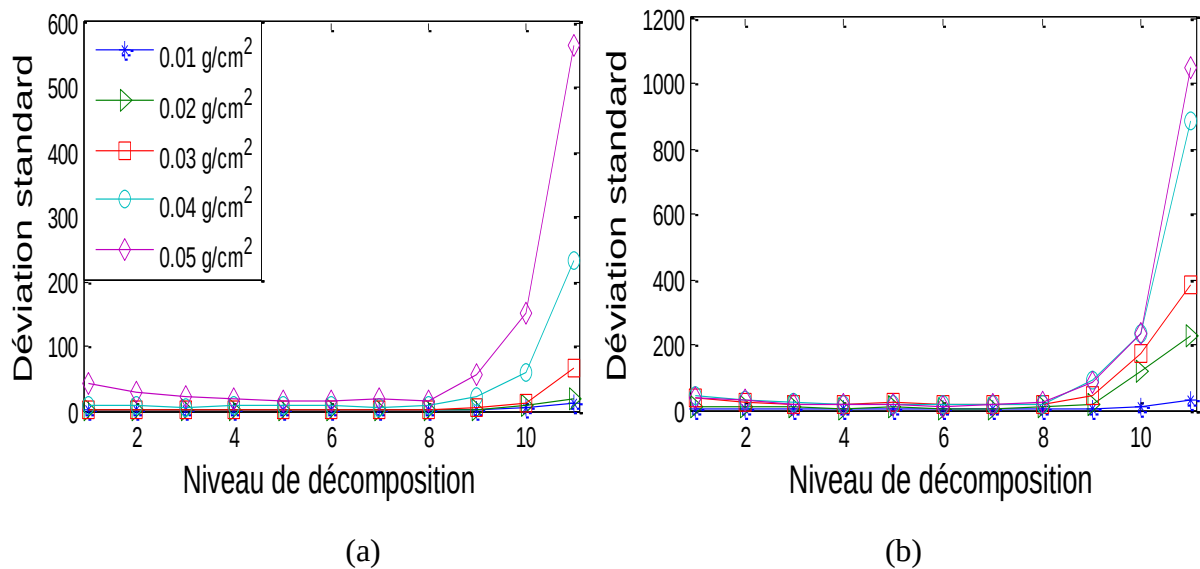


Figure III.19 : Déviation Standard en fonction du niveau de décomposition pour différentes valeurs de NSDD (a) 10 kV, (b) 30 kV.

Dans la figure III.20, nous présentons la variation temporelle du détail D11, qui peut être la composante fréquentielle la plus efficace pour suivre le niveau de la pollution pour le cas uniforme. On remarque bien que les détails n'est pas stationnaire en termes de l'amplitude en fonction du nombre d'échantillons. Avec l'augmentation de la valeur de NSDD nous

obtenons l'augmentation de l'amplitude des détails et la déformation des signaux s'accroît aussi. L'amplitude de ces composantes ne dépasse pas $40 \mu\text{A}$ pour $0,01 \text{ g/cm}^2$. Cependant, il est d'environ 1.5 mA pour $0,05 \text{ g/cm}^2$. En outre, le spectre fréquentiel du détail D11 (figure III.21) montre la présence du cinquième harmonique et l'absence du troisième pour le cas uniforme. Pour les faibles valeurs de NSDD (0.01 g/cm^2 et 0.02 g/cm^2) le détail D11 représente comme la variation temporelle de cinquième harmonique (figure III.21a et III.21b). Pour les valeurs importantes de NSDD (0.03 , 0.04 et 0.05 g/cm^2), le spectre fréquentiel du détail D11 montre la présence d'un harmonique d'ordre pair (200 Hz) à côté du cinquième harmonique (figure III.21c, III.21d et III.21e).

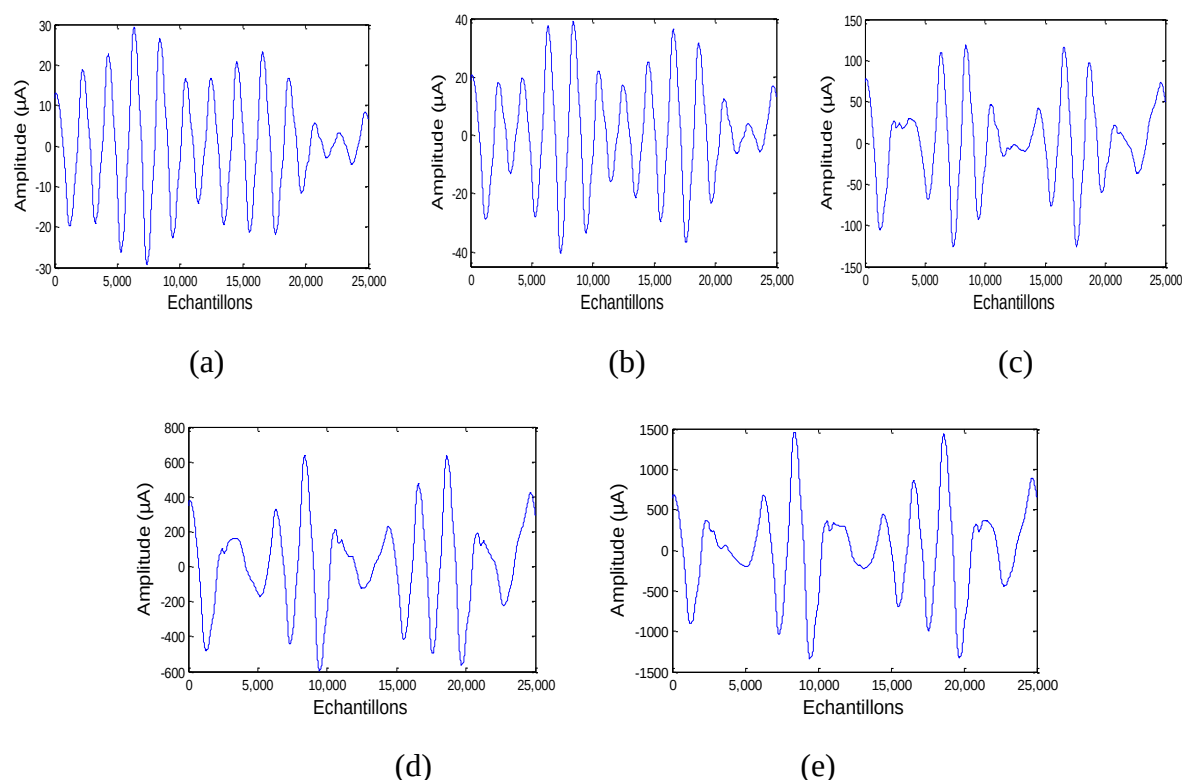
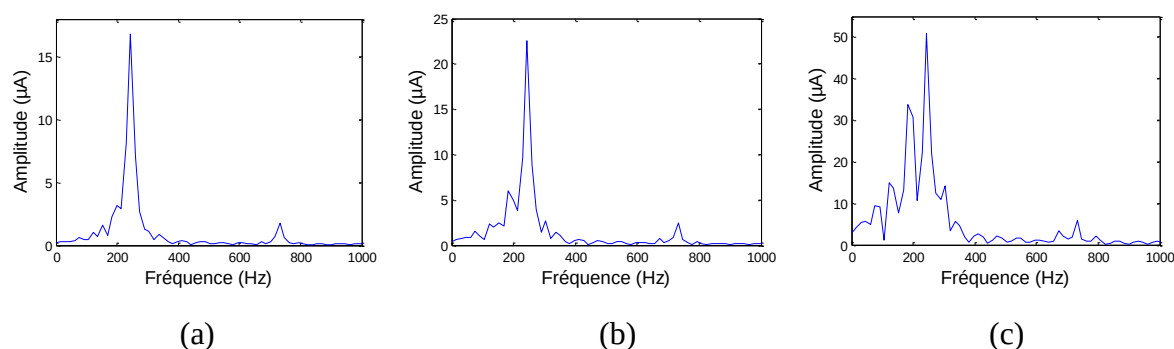


Figure III.20 : Caractéristique temporelle du détail D11 pour différentes valeurs de NSDD (a) 0.01 g/cm^2 , (b) 0.02 g/cm^2 , (c) 0.03 g/cm^2 , (d) 0.04 g/cm^2 , (e) 0.05 g/cm^2 .



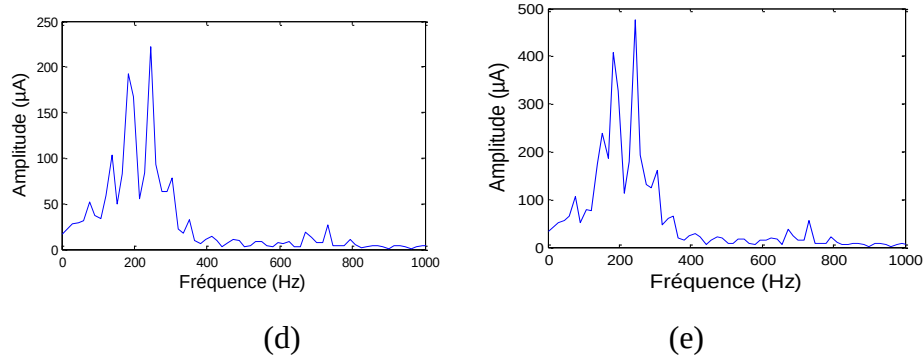


Figure III.21 : Spectre fréquentiel du détail D11 pour différentes valeurs de NSDD (a) 0.01 g/cm², (b) 0.02 g/cm², (c) 0.03 g/cm², (d) 0.04 g/cm², (e) 0.05 g/cm².

Pour le cas de la tension appliquée de 50 kV, à côté de l'augmentation de la STD des détails basse fréquence (D11, D10) avec l'augmentation de la valeur de NSDD, il y a aussi une augmentation de la STD des détails hautes fréquences avec la valeur de NSDD. Les détails hautes fréquences sont efficaces pour fournir les informations sur l'activité des décharges électriques sur les signaux du courant de fuite et pourraient représenter un bon indicateur pour détecter l'activité des décharges électriques sur la surface de l'isolateur.

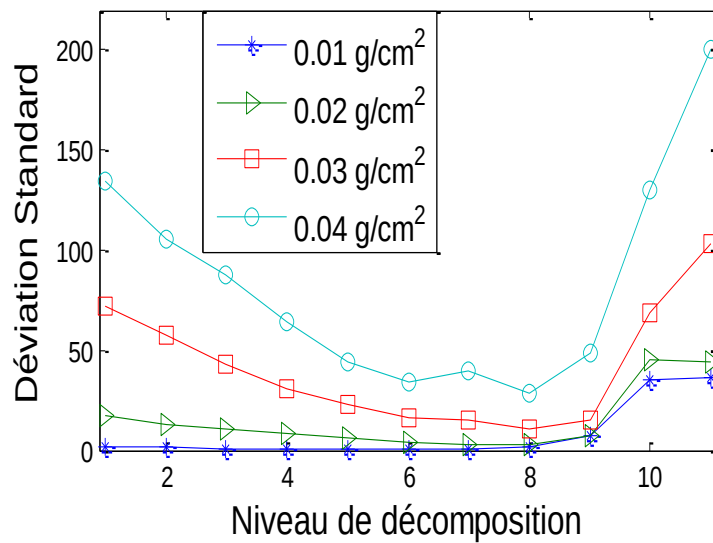


Figure III.22 : Déviation Standard en fonction du niveau de décomposition pour différentes valeurs de NSDD et pour une tension appliquée de 50 kV.

Pour le cas où la tension appliquée est de 50 kV, on voit bien sur le contenu fréquentiel du détail D11 la présence de l'harmonique trois (figure III.24), qui est absent pour les tensions plus faibles de 10 et 30 kV, ces tensions sont caractérisées par l'absence totale des arcs sur la surface de l'isolateur. L'amplitude de cet harmonique augmente avec l'augmentation de la valeur de NSDD. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par FFT, où il y a une apparition du troisième harmonique sur le spectre du courant de fuite pour les cas de présence des arcs sur la surface de l'isolateur.

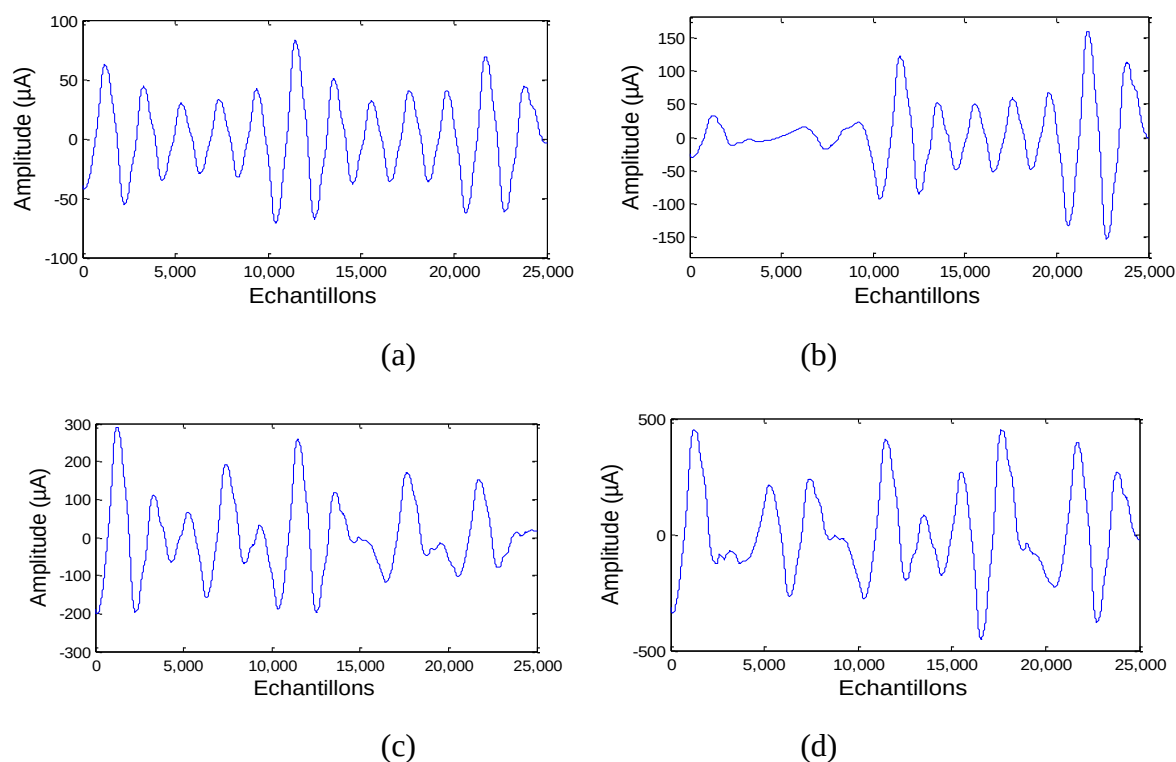


Figure III.23 : Caractéristique temporelle du détail D11 pour différentes valeurs de NSDD (a) 0.01 g/cm², (b) 0.02 g/cm², (c) 0.03 g/cm², (d) 0.04 g/cm², pour une tension appliquée de 50kV.

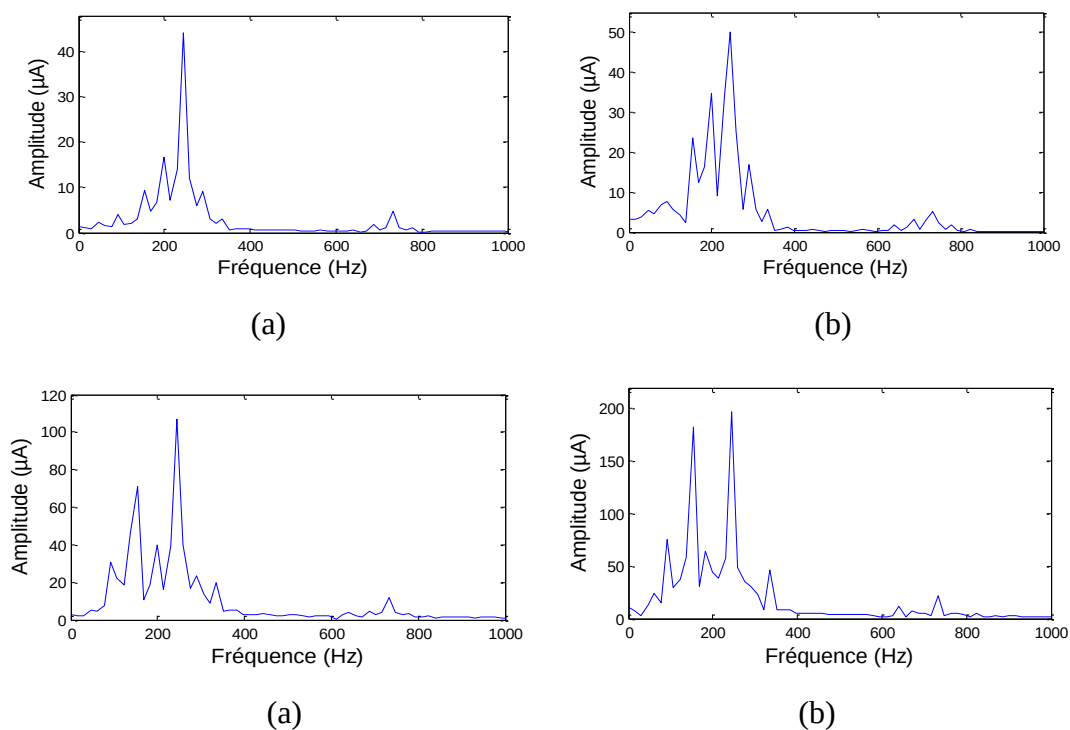


Figure III.24 : spectre fréquentiel du détail D11 pour différentes valeurs de NSDD (a) 0.01 g/cm², (b) 0.02 g/cm², (c) 0.03 g/cm², (d) 0.04 g/cm², (e) 0.05 g/cm², pour une tension appliquée de 50 kV.

III-4-2-2 Application au cas d'une pollution non-uniforme avec différentes configurations

Dans le cas non-uniforme, les signaux du courant de fuite présentés dans les figures III.6, III.7 et III.8 sont décomposés en onze composantes fréquentielles (onze détails). La déviation standard est calculée pour chaque composante pour trouver les composantes pouvant nous informer sur l'état surfacique de l'isolant.

La figure III.25 montre la variation de la STD en fonction du niveau de décomposition, pour différentes largeurs de la couche polluée et pour une couche de pollution située du côté de l'électrode HT pour une valeur de NSDD de 0.03 g/cm^2 .

Figure III.25 montre que le STD des détails D10 et D11 augmente avec l'augmentation de la largeur de la couche polluée. Nous avons observé également une augmentation significative de la STD des détails de hautes fréquences (détail D1 jusqu'au détail D6), pour les couches de pollution de 20 cm et 25 cm. D'autre part, l'augmentation de la largeur de la couche polluée favorise l'augmentation des décharges électriques, donc l'augmentation de la STD des composantes hautes fréquences indiquant l'augmentation des décharges électriques sur la surface polluée. L'activité des décharges électriques sur la surface de l'isolateur est représentée par des impulsions sur le signal de courant de fuite. Ces impulsions peut représenter par des détails de haute fréquence extraire du courant de fuite. Afin de montrer les caractéristiques temporelles des composantes hautes fréquences, nous présentons uniquement le détail D1 (figure III.28) et le détail D6 (figure III.29) avec différentes largeurs de la couche polluée.

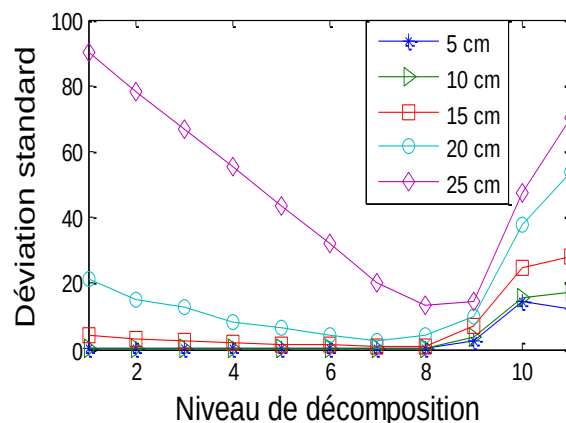


Figure III.25 : Déviation Standard en fonction du niveau de décomposition pour différentes largeurs de la couche polluée située du côté pollué HT, pour une tension appliquée de 30 kV.

La figure (III.26) montre les signaux du détail D11 pour différentes largeurs de la couche polluée. On constate que la valeur maximale du détail D11 augmente avec l'augmentation de la largeur de la couche polluée. Le spectre fréquentiel du détail D11 montre la présence du cinquième harmonique avec d'autres harmoniques d'ordre pair (figure III.27a et III.27b) pour les faibles largeurs de la couche polluée (5 cm, 10 cm). Pour les largeurs moyennes (15 et 20 cm), le spectre fréquentiel montre l'apparition du troisième harmonique à côté du cinquième harmonique (figure III.27c et III.27d). Pour la largeur de la couche polluée de 25 cm, le spectre fréquentiel montre une amplitude très importante du troisième harmonique (figure III.27e) avec d'autres harmoniques de faible amplitude. Pour ce cas, le

détail D11 représente la variation temporelle du troisième harmonique. Ce dernier peut être considéré comme une indication de la présence des arcs électriques sur la surface de l'isolateur [19].

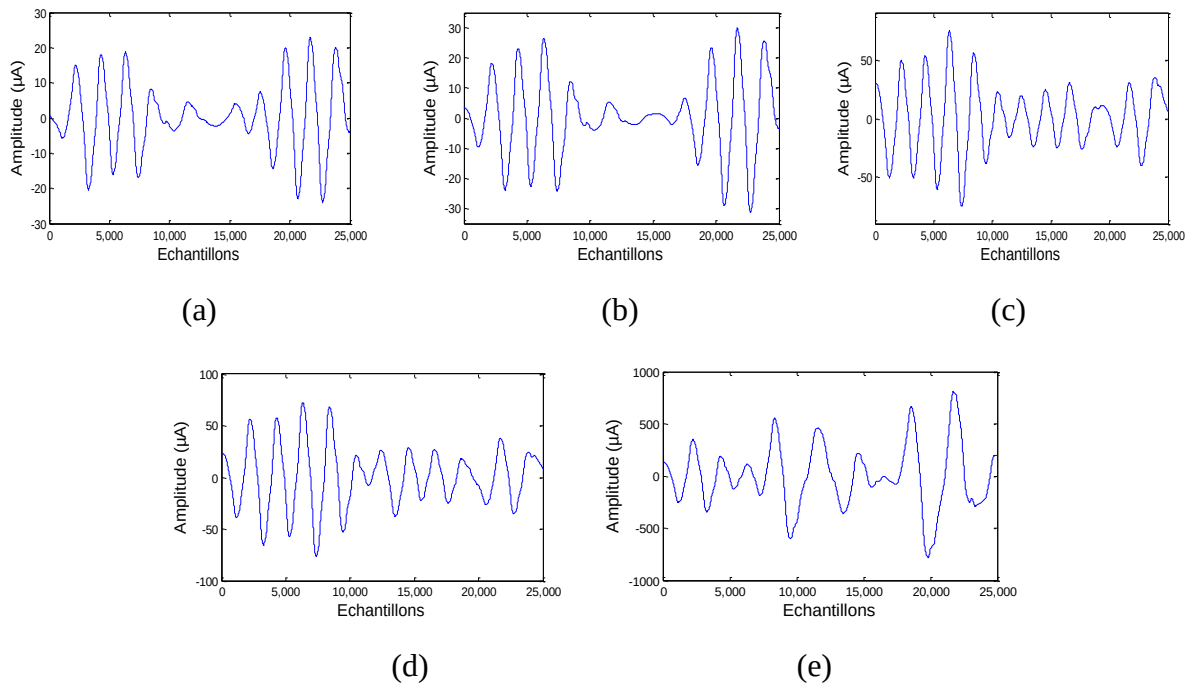


Figure III.26 : Caractéristique temporelle du détail D11 pour différentes largeurs de la couche polluée avec des valeurs de NSDD et pour une tension appliqué de 30 kV (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm, (e) 25 cm.

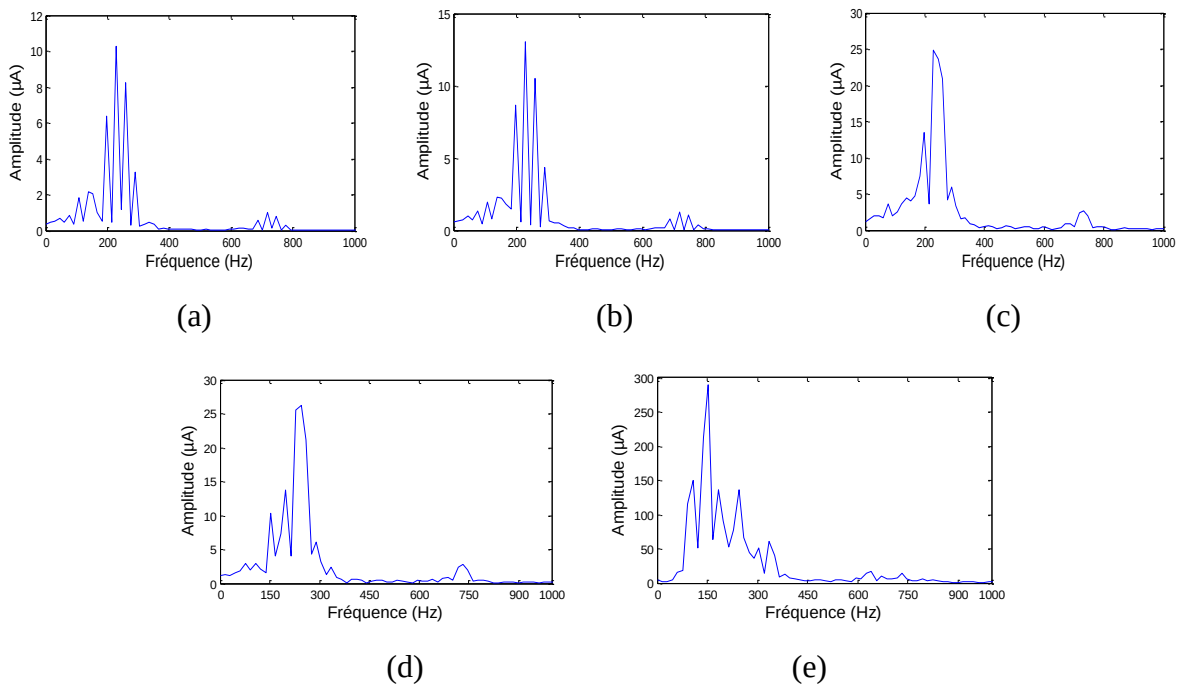


Figure III.27 : Spectre fréquentiel du détail D11 pour différentes largeurs de la couche polluée (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20cm, (e) 25 cm , pour une tension appliqué de 30 kV.

Les figures III.28 et III.29 représentent la variation temporelle de deux détails D1 (250-125 kHz) et de D6 (7,81-3,9 kHz), susceptibles de donner des informations sur l'état surfacique de l'isolateur concernant l'activité des décharges électriques. On remarque que les détails D1 et D6 sont stationnaires en amplitude et avec une rare présence d'impulsions pour les faibles largeurs de la couche polluée (5 et 10 cm). Avec l'augmentation de la largeur de la couche de pollution (15 cm), il y a une augmentation du nombre d'impulsions sur trois positions correspondant aux valeurs maximales de l'alternance négative du courant de fuite. Ces impulsions deviennent très intenses en nombre et en amplitude pour les largeurs 20 et 25 cm.

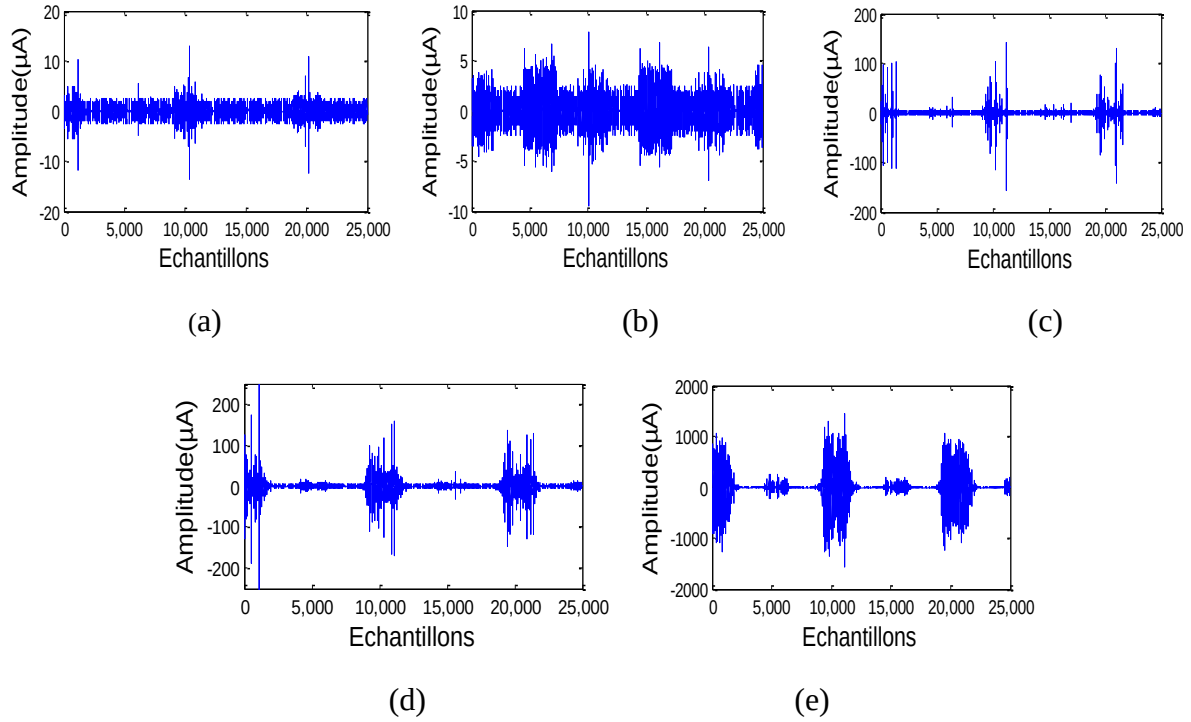
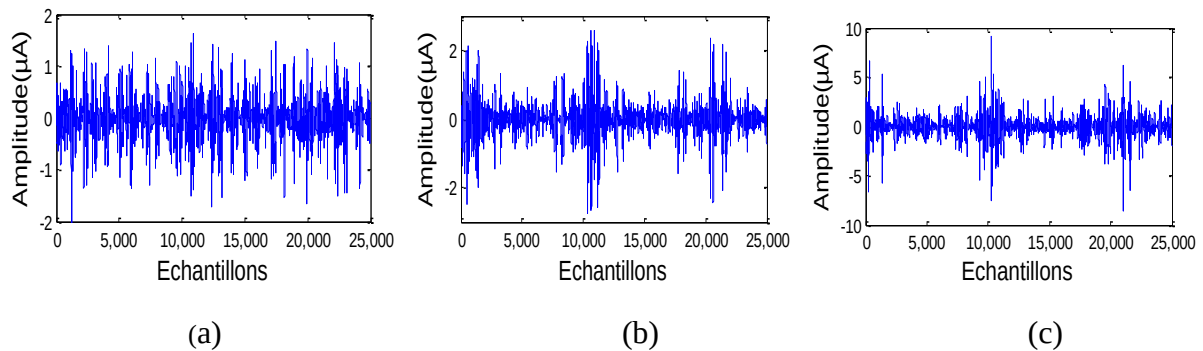


Figure III.28 : Caractéristique temporelle de détail D1 pour différentes largeurs de la couche pollué situé dans le côté HT (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm, (e) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.



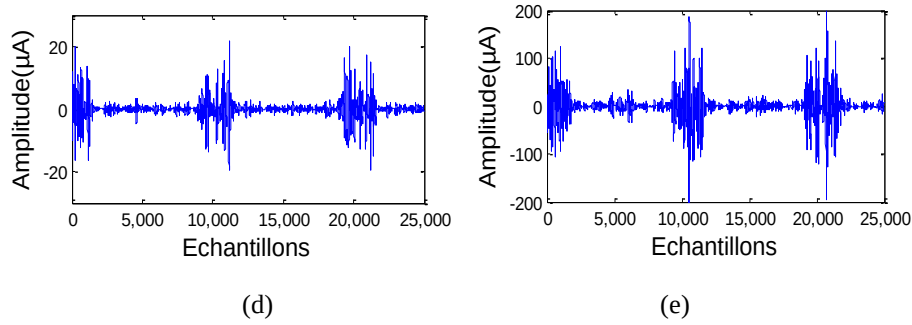


Figure III.29 : Caractéristique temporelle de détail D6 pour différentes largeurs de la couche polluée situé dans le côté HT (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm, (e) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.

Pour les deux autres positions de la couche de pollution, côté terre (figure III.30a) et au milieu (figure III.30b), le calcul de la STD pour les détails D9, D10 et D11 donne presque le même résultat que pour le cas de la couche de pollution côté HT, avec une différence pour la valeur de la STD correspondant aux détails hautes fréquences. La STD des détails hautes fréquences (D1, D6) est significative pour les couches de pollutions situées du côté haute tension (Figure III.18) et du côté terre (Figure III.19a), et moyenne pour la couche de pollution située au milieu (Figure III.19b). Ces résultats montrent que l'intensité des décharges électriques est très importante pour les bandes propres situées près des électrodes à cause de l'intensité du champ électrique qui y règne, et l'intensité des décharges électriques diminue avec l'augmentation de la distance entre la bande propre et l'une des électrodes (Haute Tension ou terre). Cette distance est maximale quand la bande propre est située dans le milieu que caractérise une activité faible des décharges électriques.

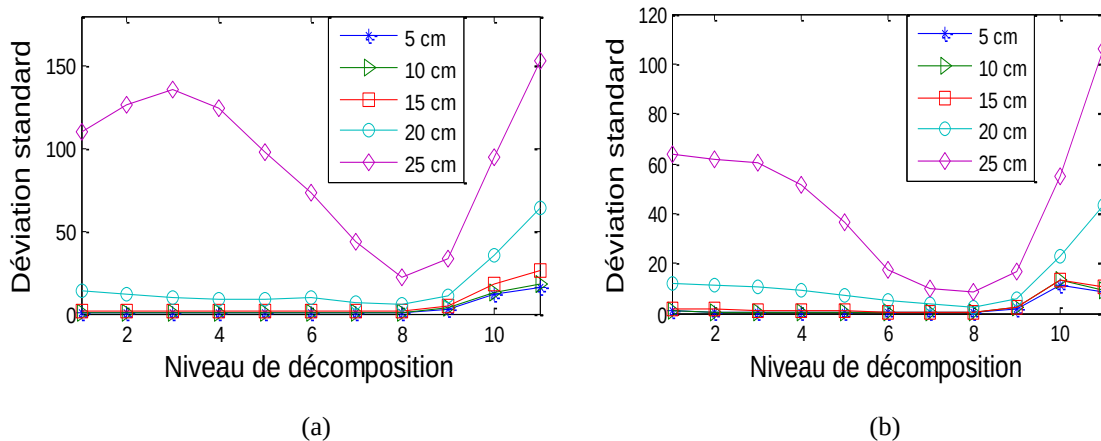


Figure III.30 : Déviation Standard en fonction du niveau de décomposition pour différentes largeurs de la couche polluée (a) couche polluée côté terre, (b) couche polluée située au milieu, pour une tension appliquée de 30 kV.

Nous présentons les signaux du détail D1 pour différentes largeurs de la couche polluée et pour les deux côtés, terre (figure III.31) et au milieu (figure III.32). Pour le cas de la couche polluée située du côté terre, les impulsions correspondent aux positions de la valeur maximale de l'alternance positive du courant de fuite, et pour la couche de pollution située au milieu, les impulsions du signal du détail D1 correspondent aux positions de la valeur maximale de l'alternance positive et négative du courant de fuite.

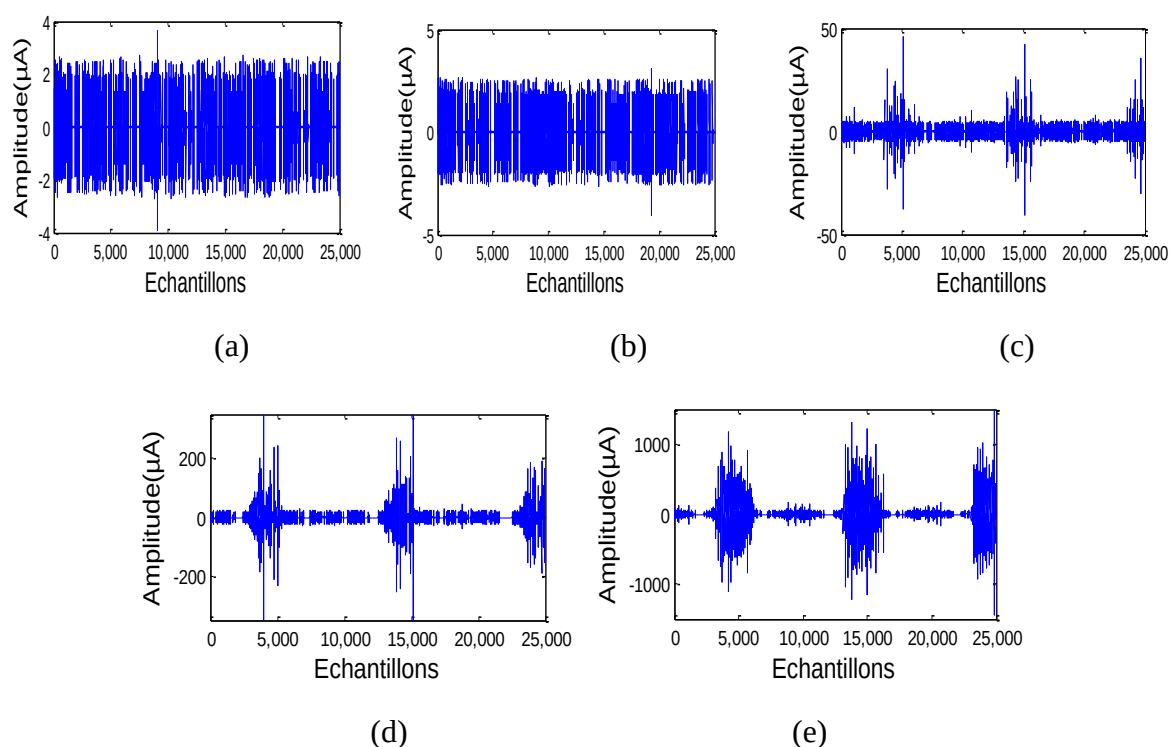


Figure III.31 : Caractéristique temporelle de détail D1 pour différentes largeur de la couche pollué situé dans le côté GR (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm, (e) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.

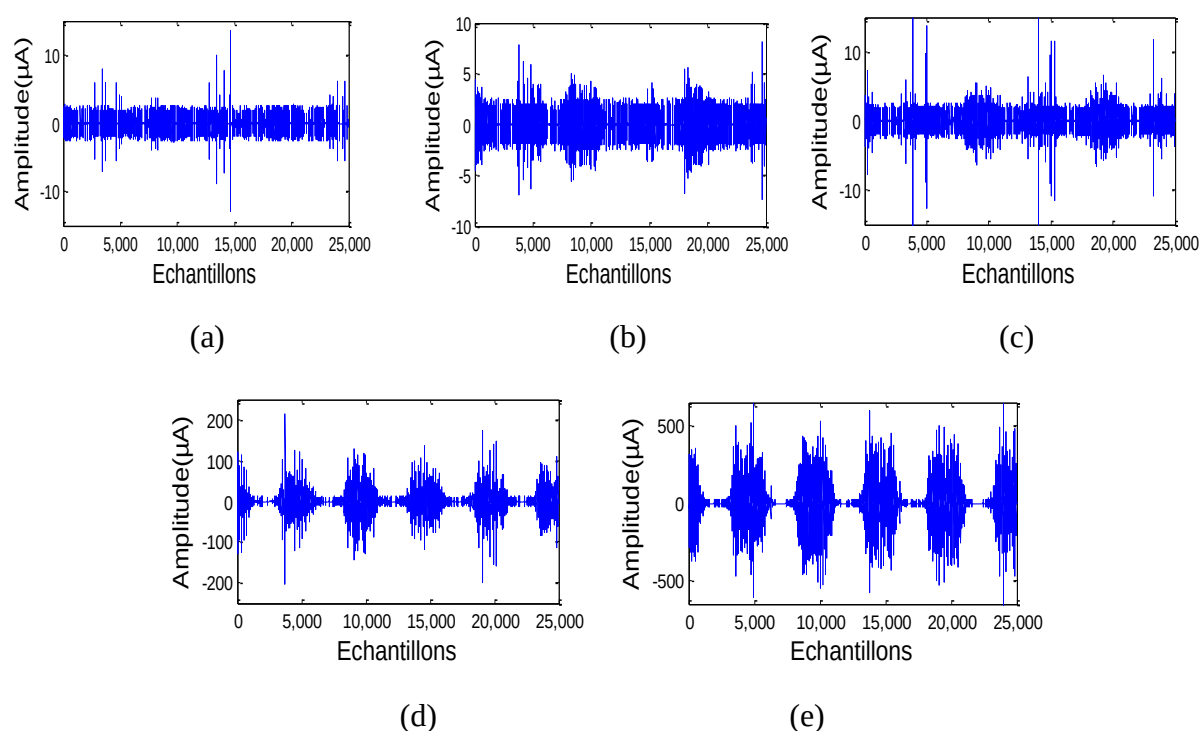


Figure III.32 : Caractéristique temporelle de détail D1 pour différentes largeur de la couche pollué situé dans le milieu (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm, (e) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.

III-5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats se rapportant au courant de fuite correspondant aux différentes configurations de couches de pollution considérées. Il s'agit principalement des cas de la couche uniforme avec différentes densités surfaciques de sable (NSDD), et du cas de la couche non-uniforme avec différentes largeurs et positions de la couche polluante. Nous constatons que le courant de fuite prend une forme différente pour chaque configuration de pollution considérée. Pour les cas de l'isolant propre, et les cas des faibles valeurs de NSDD, et des largeurs de la couche polluée inférieures à 15 cm, la forme d'onde du courant de fuite est très déformée à cause de l'effet capacitif de l'isolateur.

Pour toutes les configurations de pollution, le courant de fuite augmente pratiquement d'une manière linéaire avec la tension appliquée. La valeur efficace du courant de fuite enregistrée dans le cas de l'isolant propre (plaque propre) ne dépasse pas quelques centaines de micro-ampères à cause de l'impédance électrique équivalente très importante (460 MΩ environ). Le courant de fuite enregistré sous pollutions discontinue est plus élevé étant donné les impédances électriques équivalentes relativement réduites. À cause des impédances électriques encore plus réduites, les valeurs du courant de fuite sont plus élevées que celles obtenues dans les deux cas précédents. Au fait, le courant de fuite augmente également avec la largeur de la pollution ainsi qu'avec la quantité de sable.

Les signaux du courant de fuite enregistrés dans le cas propre et sec prennent la forme de « M » déformé à cause du caractère fortement capacitif de l'objet d'essai qui est à l'origine de la déformation apparaissant sur chaque alternance. L'effet de couronne engendrait des impulsions intermittentes dont le nombre et l'amplitude augmentent avec la tension d'essais.

Les impulsions observées sous pollution discontinue représentent des signatures des décharges de couronne. Le nombre ainsi que l'amplitude de telles impulsions augmentent avec la tension appliquée. Cependant, les oscillogrammes enregistrés dans le cas de la pollution continue sont plus ou moins déformés. Cette déformation s'atténue avec l'augmentation de la quantité de sable du fait de la diminution de la composante capacitive. Les impulsions, dont les amplitudes restent très modérées, s'intensifient notamment lors de l'application de 0.04, 0.05 g/cm² de densité de sable.

Nous avons utilisé des techniques de traitement de signal, telles que la transformation de Fourier et la transformation d'ondelettes, pour l'analyse fréquentielle appliquée sur le signal du courant de fuite. Nous obtenons plusieurs paramètres très indicatifs de l'état de surface de l'isolant, à savoir, entre autres, la variation temporelle des composantes harmoniques et leur déviation standard. Ces paramètres nous informent en effet sur l'état de surface de l'isolant, en particulier sur le niveau, ou le degré de pollution, l'importance de la largeur de la couche de pollution ainsi que sa position par rapport aux électrodes, comme ils nous renseignent sur la présence ou non d'une activité des décharges électriques sur la surface de l'isolateur.



Chapitre IV

Technique de la Récurrence Plot (RP)

IV -1 Introduction

La détection des non-linéarités et de la complexité des signaux temporels peuvent transmettre des informations importantes sur les modifications des systèmes dynamiques responsables de la génération de ces signaux [54]. Tous les états possibles d'un système dynamique non linéaire sont généralement représentés sous forme de trajectoires dans l'espace de phase (ou d'état). La propriété fondamentale de ces systèmes dynamiques est la récurrence des états. L'étude de la récurrence révèle les propriétés typiques du système et peut aider à prédire son comportement. Avec l'étude des systèmes chaotiques non linéaires, plusieurs méthodes d'investigation de récurrence ont été développées. Par exploitation de la propriété de récurrence, Eckmann et ses collaborateurs [55], ont introduit la technique de récurrence plot (RP), qui est une représentation graphique d'une matrice carrée, dans laquelle les éléments de la matrice correspondent aux états de système dynamique récurrent [56]. Cette méthode graphique, introduite pour la première fois dans la littérature en physique, a été conçue à l'origine pour localiser des motifs récurrents (rythmes cachés) et des non-stationnarités (dévié) dans des ensembles de données expérimentaux [57].

Le principe de base de cette méthode est l'existence d'un système dynamique stationnaire dans lequel différents états du système sont en récurrence, et le changement soudain dans le système dynamique est considéré comme un état nouveau, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de récurrence avec les états précédents. Par conséquent, lorsqu'une distance appropriée est choisie pour comparer les états du système, le calcul et le plot de la matrice de récurrence permet d'obtenir des caractérisations qualitatives des systèmes dynamiques.

IV-2 Mesure de récurrence distribuée dans le temps :

Pour suivre l'évolution de l'état d'un système dynamique, préalablement décrit avec des lois physiques, on définira à un instant donné un point dans un repère. Ce point caractérise l'état du système dans l'espace à cet instant. Cet espace est appelé « l'espace des phases » de dimension M [5]. La trajectoire d'espace de phase peut être reconstruite à partir d'une série temporelle x_i ($t = idt$, où dt est le temps d'échantillonnage). Considérer un signal mesuré comme la série temporelle suivante :

$$X = \{x(1), x(2), \dots, x(M)\} \quad (IV.1)$$

Où M est la longueur du signal, les points d'espace de phase du système sont obtenus à partir de la série temporelle disponible.

Pour les composantes d'un vecteur décrit dans un espace de phases à grande dimension, en 1981, Ruelle et Takens [75] prouvent qu'il est possible de reconstruire l'attracteur d'une série temporelle. Dès lors, l'espace de phase est reconstruit en un « espace d'immersion » (ou espace de plongement) de dimensions m , les « vecteurs d'immersion » [5] décrits comme suit :

$$X(t_i) = [x(t_i), x(t_i - \tau), \dots, x(t_i - (m-1)\tau)] \quad (IV.2)$$

Où m est la dimension d'immersion de l'espace de phase, τ le retard choisi entre les échantillons de la série temporelle.

Ensuite, la distance / récurrence matrice est obtenue :

$$R_{i,j}(\varepsilon) = \Theta(\varepsilon - \|X_i - X_j\|) \quad i, j = \{1, 2, \dots, N\} \quad (IV.3)$$

Et

$$RP = \begin{cases} 1 & \text{si } \|X_i - X_j\| \leq \varepsilon \\ 0 & \text{autre} \end{cases} \quad (IV.4)$$

Où $\| \cdot \|$ est la distance choisie (distance euclidienne, distance angulaire, norme L1, etc.....) et $\Theta(\cdot)$ est la fonction de pas de Heaviside, le seuil ε est considéré comme constant, et la valeur de $M = N - (m-1)\tau$.

Fondamentalement, un RP est une matrice carrée binaire qui exprime les structures récurrences si elles sont présentes dans les données. Il est construit en prenant la distance entre deux vecteurs de l'espace d'état, si la distance est en-dessous d'un seuil ε l'élément correspondant dans la matrice est placée à un (1), et sur le diagramme de récurrence représenté comme un point noir (dans notre travail points bleu) [58]. Sinon, la valeur de l'élément est mise à zéro et un point blanc est employé.

Le diagramme de RP a une forme carrée et une ligne d'identité $R_{ii}=1$ appelé (Line Of Identity, LOI) avec un angle de $\pi/4$, est généralement inclus dans la représentation graphique, bien qu'il puisse être utile de la supprimer pour les calculs [59].

IV-3- Récurrence Plot Croisée

La récurrence plot croisée (CRP) est une technique de visualisation des similitudes dans le comportement d'espace de phase de deux trajectoires x_i et y_i dans un espace de phase m -dimensionnel [60]. Cette méthode permet d'étudier et de comparer deux systèmes dynamiques complexes simultanément intégrés dans le même espace de phase. La CRP permet de comparer la similarité des états de deux signaux différents. La structure de récurrence croisée (CRP) montre tous les états dans le premier système dynamique qui se produisent dans le deuxième système dynamique [54].

La longueur des données, n et m , des deux systèmes peut être différente, ce qui conduit à une matrice CRP non carrée.

Pour la création d'un CRP, les deux trajectoires, x et y , doivent présenter le même système dynamique avec des variables d'état identiques, car elles se trouvent dans le même espace de phase.

$$CRP_{i,j}^{X,Y} = \Theta(\varepsilon - \|X_i - Y_j\|) \quad i, j = \{1, 2, \dots, N\} \quad (IV.5)$$

Et

$$CRP = \begin{cases} 1 & \text{si } \|X_i - Y_j\| \leq \varepsilon \\ 0 & \text{autre} \end{cases} \quad (IV.6)$$

IV-4 Choix des paramètres m , τ :

Pour modéliser et prédire la série temporelle chaotique, il faut choisir le temps de retard τ et la dimension d'intégration m appropriés pour la reconstruction de l'espace de phase [62]. Les paramètres m et τ jouent un rôle important dans la reconstruction de l'espace de phase, parmi lesquels les trajectoires peuvent maintenir le difféomorphisme avec le système dynamique original. Pour l'estimation de ces deux paramètres m , τ , il y a une méthode efficace qui permet de déterminer à la fois ces deux paramètres, cette méthode s'appelle « C-C method ».

La méthode C-C [62, 63] est une sorte de technique de fenêtre temporelle, qui suppose le retard temporel τ et la dimension d'immersion m interdépendants. Le temps de retard est estimé par la méthode C-C. La dimension d'intégration est obtenue via la relation combinée entre la fenêtre d'intégration et le temps de retard.

V-5 Choix du paramètre ε :

Le seuil de récurrence ε est un paramètre crucial dans l'analyse du RP. En fonction du type d'application, ε peut être une valeur fixe ou peut être variée pour chaque i de manière à ce qu'une quantité prédéfinie de voisins apparaisse dans la boule de rayon ε [79]. Si la valeur de ε est trop grande, la plupart des points seront voisins d'autres points, ce qui produira un diagramme condensé, et donc des points non pertinents. D'autre part, si la valeur de ε choisie est trop petite, on peut perdre la plupart des points récurrents, et donc aucune information utile ne sera tirée [57].

Le choix optimal de ε dépend de l'application et les conditions expérimentales (par exemple, le bruit), mais dans tous les cas, il est souhaitable que le seuil le plus petit possible soit choisi. Par ailleurs, il n'existe pas de méthode standard pour choisir la valeur de ε . Pour la classification et la détection du signal, un meilleur choix de la valeur de ε consiste à sélectionner entre 20 et 40% de l'écart type du signal [57].

IV-6 Choix de la norme ($||\cdot||$) :

Afin de calculer un RP, une norme appropriée doit être choisie. Les normes les plus fréquemment utilisées sont la norme L1, la norme L2 (norme euclidienne) et la norme L_∞ (norme maximale ou suprême). Notons que les voisinages de ces normes ont des formes différentes (Figure IV.1). Considérant un ϵ fixe, la norme L_∞ trouve le plus, la norme L1 le moins et la norme L2 un nombre intermédiaire de voisins. Pour calculer les RP, la norme L_∞ est souvent appliquée, car elle est plus rapide en calcul et permet d'étudier de manière analytique certaines caractéristiques des RP [59].

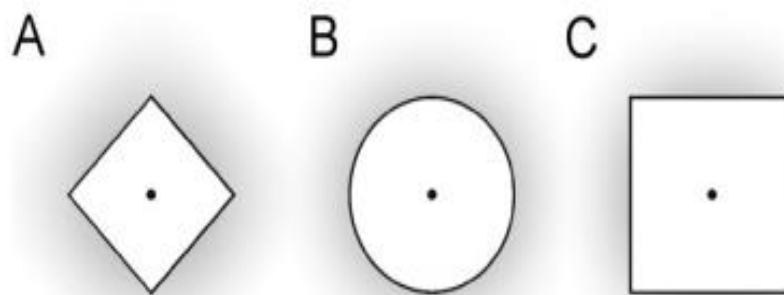


Figure IV.1 : Trois normes couramment utilisées pour le voisinage avec le même rayon autour d'un point (point noir) sont illustrées de manière exemplaire pour l'espace de phase bidimensionnel : (A) norme L1, (B) norme L2 et (C) norme L_∞ [59].

V-7 Structures dans la Récurrence Plot :

Une RP est caractérisée par des modèles typiques, dont la structure est utile pour comprendre la dynamique sous-jacente de la série temporelle. Ces motifs peuvent être classés selon deux caractéristiques : la typologie (homogène, périodique, Drifts, Disruptif) et les textures (les points isolés, les lignes diagonales et les lignes verticale/horizontales...) [59]. Sur la base de la typologie et des caractéristiques de texture, Marwan [60] fournit les directives suivantes pour l'interprétation qualitative d'un RP :

- La Structure homogène des RP sont typiques des systèmes fixes dans lesquels les temps de relaxation sont courts par rapport au temps couvert par le RP. Un exemple d'un tel PR est celui d'une série temporelle aléatoire stationnaire.
- Les systèmes périodiques et quasi-périodiques ont des RP avec des structures récurrentes diagonales, périodiques ou quasi-périodiques (lignes diagonales, structures en damier), (Figure IV.2).
- Une dévié (drift) est provoquée par des systèmes dont les paramètres varient lentement, c'est-à-dire des systèmes non stationnaires, Les pales de RP s'éloignent de la ligne diagonale (LOI) (figure IV.2c).

- Bandes blanches : le processus est la non-stationnarité ; certains états sont rares ou loin de la normale ; des transitions et des changements brusques peuvent avoir eu lieu dans les systèmes dynamiques.
- Des points de récurrence uniques et isolés peuvent se produire si les états sont rares, s'ils ne persistent que pendant une très courte période ou fluctuent fortement.

Les figures V.1a-c représentent des systèmes périodiques assez clairs pour un signal sinusoïdal : La Figure IV.1a montre le RP pour un signal sinusoïdal pure, la Figure IV.1b un signal sinusoïdal avec la présence de la troisième harmonique et le Figure IV.1c signal sinusoïdal avec la présence de la cinquième harmonique. La structure de RP d'un signal sinusoïdal se compose des lignes diagonales et orthogonales formant des carrés (structures en damier) et qui montre la périodicité du signal. Pour la deuxième configuration où la présence de la troisième harmonique, les côtés des carrés qui constituent la RP sont divisés par trois lignes courtes (Figure V.1 b) ce qui montre que la composante fondamentale est superposée au troisième harmonique. Et pour la troisième configuration, les côtés des carrés sont divisés par cinq lignes courtes (Figure V.1 c), ce qui montre que la composante fondamentale est superposée au cinquième harmonique.

Les rapports de fréquence irrationnels entraînent des structures récurrentes périodiques plus complexes. Cependant, même pour les systèmes oscillants dont les oscillations ne sont pas facilement reconnaissables, les RP peuvent être utilisés pour trouver leurs oscillations [2].

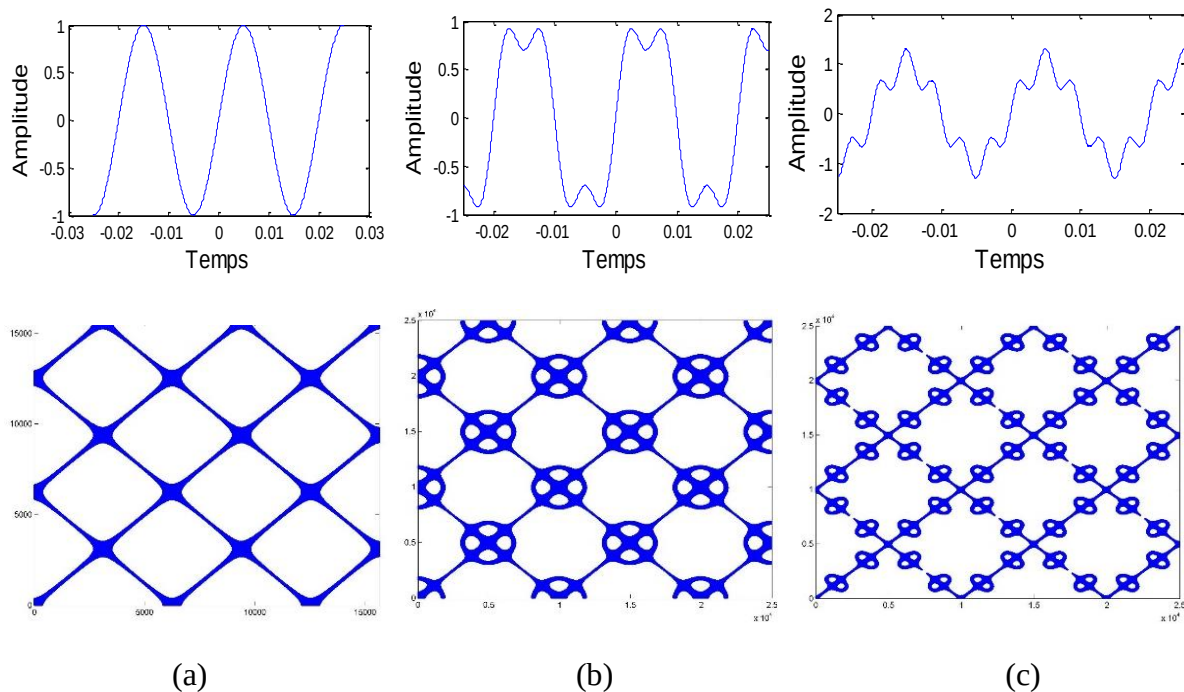


Figure IV.2 : Structures des RP de différents signaux (a)sinusoïdal (b) signal sinusoïdal avec la présence de la troisième harmonique, (c) signal sinusoïdal ave la présence de la cinquième harmonique.

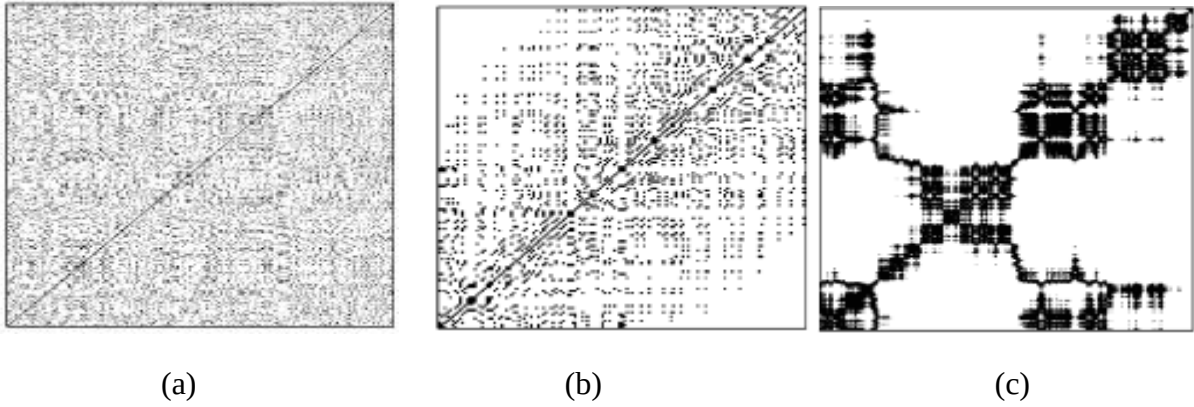


Figure IV.3 : Typologie caractéristique des tracés de récurrence (a) homogène (bruit blanc uniformément réparti), (b) dévié (carte logistique corrompue par un terme à augmentation linéaire) (c) perturbé (mouvement brownien) [60].

IV-7 L'application de la RP et CROSS-RP sur le signal du courant de fuite et la tension appliquée :

Dans ce qui suit, nous appliquons la méthode RP sur les composantes fréquentielles en se basant sur les résultats obtenus en utilisant la technique des ondelettes et comprenant les formes d'onde du courant de fuite pour décrire ces comportements avec différentes configurations de pollution.

Pour le cas d'une couche de pollution uniforme, nous avons appliqué la RP sur les formes d'ondes du courant de fuite et la méthode de récurrence plot croisé la CRP, pour étudier la similarité entre l'onde du courant de fuite et celle de la tension appliquée, pour différentes valeurs de NSDD de la couche polluante. Ceci va nous permettre de savoir, dans chaque cas, si le comportement de l'isolateur est plutôt capacitif ou résistif.

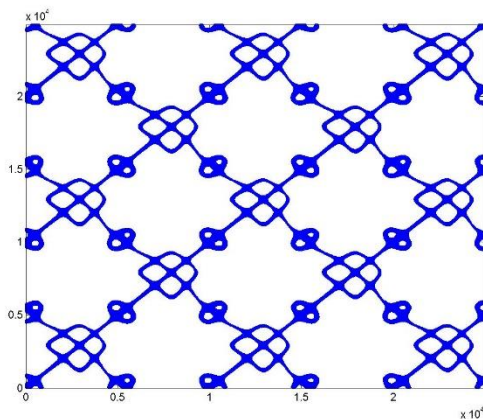
Pour le cas d'une couche de pollution non-uniforme, la RP est appliquée sur les détails hautes fréquences les plus significatifs ; ces derniers dépendent fortement de l'augmentation et de la position de la couche de pollution ainsi que de l'activité des décharges électriques sur la surface de l'isolateur pollué. Nous nous basons sur la topologie spécifique du diagramme de la RP pour chaque signal ou composante fréquentielle pour caractériser chaque configuration de pollution.

D'après les études menées, les valeurs de la dimension d'immersion m et du retard τ n'ont pratiquement pas d'effet sur la structure topologique de la RP. Néanmoins, elles sont choisies, via la «C-C method», égales à 5 et 20 respectivement. La valeur du paramètre ε est choisie égale à $0,25\sigma$, où σ est la standard déviation (l'écart type) du signal étudié. La valeur 0.25 est adoptée par plusieurs chercheurs et donne de meilleurs résultats [11, 15, 64 et 71]. Pour éviter un diagramme très condensé qui prend un temps de calcul important, on utilise la norme euclidienne qui représente la distance entre les différents espaces de phase.

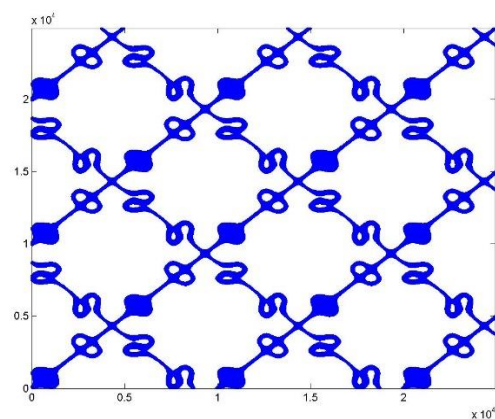
IV-7-1 Cas d'une couche de pollution uniforme :

Pour le cas uniforme, la récurrence plot (RP) est appliquée directement sur le signal du courant de fuite pour le cas propre et pollué pour différentes valeurs de NSDD (0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 g/cm²). Les structures de la RP montrent des lignes parallèles à la LOI sont composées par plusieurs lignes courtes (points concentrés entre les lignes orthogonales sont considérés comme une ligne courte), et des lignes orthogonales à la LOI. Les lignes parallèles indiquent que l'évolution est similaire à d'autres périodes. La répétition des motifs indique la périodicité du signal. Les lignes courtes indiquent les différentes déformations sur le signal du courant de fuite. Pour les cas propre et de faibles valeurs de NSDD (0.01 et 0.02 g/cm²), nous observons plusieurs petites lignes courtes qui divisent les lignes diagonales indiquant une distorsion importante du signal du courant de fuite à cause de l'effet capacitif de l'isolateur. Les lignes diagonales sont divisées par cinq lignes courtes qui indiquent l'importance de l'harmonique cinquième, pour ces cas l'isolateur est hautement capacitif.

Avec l'augmentation de la valeur de NSDD, on observe la diminution de nombre des lignes courtes qui composent les lignes diagonales à cause de l'augmentation importante de l'amplitude de la composante fondamentale qui diminue l'importance du cinquième harmonique. Pour ces cas, le signal du courant de fuite devient moins déformé, et le comportement résistif de l'isolateur augmente significativement. Pour le cas de NSDD égale à 0.05 g/cm², la structure de la RP est caractérisée par des lignes diagonales et orthogonales et l'absence totale des lignes courtes entre les lignes orthogonales, ceci indique que la forme d'onde du courant de fuite est proche de la sinusoïde. Dans ce cas, le comportement de l'isolateur est hautement résistif.



(a)



(b)

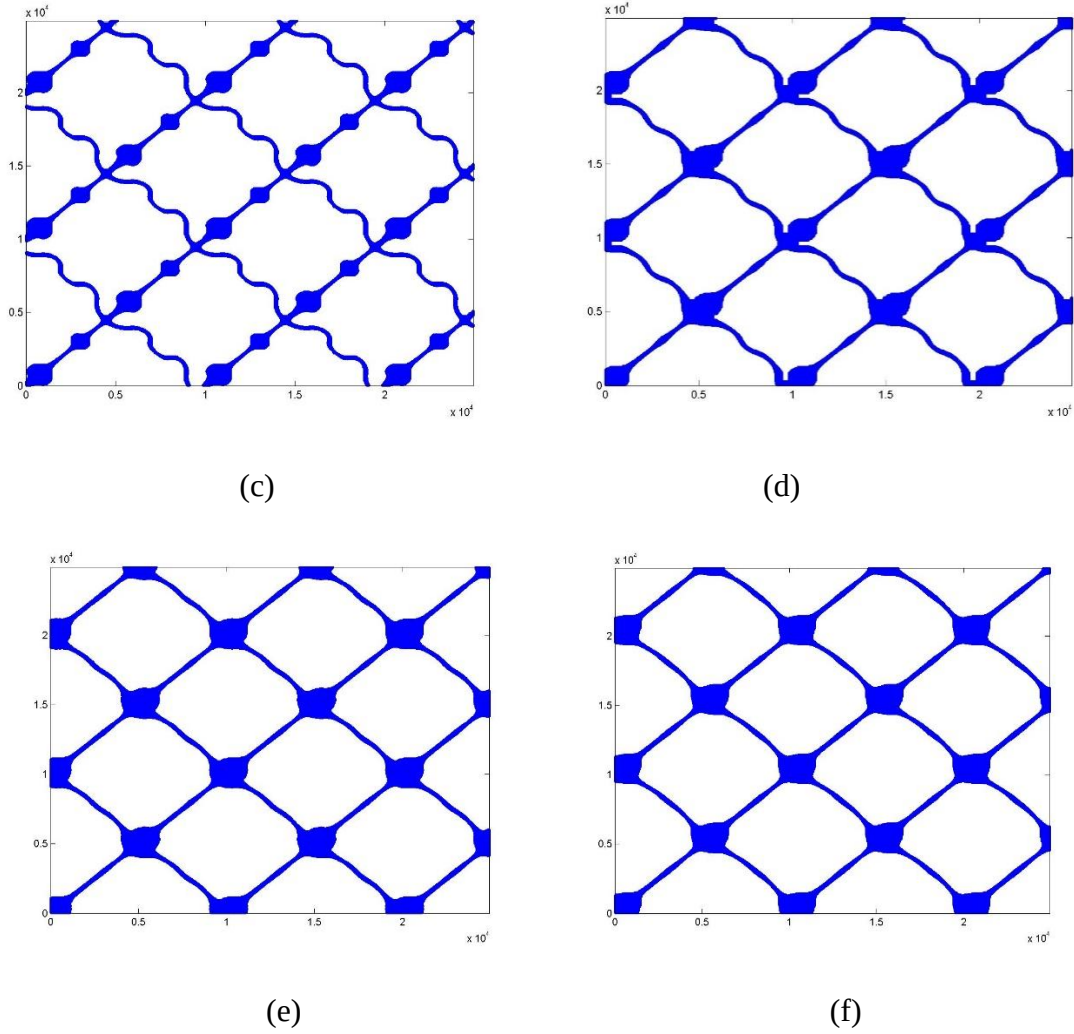


Figure IV.4 : Diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite pour différentes valeurs de NSDD (a) cas propre, (b) 0.01 g/cm², (c) 0.02 g/cm², (d) 0.03 g/cm², (e) 0.04 g/cm², (f) 0.05 g/cm².

La Figure IV.5 montre les différentes structures de RP appliquée sur le signal du courant de fuite pour différentes valeurs de NSDD et pour une tension appliquée de 50 kV. A ce niveau de tension, commence l'initiation des arcs partiels sur la surface de l'isolateur. Les diagrammes de récurrence plot montrent la présence de lignes parallèles, de points isolés, et de lignes courtes. Pour les faibles valeurs de NSDD, les lignes diagonales sont divisées en cinq lignes courtes, ce qu'indique l'importance du cinquième harmonique (figure 24a). L'augmentation de la valeur de NSDD et de la tension appliquée génère une activité de décharges électriques, ce qui provoque une augmentation de l'amplitude du troisième harmonique dans le signal du courant de fuite. Les structures de RP montrent la présence du troisième harmonique dans le signal du courant de fuite, par trois lignes courtes entre les lignes orthogonales (figure 24.b et 24 c) (le point concentré entre les lignes orthogonales est considéré comme une ligne courte).

Pour le cas de NSDD égale à 0.04 g/cm^2 (figure 24 d), la structure de RP contient des points isolés et une discontinuité des lignes diagonales (déformation dans les lignes diagonales), ceci est le signe de la présence d'impulsions de forte amplitude sur le signal du courant de fuite. Ces impulsions sont dues à l'initiation de l'apparition des arcs électriques sur la surface de l'isolateur pollué à partir de cette tension de 50 kV.

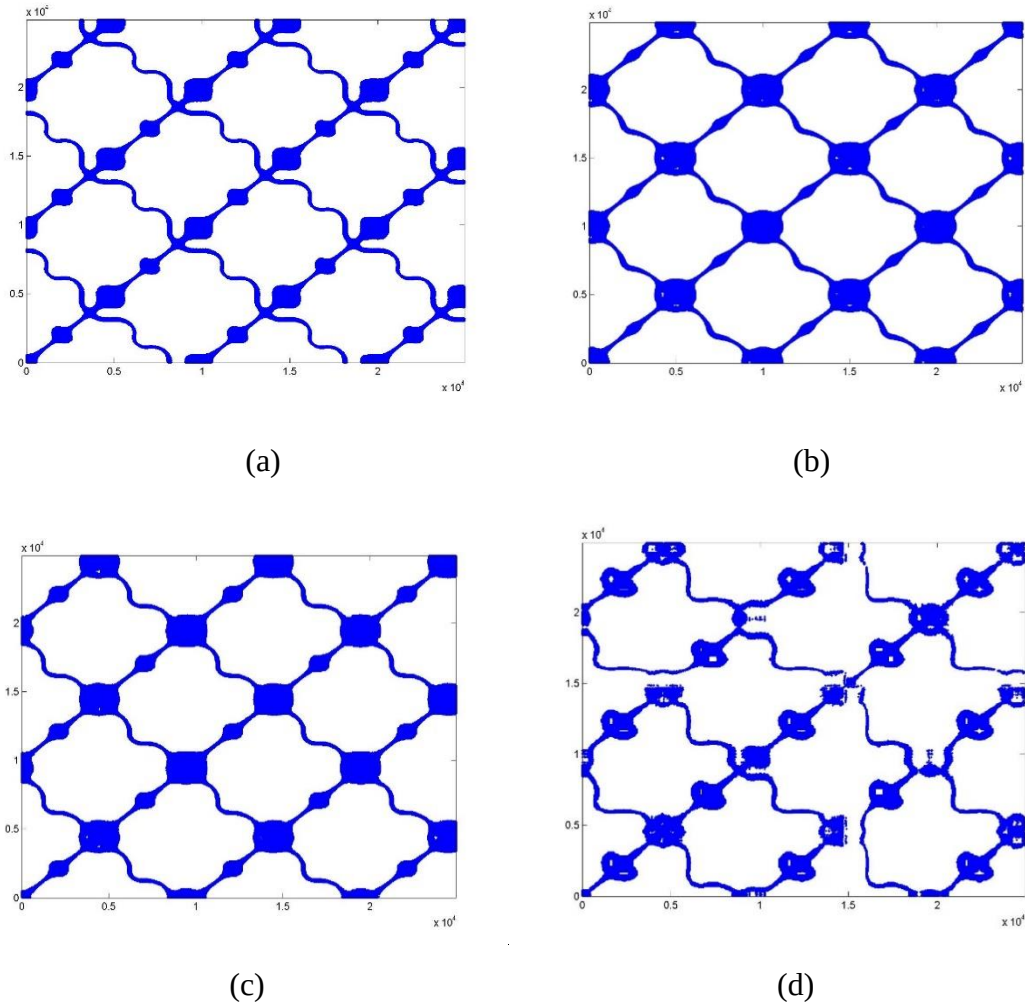


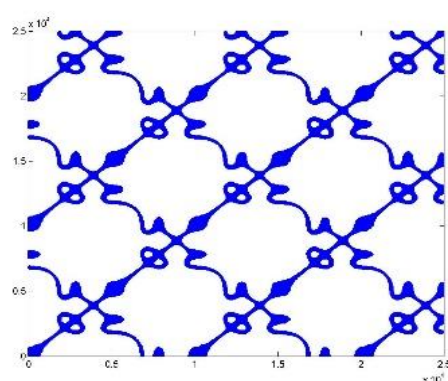
Figure IV.5 : Diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite pour différentes valeurs de NSDD (a) cas propre, (b) 0.01 g/cm^2 , (c) 0.02 g/cm^2 , (d) 0.03 g/cm^2 , (e) 0.04 g/cm^2 , pour une tension appliquée de 50 kV

IV-7-2 Cas d'une couche de pollution non-uniforme :

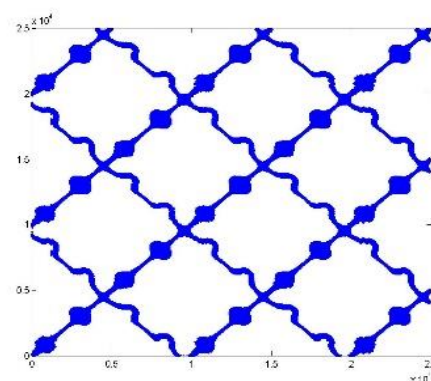
Les figures IV.6 et IV.7 montrent les diagrammes de RP appliqués aux signaux du courant de fuite pour deux positions, coté HT (figure IV.6) et coté terre (figure IV.7) et pour trois largeurs de la couche polluée (5, 20, et 25 cm). Chaque configuration a une topologie spécifique. Les diagrammes de RP sont composés de lignes parallèles à la LOI, de lignes orthogonales, de courtes lignes, et de points isolés. Sur les Figures IV.25 a et b, et c et IV.26 a et b, correspondant aux largeurs de la couche de pollution de 5 cm et 25 cm, les cartes RP

correspondantes montrent la présence de cinq lignes courtes entre les lignes orthogonales. Ce qui montre l'importance du cinquième harmonique pour les largeurs variant de 5 à 20 cm.

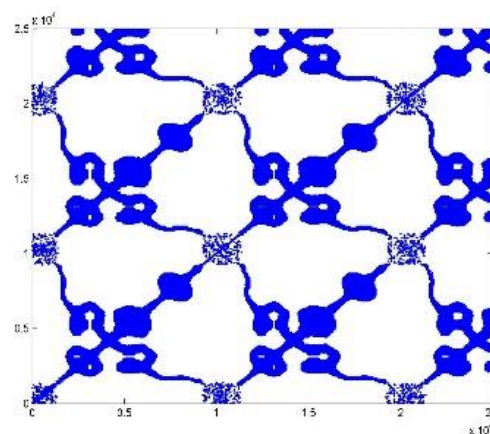
La présence des points isolés sur les lignes diagonales de la couche polluée de 25 cm indique des impulsions intenses sur les formes d'onde du courant de fuite (figures IV .6d, IV.7d). La position de ces points isolés sur les lignes diagonales correspond à la position des impulsions sur les formes d'onde du courant de fuite, donc la position de la couche de pollution. En effet ; les impulsions qui apparaissent sur l'alternance négative du courant de fuite (figure IV .7d), correspondent au cas où la couche de pollution est située du côté HT, les impulsions qui apparaissent sur l'alternance positive du courant de fuite (figure IV .7d), correspondent au cas où la couche de pollution est située du côté terre.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.6 : Diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée (a) 5 cm, (b) 20 cm, 25 cm, située du côté HT.

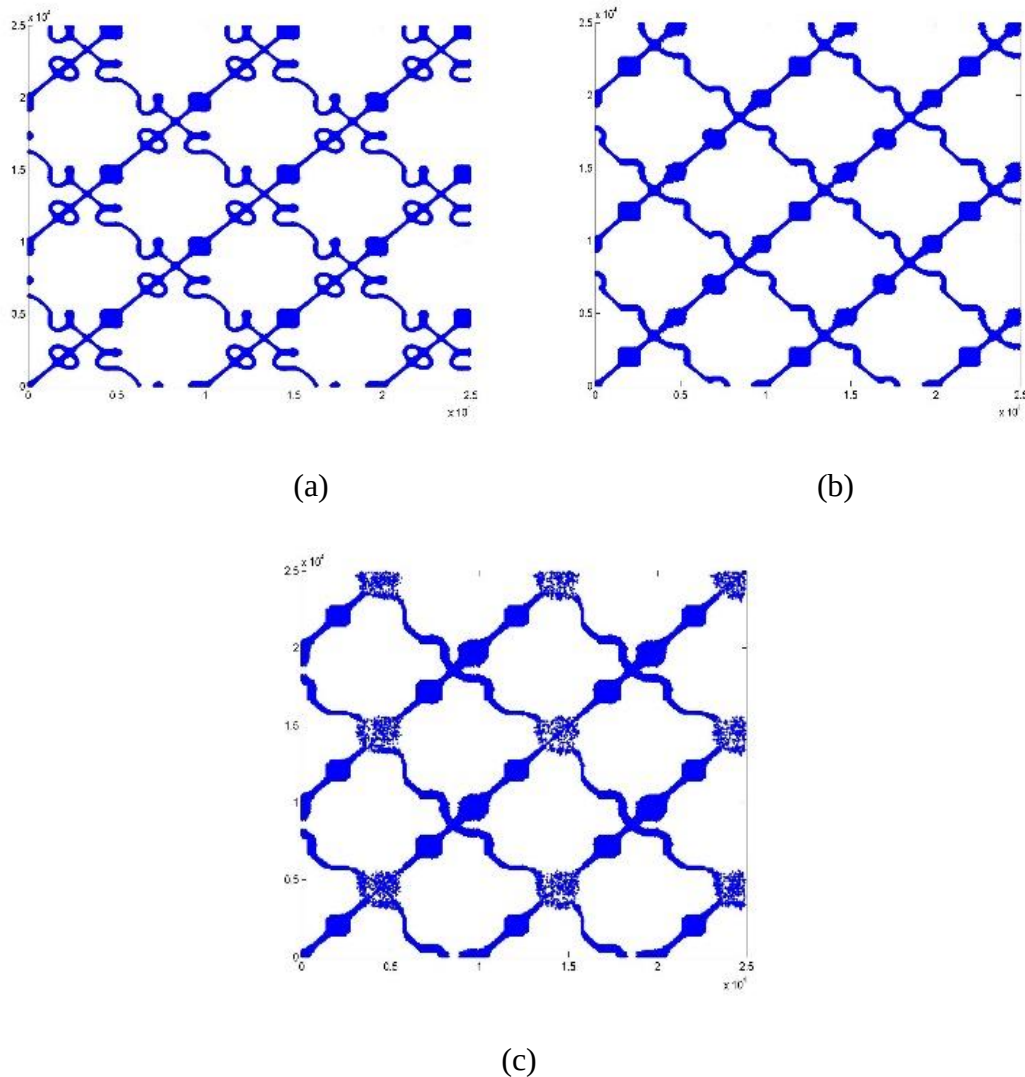


Figure IV.7 : Diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée (a) 5 cm, (b) 20 cm, 25 cm, située du côté terre.

IV 7-3 Application de la cross-récurrence plot au signal du courant de fuite et à la tension appliquée :

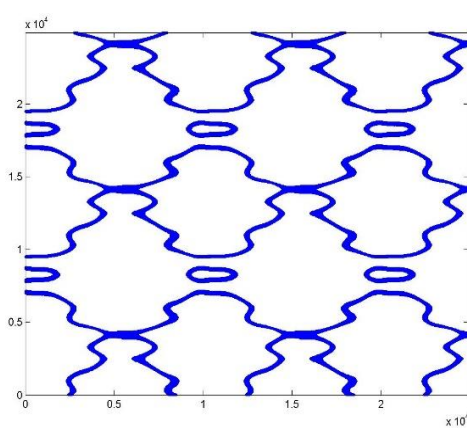
A cause de la corrélation qui existe entre les formes d'ondes du courant et de la tension et le comportement de l'isolateur, on applique la méthode cross récurrence plot sur les signaux du courant de fuite et la tension appliquée. L'inspection visuelle des CRP révèle des informations précieuses sur la relation entre les formes d'ondes du courant de fuite et de la tension appliquée. Donc nous allons suivre la forme du courant de fuite par rapport à la forme d'onde de la tension appliquée pour différentes configurations de pollution.

Les figures représentent les structures de Cross-récurrence plot pour différentes valeurs de NSDD (0 0.01, 0.02, 0.03 et 0.05 g/cm²), avec le cas propre et sec. On se concentre sur la ligne «diagonale principale» inclinée dans la CRP pour caractériser la relation courant-

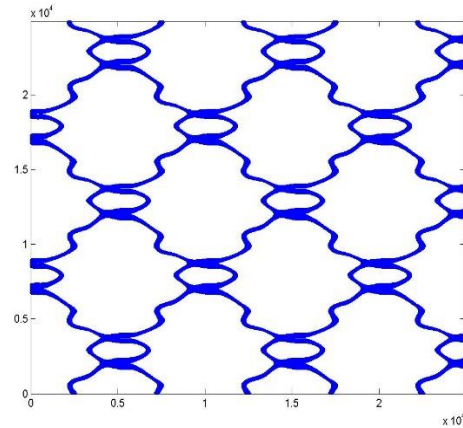
tension, car elle est liée aux fréquences et aux phases des systèmes considérés, pour donner des informations sur le comportement de l'isolateur.

La longueur des lignes courtes qui constituent la ligne diagonale principale montre la similitude entre les signaux de courant de fuite et la tension appliquée. Plus la ligne est longue plus la similarité entre les signaux augmente. Une dilatation temporelle supplémentaire ou une compression de l'une de ces trajectoires similaires provoque une distorsion de cette diagonale [9]. La ligne distordue contient les informations sur le redimensionnement dont nous aurons besoin pour resynchroniser les deux séries temporelles. Par conséquent, nous appelons cette diagonale déformée la ligne de synchronisation (LOS).

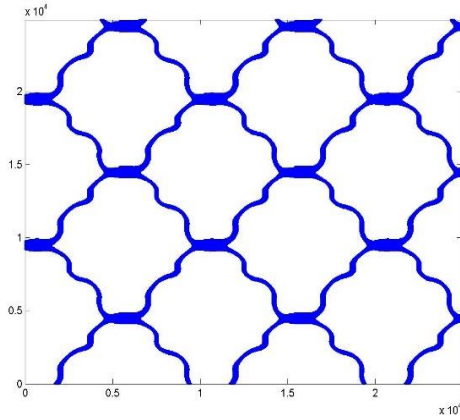
Pour les figures IV.8 (a-d), les structures de CRP consistent en des lignes diagonales courtes et longues et des points isolants sous formes circulaires. Pour le cas propre et de faibles valeurs de NSDD (figure IV.8a-c), les structures de CRP sont caractérisées par des lignes diagonales composées par plusieurs lignes courtes et très déformées ce qui indique une non-similitude entre le signal du courant de fuite et la tension appliquée en phase et en forme. Le signal de la tension appliquée délivré par le transformateur est proche de la forme sinusoïdale, donc la déformation dans la ligne diagonale est causée par le signal du courant de fuite, cette non-similarité montre que le comportement de l'isolateur dans ces conditions de pollution est hautement capacitif. Avec l'augmentation de la valeur de NSDD (0.02 g/cm^2), on remarque la formation d'une seule ligne diagonale un peu déformée ce qui montre l'augmentation de la similarité entre les formes d'ondes du courant de fuite et celles de la tension appliquée, ceci nous renseigne sur l'augmentation du comportement résistif de l'isolateur. Pour les valeurs importantes de NSDD (0.03 et 0.05 g/cm^2) (figure IV.8d et IV.8e), la structure de la CRP composée par des lignes diagonales non déformées, et ressemble à celle de la RP d'un signal sinusoïdal, ce qui montre que les deux signaux (courant de fuite et tension) deviennent très similaires en phase et en forme, et proches d'un signal sinusoïdal, pour ces cas, le comportement de l'isolateur devient très résistif.



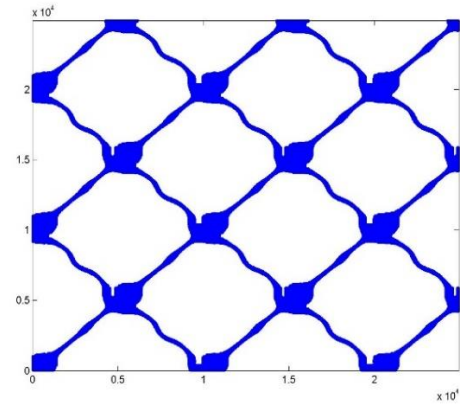
(a)



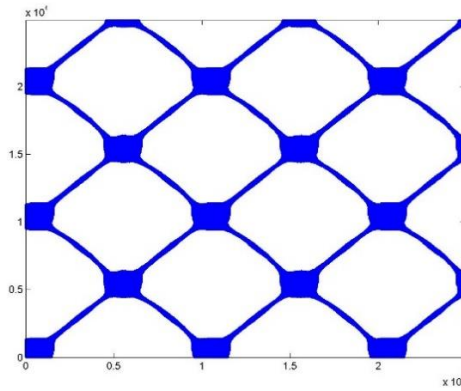
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure IV.8 : Diagramme de Cross-récurrence plot appliquée au signal du courant de fuite et à celui de la tension appliquée, pour différentes valeurs de NSDD (a) cas propre (b) 0.01 g/cm², (c) 0.02 g/cm² (d) 0.03 g/cm², (e) 0.05 g/cm².

Pour le cas d'une couche de pollution non-uniforme nous avons comparé le signal du courant de fuite à celui de la tension appliquée pour trois largeurs différentes de pollution, lorsqu'elles sont situées du côté haute tension. Pour le cas des largeurs de la couche de pollution de 5 et 20 cm, les diagrammes de la CRP montrent que la ligne diagonale principale est composée sous forme de lignes courtes déformées ; ceci montre la non-similarité entre les formes d'ondes du courant de fuite et de la tension appliquée. Pour ces cas, le comportement de l'isolateur est hautement capacitif. Pour une largeur de la couche de pollution de 25 cm, le diagramme de la CRP est très déformé, et est composé par des lignes verticales déformées sous formes des lignes courtes. Nous observons aussi l'absence des lignes diagonales (Figure IV.9c), ce qui indique l'absence totale de la similarité entre les formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite. La déformation du courant de fuite est causée par l'apparition des arcs électriques sur la surface de l'isolateur.

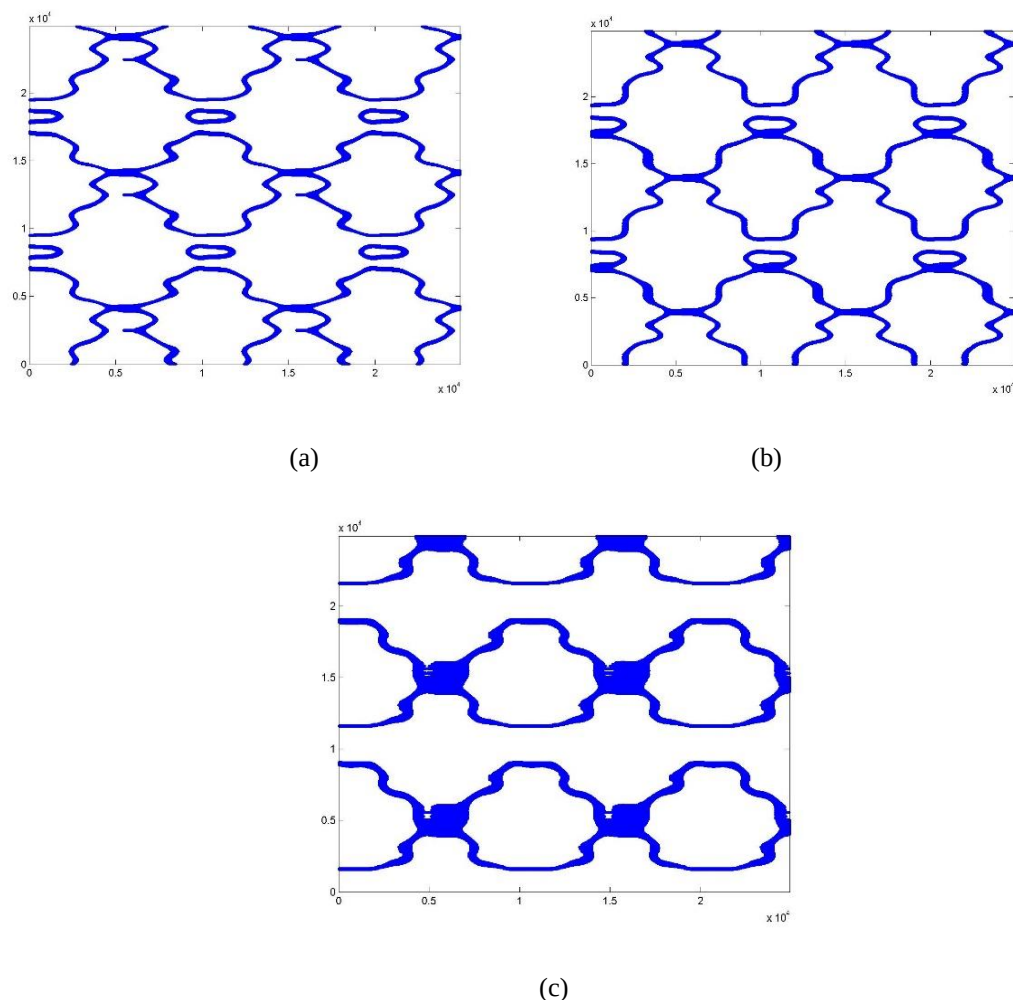


Figure IV.9 : Diagramme de la Cross-récurrence plot appliqué au signal du courant de fuite et de la tension appliquée, pour le cas d'une couche de pollution non-uniforme avec différentes largeurs de la couche polluée (a) 5 cm, (b) 20 cm, (c) 25 cm.

IV-7-4 Application de la RP sur les composantes hautes fréquences :

Pour le cas d'une couche de pollution non-uniforme, nous avons trouvé que les détails de hautes fréquences sont le meilleur moyen pour décrire l'évolution de l'activité des décharges électriques sur la surface de l'isolateur, elles ont été exploitées par plusieurs chercheurs pour étudier le comportement d'un isolateur pollué [49,64, 65, 71, et 72]. Nous exploitons les diagrammes de récurrence plot des détails hautes fréquences (D1 (Hz) à D6 (Hz)), afin de suivre la présence ou non des décharges électriques ainsi que l'importance de la largeur de la couche de pollution en différentes positions en se basant sur la variation dans la topologie des diagrammes de récurrence plot.

Les figures IV.10 et IV.11 montrent les différentes structures de RP du détail D1 (31,25 à 62,5 kHz) et du détail D6 (Hz), pour différentes largeurs de la couche polluée situées du côté Haute tension. Les structures de RP sont composées par des points denses regroupés en forme de rectangles, de points isolés, et de bandes blanches en présence d'une ligne diago-

nale appelée “Line Of Identity ou LOI” qui existe dans toutes les structures. La concentration des points récurrents et la largeur des bandes blanches dépendent de la largeur de la couche polluée et de la bande fréquentielle des détails. Pour les couches de pollution de 5 et 10 cm, les structures de RP sont caractérisées par une faible densité des points récurrents regroupés en forme de petits rectangles, et un nombre important de points isolés. Cette concentration des points récurrents est très faible pour le détail D6.

Pour les couches de pollution de 15, 20 et 25 cm, d’après les figures IV.10 et IV.11, la structure de la RP appliquée au détail D1 et D6 est constituée de points denses concentrés en forme de grands rectangles séparés par des bandes blanches. La concentration de ces points et la largeur des bandes blanches s’accroissent avec l’augmentation de la largeur de la couche polluée. Comme montré dans la figure IV.10e et figure IV.11e, pour une couche de pollution de 25 cm caractérisée par d’intenses points et de larges bandes blanches, cette largeur de la couche polluée est caractérisée par l’occurrence des arcs sur la surface de l’isolateur pour une tension appliquée d’environ 30 kV.

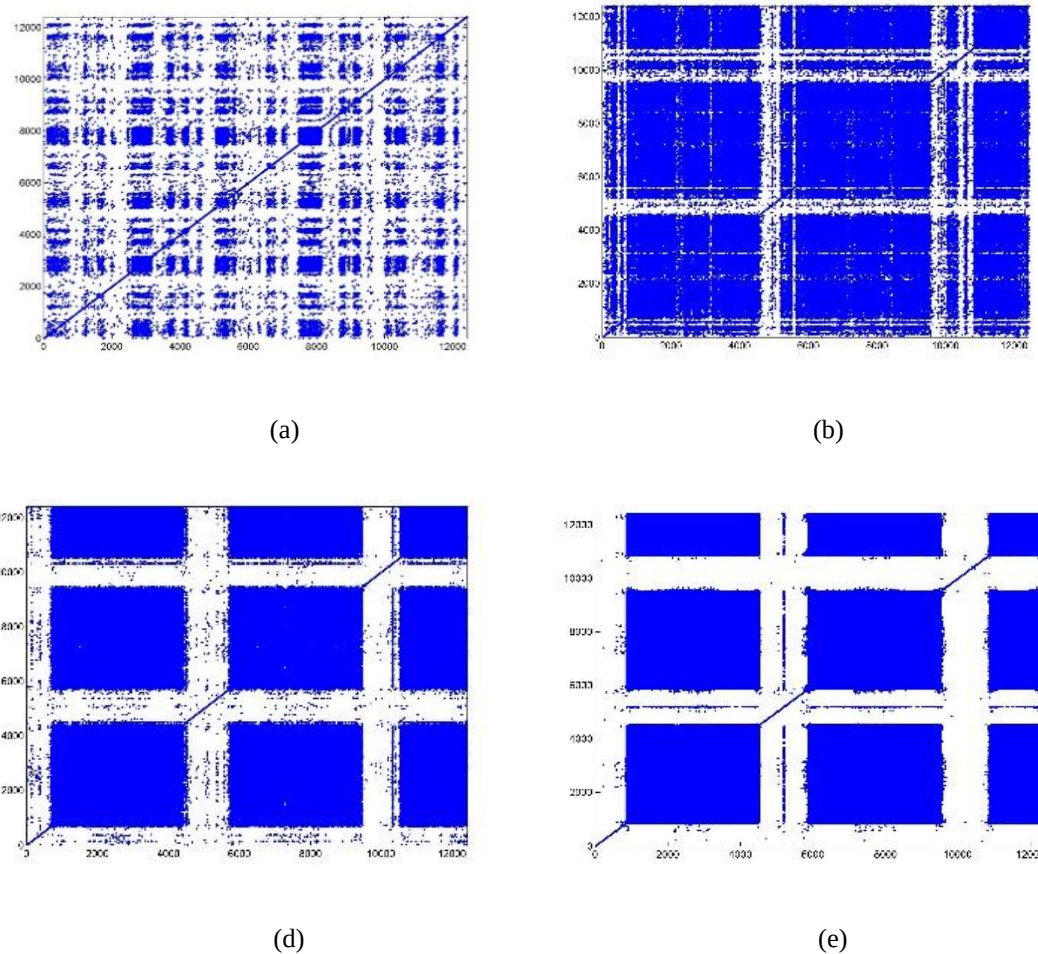


Figure IV.10 : RP appliquée au détail D3 du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée située du côté HT (a) 10 cm, (b) 15 cm, (c) 20 cm, (d) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.

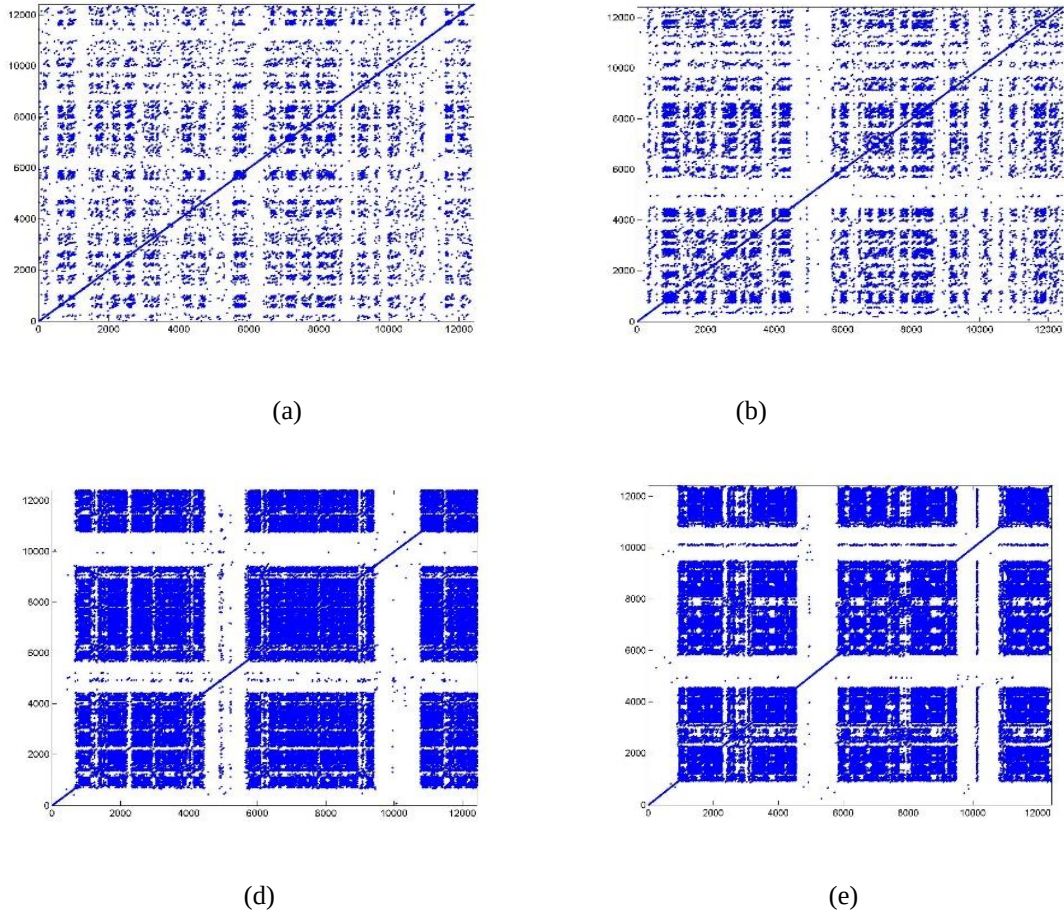
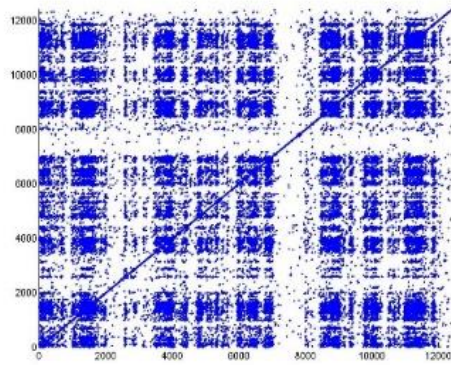


Figure IV.11 : RP appliquée au détail D6 du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée située du côté HT (a) 10 cm, (b) 15 cm, (c) 20 cm, (d) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.

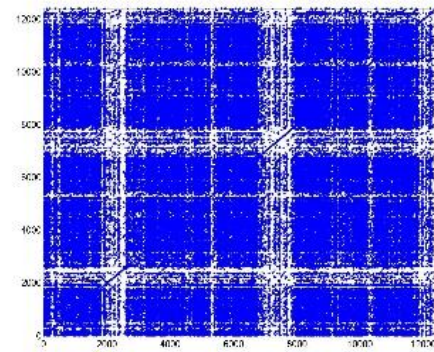
Pour étudier l'influence de la position de la couche de pollution, nous avons appliqué la technique de récurrent plot sur les composantes hautes fréquences des deux autres configurations de pollution, telles que la couche de pollution située du côté terre et la deuxième située au milieu.

La récurrence plot technique est appliquée sur le détail haut fréquence D1. La Figure IV.12 représente les structures de RP pour la couche de pollution située du côté terre pour les largeurs 10, 15, 20, et 25 cm, et la Figure IV.13 les structures de RP pour la couche de pollution située au milieu pour les largeurs 10, 15, 20, et 25 cm. Les résultats des RP obtenus sont similaires à ceux de la couche de pollution côté haute tension (Figure IV.10), telle qu'avec l'augmentation de largeur de la couche polluée, la structure de RP s'accompagne par l'augmentation de la densité des points récurrents et celle de la largeur des bandes blanches ce qui signifie l'augmentation de l'activité des décharges électriques sur la surface de l'isolateur. En outre, la position et le nombre des bandes blanches dépendent de la position de la couche polluée. Pour les couches de pollution situées du côté HT et du côté terre, la structure de RP

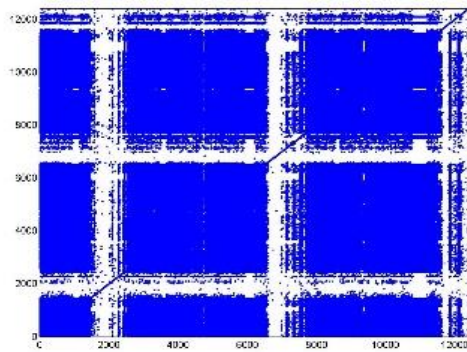
est caractérisée par trois larges bandes blanches. Pour la position de la couche de pollution située au milieu de la surface isolante, la RP est caractérisée par cinq bandes blanches.



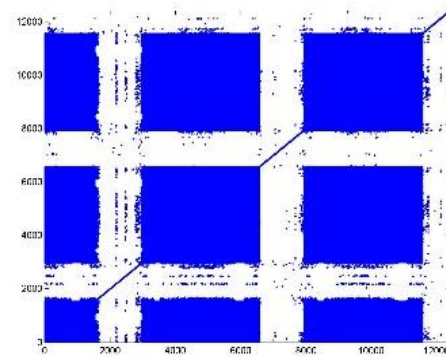
(a)



(b)

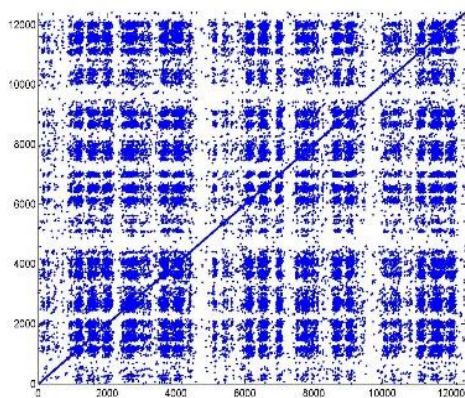


(c)

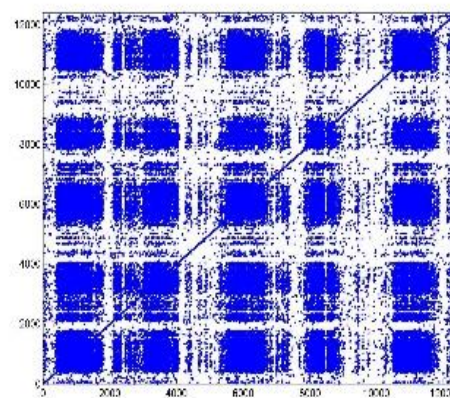


(d)

Figure IV.12 : RP appliquée au détail D3 du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée située du côté terre (a) 10 cm, (b) 15 cm, (c) 20 cm, (d) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.



(a)



(b)

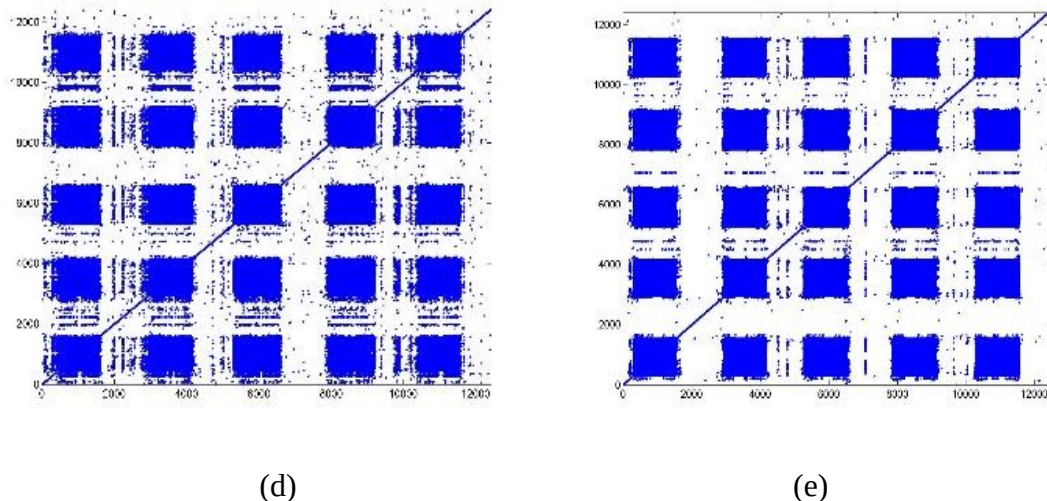


Figure IV.13 : RP appliquée au détail D3 du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche polluée située au milieu (a) 10 cm, (b) 15 cm, (c) 20 cm, (d) 25 cm, pour une tension appliquée de 30 kV.

IV-8 Récurrence Quantification Analysis (RQA) du diagramme de RP :

Dans le but d'aller au-delà de l'analyse visuelle des diagrammes de récurrence, et sachant la difficulté relativement importante à les interpréter, différentes mesures quantifiant les structures précédemment décrites par les diagrammes ont été proposées. J.P. Zbilut et C.L. Jr. Webber [67] ont développé un outil puissant qui quantifie et analyse la structure des RP, appelé « analyse quantitative de récurrence » (Recurrence Quantification Analysis, RQA).

La Récurrence plot quantification (RQA) est utilisée pour mesurer la complexité et quantifier le nombre et la durée des récurrences des systèmes dynamiques représentés par ces trajectoires d'espace d'état. La RQA est basée sur des calculs théoriques, mais possède une utilité statistique pour diagnostiquer les systèmes dynamiques non-linéaires dans plusieurs domaines scientifiques [68]. La définition mathématique explicite des caractéristiques distinctes dans les diagrammes de récurrence nous permet d'analyser des signaux multi-variés, non linéaires, non stationnaires et bruyants. L'apparence globale (à grande échelle) d'une RP peut donner des indications sur la stationnarité et la régularité, alors que les modèles locaux (à petite échelle) sont liés à des propriétés dynamiques, telles que le déterminisme [70]. Des études récentes ont montré que le déterminisme, le pourcentage des points de récurrence qui forment les lignes parallèles à la diagonale principale et les lignes verticales, reflètent la prévisibilité d'un système dynamique [66, 69, 71].

Dans cette section, nous avons calculé les différents paramètres de Récurrence plot quantification des structures de RP pour différentes configurations de pollution pour le signal du courant de fuite et les composantes de hautes fréquences. Les différents paramètres calculés sont, la densité des points récurrents, qui est définie en tant que taux de récurrence (RR),

les paramètres basés sur les lignes diagonales, le déterminisme (DET), la longueur moyenne et maximale de la ligne diagonale (L , L_{max}), et l'entropie (ENTR), qui indiquent la complexité de la structure déterministe du système. Les lignes verticales/horizontales sont également des structures importantes dans une RP en ce qu'elles reflètent la persistance d'un état pendant un certain intervalle de temps. Les paramètres dérivés des lignes verticales sont la laminarité (LAM), le temps de piégeage (TT) et la longueur maximale d'une verticale, V_{max} . Les faibles valeurs TT, LAM et V_{max} impliquent une grande complexité dans les systèmes dynamiques, car l'état du système ne reste que peu de temps dans un état similaire à l'état précédent [69].

V-8-1 Mesure de la RQA :

On peut distinguer deux types de mesure RQA, les mesures basées sur les lignes diagonales, ainsi que celles basées sur les lignes verticales (similaires aux lignes horizontales vu la symétrie).

Ainsi, nous introduisons l'histogramme $P(\epsilon, l)$, représentant le nombre total de lignes diagonales de longueur l dans un RP avec un seuil ϵ fixé :

$$P(\epsilon, l) = \sum_{i,j}^N (1 - R_{i-1,j-1}(\epsilon)) (1 - R_{i+1,j+1}(\epsilon)) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k}(\epsilon) \quad (IV.7)$$

Par analogie, le nombre de lignes verticales est calculé en remplaçant l par v qui représente la longueur de la ligne verticale. Dans les prochaines équations, nous omettrons de citer le symbole ϵ des mesures de RQA, pour une raison de simplicité ($P(\epsilon, l) = P(l)$).

ϵ est le seuil, R_{ij} sont les points récurrents, l représente la longueur des lignes diagonales, v la longueur des lignes verticales.

Les principales mesures RQA sont les suivantes :

IV-8-2- Récurrence rate (RR) :

La première variable de récurrence est % récurrence rate (% REC). % REC est la mesure quantitative de la densité des points récurrents dans le graphique (RP). Cette variable peut aller de 0% (aucun point récurrent) à 100% (tous les points sont récurrents).

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j} \quad (IV.8)$$

RR : récurrent rate (Taux de récurrence), R_{ij} les points récurrents. N , nombre d'échantillons du signal.

IV-8-3 Déterminisme (DET) :

Le déterminisme quantifie la fraction des points récurrents formant les structures des lignes diagonales. Le nom déterminisme provient de la répétition ou le déterminisme du modèle de dynamique. Le DET peut aller de 0% (pas des lignes diagonales pour les systèmes stochastiques) à > 0% (lignes courtes pour les systèmes chaotiques) à 100% (lignes longues pour les systèmes périodiques).

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N IP(l)}{\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}} \quad (IV.9)$$

Où $P(l)$ est le nombre de lignes diagonales de longueurs l , ayant au moins une longueur de $l_{\min}$.

IV-8-4 Divergence (D) :

La divergence est une mesure de la rapidité avec laquelle les trajectoires parallèles s'écartent les unes des autres. La divergence DIV est définie comme l'inverse du segment de ligne le plus long ($L_{\max}$). $L_{\max}$ représente la longueur maximale des lignes diagonales de la structure de RP à l'exception de la ligne diagonale principale (LOI). Plus la ligne diagonale maximale est courte, plus la divergence est diminuée (les trajectoires ne sont pas divergentes).

$$DIV = \frac{1}{L_{\max}}, \quad L_{\max} = \max(\{l_i, i=1,2,\dots,N_l\}) \quad (IV.10)$$

IV-8-5 Entropie (ENTR) :

L'entropie fait référence à l'entropie de Shannon de la distribution des lignes diagonales du RP : elle reflète la complexité de la structure du RP par rapport aux lignes diagonales [16]. ENTR est une mesure de la complexité du signal et est calibrée en unités de bits / bin. Ce paramètre décrit la distribution des longueurs des lignes diagonales dans la structure de RP.

Autrement dit, toutes les longueurs de lignes diagonales (nombres entiers) de la RP sont réparties dans un histogramme à partir duquel les probabilités bin non nulles, $P(l)$, sont calculées et combinées pour obtenir l'ENTR comme suit.

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l) \quad (IV.11)$$

Où $p(l)$ représente la probabilité que la ligne diagonale ait exactement la longueur l , et peut être estimée à partir de la distribution de fréquence $P(l)$, avec :

$$p(l) = \frac{P(l)}{\sum P(l)} \quad (\text{IV.12})$$

IV-8-6 Tendence (TND) :

La tendance est une mesure de l'homogénéité ($\text{TND} \pm 5$) ou de l'hétérogénéité ($\text{TND} > 5$; $\text{TND} < 5$) de la structure de récurrence (RP) [67]. En 1995, WEBBER et al [80] ont calculé le TND comme la pente de la droite de meilleur ajustement par le biais de valeurs de pourcentage de récurrence locales à des distances entières éloignées de la diagonale centrale. Dans ce cas, si la densité de points récurrents reste presque la même sur l'ensemble de la parcelle, TND se positionnera près d'une pente nulle.

Si la densité décroît loin de la diagonale centrale, la TND sera fortement négative.

Si la densité augmente loin de la diagonale centrale, la TND sera fortement positive.

Des TND proches de zéro peuvent être utilisés pour déterminer si le système est stationnaire dans le temps, mais des TND non nuls peuvent être utilisés pour déterminer si le système est en transitoire.

$$\text{TREND} = \frac{\sum_{i=1}^{N-2} [i - (N-2)](RR_i - RR)}{\sum_{i=1}^{N-2} i \frac{N-2}{2}} \quad (\text{IV.13})$$

RR , la densité du point récurrent total, RR_i , la densité des points récurrents loin de la diagonale centrale.

IV-8-7 Laminarité (LAM) :

La Laminarité est définie comme la fraction des points récurrents formant les lignes verticales sur les points récurrents totaux. Le nom LAM provient de l'empilement de plusieurs fichiers parallèles trajectoires comme lamina et aussi des stationnarités dans la série temporelle. LAM peut aller de 0% (pas de laminarité) à 100% (laminarité totale).

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N vP(v)}{\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}} \quad (IV.14)$$

Où $P(v)$ est le nombre de lignes verticales de longueurs v ayant au moins une longueur de $v_{\min}$.

IV-8-8 Trapping (TT) :

Le temps de Trapping, la dernière variable de récurrence, est calculé comme la longueur moyenne des segments de droite dans le tracé récurrent. Le TT est une mesure du temps pendant lequel la dynamique reste bloquée dans un certain état. Il peut être calibré en unités de temps si le taux de numérisation est connu.

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N vP(v)}{\sum_{v=1}^N vP(v)} \quad (IV.15)$$

Où $P(v)$ est le nombre de lignes verticales de longueur v . TT estime la moyenne temporelle où le système demeure dans un même état.

IV-8-9 Temps de Récurrence de l'Entropie (RTE) :

Le *RTE* sert à déterminer la périodicité ou la répétitivité d'un signal. Il peut être appliqué aux systèmes dynamiques, ainsi qu'aux processus stochastiques. Il se calcule via l'expression :

$$RTE = -(\ln T_{\max})^{-1} \sum_{t=1}^{t=T_{\max}} p(t) \ln(p(t)) \quad (IV.16)$$

Où $T_{\max}$ est la plus grande période du signal. Le *RTE* est très utilisé pour détecter les changements subtils dans les dynamiques des signaux stochastiques.

Les indicateurs précédemment cités informent sur les différents états d'un processus étudié, et sont en réalité fortement inter-corrélés. Les mesures basées sur les lignes verticales sont capables de trouver les transitions chaos-chaos. Ces indicateurs permettent alors, d'étudier l'intermittence, même pour les séries de données courtes et non stationnaires. De plus, les transitions chaos-ordre peuvent être identifiées pour des systèmes dynamiques périodiques dont les mesures sont nulles [13].

IV-10 Application de la récurrence plot quantification :

Le calcul des paramètres de récurrence plot appliquée sur les signaux des courants de fuite et de leurs composantes fréquentielles permet d'obtenir des informations supplémentaires sur l'état surfacique de l'isolateur. Les différents paramètres ont été calculés pour chaque configuration de pollution, tel que le cas propre, cas uniforme avec différentes valeurs de NSDD, et pour le cas non-uniforme (différentes largeurs et positions de la couche polluée). On calcul aussi les différents paramètres de récurrence plot croisée qui est appliquée sur le signal du courant de fuite et de la tension appliquée. Ces paramètres (CRQA) donnent la similarité entre les deux signaux (courant de fuite et tension appliquée) ce qui nous permet de donner des informations sur le comportement électrique de l'isolateur, tel que le comportement résistif, capacitif ou la présence des arcs sur la surface de l'isolateur.

IV-10-1 Application sur les diagrammes de RP du signal du courant de fuite :

Le tableau III.1 montre les valeurs des différents paramètres de RQA calculées à partir des diagrammes de la RP du courant de fuite pour différentes valeurs de NSDD et avec une tension appliquée de 10 kV. Les valeurs de DET et de LAM sont proches de la valeur de 1 (100%), ce qui montre que les structures du RP sont caractérisées par des lignes diagonales longues, indiquant par la même la périodicité, et le déterminisme des signaux des courant de fuite pour le cas uniforme et pour les cas avec de faibles valeurs de la tension appliquée (pas d'arcs électriques).

Nous obtenons aussi une augmentation de la longueur des lignes verticales avec l'augmentation de la valeur de NSDD, qui est un indicateur important pour suivre la variation séquentielle du diagramme de la récurrence plot.

Tableau IV.1. différents paramètres de (RQA) pour le cas uniforme								
NSDD (g/cm ²)	RR	DET	LAM	Ldmoy	Lvmoy	Ldmax	Lvmax	ENTR
0.01	0.156	0.996	0.997	109.1	192.5	12418	762	4.34
0.02	0.113	0.994	0.997	93.8	168.4	12418	810	4.34
0.03	0.156	0.998	0.999	224.3	405.7	12418	1332	4.299
0.04	0.148	0.990	0.994	89.8	158.4	12418	1273	3.524
0.05	0.142	0.994	0.996	135	236.3	12418	1234	4.28

Le tableau IV.2 représente les différents paramètres de (RQA) du signal de courant de fuite pour le cas non-uniforme avec différentes largeurs de la couche polluée. La valeur de DET est proche de (100 %) pour les faibles largeurs de la couche polluée ; ceci montre la pé-

riodicité et le déterminisme des signaux du courant de fuite. Pour les largeurs de 20 et 25 cm, il y a une légère diminution de DET, comme le montrent les figures de RP avec la présence des points isolés, à cause de l'apparition d'impulsions sur l'onde du courant de fuite. Ces impulsions diminuent la périodicité du signal du courant de fuite.

Nous avons aussi la longueur maximale de la ligne diagonale (Lmax) qui diminue avec l'augmentation de la largeur de la couche de pollution. La longueur maximale de la ligne diagonale (Lmax) est proche de celle de la ligne d'identité (LOI) pour la largeur de 5 et 10 cm, ces largeurs caractérisées par l'absence totale des impulsions sur l'onde du courant de fuite, donc l'absence des points isolés dans la structure de RP. Cette longueur diminue brusquement à cause de la présence des points isolés pour les largeurs de 15, 20 et 25 cm, ces largeurs sont caractérisées par l'apparition d'impulsions des décharges sur l'onde du courant de fuite.

Tableau IV.2. différents paramètres de (RQA) pour le cas non-uniforme

Largeur (cm)	RR	DET	LAM	Ldmoy	Lvmoy	Ldmax	Lvmax	ENTR
5	0.084	0.978	0.987	41.7	73.11	12418	540	3.5
10	0.0561	0.9795	0.98	37.4	63.12	12418	493	3.3
15	0.0699	0.977	0.988	16.17	28.82	2543	622	3.03
20	0.0566	0.89	0.975	9.21	13.93	2092	628	2.1
25	0.0868	0.9601	0.978	14.3	24.37	1260	739	2.62

IV-10-2 Application sur les diagrammes de CRP du signal du courant de fuite :

Le CRQA pourrait constituer une réponse de certains problèmes posés par l'analyse des interactions entre deux systèmes par l'analyse de la dynamique partagée entre leurs séries temporelles. Il est très sensible à la structure temporelle des interactions et à leurs tendances non linéaires. Il peut traiter une grande variété de données, permettant ainsi de quantifier les interactions entre les systèmes dans un large éventail de modalités [67].

Le troisième tableau IV.3 représente les différents paramètres de la récurrence plot croisée CRQA calculés à partir du diagramme de CRP entre le courant de fuite et la tension appliquée pour différentes valeurs de NSDD. Ces paramètres décrivent la similarité entre la forme d'onde du courant de fuite et celle de la tension appliquée. Plusieurs paramètres ont été suggérés pour articuler la structure de la coordination entre ces deux signaux. Nous avons calculé ces paramètres justes pour le cas d'une couche de pollution uniforme à cause de la dépendance entre le signal du courant de fuite et la tension appliquée. Le taux de récurrence croisé (RR), révèle la probabilité d'apparition d'états similaires dans les deux systèmes avec

un retard donné t . Une forte densité de points de récurrence dans une diagonale donne une valeur élevée de RR. C'est le cas des systèmes dont les trajectoires visitent souvent les mêmes régions d'espace de phase.

Les structures diagonales représentent les périodes dans une série temporelle qui suivent des trajectoires similaires dans leur évolution temporelle à celles d'une autre série temporelle, lorsqu'elles sont alignées ou décalées dans le temps. Plus les deux systèmes sont étroitement couplés, en termes de partage des mêmes chemins, plus les récurrences seront organisées en diagonales. La mesure qui capture le taux de points de récurrence formant des lignes diagonales est appelée déterminisme (DET) de l'interaction entre les deux séries temporelles. Il est également possible de mesurer la complexité de la similarité entre les systèmes (entropie ou ENTR), si les lignes diagonales ont tendance à avoir la même longueur, l'initiation est très régulière (faible ENTR), sinon l'accord est complexe (haute ENTR).

Les paramètres RR et Lmax calculés à partir de diagramme CRP du courant de fuite et de la tension appliquée augmentent avec l'augmentation de la valeur de NSDD, indiquant l'augmentation de la similarité entre la forme d'onde du courant de fuite et celle de la tension appliquée. Les valeurs de RR et Lmax sont très faibles pour les cas propre et de faibles NSDD (0.01 et 0.02 g/cm²), ceci montre une non-similarité entre le signal du courant de fuite et celui de la tension appliquée. Pour les valeurs de NSDD plus importantes (0.03 et 0.04 g/cm²), la forme d'onde du courant de fuite est similaire à celle de la tension appliquée, les valeurs de RR et de Lmax pour ces cas sont très importantes.

L'entropie ENTR augmente avec l'augmentation de la valeur de NSDD, ce qui signifie que les deux signaux ont tendance à avoir la même complexité. Dans ce cas, les signaux du courant de fuite et de la tension appliquée ont tendance à avoir la même forme sinusoïdale.

Tableau IV.3 différents paramètres de CRQ pour le cas non-uniforme

NSDD	RR	DET	LAM	Ldmoy	Lvmoy	Ldmax	Lvmax	ENTR
propre	0.081	0.991	0.995	68	143	676	1310	4.53
0.01	0.087	0.99	0.999	79.83	235	715	1166	4.55
0.02	0.084	0.992	0.996	79.8	160	1032	1284	4.36
0.03	0.14	0.997	0.997	189	304	12418	1316	4.94
0.04	0.15	0.998	0.999	227.5	399	12418	1306	5.25

IV-10-3 Application de RQA sur les diagrammes de RP des composantes hautes fréquences :

Pour le cas d'une couche de pollution non-uniforme nous avons calculé les paramètres de RQA des diagrammes de RP des composantes hautes fréquences (D1) pour différentes largeurs et positions de la couche polluée. L'application de la récurrence plot sur les composantes est en effet, étudiée par plusieurs chercheurs pour suivre le phénomène du contournement ainsi que l'état surfacique de l'isolateur [72-74]

Le tableau IV.4 représente les différents paramètres de RQA tirés des diagrammes de RP des composantes hautes fréquences pour différentes configurations de pollution (largeurs et positions de la couche polluée). Nous constatons l'augmentation de ces paramètres avec l'augmentation des largeurs des couches polluées pour chaque configuration de la pollution. Nous commençons par étudier le paramètre RR (Récurent Rate) qui indique la densité des points de récurrence sur les cartes RP. Ils sont très faibles pour des largeurs de la couche polluée de 5 cm, 10 cm et 15 cm où ils ne dépassent pas la valeur de 5% pour chacune de ces configurations. Ces largeurs sont caractérisées par une faible activité des décharges électriques. Les valeurs de (RR) sont plus importantes pour les largeurs de la couche polluée de 20 et 25 cm. Elles sont proches de la valeur de 50%. Ces largeurs sont caractérisées par une intense activité des décharges électriques pour chacune de ces deux configurations. Les valeurs RR sont plus importantes pour les couches polluées situées du côté électrodes haute tension et terre pour les largeurs dépassant 15 cm que lorsqu'elles sont situées au milieu.

Le paramètre DET étudie le déterminisme des signaux (systèmes stochastiques, chaotiques et périodiques). En effet, les valeurs basses du DET correspondent aux faibles largeurs de la couche de pollution de 5 cm, 10 cm et 15 cm. Chaque configuration indique un comportement dynamique stochastique du signal des composantes hautes fréquences (DET ne dépasse pas la valeur de 30%). Pour les largeurs de 20 cm et 25 cm, la valeur de DET augmente significativement et devient proche de 100% (environ de 80 % pour 20 cm et 95 % pour la largeur de 25 cm) indiquant la périodicité des composantes hautes fréquences, l'activité des décharges électriques se stabilise pour chaque période de la tension appliquée.

On voit aussi que les longueurs maximale et moyenne des lignes diagonales et verticale/horizontale, augmentent avec l'augmentation de la largeur de la couche de pollution pour chaque configuration. Ces paramètres peuvent donner des informations sur la taille des rectangles des points récurrents, donc donner aussi l'information sur la largeur et la position de la couche polluée. Les couches de pollution situées côté HT et côté terre sont caractérisées par de larges rectangles ($L_{mx} = 1000$) ; la couche de pollution située au milieu est caractérisée par plusieurs rectangles de de largeur $L_{mx} = 500$.

Le paramètre ENTR donne les informations sur la distribution la longueur des lignes diagonales sur la structure de RP. Autrement dit, toutes les longueurs de lignes diagonales (nombres entiers) du RP sont réparties dans un histogramme à partir duquel les probabilités non nulles $P(l)$ sont calculées et combinées pour obtenir l'ENTR. La valeur de ENTR peut aller de 0 (pas de complexité) à ENTRmax (la complexité maximale en fonction du nombre de cases non nulles, N) [67]. La valeur d'ENTR augmente avec l'augmentation de la largeur de la couche de pollution.

Le paramètre LAM, désigné par l'empilement de plusieurs trajectoires parallèles sous forme de lamina, à partir de stationnarités dans la série temporelle peut aller de 0% (pas de laminarité) à 100% (laminarité complète). La valeur de LAM augmente avec l'augmentation de la largeur de la couche de pollution pour chaque configuration. Pour les faibles largeurs (5, 10 et 15 cm), la valeur de LAM est faible (ne dépasse pas 40 %), pour la largeur de 20 cm, la valeur de LAM dépasse 50 %, et pour 25 cm la valeur de LAM est proche de la valeur 100% ce qui indique la laminarité complète du signal du détail D1.

Tableau IV.4 différents paramètres de RP appliquée sur les composantes hautes fréquences pour le cas non-uniforme.

	Largeur (cm)	RR	DET	LAM	Ldmoy	Lvmoy	Ldmax	Lvmax	ENTR
Coté haute tension	5	0.0022	0.124	0.258	3.780	3.22	11	14	1.126
	10	0.0066	0.1003	0.265	2.875	2.893	11	16	0.9674
	15	0.0235	0.2431	0.475	3.54	4.252	51	38	1.635
	20	0.128	0.392	0.618	3.752	4.714	120	99	1.76
	25	0.369	0.870	0.932	14.45	20.92	1216	1239	2.538
Coté terre	5	0.0078	0.0943	0.252	2.995	3.282	35	39	1.023
	10	0.009	0.194	0.3985	3.363	4.440	32	32	1.1706
	15	0.0121	0.138	0.333	2.960	3.631	46	49	1.155
	20	0.106	0.473	0.681	5.095	7.824	413	416	2.018
	25	0.354	0.881	0.939	12.51	18.18	924	927	2.8
Au milieu	5	0.008	0.195	0.400	3.112	3.755	37	40	1.285
	10	0.0674	0.178	0.372	3.508	4.210	49	49	1.451
	15	0.009	0.213	0.420	3.798	4.935	59	61	1.684
	20	0.085	0.552	0.744	4.294	6.005	135	138	1.935
	25	0.153	0.866	0.931	11.63	17.41	597	597	2.737

IV-11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement de la surface polluée d'un isolateur en se basant sur l'analyse des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée et leurs composantes fréquentielles par la méthode de récurrence plot et la récurrent plot quantification. Les structures topologiques du RP semblent être un excellent outil pour prédire l'état surfacique de l'isolateur et l'évolution des décharges électriques durant le processus de contournement. On a également eu recours à la technique RP et à l'analyse RQA, donnant des informations supplémentaires et une corrélation respectable entre l'activité des décharges électriques et la largeur de la pollution.

Les cartes RP peuvent être utilisées pour détecter la largeur de la bande polluée via la densité de points de récurrence, et la position de la bande polluée peut être identifiée à l'aide de l'emplacement et du nombre de bandes colorées dans les cartes RP. De plus, les indicateurs RQA (RR, DET et ENTR) ont été utilisés efficacement pour caractériser les cartes de RP obtenues. De tels résultats pourraient être utiles pour les informations sur la largeur, la position et le processus de décharge.



Conclusion générale

Le présent travail a pour objet d'étudier l'impact de la configuration et de la sévérité de la couche de pollution sur le comportement d'un modèle plan sous pollution désertique. Nous nous sommes intéressés à l'effet de la quantité de sable en termes de densité de dépôt non-soluble (NSDD) et de la largeur de la couche polluée sur le processus du contournement et le comportement électrique de l'isolateur. Pour cela, nous avons procédé en premier lieu à l'enregistrement des vidéos du contournement, cela nous a permis d'examiner visuellement le développement ainsi que l'évolution des arcs en fonction de la tension appliquée.

Dans la première partie, nous avons présenté les caractéristiques de la pollution désertique à partir des résultats effectués dans le domaine par d'autres chercheurs. Ces résultats concernent la formation de la couche de pollution dans les régions désertiques formées sur les surfaces des isolateurs pendant les périodes des tempêtes de sables. L'analyse chimique et physique de la couche de pollution montre que juste les grains de taille fine qui s'accumulent sur la surface de l'isolateur, ces grains sont caractérisés par un contenu important des sels solubles comparé aux grains de taille grossière. L'humidification de cette couche de pollution peut provoquer la formation des phénomènes électriques qui commencent par l'apparition du courant de fuite, d'arcs partiels qui peuvent évoluer jusqu'au contournement total.

Dans la deuxième partie, nous présentons les résultats expérimentaux concernant le processus du contournement et les formes d'ondes du courant de fuite ainsi que les tensions appliquées mesurées pour chaque configuration. Ces mesures servent simultanément à évaluer les amplitudes de ces deux paramètres (tension et courant) ainsi qu'à l'enregistrement de leurs formes d'ondes. Les résultats obtenus des essais ont montré que la valeur de NSDD et la largeur de la bande polluante influent fortement sur les différentes étapes conduisant au contournement. Toutefois, la position de la couche polluante influe sur le chemin des arcs électriques sur la surface de l'isolateur ainsi que sur les impulsions de l'onde du courant de fuite.

Par ailleurs, nous exploitons ces résultats expérimentaux afin de prédire l'activité des décharges électriques et la sévérité de pollution en se basant sur trois méthodes de traitement de signal à savoir : la Transformée de Fourier, la transformée en ondelettes et la récurrence plot. Ces méthodes ont été appliquées sur les signaux du courant de fuite et de la tension appliquée. Nos résultats d'investigations ont montré que :

1- Le contournement se fait directement sans apparition d'arcs au préalable, pour les cas propre, de faibles valeurs de NSDD et pour les largeurs de la couche polluée inférieures à 15 cm. Pour ce dernier cas, le contournement s'est effectué plutôt dans l'air du fait qu'il est moins rigide que le verre. Pour les autres cas, pour les NSDD et les largeurs de la couche polluée supérieures à 15 cm, le contournement se fait par plusieurs étapes. Le contournement est l'ultime conséquence de l'initiation et du développement des décharges électriques suite à une augmentation progressive de la tension appliquée au modèle expérimental uniformément pollué et humidifié.

Pour le cas uniforme, l'initiation et l'élongation des arcs s'effectuent à partir des deux électrodes HT et Terre. Pour le cas non-uniforme, l'initiation des arcs se fait d'abord sur la bande propre, pour continuer à s'allonger au niveau des bandes polluantes.

La valeur efficace du courant de fuite (RMS) est un paramètre crucial pour donner les informations initiales sur le niveau de la pollution de la surface de l'isolateur et définir la conductivité surfacique de la pollution. Pour le cas de la pollution désertique, le RMS du courant de fuite augmente avec la tension appliquée et la quantité de sable distribuée sur la surface de l'isolateur (NSDD). En outre, le RMS du LC dans le cas d'un sable à grains fins est supérieur à celui des grains de sable grossiers, ce qui montre que la conductivité des grains fins de sable est importante, et le RMS du LC pour la région de Oued Souf est importante en comparant avec celle de la région de NAAMA.

Les formes d'ondes du courant de fuite enregistrées sont très bien corrélées avec la configuration de la pollution. La forme d'onde du courant de fuite est très déformée pour le cas propre et pour les faibles valeurs de NSDD à cause de l'effet capacitif de l'isolateur. Pour le cas résistif, la forme d'onde du courant de fuite devient similaire à celle de la tension appliquée.

Dans le cas où il y a des décharges électriques sur la surface de l'isolateur, la forme d'onde du courant de fuite est accompagnée par des impulsions. L'intensité et le positionnement de ces impulsions sur le courant de fuite dépend de la largeur et de la position de la couche polluée. Les impulsions apparaissent sur l'alternance négative du courant de fuite dans le cas où la pollution est située du côté HT, sur l'alternance positive pour le cas où la couche polluée est située du côté terre, et au niveau des deux alternances du courant de fuite pour la couche de pollution située au milieu.

La technique de FFT a été utilisée pour extraire les contenus harmoniques dans le signal de courant de fuite. Il a été montré que les harmoniques d'ordres impaires ont été générées. Pour les cas d'isolateur propre ou avec une faible NSDD de la couche de pollution, le comportement de l'isolateur est fortement capacitif. Dans ces cas, le spectre fréquentiel du courant de fuite montre que l'amplitude du cinquième harmonique est le plus significatif. Pour le comportement hautement résistif, les amplitudes des harmoniques sont négligeables devant l'amplitude de la composante fondamentale.

Pour le cas non-uniforme, le spectre fréquentiel montre l'existence d'harmoniques impaires et l'apparition d'autres harmoniques paires. Pour la couche de pollution située du côté HT et du côté terre, nous constatons la présence de deux harmoniques de cinquième et de septième ordres, et l'absence de septième harmonique pour la couche de pollution située au milieu. Dans le cas de la présence des arcs sur la surface de l'isolateur, il y a l'apparition d'autres harmoniques de troisième et deuxième ordres pour les couches de pollution situées du côté HT ou du côté terre et uniquement la troisième harmonique pour la couche de pollution située au milieu.

Dans la technique DWT donnant les caractéristiques temps-fréquence de différents composants (détails), la STD est étudiée pour trouver les détails les plus significatifs permettant de surveiller la surface isolante. La représentation STD des détails D_{10} et D_{11} caractérisés par des fréquences basses, montre une bonne corrélation avec l'augmentation de NSDD dans la configuration de pollution uniforme. En outre, le détail D_{11} d'une part, et les détails hautes fréquences D_1 à D_6 , d'autre part, donnent une corrélation avec l'augmentation de la largeur de la couche de pollution, puis une corrélation avec les activités de décharges électriques dans une configuration de pollution non uniforme.

La récurrence plot technique et la récurrence plot quantification appliquée aux signaux du courant de fuite et les composantes fréquentielles pour donner des informations supplémentaires sur l'état surfacique de l'isolateur.

Les diagrammes du récurrent plot appliqués au signal du courant de fuite pour le cas uniforme donne des informations sur la forme d'onde du courant de fuite et montrent les différentes déformations sur le signal du courant de fuite. Pour le cas propre et de faible valeur de NSDD (0,0.01, et 0.02 g/cm²), les diagrammes de récurrence plot montrent que les lignes diagonales composées de plusieurs lignes courtes qui indiquent une distorsion importante du courant de fuite due à l'effet capacitif de l'isolateur. Pour les cas où la valeur de NSDD est importante, le diagramme de RP consiste en lignes parallèles et orthogonales, la structure du RP dans ces cas est similaire à celle du signal sinusoïdal ce qui indique un comportement hautement résistif de l'isolateur. Dans le cas où les présences des points isolés, la structure de RP montre la présence d' impulsions des décharges partielles sur le signal du courant de fuite.

Pour comprendre l'évolution et le positionnement des décharges électriques sur la surface de l'isolateur pollué, la méthode de récurrence plot a été appliquée sur les détails de hautes fréquences. Ces détails donnent une corrélation significative avec l'intensité et la position des arcs électriques. Les faibles densités des points récurrents indiquent la présence de faibles décharges électriques sur la surface de l'isolateur. Pour le cas où il y a des arcs électriques sur l' isolateur, la structure de RP des composantes hautes fréquences est caractérisée par des densités intenses des points récurrents et par de larges bandes blanches indiquant la présence d'une importante fluctuation. En outre, la position et le nombre des bandes blanches indiquent la position de l'intensité des décharges électriques.



Bibliographie

- [1] F. Rizk, A. El-Arabaty, and A. El-Sarky, "Laboratory and field experiences with EHV transmission line insulators in the desert," IEEE Trans. Pwr. App. Sys., vol. PAS-94, no.5, pp 1770-1776, 1975.
- [2] A. El-Sulaiman and M. I. Qureshi, "Effect of contamination on the leakage current of inland desert insulators", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. EI-19, no. 4, pp. 332-339, August. 1984.
- [3] M. Awad, M. Said, A. Arafa, and A. Sadeek, "Effect of sandstorm with charged particles on the flashover and breakdown of transmission lines," CIGRE, pp. 1-5, 2002. Mag., Vol. 5, No. 6, pp. 22-27, 1989.
- [4] A. Arafa, and A. Nosserir, "Effect of severe sandstorm on the performance of the polymeric insulators," CIGRE, D1-104, 2012.
- [5] M. El-Shahat, and H. Anis, "Risk assessment of the desert pollution on composite high voltage insulators," J. Advanced Research, vol. 5, issue 5, pp 569-576, 2014.
- [6] X. DUCOURET, "Matériels des lignes aériennes" ; Septembre 2008, France.
- [7] A. MEKHALDI, "Étude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Décembre 1999, Alger, Algérie.
- [8] S. BOUAZABIA, T. CHIKHAOUI, "Méthode d'essais sur des isolateurs pollués dans les conditions désertiques", Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 1988, Alger, Algérie.
- [9] A. LECHEHEB, "Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée", Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 1999, Alger, Algérie.
- [10] M. TEGUAR, "Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro-géométriques", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Avril 2003, Alger, Algérie.
- [11] B. MOULA, "Diagnostic des isolateurs de haute tension sous tension alternative 50Hz", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Décembre 2014, Alger, Algérie.
- [12] 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 Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 17, No. 4, pp. 1284-1297, 2010.
- [13] T. Suda , "Frequency Characteristics of Leakage Current Wavefo of an Artificially Polluted Suspension Insulator," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 8, no. 4, pp, 705-709, 2001.
- [14] S. Chandrasekar, C. Kalaivanan, A. Cavallini, and G. Montanari, "Investigations on leakage current and phase shift characteristics of porcelain and polymeric insulator under

- contaminated condition,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 16, no. 2, pp. 574-583, 2009.
- [15] A. K. Chaou, A. Mekhaldi and M. Tegar, "Recurrence quantification analysis as a novel LC feature extraction technique for the classification of pollution severity on HV insulator model,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol.22, no. 6, pp. 3376-3384, 2015.
- [16] Y. Liu, B. X. Du. “Recurrent Plot Analysis of Leakage Current on Flashover Performance of Rime-iced Composite Insulator,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 17, no. 2, pp. 465- 472, 2010.
- [17] F.Rizk, G.N.Trinh, “High voltage engineering”, Taylor & Francis Group, International Standard Book Number-13: 978-1-4665-1377-8 (eBook - PDF).
- [18] M.A.B.EL-Koshairy, A.E.Abdullah, “The performance of high voltage transmission lines epoxy resin insulators under desert pollution conditions”, CIGRE, international conference on large high voltage electric systems, 1978.
- [19] J.S.T. Looms, “Insulators for High Voltages”, IET Power and Energy Series, Volume 7, 2006.
- [20] K.H. Schneider, “The measurement of Site Pollution Severity and Its Application to Insulator Dimensioning for a. c. Systems”, CIGRE, ELECTRA, N 64,pp 101-116.
- [21] C.N. Richards, J.D. Renowden “Development of a remote insulator contamination monitoring system”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1,pp389-397 January 1997.
- [22] A. Akbar, R. Houlgate “insulator pollution monitoring”, ELT-152-2, ÉLECTRA N° 152, FÉVRIER 1994.
- [23] Masoud. Farzaneh, William a. Chisholm “insulators for icing and polluted environments”, IEEE Book, ISBN 978-0-470-28234-2.
- [24] William A. Chisholm “Insulator Leakage Distance Dimensioning in Areas of Winter Contamination using Cold-fog Test Results”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol.14, no. 6, pp. 332–339, 2007.
- [25] M.A.B.EL-Koshairy, F.Rizk, “Performance of EHV transmission line insulators under desert pollution conditions”, CIGRE, international conference on large high voltage electric systems, 1970.
- [26] F. Rizk, A. El-Arabaty, and A. El-Sarky, “Laboratory and field experiences with EHV transmission line insulators in the desert,” IEEE Trans. Pwr. App. Sys., vol. PAS-94, no.5, pp 1770-1776, 1975.
- [27] D.A. SWIFT, J.P. REYNDERS, C.S. ENGELBRECHT “polluted insulators: a review of current knowledge”, CIGRE, Task Force 33.13.01 (formerly 33.04.01).
- [28] Hall, J.F. and T.P. Mauldin. Wind tunnel studies of the insulation contamination process. IEEE Transactions on Electrical Insulation EI-16(3): 180–188, June 1981.

- [29] D.A. Swift, J.P. Reynders “Outdoor insulation in polluted conditions: Guidelines for selection and dimensioning”, CIGRE, ELECTRA.
- [30] Standard for High-Voltage Testing Techniques, IEEE Std. 4, 2013.
- [31] Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions, IEC/TS 60815-1, 2008.
- [32] High-voltage test techniques, General definitions, IEC 60060-1, 2010.
- [33] A. Mohamed, “Performance d’un Isolateur de Haute Tension sous Pollution Désertique soumis à une Tension Alternative 50Hz”, thèse master ENP, 2017.
- [34] B. He, H. Jin, N. Gao, B. Chen and Z. Peng “Characteristics of Dust Deposition on Suspended Insulators during Simulated Sandstorm”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, No. 1, pp100-105; February 2010.
- [35] D. Zhang, Z. Zhang “Study on the Flashover Performance of Various Types of Insulators Polluted by Nitrates”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 24, No. 1; pp. 167-174.2017.
- [36] F. Rizk, G. Trinh “high voltage engineering”, International Standard Book, Taylor & Francis Group, pp. 479.
- [37] O. E. Gouda, “Experimental Techniques to Simulate Naturally Polluted High Voltage Transmission Line Insulators”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 21, No. 5; pp. 2199- 2205, 2014.
- [38] H.Streubel, “The influence of non-uniform contamination on the flashover voltage of insulators”, 4th international symposium on high voltage engineering, report 46-10,1983 Grees.
- [39] Z.Zhang, J.You, D.Dongdong “AC flashover performance of various types of insulators under Fan-shaped Non-uniform pollution”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 23, No. 3; pp. 1760- 1768, 2016.
- [40] A. Beroual and N.Dhahbi-Megriche “Dynamic Model of Discharge Propagation on Discontinuous Pollution Layers Under AC Voltages and Experimental Validation”. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; 2002.
- [41] A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia and A.Beroual “Flashover of Discontinuous Pollution Layer on HV Insulators,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 6, no. 6, pp. 900-906, 1999.
- [42] A. Mekhaldi, “étude du développement d'un arcelectrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution desertique” these de magister,1990.
- [43] M. Famarzi, and M. Mirzaire, “Diagnosis of porcelain and glass insulators conditions using phase angle index based on experimental tests,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, no. 3, pp. 1460- 1466, 2016.
- [44] D. Maadjoudj, A. Mekhaldi and M. Tegar, “Flashover Process and Leakage Current Characteristics of Insulator Model under Desert Pollution”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 25, no. 6, pp. 2296–2304, Dec. 2018.

- [45] “Multiresolution Signal Decomposition, Transforms, Subbands, and Wavelets”, Second Edition, Series Editor T, Russell Hsing.
- [46] INGRID.DAUBECHIES “Ten Lectures on Wavelets” , society for industrial and applied mathematics, PHILADELPHIA, PENNSYLVANIA 1992.
- [47] “a wavelet tour of signal processing”
- [48] G.Wang, S. Kim, G. Kil “Optimization of Wavelet and Thresholding for Partial Discharge Detection under HVDC”.
- [49] A. K. Chaou, A. Mekhaldi and M. Tegar, "Recurrence quantification analysis as a novel LC feature extraction technique for the classification of pollution severity on HV insulator model," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol.22, no. 6, pp. 3376-3384, 2015.
- [50] Y. Liu, B. X. Du. “Recurrent Plot Analysis of Leakage Current on Flashover Performance of Rime-iced Composite Insulator,” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 17, no. 2, pp. 465- 472, 2010.
- [51] N. Megriche, A. Beroual, “Time-frequency analyses of leakage current wavefo and non-uniform polluted conditions,” IET Science, Measurement & Technology, Vol. 9, No. 8, pp. 945-954, 2015.
- [52] A. Bouzida, O. Touhami, R. Ibtouen “Fault Diagnosis in Industrial Induction Machines through Discrete Wavelet Transform” IEEE Trans, vol. 58, no. 9, pp, 4385- 4395, 2011.
- [53] X.Jiang, Y.Shi, C.Sun and Z. Zhang, “Evaluating the Safety Condition of Porcelain Insulators by the Time and Frequency Characteristics of LC Based on Artificial Pollution Tests”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.,vol. 17, no. 2, pp, 481- 489, 2001.
- [54] Norbert Marwan , Michael Riley “Translational Recurrences: From Mathematical Theory to Real-World Applications”.
- [55] J.-P. Eckmann S.oliffson and D. Ruelle “Recurrence Plots of Dynamical Systems”, Europhys. Lett., 4 (91, pp. 973-977 (1987).
- [56] Marwan, M. C. Romano, M. Thiel, J. Kurths, “Recurrence plots for the analysis of complex systems” Physics Report (438), pp. 237– 329, 2007.
- [57] C. L. WEBBER, JR, AND J. P. ZBILUT “Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies”, the American Physiological Society, PhyJ. Appl. Physiol. 76(2): 965-973, 1994.
- [58] Patrick F. Coutinho, et al “Blind Equalization Based on Complexity Measures: Is It Feasible?.”
- [59] N. Marwan, J.Kurths ‘Nonlinear analysis of bivariate data with cross recurrence plots’.
- [60] C.Mocenni, A.Facchini, A.Vicino “Comparison of recurrence quantification methods for the analysis of temporal and spatial chaos”, Mathematical and Computer Modelling 53 (2011) 1535–1545.
- [61] N. Marwan, M. Thiel, and N. R. Nowaczyk “Cross recurrence plot based synchronization of time series”, Nonlinear Processes in Geophysics (2002) 9: 325–331.

- [62] Y. Li Yong S. Caihong Li “Selection of Parameters for Phase Space Reconstuction of Chaotic Time Series”, conferece IEEE, 2010.
- [63] C. Wei-Dong, Q. Yi-Qinget and Y. Bing-Ru, "Determination of phase-space reconstruction parameters of chaotic time series", *Kybernetika*, Vol. 44, issue 4, pp. 557-570, 2008.
- [64] B. X. Du and D. S. Dong “Recurrence Plot Analysis of Discharge Currents in Tracking Tests of Gamma-ray Irradiated Polymers”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 15, No. 4; pp 974 – 981. August 2008.
- [65] H. Yang, L. Pang, Z. Li, Q. G. Zhang, X. L. Yang, Q. J. Tang and J. Zhou, “Characterization of Pre-Flashover Behavior Based on Leakage Current along Suspension Insulator Strings Covered with Ice”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 22, No. 2, pp. 941-950, 2015.
- [66] B. X. Du, H. Xu and Y. Liu “Effects of Wind Condition on Hydrophobicity Behavior of Silicone Rubber in Corona Discharge Environment”. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 23, No. 1;pp 385-393; February 2016.
- [67] C.WEBBER. “Recurrence quantifications: feature extractions from recurrence plots”, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 17, No. 10 (2007) 3467–3475.
- [68] Charles L. Webber, Jr. Norbert Marwan “Recurrence Quantification Analysis”, Springer.
- [69] K. Chaou “Techniques de diagnostic et de classification de l'état de surface d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz”, thèse de doctorat 2015, ENP.
- [70] M. Thiel, M. C.Romano, Jürgen Kurths “How much information is contained in a recurrence plot?”, *Physics Letters A* 330 (2004) 343–349.
- [71] Y. Liu and B.X. Du, “Recurrent Plot Analysis of Leakage Current on Flashover Performance of Rime-iced Composite Insulator,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 2, pp. 465–472, Apr. 2010.
- [72] Y. Liu, M. Farzaneh and B. X. Du “Nonlinear Characteristics of Leakage Current for Flashover Monitoring of Ice-covered Suspension Insulators”. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* Vol. 23, No. 3; pp. 1242-.1250, June 2016.
- [73] G. Jain, R. Ghosh and S. Dalai “Identification of Power System Transients using Recurrence Plot Analysis”, *ICPDEN* 2015.
- [74] S. Ramdani, F. Bouchara, and A. Lesne “Probabilistic analysis of recurrence plots generated by fractional Gaussian noise”, *American Institute of Physics*, 30 August 2018.
- [75] F. Takens, "Detecting strange attractors in turbulence", In *Lecture notes in mathematics*, Dynamical systems and turbulence, Vol. 898, Berlin, page 366, 1981.
- [76] J.M. Nichols, S.T. Trickey and M. Seaver, "Damage detection using multivariate recurrence quantification analysis", *Mech. Syst. Signal Process.* 20 (2) (2006), pp. 421–437.
- [77] N. Marwan, "Encounters with neighbours: current development of concepts based on recurrence plots and their applications". Ph.D. Thesis, University Potsdam, 2003.

- [78] G.M. Mindlin, R.Gilmore, "Topological analysis and synthesis of chaotic time series", *Physica D*, Vol. 58, pp. 229-242, 1992.
- [79] Norbert Marwan, Jürgen Kurths, "Nonlinear analysis of bivariate data with cross recurrence plots", Potsdam 14415, Germany. 24 October 2018.
- [80] C. WEBBER, JR., MICHAEL A. SCHMIDT, AND JOHN M. WALSH "Influence of isometric loading on biceps EMG dynamics as assessed by linear and nonlinear tools". 0161-7567/95, 1995 the American Physiological Society.

Travaux effectués dans le cadre de cette thèse de Doctorat D/LMD

PUBLICATION INTERNATIONALE

D. Maadjoudj, A. Mekhaldi and M. Tegar ‘Flashover Process and Leakage Current Characteristics of Insulator Model under Desert Pollution’. Published in: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 6; pp 2296-2304 **December 2018. DOI: 10.1109/TDEI.2018.007112**

CONFERENCE INTERNATIONALE

D. Maadjoudj, A. Mekhaldi and M. Tegar ‘Recurrent Plot and Quantification of Leakage Current for Monitoring the Insulator Surface State under Nonuniform Desertic Pollution’, **(ICEE 2017) Boumerdes (Algeria).**

D. Maadjoudj, A. Mekhaldi and M. Tegar ‘Frequency analysis and Recurrent plot of the leakage current to monitoring the insulator surface’, **(ICD 2018) Budapest (Hongrie).**

D. Maadjoudj, A. Mekhaldi and M. Tegar ‘Wavelet transform of the leakage current to monitoring the insulator surface under non-uniform desert pollution’ **(CISTEM 2018) Alger.**