

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

LABORATOIRE DE HAUTE TENSION

Mémoire du projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Thème :

*Caractérisation de l'état de
surface d'un isolateur pollué
sous tension alternative 50Hz.*

Proposé par :

Pr.A.MEKHALDI

Etudié par :

Nassim BENMESSAOUD

Habib Adel BENBRAHIM

- Promotion Juin 2010 -

REMERCIEMENTS

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

Arrivé au terme de notre travail, nous tenons à remercier notre promoteur Mr. Abdelouahab Mekhaldi, professeur et membre de la IEEE pour ses précieux conseils, son suivi permanent, ainsi que ses qualités humaines.

Nous remercions aussi Mr. A.Boubakeur et à Mr. M.Teguar pour leurs constante présence au sein du laboratoire de Haute Tension, ainsi que pour leur soutien moral.

Un grand merci à Mr. Moula et Mlle. Bournane qui nous ont beaucoup aidé à avancé durant nos manipulations effectuées au laboratoire.

Nos remerciements vont également aux enseignants du département du génie électrique et des sciences fondamentales, qui ont contribué à notre formation d'ingénieur.

Enfin, nous remercions les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre modeste travail.

Dédicaces

A mes très chers parents dont l'amour, le soutien et l'encouragement sont l'essence de ma réussite

A mes sœurs : Yasmina et Ratiba

A ma grand-mère bien-aimée

A toute ma famille

A mon binôme et frère Nassim

A mes chers amis : Lyes « grand frère », Amine «milker», Amine « zigic », Raouf « général », Karim, Titou, Imad « bez », Chakib«10da », bob rabi ydjiblou chfa , Zakari « mokh », Salim, Nassim, Lepra, et sans oublier sara « kavia », nes « blonda », imene, sab, sama et faiza

A ge3 wled houmti et mes amis de l'ini « reda, Abdelah, Kadi, djalil et toute l'équipe »

A toute la promo ENP 2010 et biensur les Electrotasse en particulier

Habib Adel

A mes très chers parents dont l'amour, le soutien et
l'encouragement sont l'essence de ma réussite

A mes sœurs : Lyssia et Manel

A mon frère Redha

A mes deux tantes

A toute la famille BENMESSAOUD et MESBAH

A mon cher ami et binôme Habib

A mes cher amis : Chihab et Sofia ...

A toute la promo ENP 2010

A mes amis

Nassim

ملخص:

في هذا العمل قمنا بدراسة شدة التلوث تحت تيار متناوب ذو توتر 50 هرتز على نموذج سطحي يمثل العازل PSV 120B ولغذا الغرض أجريت عدة تجارب لتلوث المنتظم وغير المنتظم بالخبر عالي التوتر للمدرسة الوطنية العليا للهندسة والتقنيات لتمييز حالة سطح النموذج اعتمادا على إشارات كل من تيار التسرب والتوتر المطبق. أولا ركزنا على توتر الإحاطة، سعة تيار التسرب، فرق الصفحة بين التوتر و تيار التسرب وتطور عدد وطول التفريقات المتوازية. ثانيا قمنا بعرض نتائج معالحة إشارة كل من تيار التسرب والتوتر بواسطة FFT و THD لتقدير شدة التلوث. وأخيرا طبقت تقنية التحليل بالويجات على كل من إشارة التوتر وتيار التسرب باستعمال CWT و DWT على التسلسل لتشخيص حالة السطح.

الكلمات المفتاحية: التلوث المنتظم، التلوث غير المنتظم، نموذج سطحي، تيار التسرب، توتر الإحاطة، فرق الصفحة، التفريقات المتوازية، التحويل بالويجات، THD , FFT

Résumé :

Dans le présent travail, l'étude de la sévérité de pollution est effectuée en tension alternative 50 Hz sur un modèle plan qui simule l'isolateur standard PSV 120B. Pour cela, plusieurs essais en pollution uniforme et non-uniforme sont accomplis au Laboratoire de Haute Tension de L'ENSP pour caractériser l'état de surface du modèle à travers les signaux du courant de fuite et de la tension appliquée. En premier lieu, nous nous intéressons à la tension de contournement, à l'amplitude du courant de fuite et au déphasage courant - tension. En deuxième lieu, nous présentons les résultats du traitement des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée par l'analyse spectrale et le taux de distorsion harmonique pour évaluer la sévérité de pollution. En fin, la technique d'analyse par les ondelettes est employée sur la tension à travers la CWT et sur le courant de fuite en utilisant la DWT, afin d'estimer l'état de surface du modèle.

Mots-clés : Pollution uniforme, pollution non-uniforme, modèle plan, courant de fuite, tension de contournement, déphasage, transformée en ondelette, Analyse spectrale, taux de distorsion harmonique.

Abstract:

In this work, pollution severity under 50 Hz applied voltage is studied on plan model which simulates PSV 120B outdoor insulator. Many tests at High Voltage Laboratory of the ENSP are carried out in uniform and non-uniform pollution in order to characterize conditions of insulating surface, by using leakage current and applied voltage waveforms. First, we study flashover voltage, leakage current magnitude, phase angle between leakage current and applied voltage and parallel discharges length and number evolution according to applied voltage. Secondly, we present the signal processing results of leakage current and applied voltage waveforms by using spectral analyses and the total harmonic distortion to evaluate pollution severity. Finally, Continuous Wavelet Transform is employed on voltage waveform and Discrete Wavelet Transform is adopted to analyze leakage current waveform for estimating the surface condition.

Key-words : Uniform pollution, non-uniform pollution, plan model, leakage current, flashover voltage, phase angle, wavelet transform, spectral analyses, total harmonic distortion.

Liste des symboles

CEI: Commission Electrotechnique Internationale.

DAS: Data Acquisition System.

db : Daubechies.

D : Diamètre de la particule de quartz.

DSO: Digital Storage Oscilloscope.

DWT: Discrete wavelet transform.

E : Energie totale d'un signal.

ESDD: Equivalent salt deposit density

EVA: Ethylene Vinyl Acetate.

fo : Fréquence du signal X(n).

FFT: Fast Fourier Transform.

HF : High Frequency.

IDWT : Transformée en ondelette inverse.

ITFD : Transformée de Fourier inverse à temps discret.

$K_{5/3}$: Rapport des harmoniques 3 et 5 du courant de fuite.

LC: Leakage current.

LF : Low Frequency.

PC: Personal Computer.

PU: Protection Unit.

P : Puissance moyenne d'un signal.

RP: Recurrent plot (technique graphique récurrente).

RTV: Room Temperature Vulcanized.

r_{xy} : Coefficients de corrélations.

SEM: Scanning Electron Microscopy.

Liste des symboles

SGWT: Second Generation Wavelet Transform.

SiR: Silicone rubber.

s : l'échelle de l'ondelette.

SNR: Signal noise ratio.

$|s(t)|^2$: Densité temporelle d'énergie.

$|S(f)|^2$: Densité spectrale d'énergie.

s_x, s_y : Ecart-types de x et y .

THD: Total Harmonic Distortion.

THD_H: High Total Harmonic Distortion.

THD_L: Low Total Harmonic Distortion.

u : la translation de l'ondelette.

$w(n)$: Fonction de fenêtrage.

$X_a(nT)$: Signal a la sortie du filtre anti-repliement.

$X_e(n)$: Signal échantillonné pour n .

$X(f)$: Transformée de Fourier du signal $x(t)$.

XRD: X-Ray-Diffraction.

$|x(t)|$: Module du signal $x(t)$.

σ : Déviation standard.

ξ : Centre de fréquence d'une ondelette.

Ψ : l'ondelette mère.

Sommaire

Introduction générale 1

Chapitre I : Travaux antérieurs sur l'étude de la pollution des isolateurs.

I.1. Introduction.....3

I.2. Synthèse des principaux travaux récents.....3

I.2.1. L'analyse graphique récurrente du courant de fuite sur les performances du contournement des isolateurs composites givrés 3

I.2.2. Distribution du courant de fuite sur la surface d'isolateurs en polymère pollués artificiellement6

I.2.3. Méthode de mesure de la performance des isolateurs basée sur la transformé de fourier du courant de fuite.....9

I.2.4. Utilisation de la SGWT pour le filtrage des signaux de décharges partielles 11

I.2.5. Amélioration de la performance des isolateurs en céramique en plein air dans un environnement très pollué à l'aide de la technique de revêtement en caoutchouc de silicone13

I.2.6. Etude du phénomène d'érosion d'un isolateur SiR exposé aux décharges partielle....17

I.2.7. Etude sur les Harmoniques du Courant de fuite des isolateurs en porcelaine sous pollution..... 19

I.2.8. Caractérisation du procédé d'érosion par les méthodes d'analyses temps-fréquence...22

I.2.9. Etude de la probabilité d'occurrence du contournement des isolateurs composites en utilisant les composants harmoniques du courant de fuite..... 25

I.2.10. Analyse micro-structurale d'isolateurs sains et d'isolateurs en porcelaine soumis a un vieillissement du au champ électrique.....30

Chapitre II : Théories du traitement du signal.

Introduction	32
II.1. Définition d'un signal.	32
II.2. Energie et puissance des signaux.	32
II.2.1. Energie totale d'un signal.	32
II.2.2. Puissance moyenne d'un signal.	33
II.3. Les types de signaux.	33
II.3.1. Les signaux aléatoires.	34
II.3.2. Les signaux déterministes.	34
II.3.2.1. Les signaux à énergie finie.	34
II.3.2.2. Les signaux puissance moyenne finie non-nulle	35
II.4. Transformée de Fourier.	35
Introduction.	35
II.4.1. Définition de la transformée de Fourier.	35
II.4.2. La transformée de Fourier d'un signal continu.	35
II.4.2.1. Conditions d'existence.	36
II.4.2.2. Propriétés.	36
II.4.3. La transformée de Fourier d'un signal discret.	38
II.4.3.1. Conditions d'existence.	40
II.4.3.2. Propriétés.	40
II.4.3.3. La FFT.	41
II.4.4. Echantillonnage.	41
II.4.4.1. Définition de l'échantillonnage.	41
II.4.4.2. Le théorème de Shanon.	42

II.4.5. La technique de distorsion harmonique (THD).	43
Conclusion.	44
II.5. Transformée en ondelettes.	
Introduction.	45
II.5.1. Transformée en ondelettes continue (CWT).	46
II.5.1.1. Définition.	46
II.5.1.2. Expression mathématique.	46
II.5.1.3. Les conditions que doivent satisfaire les fonctions ondelettes.	47
II.5.1.4. Ondelette de Morlet.	48
II.5.1.5. Scalogramme.	50
II.5.1.6. Calcul des coefficients de la CWT.	52
II.5.2. Transformée en ondelette discrète (DWT).	54
II.5.2.1. Définition.	54
II.5.2.2. Expression mathématique.	54
II.5.2.3. Algorithme de décomposition pyramidale.	54
II.5.2.4. Choix de l'ondelette analysante.	56
Conclusion.	57

Chapitre III : Techniques expérimentales.

III.1. Introduction	58
III.2. Dispositif expérimental	58
III.2.1. Circuit d'essais du Laboratoire de l'ENP.....	58
III.2.2. Objet d'essai.....	58
III.3. Le nettoyage du plan.	62

III.4. Préparation des solutions polluantes.....	63
III.5. Méthode de pulvérisation.....	63
III .5.1. Pollution uniforme.....	63
III.5.2. Pollution non-uniforme	64
III.6. Mesure du courant de fuite.	64
III.7. Mesure du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée.	65
III.8. Conclusion.	65

Chapitre IV : Etude du comportement du modèle plan.

IV.1. Introduction.	66
IV.2. Mode opératoire	66
IV.3. Etude de la tension de contournement.....	66
IV.3.1. Identification du système d'électrodes formé par le modèle plan.	66
IV.3.2. Résultats des essais pour le cas de la pollution uniforme.	67
IV.3.3. Résultats des essais pour le cas de la pollution non uniforme ($\gamma_{vol} = 1.2 \text{ mS/cm}$) ...	70
IV.3.3.1. Le contournement final.	70
IV.3.3 .2. Le contournement de la zone propre.	74
IV.4. Etude du courant de fuite.	74
IV.4.1. Résultats des essais pour l'état sec.	75
IV.4.1. Résultats des essais dans le cas de la pollution uniforme.	75
IV.4.2. Résultats des essais dans le cas de la pollution non uniforme ($\gamma_{vol} = 1.2 \text{ mS/cm}$).	77
IV.5. Etude du déphasage (courant de fuite – tension appliquée)	79
IV.5.1. Etude du déphasage pour le cas sec.....	79

IV.5.2. Etude du déphasage pour le cas de la pollution uniforme.	80
IV.5.3. Etude du déphasage pour le cas de la pollution non uniforme ($\gamma_{vol} = 1.2$ mS/cm)....	82
IV.6. Conclusion.	84

Chapitre V : L'analyse des harmoniques du courant de fuite.

V.1. Introduction.....	85
V.2. L'analyse spectrale.....	85
V.3. Cas sec.....	86
V.4. Pollution uniforme :	88
V.5. Pollution non uniforme.....	94
Conclusion	99

Chapitre VI : Etude de la pollution par la technique des ondelettes.

VI.1. Introduction	101
VI.2. Pollution uniforme.....	102
VI.2.1. Conductivité 10 μ S/cm.....	103
VI.2.2. Conductivité 720 μ S/cm.....	104
VI.2.3. Conductivité 1.2 mS/cm.....	105
VI.2.4. Conductivité 6.1 mS/cm.....	106
VI.2.5. Conductivité 10 mS/cm.....	107
VI.2.6. Conclusion sur l'analyse par la CWT.....	108

VI.3. Pollution non-uniforme	109
VI.3.1. Formes d'ondes des courants de fuites.	110
VI.3.2. La décomposition par la DWT.	112
VI.3.3. Conclusion sur l'analyse par la DWT.	113

<i>Conclusion générale</i>	114
---	-----

Références bibliographiques

Introduction Générale

De nos jours, l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement et l'évolution de l'industrie et l'économie du pays. De ce fait, il faut assurer, à tout instant, un bon équilibre entre la demande croissante et la production de l'énergie. C'est pour cela, qu'une très grande part d'importance est attachée aux réseaux électriques, principalement aux lignes de haute tension [1]. La conception et la réalisation des isolateurs est devenue un des facteurs déterminants pour assurer le bon fonctionnement des ces lignes. Le contournement des isolateurs est l'un des grands problèmes actuels auquel les ingénieurs s'offrent de trouver des solutions.

Dans les conditions d'exploitation normales, les isolateurs de haute tension ne tardent pas à se recouvrir de différents types de pollution. Le contournement des isolateurs sous en présence d'impuretés conductrices est lié à l'apparition des décharges électriques qui progressent à leurs surfaces conductrices jusqu'au court-circuit. Les conséquences du contournement vont de la dégradation de la surface de l'isolateur jusqu'à la mise hors service de l'ensemble de l'isolation électrique.

Le phénomène de contournement reste à ce jour complexe [2] malgré de nombreuses recherches effectuées [3] pour comprendre le développement de la décharge électrique qui mène au contournement de l'isolateur en présence de couches fortement conductrices. La complexité de ce phénomène impose aux chercheurs d'effectuer plus d'expériences en laboratoires sous des conditions de pollution artificielles ou naturelles afin de 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 [4].

La prédiction exacte du contournement et l'identification du moment où le contournement est imminent sont de grande importance. Evidemment, un critère de diagnostic exact est nécessaire pour déterminer l'état de surface de l'isolateur ainsi que le risque d'occurrence du contournement. Les recherches des laboratoires et les expériences industrielles ont montré que le courant de fuite circulant sur la surface de l'isolateur ainsi que la tension appliquée au borne de l'isolateur, facilement mesurables, donnent des informations capitales pour caractériser l'état de surface des isolateurs avec un moindre cout. C'est pourquoi nous nous proposons d'analyser les deux signaux en vue de comprendre l'effet des décharges électriques sur la conductivité du milieu et l'évaporation causée par l'augmentation de la température sur la surface isolante, afin de prévenir le phénomène de contournement.

Les méthodes de diagnostiques sont nombreuses, en premier lieu nous nous proposons d'étudier le taux de distorsion harmonique qui représente la variation d'un signal par rapport à une référence et décrit l'influence des composantes harmoniques. En deuxième lieu l'analyse par la technique des ondelettes a été utilisée pour le traitement local qui a pour objectif de détecter les points et les zones déformées du signal du courant de fuite et de la tension appliquée.

Le présent travail consiste à étudier la sévérité de pollution sur un modèle d'isolateur plan avec différentes configurations de pollution afin de comprendre l'impact de celles-ci sur les performances électriques de l'isolateur, en exploitant principalement le signal du courant de fuite et celui de la tension appliquée.

Dans le premier chapitre, nous présentons les principaux travaux qui traitent de la pollution des isolateurs avec tous les phénomènes qu'ils l'accompagnent. Ces travaux sont en grande partie basés sur l'étude du courant de fuite avec plusieurs méthodes afin d'extraire le plus d'informations concernant l'état de surface de l'isolateur considéré.

Le deuxième chapitre présente de manière succincte la théorie du traitement du signal en l'occurrence la transformée de Fourier et la transformée en ondelettes. Nous parlerons du taux de distorsion harmonique qui va nous permettre d'évaluer l'état de la surface de l'isolateur pendant l'évolution des décharges électriques. Par la suite, nous introduisons la théorie des ondelettes discrètes et continues dans lesquelles nous décrivons les principales idées se rapportant à l'analyse multi-résolution ainsi qu'à la représentation temps-échelle, qui peuvent faire l'objet d'une surveillance de l'état de surface des isolateurs.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les techniques expérimentales et les différents outils de manipulation exploités pour mener à bien les essais en laboratoire.

Le quatrième chapitre est entièrement consacré à l'étude du comportement du modèle plan lorsque la pollution est uniforme avec plusieurs conductivités, et lorsque la pollution est non uniforme pour les différentes largeurs de la couche propres. Nous présentons les résultats concernant la tension de contournement, le courant de fuite, le déphasage courant de fuite-tension appliquée et l'évolution de la tension de contournement de la couche propre en fonction de la largeur de la couche polluée.

Le cinquième chapitre présente les résultats de l'étude harmonique du courant de fuite pour déterminer un critère de diagnostic sur l'état de surface de l'isolateur par l'analyse spectrale et la mesure du taux de distorsion harmonique.

Dans le sixième chapitre, nous mettons en application l'analyse par la technique des ondelettes. Pour la pollution uniforme, la transformée en ondelette continue (CWT) est appliquée sur le signal de la tension pour un éventuel diagnostic de l'état de surface. Pour la pollution non-uniforme, la transformée en ondelette discrète (DWT) est utilisée pour estimer l'augmentation de la largeur de la couche propre via la représentation STD-MRA plot.

En dernier lieu, nous terminons par une conclusion générale qui est une synthèse des principales observations liées à l'attitude adoptée par l'isolateur en présence des couches conductrices.

Chapitre I:

*Travaux antérieurs sur la
pollution des isolateurs.*

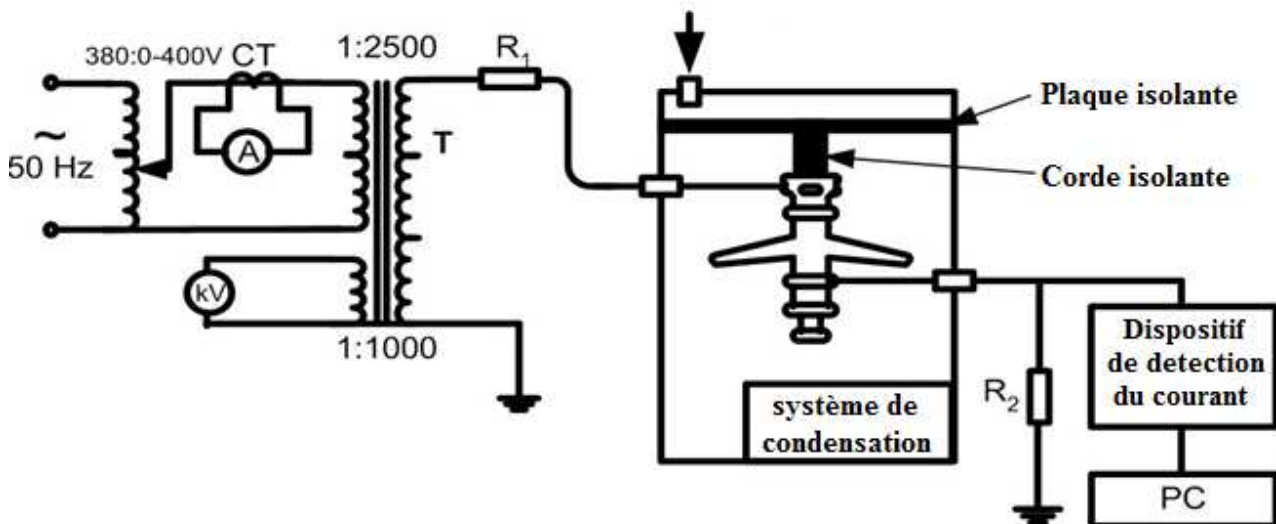
I.1. Introduction :

Dans cette partie, nous présentons les plus récents travaux concernant la pollution des isolateurs ainsi que l'étude des phénomènes accompagnant la phase du contournement. Ces recherches sont pour la plupart basées sur l'étude du courant de fuite qui procure des informations essentielles sur l'état de surface des isolateurs. L'étude de ce signal est effectuée avec plusieurs méthodes dont l'analyse par les ondelettes ou encore le traitement temps-fréquence par la transformée de Fourier et l'analyse des composants harmoniques.

I.2. Synthèse des principaux travaux récents :

I.2.1. L'analyse graphique récurrente du courant de fuite sur les performances du contournement des isolateurs composites givrés :

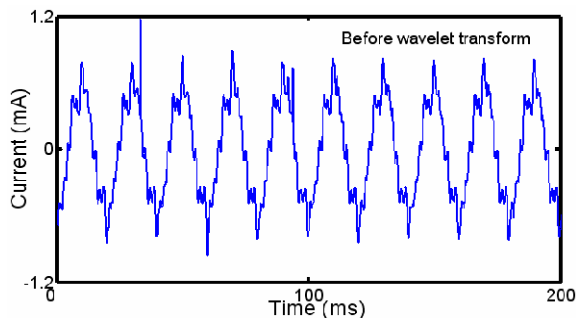
En raison de la large application des isolateurs composites dans le secteur de l'énergie, beaucoup de chercheurs s'intéressent aux performances de ces derniers en vertu des différentes conditions environnementales. Yong Liu and B. X. Du [5] ont étudié l'influence du givre sur la performance du contournement de l'isolant composite. Des examens de laboratoire ont été effectués dans une chambre climatique artificielle afin de simuler différentes morphologies du givre sur la surface de l'isolateur pour établir une relation entre les paramètres du givre et celles du contournement des isolateurs. Le dispositif expérimental est donné par la figure (I.1).



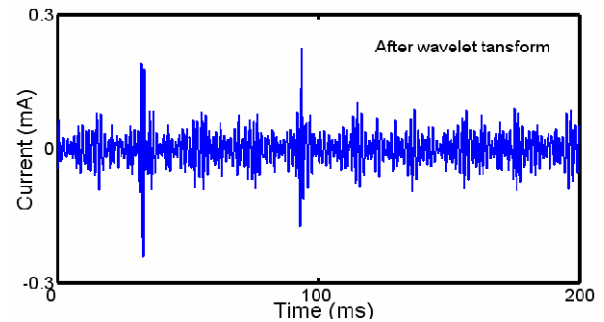
T: transformateur de haute tension; **R1:** Résistance de limitation du courant (100 Ω);
R2: Résistance de mesure (1 Ω)

Figure I.1 : Dispositif expérimental.

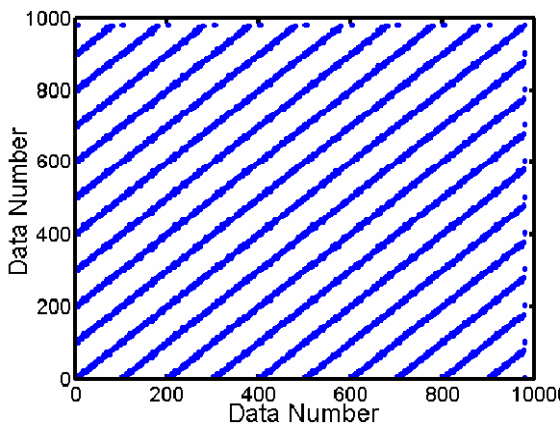
Une technique graphique récurrente (RP) a été proposée pour analyser les caractéristiques non linéaires du courant de fuite [6]. Cette méthode est très utile pour l'extraction des informations à partir des signaux temporels ainsi que ceux transformés en ondelette dans les hautes fréquences (1.25-2.5 kHz) [6,7]. La figure (I.2) montre un exemple de la RP pour un signal du courant de fuite lors d'un processus de contournement.



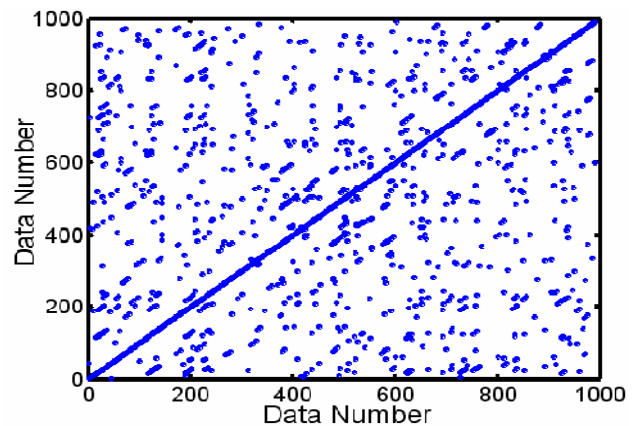
(a) Forme d'onde du courant de fuite.



(b) Après transformation d'ondelette.



(c) RP du courant de fuite avant transformation



(d) Après transformation d'ondelette.

Figure I.2 : Exemple de la technique graphique récurrente pour un signal du courant de fuite

Selon l'observation visuelle, le processus de contournement des isolants dans les conditions de givre peut être séparé en six étapes. Les phénomènes typiques et caractéristiques de décharge à chaque étape sont présentés dans la figure (I.3). Les formes d'ondes et leurs caractéristiques de fréquences sont présentées sur la figure (I.4).

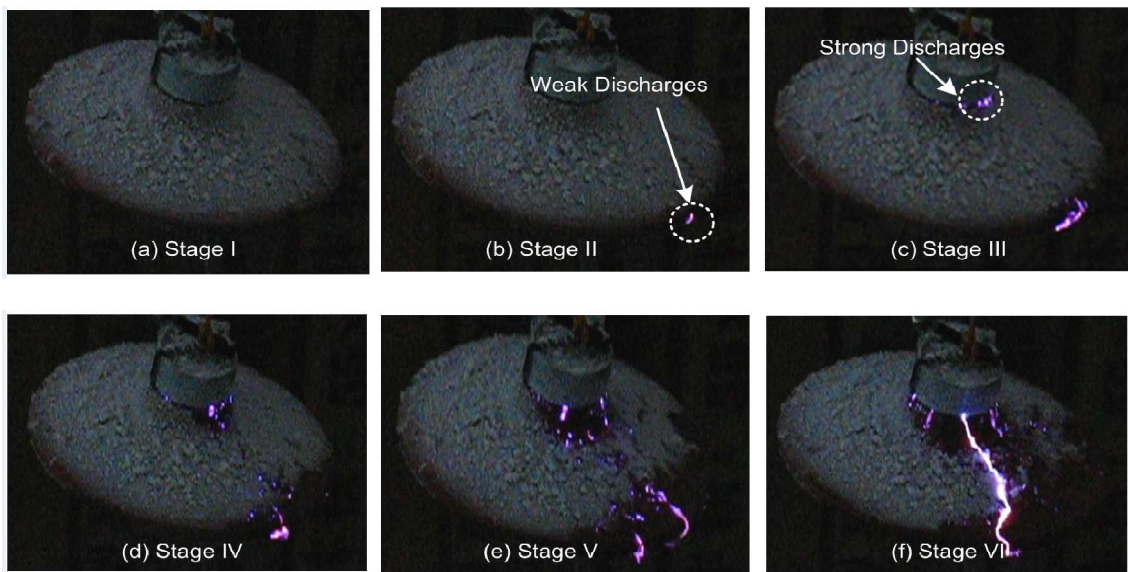


Figure I.3 : Le processus de contournement

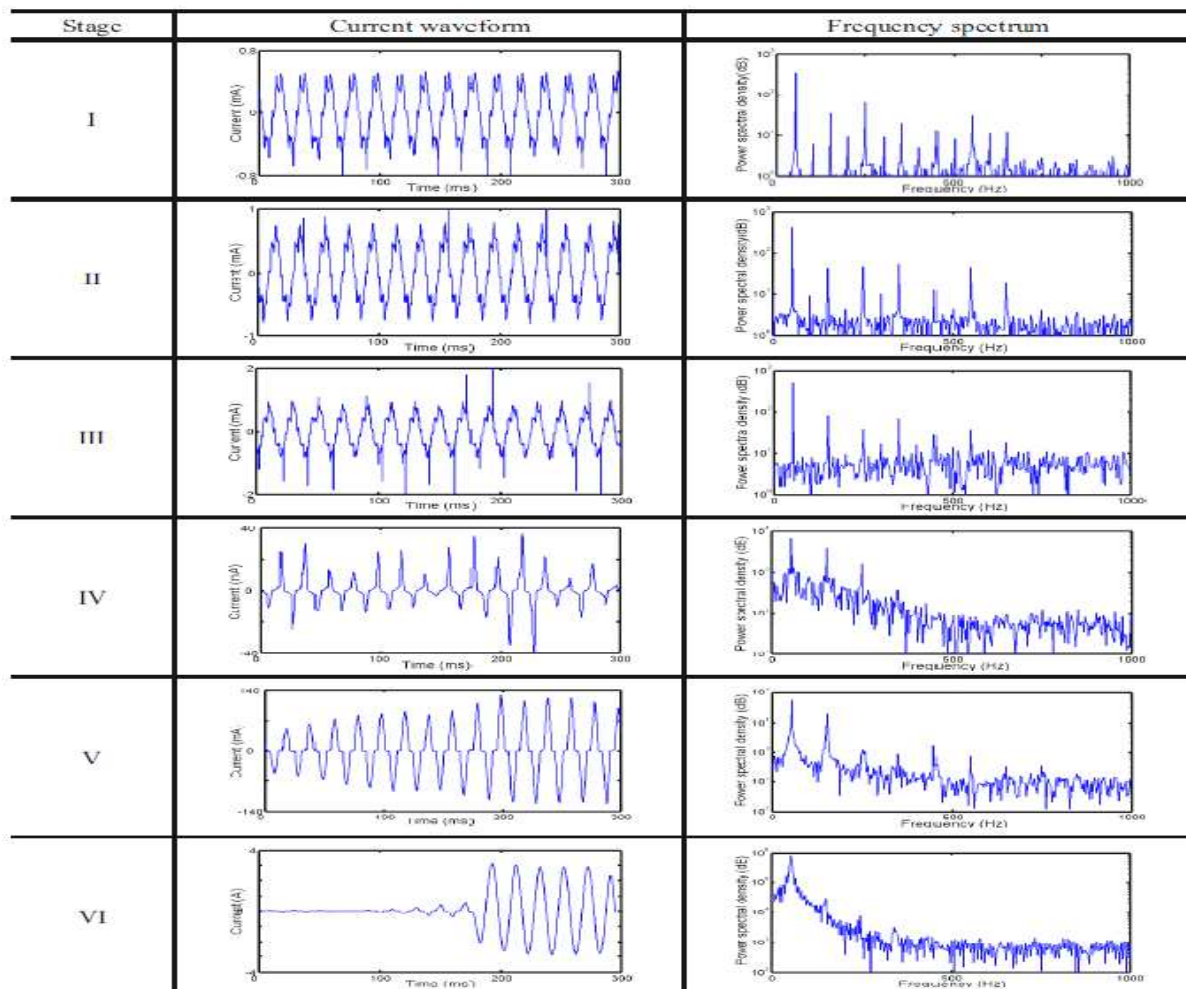


Figure I.4 : Forme d'onde et spectre du courant de fuite.

Tel que décrit dans les figures (I.3) et (I.4), le processus de contournement est associé à des décharges de surface qui sont reflétées dans la distorsion de l'onde de courant.

Le courant de fuite décrit dans la figure (I.4) est divisé en trois étapes: les phases I et II comme l'étape initiale, la phase III décrit l'étape intermédiaire et les phases IV et V de la scène avant le contournement général, et la phase VI qui représente le contournement.

Après avoir extrait les composants de haute fréquence du courant de fuite, les techniques graphiques récurrentes pendant le processus de contournement sont obtenues comme le montre la figure (I.5).

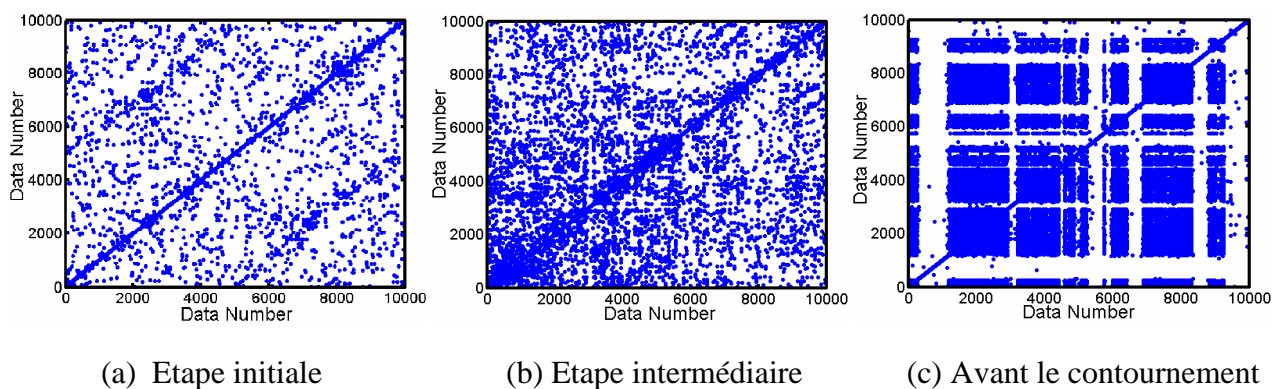


Figure I.5 : La technique graphique récurrente des composants de haute fréquence.

L'évaluation visuelle des structures indique la caractéristique non-linéaire du courant de fuite ainsi que la transition de la performance dynamique sur la surface de l'isolateur. Il se trouve qu'il ya deux propriétés différentes: l'une est caractérisée par des points formant des lignes, qui sont parallèles à la principale diagonale, comme illustré dans la figure (I.5.a) et (I.5.b), l'autre se caractérise par l'alternance des points de concentration récurrentes et segments spatiaux blanc, comme le montre la Figure I.5.c. Le nombre croissant de points récurrents peuvent refléter le changement dans l'activité des décharges sur la surface de l'isolateur. Les points denses indiquent l'état stationnaire des décharges intensives dans les bandes sèches, le segment vierge indique l'état de transition.

I.2.2. Distribution du courant de fuite sur la surface d'isolateurs en polymère pollués artificiellement:

Yong Zhu et al [8] ont exploité les informations procurées par le signal du courant de fuite pour caractériser l'état de surface d'un isolateur SiR (Silicone rubber) de type EVA (Ethylene Vinyl Acetate) pour comparer les résultats obtenus avec ceux d'un modèle proposé. Le diagnostic à partir du courant de fuite a été pris en considération suite à l'intérêt porté par l'équipe sur les propriétés hydrophobes du matériau et l'évaluation des dégradations occasionnées sur les propriétés d'isolations [9].

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

- Les arcs locaux qui surviennent dans les bandes sèches.
- Les décharges partielles qui sont provoquées par la triple jonction entre les gouttelettes d'eau, le polymère et l'air à cause de la différence de la permittivité de chacun d'entre eux [10].

Le mode expérimental a pris en considération la pollution par humidification vu qu'elle est largement utilisée dans les recherches pour l'étude des performances électriques des polymères sous haute tension [11,12]. La pollution des isolateurs réel et modèle (Figure I.6) est faite avec une solution de 3L d'eau distillée qui contient 40 g/L de Tonoko et 12 g/L de NaCl ; les mesures effectuées avec l'ESDD (Equivalent salt deposit density) indiquent 0.03 mg/cm² pour cette solution. La pollution des surfaces est effectuée par pulvérisation et la tension appliquée est de 4.8 kV et 13.3 kV respectivement pour le modèle et l'isolateur réel.

Une camera sert à suivre le phénomène de décharge et un oscilloscope relié à un PC permet l'acquisition des signaux du courant de fuite. L'évaluation du champ électrique en utilisant la méthode des éléments finis, indique les zones de fortes intensités.

Les résultats obtenus lors de l'analyse des courants 1ch, 2ch et 3ch montrent que 1ch a une forme parfaitement sinusoïdale due à l'uniformité de la couche de pollution (caractère parfaitement résistif) ; 2ch et 3ch ont une forme distordue due, d'une part à l'activité intense des décharges et d'autre part à la non-uniformité de la couche de pollution (Figure I.7). Ces décharges sont le résultat d'une valeur du champ électrique qui dépasse celle de la rigidité diélectrique du système ainsi formé.

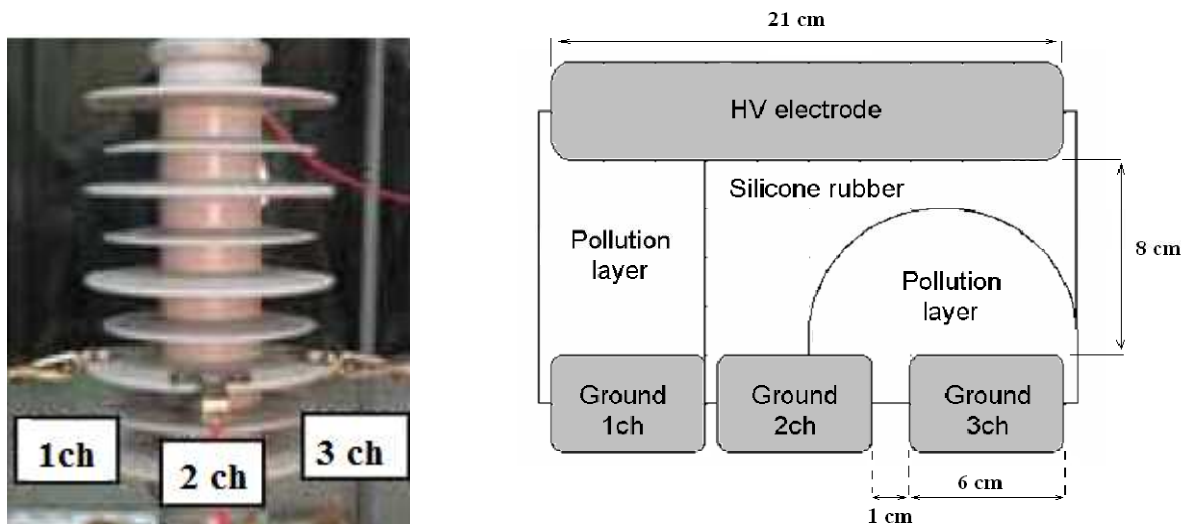


Figure I.6: Isolateur réel (à gauche) et son modèle (à droite).

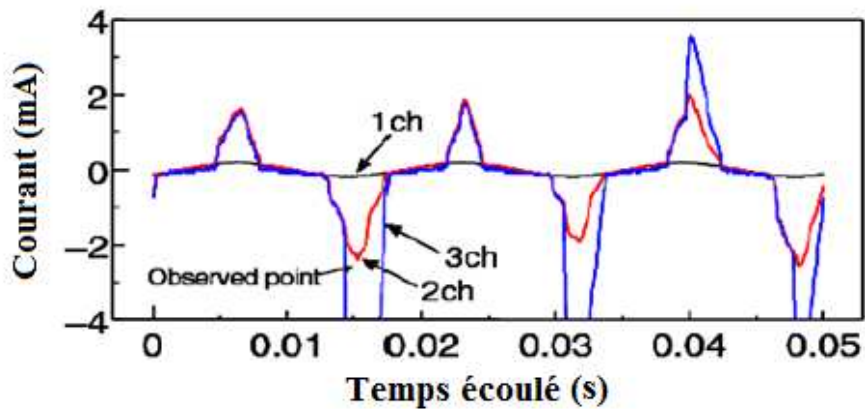


Figure I.7: Formes d'ondes des courants de fuite du modèle.

Pour l'isolateur de type EVA, les trois signaux du courant de fuite ont une densité non-uniforme (Figure I.8); ce phénomène est le résultat de l'irrégularité du profil de l'isolateur. L'apparition d'arcs locaux est causée par l'assèchement de certaines zones, du à cette densité de courant non-uniforme. La surveillance par camera de l'activité des décharges a permis de détecter la position de celles-ci en fonction de la variation d'amplitude de 1ch, 2ch et 3ch :

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

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

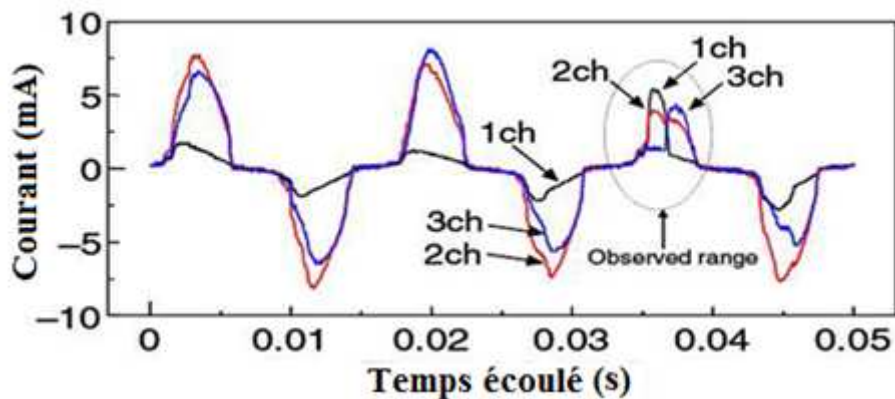


Figure I.8: Formes d'ondes des courants de fuite de l'isolateur réel.

I.2.3. Méthode de mesure de la performance des isolateurs basée sur la transformée de fourier du courant de fuite :

Melda Latif [13] étudie le comportement d'un isolateur sous pollution en se basant sur l'étude des signaux du courant de fuite.

La figure (I.9) montre le schéma expérimental utilisé pour cette étude. Les isolateurs sont de type Résine Epoxy 20 kV. L'humidité de la chambre varie entre 50% et 95% dans des conditions de brouillard propre ou salin.

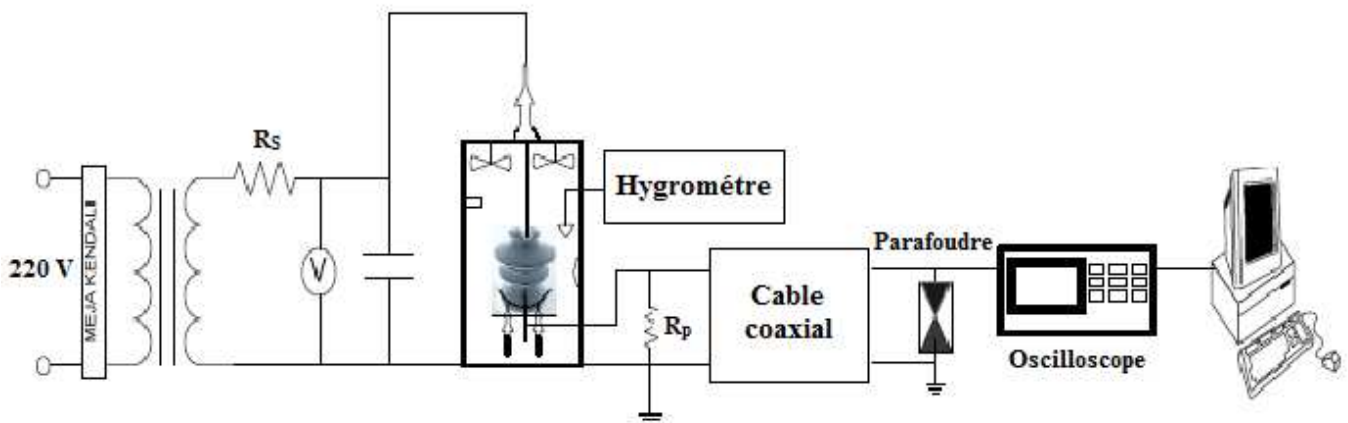


Figure I.9 : Installation expérimentale.

La transformée de Fourier est utilisée pour extraire l'amplitude et les composants harmoniques du courant de fuite. Les composants harmoniques sont classés en 2 parties :

- Les harmoniques de basses fréquences ($2^{\text{ème}} \leq \text{harmonique} \leq 21^{\text{ème}}$).
- Les harmoniques de hautes fréquences (harmonique $\geq 22^{\text{ème}}$), qui peuvent être définies comme un bruit.

La méthode de calcul du THD (Total Harmonic Distortion) pour les basses et hautes fréquences est utilisée pour diagnostiquer l'état de surface des isolateurs [14,15], et elle est définie comme suite :

$$\text{THD}_L = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{21} I_n^2}}{I_1} \quad \text{THD}_H = \frac{\sqrt{\sum_{n=22}^{200} I_n^2}}{I_1}$$

Où : $I_1 = 1^{\text{er}}$ harmonique (fondamental du courant)

$I_n = n^{\text{ème}}$ harmonique.

Un indice de performance pour l'isolateur peut être défini par un rapport logarithmique entre les basses et les hautes fréquences en utilisant la méthode SNR (Signal noise ratio) [15]:

$$SNR = 10 \cdot \log \left(\frac{THD_L}{THD_H} \right)$$

Le tableau (I.1) montre les formes d'ondes du courant de fuite et les valeurs des paramètres de performances des surfaces d'isolateurs en vertu de diverses conditions.

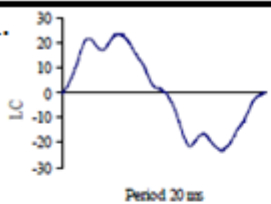
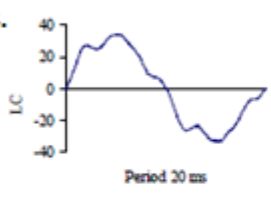
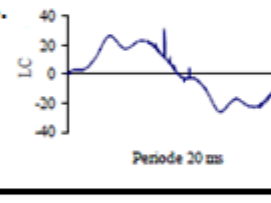
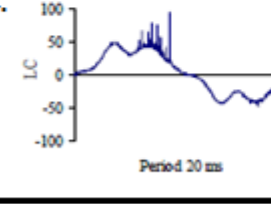
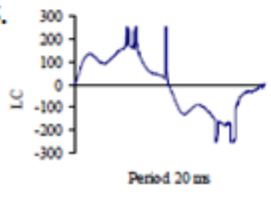
Forme d'onde	Condition de travail	LC Magnitude	THD	THD _L	THS _H	SNR (db)
<p>1.</p> 	<p>Isolateur sec, atmosphère très humide, 27°C, brouillard propre</p>	22	16%	16%	1%	12.04
<p>2.</p> 	<p>Isolateur pollué (300 µS/cm), atmosphère très humide, 12kV, 27°C, brouillard propre</p>	32	13%	13%	1%	11.14
<p>3.</p> 	<p>Isolateur pollué (1200 µS/cm), atmosphère très elevé, 15kV, 27°C, brouillard propre</p>	24	20%	20%	5%	6.02
<p>4.</p> 	<p>Isolateur pollué (1200 µS/cm), atmosphère très humide, 25kV, 27°C, brouillard propre</p>	43	25%	22%	10%	3.42
<p>5.</p> 	<p>Isolateur pollué (1200 µS/cm), atmosphère très humide, 50kV, 27°C, brouillard salin</p>	169	39%	35%	18%	2.89

Tableau I.1 : Formes d'ondes et valeurs des différents paramètres de performances .

Cette méthode donne une bonne interprétation des conditions des isolateurs. Pour l'isolateur propre et dans des conditions normales, la valeur du SNR est grande, ceci indique qu'il n'y a pas de bruit, c'est-à-dire que la THD_H est petite. Dans le cas d'une pollution légère (condition 1), la forme d'onde du courant de fuite est la même que dans le cas propre mais la valeur de l'amplitude est plus grande. La valeur de la THD_H ne varie pas par rapport à l'état propre mais le SNR est plus petit.

Plus la pollution devient plus lourde et la tension appliquée augmente plus on remarque des distorsions et des pics qui apparaissent sur l'onde du courant de fuite. On remarque aussi la valeur de la THD_H et la valeur du SNR diminuent.

La figure (I.10) montre la variation de la valeur du SNR en fonction des différentes conditions de pollution.

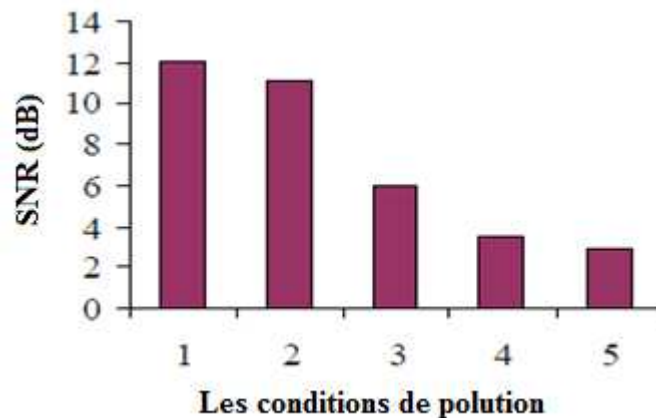


Figure I.10 : Valeurs du SNR pour les différentes conditions de pollution.

I.2.4. Utilisation de la SGWT pour le filtrage des signaux de décharges partielles :

Actuellement, les matériaux isolants utilisés dans les réseaux électriques subissent des dommages et des dégradations progressives dus à l'activité des décharges partielles, ce qui rend leur détection et leur caractérisation d'une importance capitale dans le diagnostic et la surveillance en temps réel. [16]

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

X.Song et al [17] utilisent la SGWT pour le filtrage des données concernant les décharges partielles. Pour cela, ils effectuent une comparaison entre la DWT (Discrete wavelet transform) et la SGWT (Second Generation Wavelet Transform) ; ils déduisent qu'à cause de son extrême sensibilité, la SGWT procure de meilleures performances par rapport à la DWT bien que celle-ci suscite un grand intérêt ces dernières années [18,19]. La différence entre les deux méthodes réside dans l'algorithme de décomposition et de reconstruction du signal d'entrée.

Leurs travaux de simulation par ordinateur consistent à reproduire 10 impulsions de décharges selon la norme IEC 60270 (High-voltage test techniques - Partial discharge measurements); la fréquence d'échantillonnage est de 100 MHz et le signal de décharge est pollué à l'aide d'un bruit blanc Gaussien de rapport Signal/bruit = -15 dB (Figure I.11).

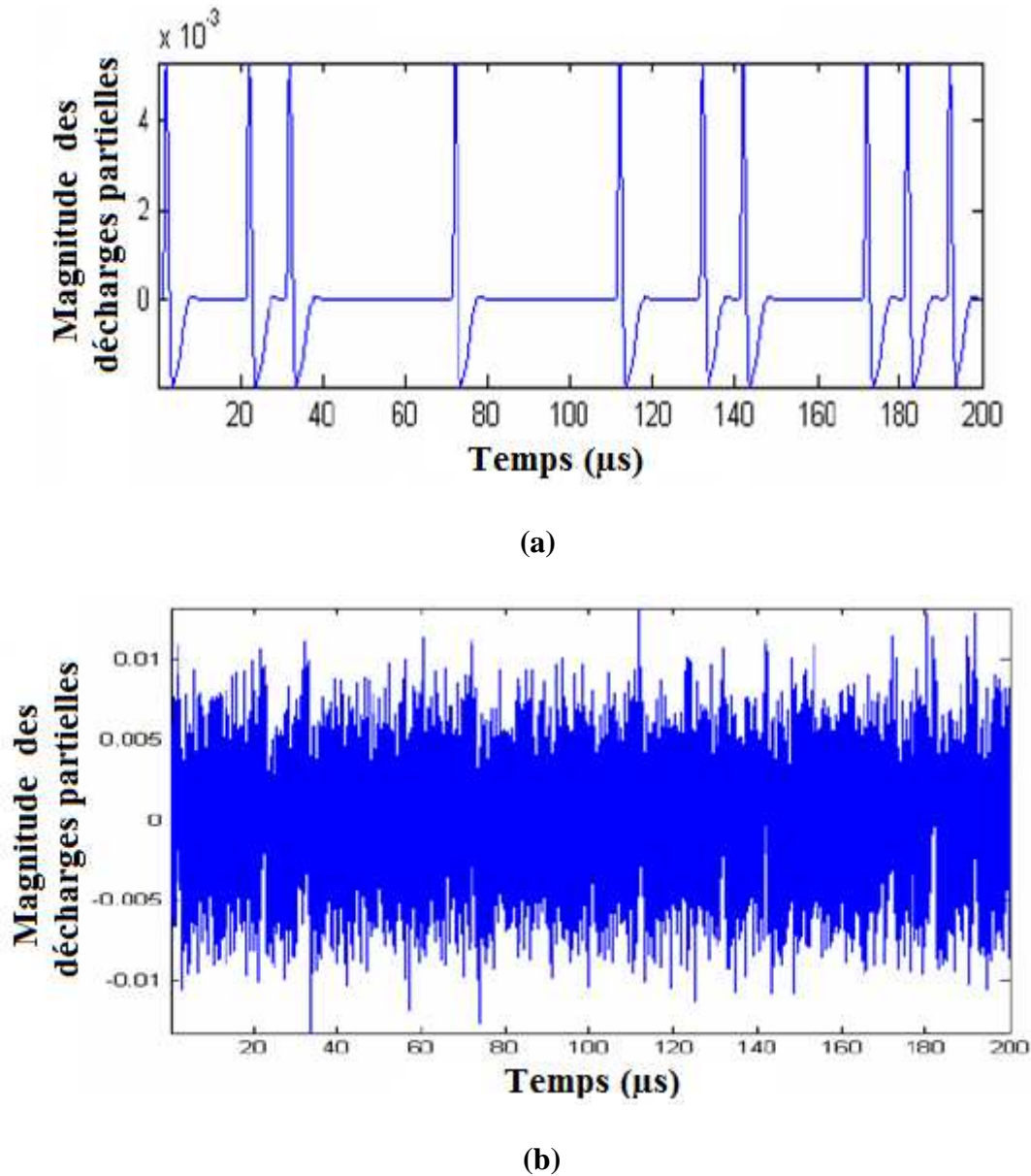


Figure I.11: Forme d'onde du signal des décharges partielles : (a) sans bruit (b) avec bruit.

Les erreurs commises lors des calculs sont moins importantes pour la SGWT que pour la DWT ; cependant leurs précisions de calcul se détériorent progressivement avec l'augmentation du niveau de bruit.

Les travaux expérimentaux concernent l'application de la SGWT et de la DWT sur un signal de décharge réel récupéré du réseau EDF 11 kV. L'équipe conclut encore une fois que la SGWT est meilleure que la DWT pour déterminer l'amplitude et le nombre de décharges partielles et ce pour un temps de calcul très appréciable [19].

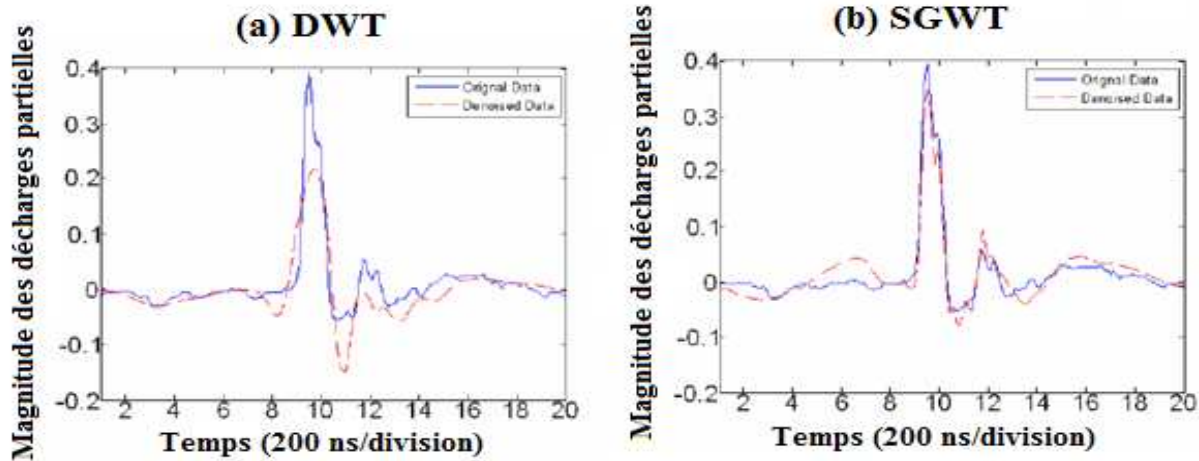


Figure I.12: Impulsion de décharge partielle reconstruite avec la DWT et la SGWT (l'impulsion réelle est en bleu et l'impulsion reconstruite est en rouge).

I.2.5. Amélioration de la performance des isolateurs en céramique en plein air dans un environnement très pollué à l'aide de la technique de revêtement en caoutchouc de silicone (RTV) :

Les isolateurs en céramiques sont largement utilisés dans les lignes de transmissions et de distributions [20]. Ces isolateurs en plein air, sont exposés à des conditions de pollution qui peuvent être très sévères. Récemment, l'ajout d'agents hydrophobiques sur les isolateurs a été introduit pour améliorer leurs performances. Fari Pratomosiwi et Suwarno [21] présentent les résultats expérimentaux de la technique de revêtement en caoutchouc de silicone (RTV) sous plusieurs conditions environnementales. La Figure I.13 présente un échantillon d'isolateur en céramique revêtu en caoutchouc de silicone avec une épaisseur d'environ 0.3mm.



Figure I.13: Échantillon d'isolateur avant revêtement (a) et après revêtement (b).

Pour la couche saline, 40 g de kaolin a été utilisé dans 1 litre d'eau, en ajoutant du NaCl pour obtenir la conductivité souhaitable, conformément à la norme CEI 507 (Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems). Pour le test de brouillard salin, 40 g de kaolin a été utilisé dans un litre d'eau mélangé à du NaCl. Le détail des conditions expérimentales étudiées dans cette expérience sont présentées dans le tableau (I.2).

Dans cette expérience, les formes d'onde du courant de fuite ont été mesurées en utilisant un système de mesure assistée par ordinateur et le contenu harmonique a été analysé par la FFT en utilisant l'outil MATLAB. Pour la quantification du contenu des harmoniques du courant de fuite, ils ont utilisé la THD.

La THD est définie comme le rapport des composantes harmoniques totale sur le fondamental qui peut être exprimé comme:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

Où : $I_1 = 1^{\text{er}}$ harmonique (fondamental du courant)

$I_n = n^{\text{ème}}$ harmonique .

Numéro de l'essai	Les conditions environnementales	La tension appliqué
1	Isolateur propre; brouillard propre	10-60
2	Isolateur pollué avec du Kaolin-sel à 1.3 mS) ; brouillard propre	10-60
3	Isolateur pollué avec du Kaolin-sel à 2 mS; brouillard propre	10-60
4	Isolateur pollué avec du Kaolin-sel à 3.6 mS; brouillard propre	10-60
5	Isolateur pollué avec du Kaolin; brouillard salin à 2 mS.	10-60
6	Isolateur pollué avec du Kaolin; brouillard salin à 3 mS.	10-60
7	Isolateur pollué avec du Kaolin; brouillard salin à 3.6 mS.	10-60

Tableau I.2: Conditions expérimentales

L'analyse de l'amplitude du courant de fuite et la THD qui a été faite à partir des tests sur les isolateurs sous différentes conditions de pollution a donné les résultats présentés sur les figures (I.14 à I.16)

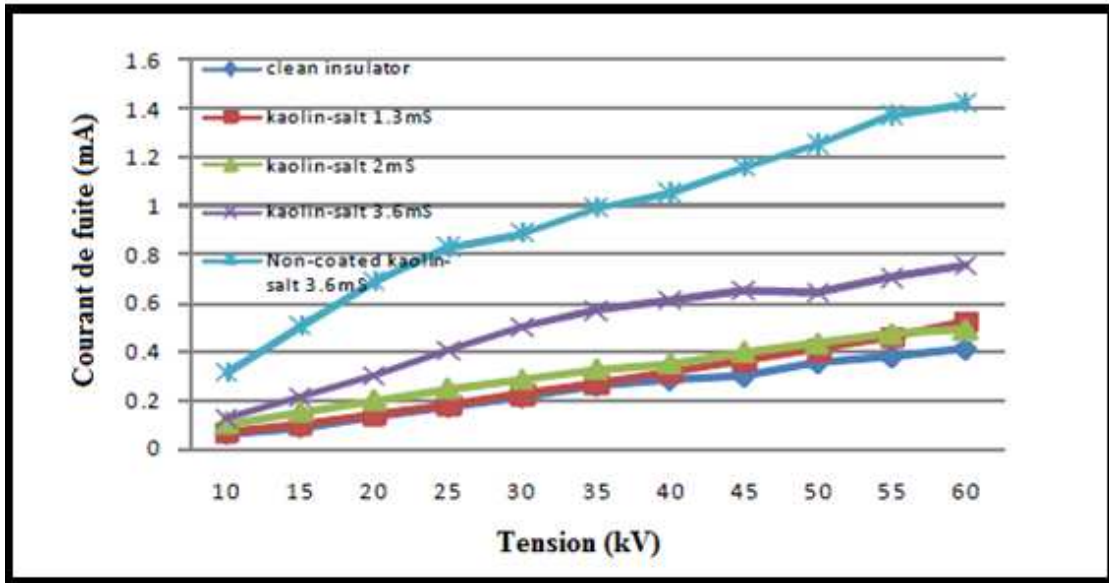


Figure I.14 : L'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour des isolateurs pollués avec différentes conductivités sous un brouillard propre.

On voit clairement que l'amplitude du courant de fuite augmente presque linéairement avec la tension appliquée. La figure (I.14) montre également que l'amplitude du courant de fuite est affectée par les différents niveaux de pollution. Avec l'augmentation de la tension appliquée, l'amplitude du courant de fuite est plus élevée pour le cas des échantillons pollués que pour celui des échantillons propres.

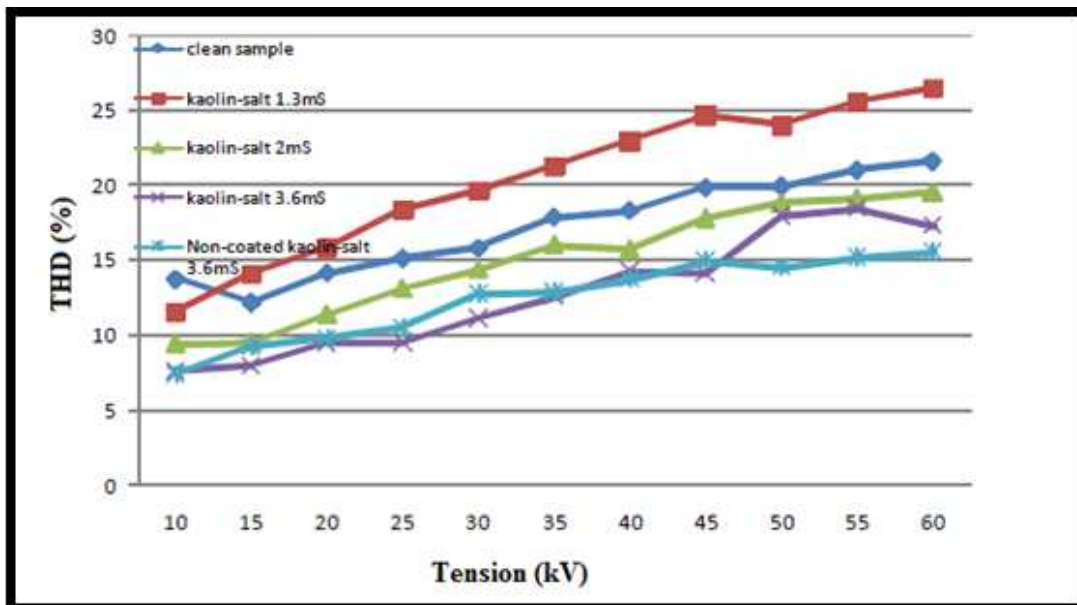


Figure I.15: THD en fonction de la tension appliquée pour des isolateurs pollués avec différentes conductivités sous un brouillard propre.

La figure (I.15) montre les dépendances de la distorsion harmonique totale (THD) de la forme d'onde du courant de fuite sur la tension appliquée et les niveaux de la pollution (kaolin-sel). On voit que la THD augmente avec la tension appliquée. Cependant, la figure indique également que la valeur de la THD pour les isolateurs pollués sous brouillard propre a diminué avec les quantités croissantes de pollution appliquées. Cela est dû à l'augmentation de la conductivité de surface. Ils ont remarqué aussi qu'il n'y a pas eu de contournement, à part quelques aigrettes observées pour les tensions 40-60 kV.

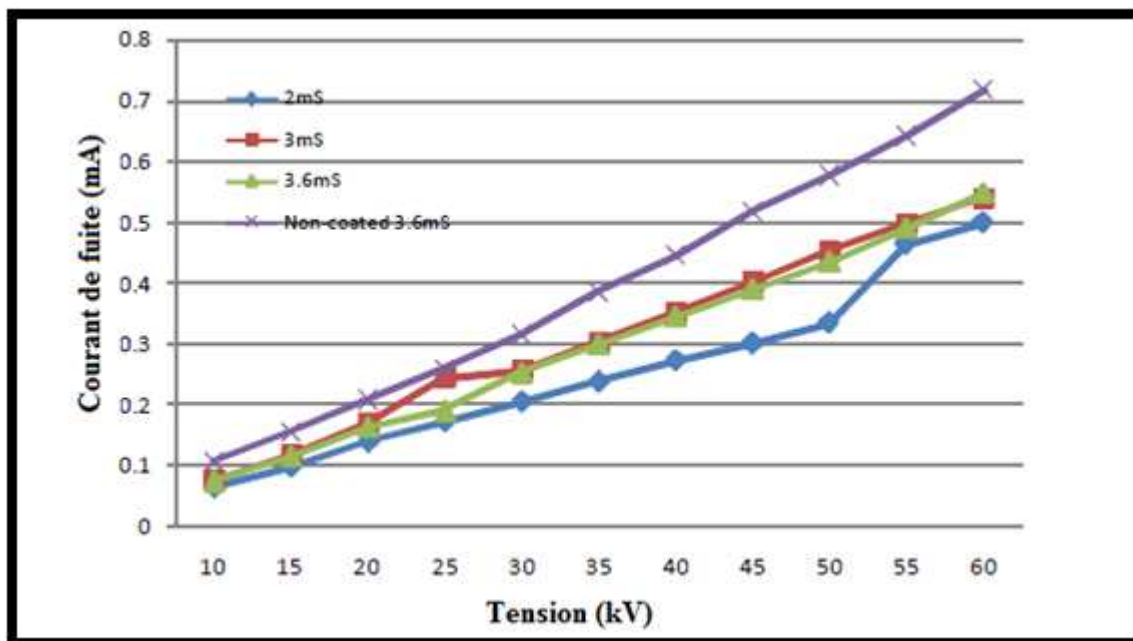


Figure I.16 : L'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour des isolateurs pollués sous un brouillard salin avec différentes conductivités.

L'augmentation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée est linéaire. La figure (I.16) montre que l'amplitude du courant de fuite est presque la même en vertu des différentes conductivités du brouillard salin. Il peut être considéré que le brouillard salin pour différentes conductivités n'a pas d'incidence sur l'amplitude du courant de fuite. Par contre l'amplitude du courant de fuite pour la conductivité 3.6 mS/cm augmente pour l'isolateur non revêtu par rapport à l'isolateur revêtu.

Ainsi, ils concluent que la conductivité du brouillard salin n'affecte pas l'amplitude du courant de fuite ainsi que son contenu harmonique pour les isolateurs en céramique revêtu de caoutchouc de silicone RTV.

I.2.6. Etude du phénomène d'érosion d'un isolateur SiR exposé aux décharges partielles superficielles:

Vu le grand intérêt porté par l'Amérique du nord aux isolateurs de type SiR [24], et sachant que plusieurs études montrent que ceux-ci sont les plus exposés au phénomène d'érosion pour de faibles conductivités [25,26], il est devenu nécessaire de mener des recherches pour mettre en évidence que les décharges partielles qui apparaissent à la surface des isolateurs pollués avec de faibles conductivités, sont responsables de la dégradation des propriétés de ces matériaux à savoir : une rigidité mécanique élevée malgré leur légèreté et une résistance relativement élevée pour des conditions de pollution extrêmes.

Au Japon, K. Haji et al [27] ont consacré toute une étude pour voir l'effet des décharges partielles sous différentes conductivités, sur l'érosion ainsi que la perte de poids (Molar Weight Loss) sur des isolateurs SIR. Comme le montre la figure (I.17), le modèle d'isolateur est équipé de deux électrodes en cuivre ; une connectée à la source haute tension (60 Hz) à travers une résistance $R_s = 1.4 \text{ M}\Omega$ et une autre connectée à la terre.

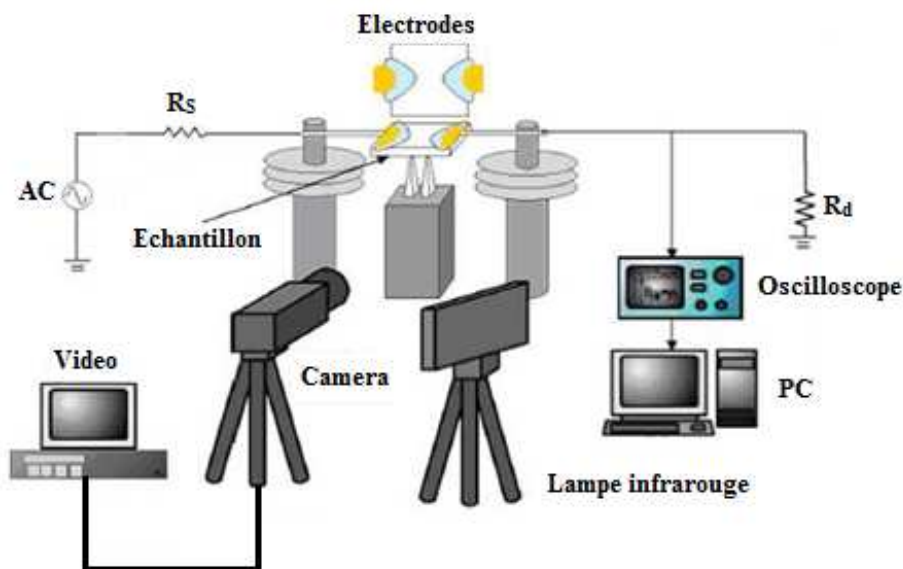


Figure I.17 : Dispositif expérimental.

La pollution de la surface est simulée avec quatre solutions contenant du NaCl de conductivité : 0,8, 4,8 et 16 mS/cm. La distance inter-électrode est de 10 mm. Un dispositif constitué d'une caméra et d'un oscilloscope reliés à un PC, a permis de suivre le comportement des décharges et d'enregistrer les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite. Un thermographe a enregistré l'évolution de la température et une balance électronique mesure le poids du modèle après chaque essai de décharge. Une simulation du champ électrique avec la méthode des éléments finis a permis d'évaluer sa distribution durant la propagation des décharges partielles. Le calcul de la résistance de la couche de pollution est fait grâce à la relation de Mayr [28,29]. Le courant de fuite est maintenu à 10 mA et le calcul du champ électrique a tenu compte des investigations de Nishimura [30].

Les résultats obtenus montrent qu'après 140 s d'exposition aux décharges partielles, les pertes de poids molaires sont plus importantes pour les basses conductivités (0.8 et 4 mS/cm). Les relevés du courant de fuite et de la tension appliquée ont permis de suivre l'évolution des décharges et d'indiquer que plusieurs de ces décharges ont eu lieu simultanément. Cela est confirmé par la présence de pics au sein de l'onde de tension et celle du courant de fuite (Figure I.18).

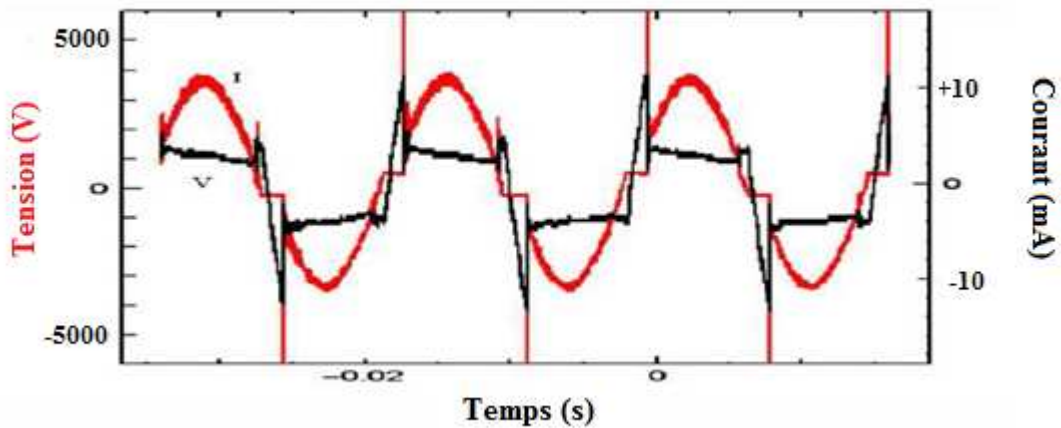


Figure I.18: Formes d'ondes du courant de fuite et de la tension pour 0.8 mS/cm.

Les auteurs constatent également que pour les faibles conductivités, les décharges se propagent à la surface de l'isolateur avec l'apparition de particules de silice ; ceci signifie que l'érosion est très sévère [31]. Pour les conductivités élevées (8 et 16 mS/cm), l'arc électrique a tendance à se former dans l'air ce qui peut expliquer l'absence quasi-totale de trace d'érosion. Ces résultats concordent parfaitement avec d'autres investigations [32].

Les résultats du thermographe obtenus après 20 s du début de la décharge, montrent que la température augmente proportionnellement avec la conductivité et atteint 1073°K pour 16 mS/cm. Ce phénomène physique est le résultat de l'augmentation de la densité de courant pour les grandes conductivités, qui donne lieu à un dégagement de chaleur par effet joule.

Les simulations du champ électrique affichent une diminution de son intensité avec l'augmentation de la conductivité. Cette diminution survient à cause des ions Cl (pollution marine) qui ont tendance à réagir avec l'électrode en cuivre menant à une chute de tension au voisinage de la cathode [33,34] ; elle est estimée à 500 V pour 16 mS/cm. Le nombre de ces ions dépend de la concentration de la solution polluante et son augmentation conduit à un affaiblissement de l'intensité du champ électrique au voisinage de la cathode.

I.2.7. Etude sur les Harmoniques du Courant de fuite des isolateurs en porcelaine sous pollution :

Dans leurs recherches, S.Chandrasekar et C.Kalaivanan [35] ont essayé de comprendre le comportement des isolateurs en porcelaine sous différentes conditions de pollution. Le schéma de l'installation expérimentale est présenté sur la figure (I.19). Les solutions polluantes ont été préparées avec du NaCl et 40g de kaolin mélangés dans 1 litre d'eau distillée. La chambre de brouillard est toujours maintenue à 95% d'humidité.

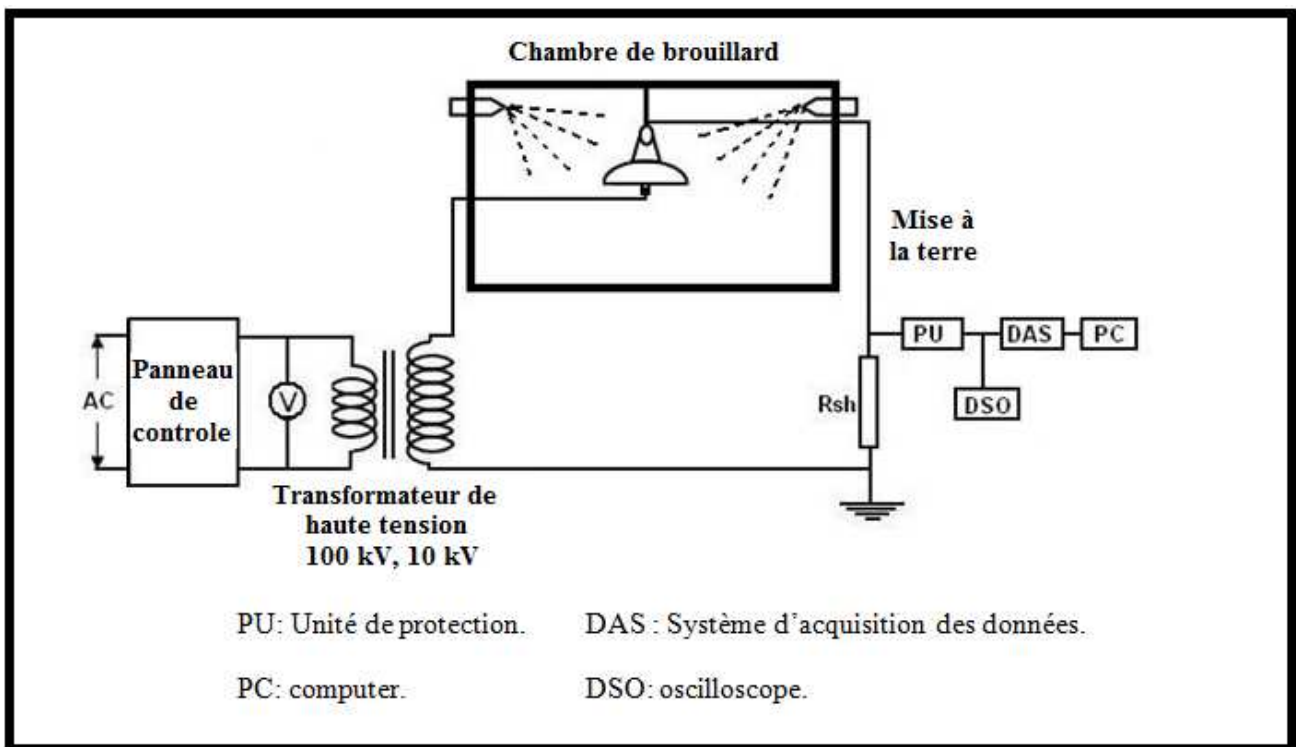


Figure I.19: Schéma expérimental.

L'étude s'est basée sur l'analyse spectrale du courant de fuite et le calcul du THD% sous différents niveaux de pollutions.

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \times 100 \quad \%$$

L'analyse de la corrélation a été adoptée afin de déterminer la tendance suivie par les harmoniques du courant de fuite durant le développement du processus de contournement.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y}$$

Où : \bar{x} et \bar{y} sont les moyennes d'échantillons de x et y.

s_x et s_y sont les écarts-types de x et y.

n : nombre de mesures effectuées.

r_{xy} : coefficients de corrélations.

Au début, un isolateur propre a été testé avec une tension appliquée de 11kV. Aucune décharge électrique visuelle n'a été observée. La figure (I.20) montre le tracé de la FFT du courant de fuite dans cette condition. Il est observé que le signal en vertu de l'état de surface propre contient les composantes harmoniques d'ordres 5, 7, 9 et 11. En outre, il est remarqué que la composante harmonique de 3ème ordre n'apparaît pas. La valeur du THD est de 37.58%.

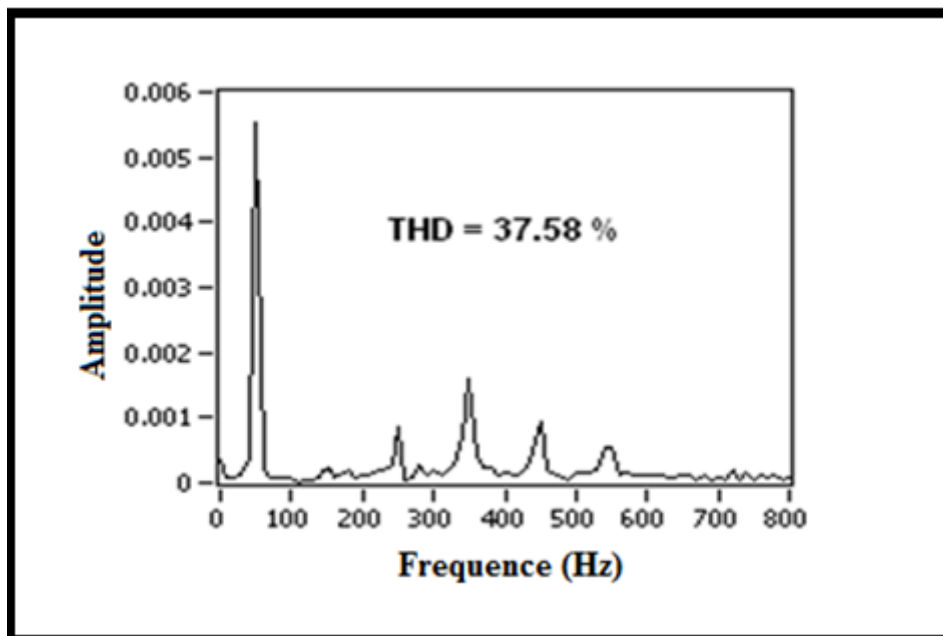


Figure I.20: La FFT du signal du courant de fuite sous les conditions propre.

La figure (I.21) montre les différentes grandeurs harmoniques des signaux du courant de fuite capturés dans la condition de pollution 30 g/litre de NaCl. Elle montre clairement que lorsqu'il ya une grave formation de décharges sur la surface, le 3^{ème} harmonique augmente considérablement avec la réduction des harmoniques d'ordre supérieur.

D'après les observations à différents niveaux de pollution, il est clair que lorsque la surface est humide et polluée, la possibilité d'apparition de courte et de longues décharges est plus élevée. La présence de la 3^{ème} composante harmonique joue un rôle majeur dans l'identification de l'état de surface.

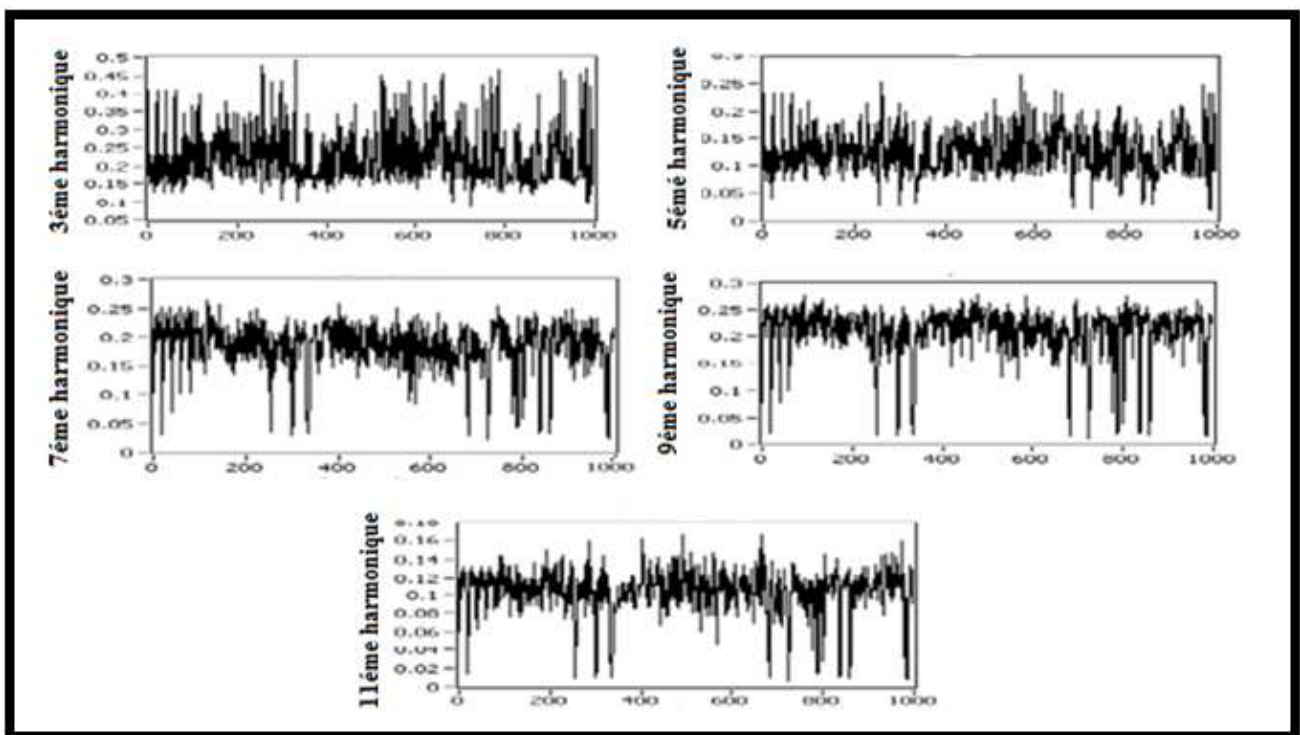


Figure I.21: Tendances suivies par les amplitudes d'harmoniques du courant de fuite sous la condition de pollution 30 g / litre de NaCl.

Afin de comprendre la corrélation entre les différentes amplitudes harmoniques, la matrice des coefficients de corrélation a été calculée comme indiqué dans le tableau (I.3). Le tableau montre clairement la relation linéaire positive qui existe entre le développement du 3^{ème} et 5^{ème} harmonique. De même, une relation linéaire positive est observée entre les 7^{ème}, 9^{ème} et 11^{ème} harmoniques. Cependant, la corrélation entre les 3^{ème} et 5^{ème} harmoniques avec les harmoniques d'ordre supérieur est très faible. Donc on remarque clairement que le 3^{ème} et 5^{ème} ordre d'harmonique est très important pour prédire l'état de surface de l'isolant.

	3 ^{ème}	5 ^{ème}	7 ^{ème}	8 ^{ème}	11 ^{ème}
3 ^{ème}	1	0.7962	-0.1850	-0.0432	0.0671
5 ^{ème}		1	0.0621	0.2425	0.3573
7 ^{ème}			1	0.8779	0.7568
9 ^{ème}				1	0.8367
11 ^{ème}					1

Tableau I.3: Matrice des coefficients de corrélation sous la condition 30 g / litre de NaCl.

Les caractéristiques rapportées ci-dessus du modèle du courant de fuite sous différentes conditions montrent que la gravité de la pollution et le phénomène de contournement des isolateurs en plein air peut être évaluée par l'observation de l'évolution des composantes harmoniques au cours du temps. En particulier, le changement pour les troisième et cinquième composantes harmoniques est visible et peut être détecté par l'installation de dispositifs appropriés sur les lignes.

I.2.8. Caractérisation du procédé d'érosion par les méthodes d'analyses temps-fréquence :

Une autre vision concernant le phénomène d'érosion est établie par S.W.Jee et al [36] en utilisant les méthodes d'analyses temps-fréquence ainsi que le calcul de la distribution d'énergie du signal de la tension appliquée.

L'étude du phénomène nécessite l'utilisation d'une plaque en PVC (Figure I.22), (60x60x3 mm³) et l'application d'une tension sinusoïdale de fréquence 60 Hz et d'amplitude 380 V ; l'acquisition des signaux de la tension et courant de fuite (Figure I.23) est faite grâce à un oscilloscope digital Lecroy DSO. Les tests sont réalisés suivant la norme IEC 60112 (Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems). L'électrolyte est constitué de NH₄Cl de concentration 0.1 % dans un volume d'eau de 20 mm³ est pulvérisé sur la plaque toutes les 30 s car son utilisation favorise l'apparition des décharges électriques.



Figure I.22 : Disposition des électrodes sur la plaque.

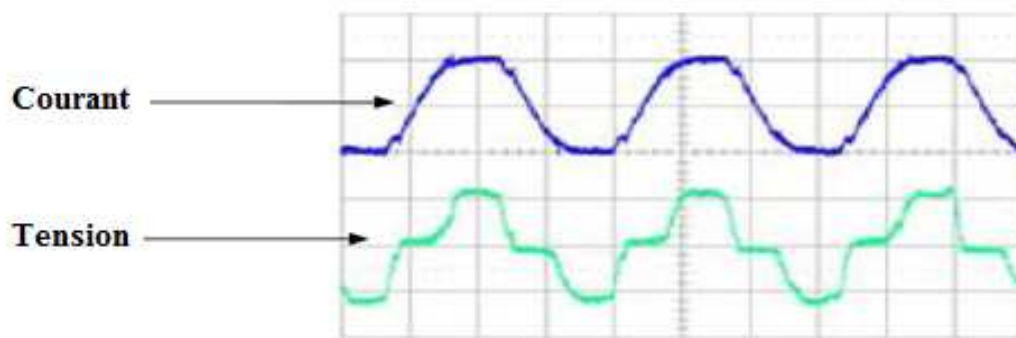


Figure I.23 : Forme d'ondes du courant de fuite et de la tension pendant la progression de la décharge

Les deux méthodes d'analyses montrent que le procédé d'érosion se décompose en cinq étapes :

- Etat statique pour une faible tension appliquée.
- Apparition des décharges partielles.
- Progression de la décharge.
- Formation du Carbone sur la surface des électrodes.
- Erosion de la plaque après la décharge disruptive.

Selon l'analyse temps-fréquence de la tension appliquée, S.W.Jee et al [36] constatent que des pics descendants apparaissent pour une allure pulsatile du courant de fuite et que l'amplitude de ces pics augmente avec la progression de la décharge partielle jusqu'à atteindre une valeur critique pour laquelle a lieu le contournement.

La distribution de l'énergie du signal de la tension montre qu'il est intéressant de caractériser les étapes d'érosions suivant ses harmoniques ; puisque l'amplitude des quatrième jusqu'au dixième harmoniques varie avec les faibles perturbations causées par les décharges électriques et que les onzième jusqu'au vingt-cinquième harmoniques nous informent sur le déroulement des cinq étapes d'érosion pour des perturbations de grandeurs élevées. Ainsi, la distribution d'énergie de la tension permet d'expliquer la nature pulsatile du courant de fuite.

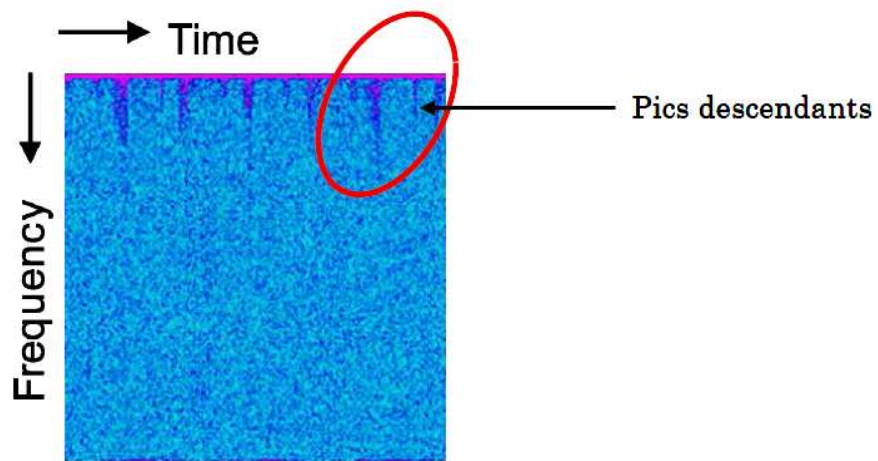


Figure I.24: Représentation temps-fréquence juste avant la décharge disruptive.

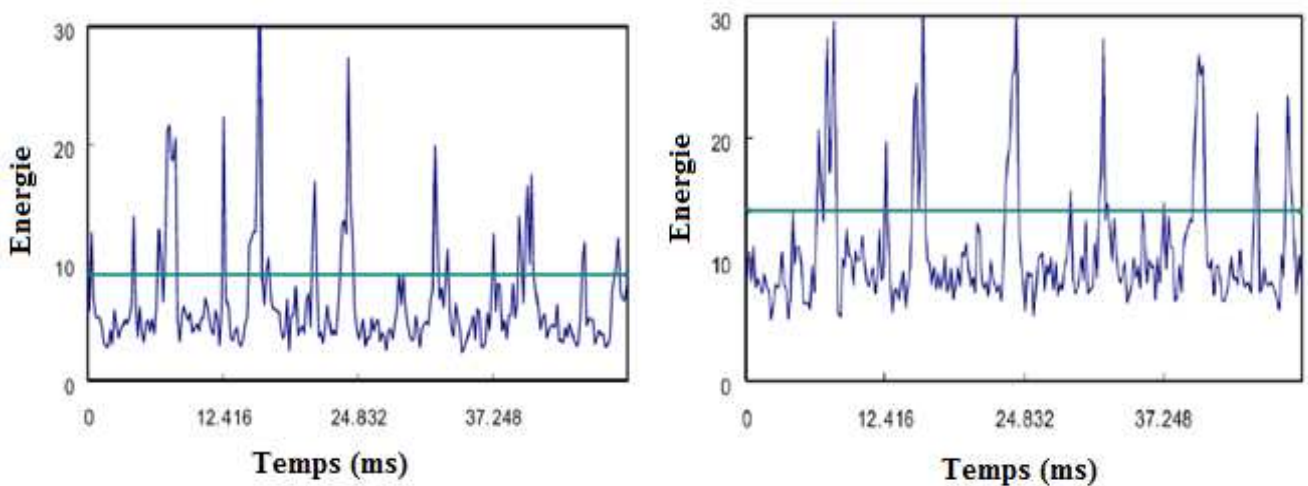


Figure I.25 : Distribution de l'énergie de la tension pour la gamme des harmoniques 4 jusqu'à 10 (à gauche) et pour la gamme 11 jusqu'à 25 (à droite) juste avant le contournement.

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

I.2.9. Etude de la probabilité d'occurrence du contournement des isolateurs composites en utilisant les composants harmoniques du courant de fuite :

Le contournement des isolateurs contaminés dans les zones polluées est un facteur très influant sur le fonctionnement des lignes. La méthode proposée par H. H. Kordkheili et al [37] permet de prédire le contournement des isolateur SiR ainsi que sa probabilité en utilisant les composants harmoniques du courant de fuite.

Les essais ont été effectués sur des profils différents (Figure I.26) dans des conditions de brouillard propre. Les caractéristiques des différents isolateurs sont dans le tableau (I.4).

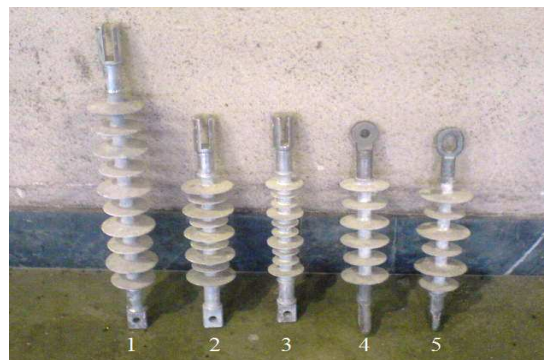


Figure I.26 : Différents profils des isolateurs.

Numéro de l'isolateur	1	2	3	4	5
Tension nominale (kV)	33	24	24	24	24
Résistance à la traction mécanique (kN)	70	70	70	70	70
Hauteur (mm)	720	520	520	449	449
ligne de fuite (mm)	1070	770	590	674	630

Tableau I.4: Caractéristiques des isolateurs.

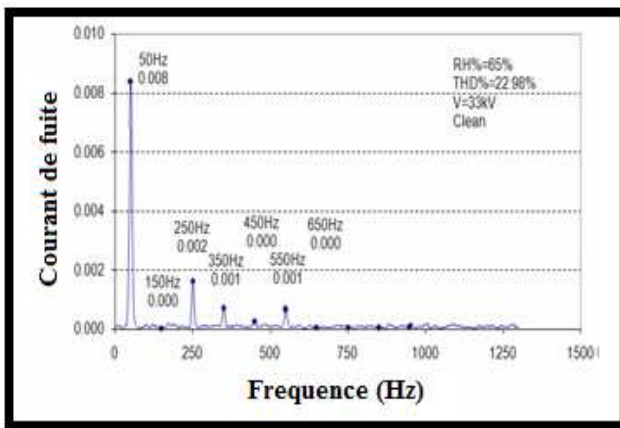
La contamination des isolateurs se fait par deux étapes pour avoir une pollution uniforme. L'isolateur est pré-contaminé par la pulvérisation d'eau distillée et le versement de poudre de kaolin pour former une fine couche de colle [38]. Par suite une solution à base de kaolin et de sel avec des concentrations différentes est préparée sous forme de pate (boue) et appliquée à la surface de l'isolateur avec différents niveaux de pollution (Tableau I.5).

Ins. No.	Kaolin /Salt (gr/lit)	Measured electrical conductance (μ S/cm)	Insulator surface area (cm ²)	ESDD (mg/cm ²)	Pollution level
1	40/40	1343	2283	0.167	Heavy
2	40/40	719	1141.5	0.176	Heavy
3	40/40	431	695	0.170	Heavy
4	40/40	568	920	0.171	Heavy
5	40/40	526	890	0.163	Heavy
1	40/30	621	2283	0.075	Moderate
2	40/30	332	1141.5	0.079	Moderate
3	40/30	218	695	0.084	Moderate
4	40/30	279	920	0.082	Moderate
5	40/30	253	890	0.077	Moderate
1	40/20	375	2283	0.045	Light
2	40/20	205	1141.5	0.048	Light
3	40/20	127	695	0.048	Light
4	40/20	176	920	0.051	Light
5	40/20	164	890	0.049	Light

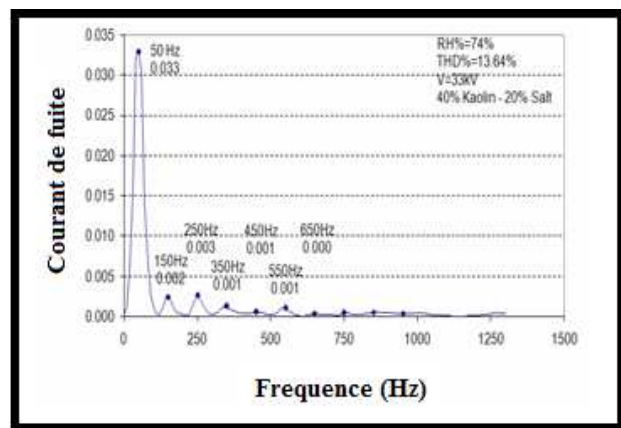
Tableau I.5 : Conductivité et concentration des différentes couches de pollution.

La méthode utilisée dans cette étude est basée sur le calcul du rapport des harmoniques 3 et 5 du courant de fuite (index $K_{5/3}$).

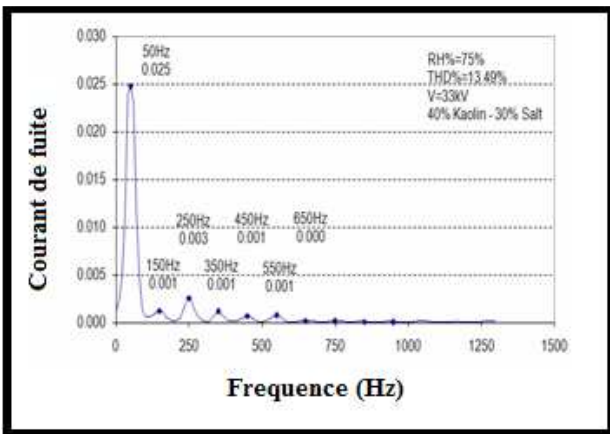
Les figures I.27, I.28 et I.29 représentent respectivement le spectre FFT, la variation des harmoniques et la forme d'onde du courant de fuite dans l'isolateur n°1 avec différents niveaux de pollution.



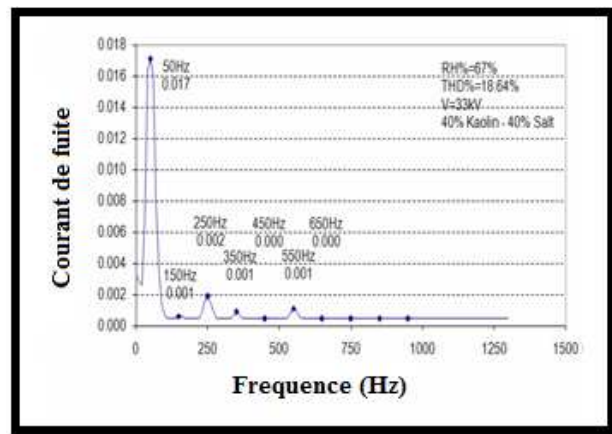
(a)



(b)

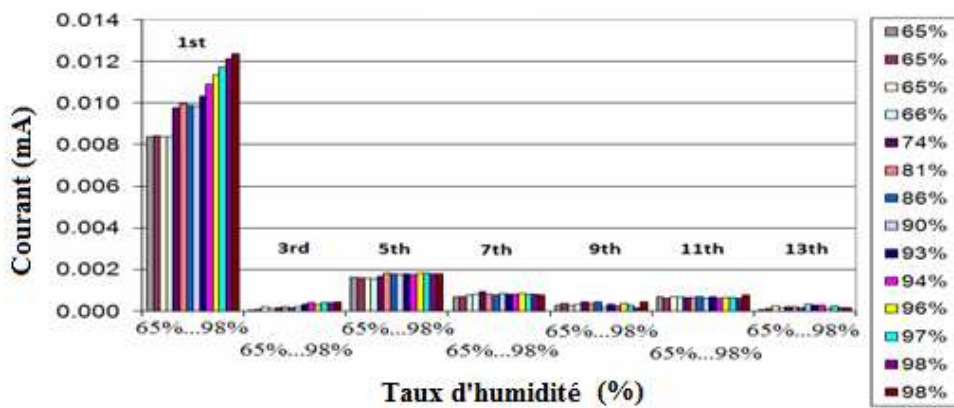


(c)

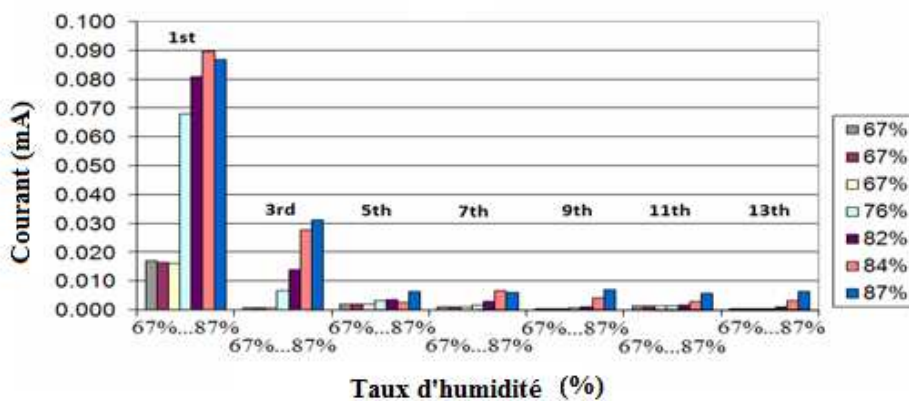


(d)

Figure I.27 : FFT du courant de fuite pour le profile n°1.
(a): Clean, (b): Light, (c): Moderate, (d): Heavy



(a)



(b)

Figure I.28: Variation des harmoniques du courant de fuite pour le profile n°1 en fonction du taux d'humidité. (a) : Clean, (b) : Heavy

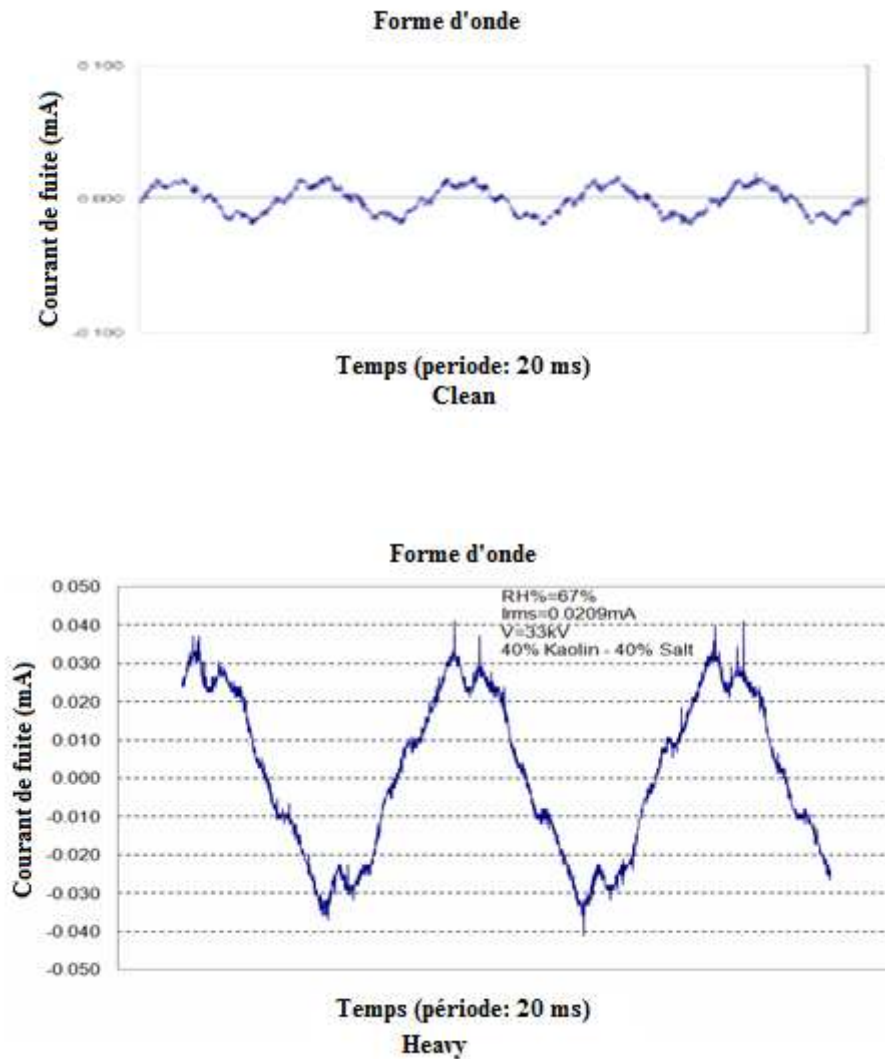


Figure I.29 : Forme d’onde du courant de fuite pour le profil n°1.

La pollution et l’humidité augmente la conductivité de la surface de l’isolateur donc il y aura un accroissement du courant de fuite. Cet accroissement provoque des décharges partielles et un assèchement de la surface, donc on aura une déformation de l’onde du courant et ainsi une augmentation de l’harmonique n°3 [39,40].

La variation du rapport (harmonique 5 / harmonique 3) forme un critère pour juger l’état de surface de l’isolateur. Le tableau (I.6) représente les valeurs de $K_{5/3}$ pour le profil n°1 avec différents niveaux de contamination.

Clear										
Humidité (%)	65%	65%	65%	66%	74%	81%	86%	90%	93%	94%
5th/3rd	5044%	1936%	860%	1224%	906%	823%	997%	792%	567%	417%
Humidité (%)	96%	97%	98%	98%						
5th/3rd	654%	444%	443%	393%						

Light										
Humidité (%)	74%	74%	74%	75%	76%	83%	89%	91%	92%	94%
5th/3rd	106%	133%	184%	209%	48%	40%	36%	41%	42%	35%

Moderate										
Humidité (%)	75%	75%	75%	77%	80%	82%	85%	89%	93%	
5th/3rd	532%	881%	320%	85%	68%	85%	32%	23%	21%	

Heavy										
Humidité (%)	67%	67%	67%	76%	82%	84%	87%			
5th/3rd	305%	292%	331%	47%	25%	8.5%	20%			

Tableau I.6 : Les valeurs de $K_{5/3}$ pour le profile n°1.

Dans les conditions propres, $K_{5/3}$ est toujours supérieur à 100% et le contournement n'a jamais eu lieu. Donc si $K_{5/3} > 100\%$ l'isolateur est dans son état normal. Pour la pollution légère l'isolateur continue à fonctionner correctement, sauf dans deux cas où le contournement a eu lieu, en précisant que la valeur de $K_{5/3}$ dans ces cas là est inférieure à 30%. Enfin pour la pollution modérée et lourde qui contient plus de sel (grande conductivité), la valeur de $K_{5/3}$ continu à diminuer jusqu'au point de contournement, et encore une fois dans tous les cas où le contournement s'est produit, $K_{5/3}$ était inférieur à 30%.

Selon les mesures, dans 41 cas, $K_{5/3}$ a été inférieur à 30%, dont sept ont conduit au contournement. Si nous considérons le problème comme ci-dessous:

«Dès que l'état de $K_{5/3} < 30\%$ est vrai, le test est similaire à un jet de pièces qui se suivent, qui a l'un des deux résultats: un phénomène de contournement avec la probabilité de (P) (Réussite) et aucun contournement avec la probabilité de (1-P) (Défaillance). Chaque essai dure deux minutes. »

Les processus peuvent être modélisés à l'aide de la distribution de probabilité géométrique des variables aléatoires appelée "distribution géométrique" et représentés par $g(x, p)$:

$$g(x; p) = p q^{x-1} \quad (x=1, 2, 3, \dots)$$

Où: x est le nombre d'essais de Bernoulli, p est la probabilité de succès et $q = 1-p$ est la probabilité de défaillance.

I.2.10. Analyse micro-structurale d'isolateurs sains et d'isolateurs en porcelaine soumis à un vieillissement du au champ électrique:

Dans l'intention d'apporter un nouvel aspect d'analyse hormis le traitement du signal pour caractériser l'état de surface des isolateurs ayant subi une longue période d'utilisation, A. Rawat et R.S. Gorur [41] utilisent l'analyse micro-structurale pour des isolateurs vieillis par le champ électrique et d'autres neufs (Figure I.29).

Les deux techniques basées sur la XRD (X-Ray-Diffraction) et la SEM (Scanning Electron Microscopy) sont les principaux outils utilisés pour avoir des renseignements précis sur la répartition des matières premières qui forment la porcelaine comme le quartz, le mellite et le corindon ; le calcul du taux de porosité a été bénéfique pour établir l'influence du champ électrique intense sur les isolateurs en porcelaine. Le but de cette étude concerne l'évaluation des performances des isolateurs en termes de rigidité mécanique et de rigidité électrique. 200 échantillons utilisés dans le réseau 115/500 kV sont ramenés des différentes régions d'Amérique du nord et sont testés au laboratoire sous tension alternative (60 Hz) selon la norme ANSI C29.1 [42]. Ces isolateurs avaient subi des perforations et des microfissures causées, soit par le phénomène de contournement, soit par une activité intense des décharges partielles sur leurs surfaces. La variation de couleur observée sur ces matériaux va du blanc au jaune verdoyant ; ceci peut être interprété par la présence d'impuretés introduites au sein de l'argile durant le processus de fabrication [43].



Figure I.29: Différents types d'isolateurs testés.

Les tests de la rigidité mécanique et de la rigidité électrique montrent que les isolateurs perforés sont tout à fait aptes à poursuivre leur fonction de support mécanique pendant quelques années du moment qu'ils répondent aux normes standards.

L'analyse par la XRD du matériau isolant montre que les isolateurs ayant un fort taux d'alumine et pour lesquels la décharge électrique avait suivi le chemin de perforation, ont un faible résidu de quartz ; par contre les isolateurs pour lesquels la décharge n'avait pas suivi le chemin de perforation, ont un résidu de quartz élevé. Pour le ciment, la XRD révèle qu'une expansion de celui-ci autour de la cavité où se trouve l'électrode haute tension produirait une forte intensité du champ électrique, qui va engendrer des fissures au niveau de la porcelaine [44]; cette expansion causée par la formation d'oxyde de magnésium à partir d'un procédé d'humidification qui fait apparaître de l'étringite, produite par une réaction chimique entre le ciment et les ions sulfatés [45].

Les observations relatives à l'analyse par SEM sont synthétisées dans le tableau (I.7).

Eléments	Isolateurs perforés	Isolateurs en bon états
Quartz	Nombre important de particules sur la périphérie de l'isolateur avec un diamètre $D > 50\mu\text{m}$	Nombre réduit de particule sur l'isolateur avec un diamètre $D < 25\mu\text{m}$
Corindon	Très faible quantité avec un diamètre $14 < D' < 16\mu\text{m}$	Distribution uniforme des particules avec un diamètre $D' < 10\mu\text{m}$
Taux de porosité	Grand nombre de pores formant des agglomérations.	Pores dispersés avec un faible taux d'existence.
Mullite	Occupe une grande surface.	Particules de mullite en contact l'une avec l'autre.

Tableau I.7 : Principales observations par la SEM.

Il s'avère que la présence du corindon réduit la probabilité d'occurrence des fissures puisqu'il diminue l'intensité du champ électrique, mais il ne peut garantir une protection à long terme. La présence de pores sous forme d'agglomération indique une exposition à un champ électrique intense. Le quartz est en grande partie responsable des fissures occasionnées par le champ électrique, donc il serait préférable de fabriquer la porcelaine avec un faible taux de quartz dont les particules possèdent de petites dimension ($D < 25\mu\text{m}$). Aussi, la présence des particules de sable dans le ciment permet de limiter l'expansion de celui-ci dans la cavité de l'isolateur mais elle n'a aucune influence sur la formation des microfissures.

Chapitre II :
*Théories du traitement du
signal*

Introduction :

Les enregistrements du signal du courant de fuite montrent que son allure varie clairement en fonction de plusieurs paramètres, comme la tension appliquée ou la disposition de la couche de pollution sur notre isolateur. Pour comprendre cette variation, il est primordial de connaître les concepts fondamentaux du traitement de signal à savoir, l'échantillonnage, la transformée de Fourier, ainsi que le taux de distorsion.

On appelle « **traitement du signal** », toutes les méthodes et les techniques qui permettent l'extraction de l'information à partir d'un signal quelconque.

II.1. Définition d'un signal [46]:

Un signal est un support d'information modélisé par un objet mathématique qui représente des variations d'une grandeur physique en fonction d'une variable (le temps par exemple). Cet objet peut être **continu** donc disponible à tout instant, ou **discret** à condition qu'il soit observable à des instants particulièrement espacés.

On appelle « signal utile » le signal qui nous intéresse (l'objet de notre application), et on appelle « bruit » tout signal qui perturbe notre signal utile.

$$s(t) = x(t) + b(t)$$

$s(t)$: signal reçu

$x(t)$: signal intéressant

$b(t)$: bruit

II.2. Energie et puissance des signaux [46]:

II.2.1. Energie totale d'un signal :

Dans le cas d'un signal continu :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt$$

Dans le cas d'un signal discret :

$$E = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} |x(k)|^2$$

II.2.2. Puissance moyenne d'un signal :

Dans le cas d'un signal continu :

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} |x(t)|^2 dt$$

Dans le cas d'un signal discret :

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^{k=+N} |x(k)|^2$$

II.3. Les types de signaux [46, 47]:

Avant d'entamer un traitement quelconque de signal, il est primordial de connaître sa nature pour choisir la méthode analysante adéquate. L'organigramme de la figure ci-dessous nous montre les différents types de signaux qui peuvent être rencontrés.

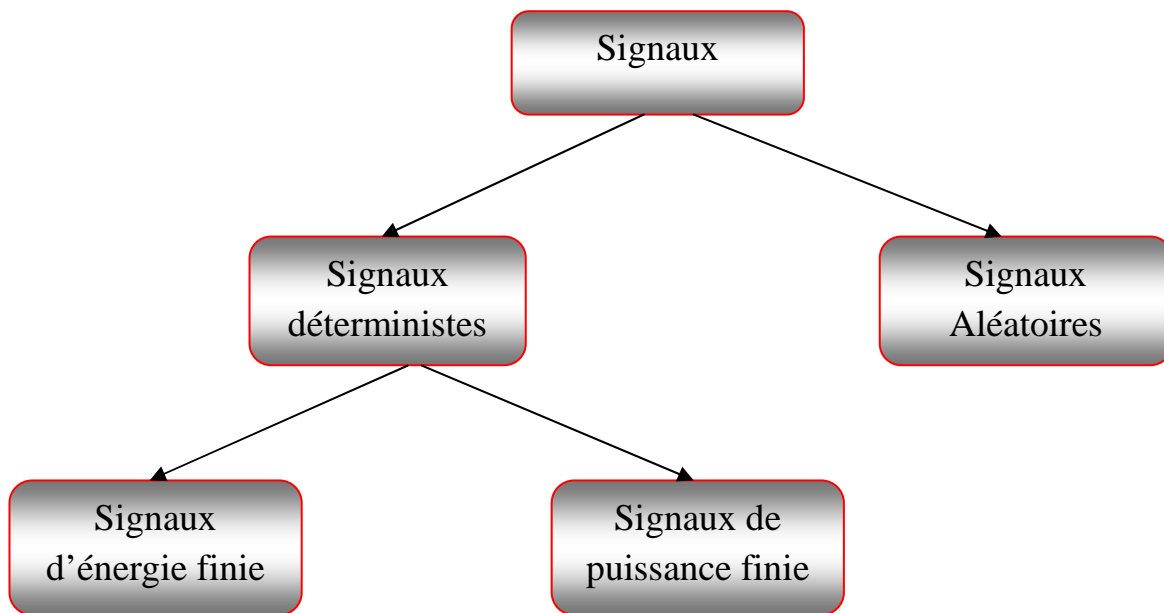


Figure II.1: Les différents types de signaux

II.3.1. Les signaux aléatoires :

Il s'agit de signaux dont le modèle mathématique n'est pas connu (Figure II.2.1). Leur évolution en fonction du temps est imprévisible.

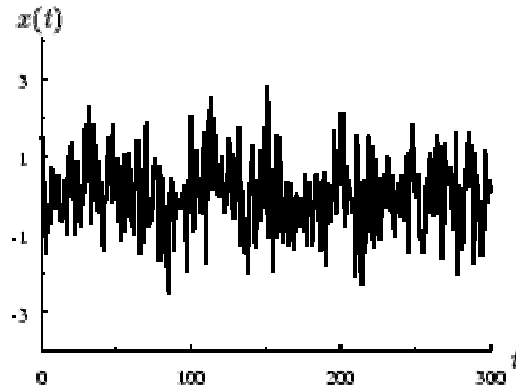


Figure II.2.1: Exemple d'un signal aléatoire

II.3.2. Les signaux déterministes :

Il s'agit de signaux dont le modèle mathématique est connu (Figure II.2.2). Leur évolution en fonction du temps peut donc être parfaitement prédite. Ils peuvent être classés en deux groupes selon qu'ils soient d'énergie finie ou de puissance finie.

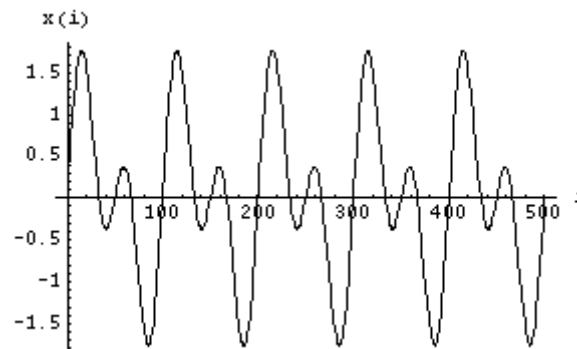


Figure II.2.2: Exemple d'un signal déterministe

On distingue deux grandes classes de signaux déterministes selon leur nature énergétique :

II.3.2.1. Les signaux à énergie finie :

$$E < \infty \quad \Rightarrow \quad P = 0$$

Ces signaux se caractérisent par leur énergie puisque leur puissance moyenne est nulle.

II.3.2.2. Les signaux puissance moyenne finie non-nulle:

$$P < \infty \quad \Rightarrow \quad E = \infty \quad (\text{leurs énergie est infinie})$$

Ces signaux se caractérisent par leur puissance, ils ne sont pas physiquement réalisables.

II.4. Transformée de Fourier :

Introduction :

Il y a deux domaines importants de description du signal selon la nature de la variable :

- Le domaine de description temporel, dans lequel la variable indépendante est le temps. Il s'agit du domaine de description usuel des signaux. Dans ce domaine de représentation, le signal peut être caractérisé par sa durée, sa période, ou son amplitude.

- Le domaine fréquentiel, dans lequel la variable indépendante est la fréquence dont la dimension est l'inverse du temps. Dans ce domaine de représentation, le signal peut être caractérisé par sa bande passante, sa fréquence fondamentale, ou sa phase.

Ces deux domaines de description du signal sont reliés entre eux par la transformée de Fourier qui constitue une généralisation de la série de Fourier. Cette dualité entre les domaines de description temporelle et fréquentiel est le fondement de la plupart des méthodes du traitement du signal.

II.4.1. Définition de la transformée de Fourier [46] :

La transformée de Fourier est une généralisation de la série de Fourier appliquée aux signaux non périodiques. De nos jours, cette transformée est devenue un outil puissant en traitement du signal puisqu'elle localise toutes les composantes fréquentielles d'un signal quelconque. Cependant, son application est liée à la nature du signal, qu'il soit continu ou discret.

II.4.2. La transformée de Fourier d'un signal continu :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

II.4.2.1. Conditions d'existence [46]:

Tous les signaux ne possèdent pas obligatoirement des transformées de Fourier. Pour qu'un signal $x(t)$ ait une transformée de Fourier, les conditions de Dirichlet sont nécessaires et suffisantes :

Condition 1 : Dans l'intervalle considéré T , le signal $x(t)$ doit être absolument intégrable :

$$\int_{(T)} |x(t)| dt < \infty$$

Condition 2 : Dans l'intervalle considéré T , le signal $x(t)$ doit posséder un nombre fini d'extremums (maxima et minima)

Condition 3 : Dans l'intervalle considéré T , le signal $x(t)$ doit avoir un nombre fini de discontinuités. En plus, chacune des discontinuités doit être finie.

Exemple : $x(t) = \sin(1/t) \quad 0 < t \leq 1$

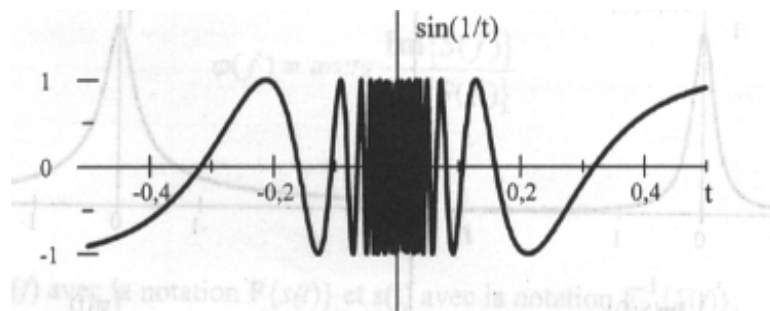


Figure II.3 : représentation graphique du signal $x(t)$

D'après la figure (II.3), ce signal vérifie la condition 1, mais ne vérifie pas la condition 2. Il possède un nombre infini d'extremums, donc la transformée de Fourier n'est pas applicable sur ce signal.

II. 4.2.2. Propriétés [46] :

- Linéarité :

$$a.s_1(t) + b.s_2(t) \xrightarrow{\text{TF}} a.S_1(f) + b.S_2(f)$$

- Translation dans le domaine temporelle :

$$s(t - t_0) \xrightarrow{\text{TF}} S(f) \cdot e^{-j2\pi f t_0}$$

- Translation dans le domaine fréquentielle :

$$s(t) \cdot e^{-j2\pi f_0 t} \xrightarrow{\text{TF}} S(f - f_0)$$

- Convolution temporelle :

$$s_1(t) * s_2(t) \xrightarrow{\text{TF}} S_1(f) \cdot S_2(f)$$

- Convolution dans le domaine fréquentielle :

$$s_1(t) \cdot s_2(t) \xrightarrow{\text{TF}} S_1(f) * S_2(f)$$

- Théorème de Parseval :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |S(f)|^2 df$$

Ce théorème très important montre que l'énergie totale d'un signal $s(t)$ peut être déterminée en considérant la puissance instantanée ($|s(t)|^2$) ou l'énergie par unité de fréquence ($|S(f)|^2$).

Les quantités $|s(t)|^2$ et $|S(f)|^2$ sont respectivement la densité temporelle d'énergie (DTE) et la densité spectrale d'énergie (DSE). Ce théorème montre donc que l'énergie du signal peut être répartie sur le spectre (Figure II.4).

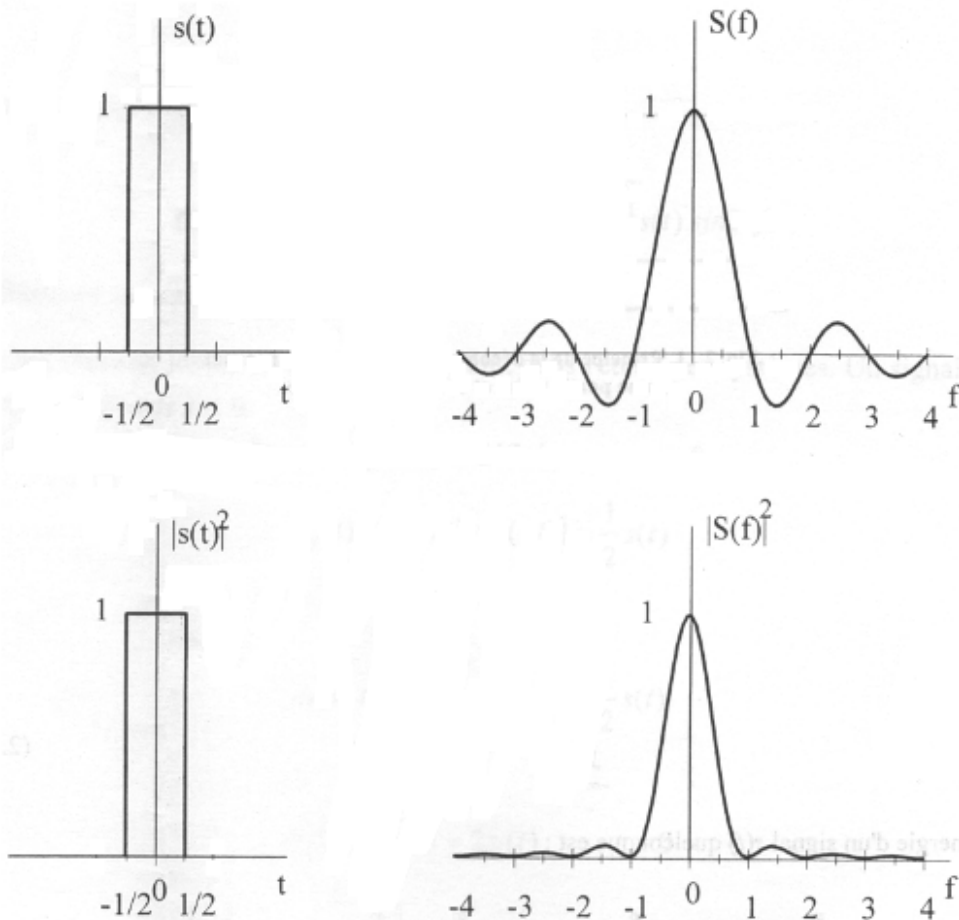


Figure II.4: Théorème de Parseval : les aires au dessous

de $|s(t)|^2$ et $|S(f)|^2$ sont égales.

II .4.3. La transformée de Fourier d'un signal discret [54]:

La transformée de Fourier discrète est une méthode d'analyse et de traitement fondamentale dans l'étude des systèmes et des signaux numériques.

La transformée de Fourier à temps discret effectue un produit scalaire entre un signal discret et l'exponentielle complexe pour chaque fréquence f . Le but de cette transformée est de rechercher les périodicités dans un signal de durée finie, pour mesurer leurs contributions via une représentation fréquentielle.

L'expression mathématique de la TFD est la suivante :

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{-j2\pi m \left(\frac{k}{N}\right)} \quad m = 0, 1, \dots, N-1$$

Les nombres « m » sont liés aux instants d'échantillonnage temporel.

Contrairement à la transformée de Fourier d'un signal continu (analogique), la transformée de Fourier d'un signal discret est périodique d'une période égale à l'unité qui est généralement représentée sur l'intervalle $[-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}]$.

Comme $S(f)$ est périodique de période égale à 1, il suffit de l'échantillonner sur une seule période. Chaque période peut être divisée en N échantillons (Figure II.5.1 et II.5.2).

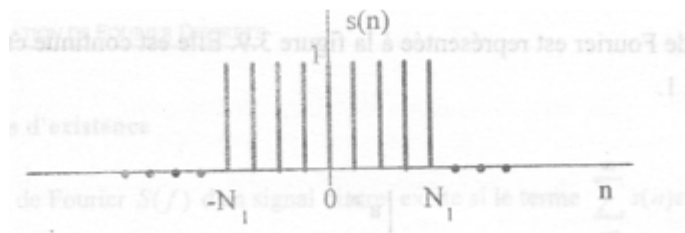


Figure II.5.1 : Impulsion rectangulaire discrète

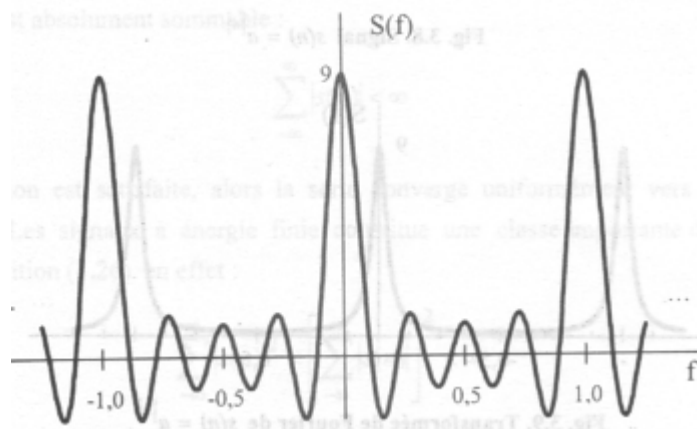


Figure II.5.2 : Transformée de Fourier de l'impulsion rectangulaire discrète pour $N=4$

De manière inverse, on peut calculer $x(k)$ à partir de $X(m)$ à l'aide de la transformée de Fourier inverse à temps discret (ITFD) tel que :

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) \cdot e^{j2\pi m(\frac{k}{N})} \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

II.4.3.1. Conditions d'existence [46]:

La transformée de Fourier $S(f)$ d'un signal discret existe si le terme $\sum_{-\infty}^{+\infty} x(k) \cdot e^{-j2\pi f k}$ est fini, c'est-à-dire que la série converge.

Comme le module du terme $e^{-j2\pi f n}$ est toujours égal à 1, la condition suffisante pour que $S(f)$ existe est que la suite $s(n)$ soit absolument sommable :

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} |x(k)| < \infty$$

II.4.3.2. Propriétés [46]:

La plupart des propriétés de la transformée de Fourier des signaux continus ont leurs équivalents dans la DFT. Ces propriétés vont nous permettre un usage facile de la DFT.

- Périodicité :

Nous avons vu que le nombre d'échantillons contenu dans le signal $s(n)$ est égal à celui contenu dans le signal $S(m)$ et que la discrétisation temporelle conduit à un spectre périodique dans le domaine fréquentiel. De la même façon une discrétisation fréquentielle conduit à une périodisation dans le domaine temporel. Ainsi les suites d'échantillons $s(n)$ et $S(m)$ sont périodiques de période N

$$\begin{cases} s(n) = s(n + p \cdot N) & 0 \leq n \leq N - 1 \\ S(m) = S(m + p \cdot N) & 0 \leq m \leq N - 1 \end{cases} \quad \text{Pour toute valeur entière de } p$$

- La linéarité :

$$a \cdot x(k) + b \cdot y(k) \xrightarrow{\text{DFT}} a \cdot X(m) + b \cdot Y(m)$$

- Décalage en temps :

$$x(k - k_0) \xrightarrow{\text{DFT}} X(m) \cdot e^{-j2\pi \left(\frac{m}{N}\right) k_0}$$

- Décalage en fréquence :

$$x(k) \cdot e^{-j2\pi \left(\frac{k}{N}\right) m_0} \xrightarrow{\text{DFT}} X(m - m_0)$$

- Conjugaison :

$$x^*(k) \xrightarrow{\text{DFT}} X^*(-m)$$

- Produit de convolution :

$$x_1(k) * x_2(k) \xrightarrow{\text{DFT}} X_1(m) \cdot X_2(m)$$

- Théorème de Parseval :

$$\sum_{k=0}^{N-1} |x(k)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} |X(m)|^2$$

II.4.3.3. La FFT :

J.W.COOLEY et W.TURKEY [46] ont révolutionné le domaine du traitement numérique du signal avec la publication en 1965 d'un algorithme de calcul rapide de DFT appelé transformation de Fourier rapide plus connu sous le nom de la FFT (Fast Fourier Transform)

Lorsque le signal échantillonné est de taille $N = 2^n$, la transformée de Fourier peut être calculée à l'aide d'un algorithme nommé transformée de Fourier rapide (FFT) qui permet un gain de calcul appréciable. Ce gain a pour expression :

$$\text{Gain} = \frac{N}{\log_2(N)}$$

II.4.4. Echantillonnage :

II.4.4.1. Définition de l'échantillonnage :

Le principe de base d'un échantillonneur est réalisé à l'aide d'un interrupteur qui s'ouvre et se ferme périodiquement à la fréquence $F_e = 1/T_e$. Le signal d'entrée $s(t)$ apparaît en sortie lorsque l'interrupteur est fermé et disparaît lorsque l'interrupteur est ouvert. Le signal échantillonné $s_e(t)$ est une suite d'impulsions périodiques de très faible durée du signal d'entrée. Le signal échantillonné $s_e(t)$ est alors une simple multiplication du signal analogique $s(t)$ par une fonction d'échantillonnage $f(t)$.

II.4.4.2. Le théorème de Shanon :

Le théorème de Shanon, appelé aussi « théorème d'échantillonnage » énonce qu'un signal réel à fréquence maximale f_s doit être échantillonné avec une fréquence F_e supérieure ou égale à deux fois la fréquence maximale. Cette fréquence d'échantillonnage porte le nom de fréquence de Nyquist.

Lorsque cette condition n'est pas respectée, l'opération de reconstruction parfaite n'est plus possible et on assiste à une interférence des motifs : ce phénomène est connu sous le nom de repliement de spectre.

La figure (II.6.2) montre l'échantillonnage d'une sinusoïde de fréquence **50 Hz** et d'amplitude **A=4** (Figure II.6.1) avec les deux fréquences 80 Hz et 1 kHz. Nous constatons que le signal échantillonné avec la fréquence 1 kHz est mieux reconstruit que celui échantillonné avec la fréquence 80 Hz.

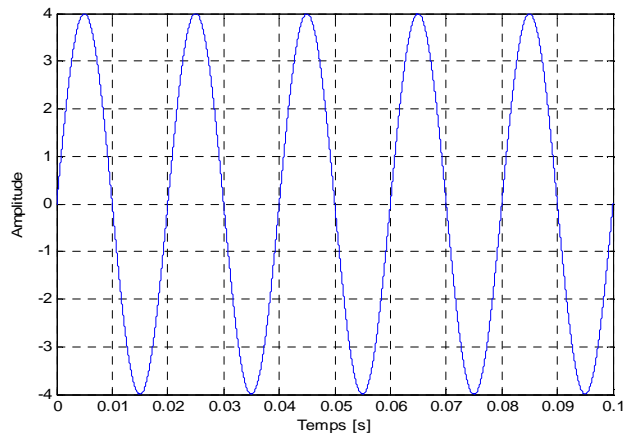


Figure II.6.1 : Allure d'une sinusoïde parfaite de fréquence **50 Hz** et d'amplitude **A=4**.

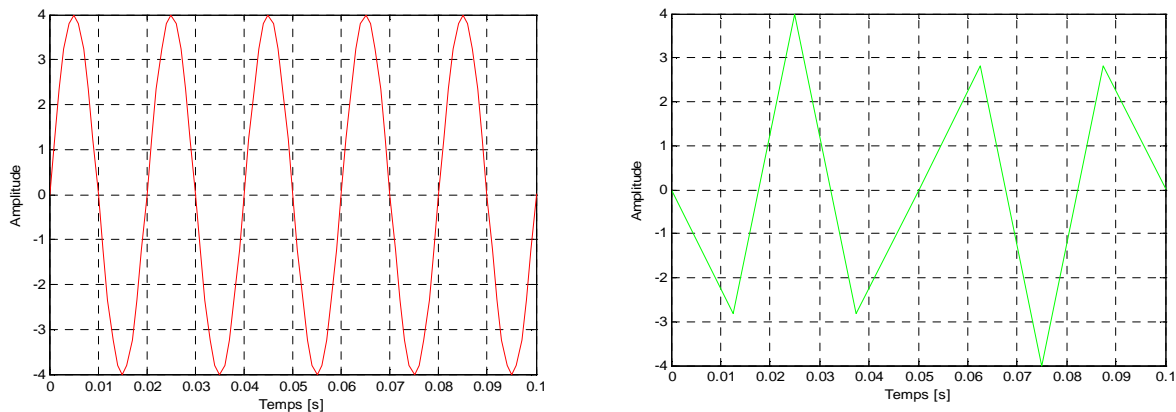


Figure II.6.2: Allure de la sinusoïde échantillonnée pour $F_e=80$ Hz (à droite en vert) et pour $F_e= 1$ kHz (à gauche en rouge).

II.4.5. La technique de distorsion harmonique (THD) :

Les courants harmoniques sont les composantes sinusoïdales d'un courant électrique périodique décomposé en série de Fourier. Les harmoniques ont une fréquence multiple de la fréquence fondamentale, généralement de 50 ou 60 hertz dans les réseaux électriques.

On appelle distorsion toute déformation apportée à un signal lors de son passage à travers un système quelconque (**Figure II.7**).

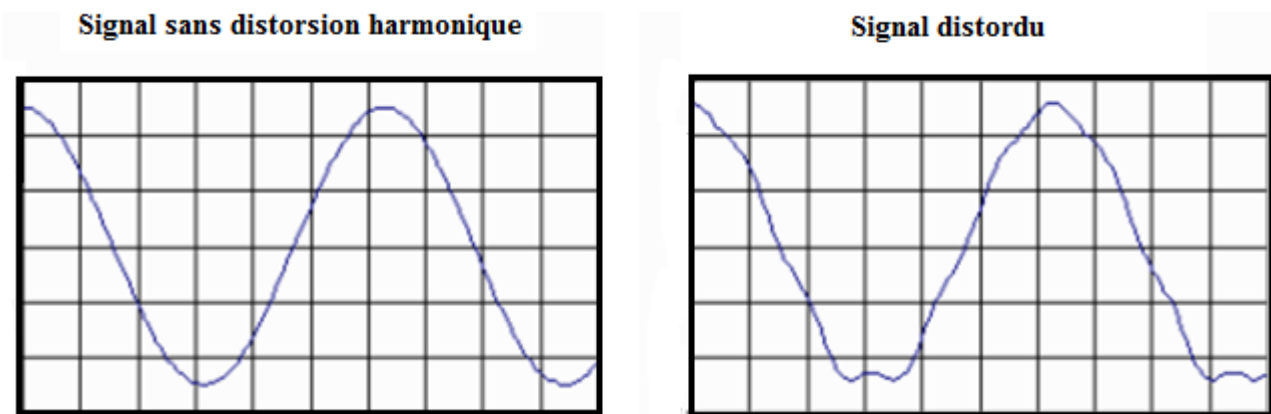


Figure II.7: Signal sans distorsion harmonique (à gauche), signal distordu (à droite)

Le **taux de distorsion harmonique** (abrégé THD, *total harmonic distortion* en anglais) représente la variation d'un signal par rapport à une référence.

Le taux de distorsion harmonique total décrit l'influence des composantes harmoniques d'un signal, il est défini selon la CEI 61000-2-2 comme suit :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{Q_h}{Q_1}\right)^2} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} Q_h^2}}{Q_1}$$

- Q_h : valeur efficace de l'harmonique au rang h.
- Q_1 : composante fondamentale.

- h : rang harmonique.
- H : rang harmonique maximal, en théorie infini.

Dans notre étude, on s'intéresse aux distorsions de l'onde du coutant de fuite :

$$\text{THD (\%)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad \%$$

Où: I_1 : premier harmonique

I_N : $n^{\text{ème}}$ harmonique

Conclusion :

Dans cette partie, nous avons présenté brièvement l'environnement du traitement du signal, en définissant ce que c'est qu'un signal, et en traitant les principales idées sur la transformée de Fourier à temps continu et à temps discret.

Pour faire une bonne analyse, il faut tout d'abord connaître la nature du signal à traiter, ainsi que ses propriétés, après cela on pourra entamer notre traitement tout en respectant les règles basiques qu'on a pu voir dans cette partie, comme par exemple : le théorème d'échantillonnage qui constitue la base de toute parfaite reconstruction.

L'estimation spectrale aboutit à de meilleurs résultats avec le périodogramme de Welch qui réduit de façon appréciable la variance pour une meilleure distribution fréquentielle du signal.

II.5. Transformée en ondelettes :

Introduction [48, 49]:

La plupart des signaux du monde réel ne sont pas stationnaires, et c'est justement dans l'évolution de leurs caractéristiques (fréquentielles, temporelles, spatiales) que réside l'essentiel de l'information qu'ils contiennent. Or l'analyse de Fourier propose une approche globale du signal, les intégrations sont faites de moins l'infini à plus l'infini, et toute notion de localisation temporelle (ou spatial pour les images) disparaît dans l'espace de Fourier, il faut donc trouver un compromis, une transformation qui nous renseigne sur le contenu fréquentiel tout en préservant la localisation afin d'obtenir une représentation temps/fréquence ou espace/échelle du signal.

L'analyse par la technique des ondelettes fournit de meilleurs résultats pour le traitement local qui a pour objectif de détecter les points de discontinuités ou les zones déformées du signal, qui sont souvent de hautes fréquences.

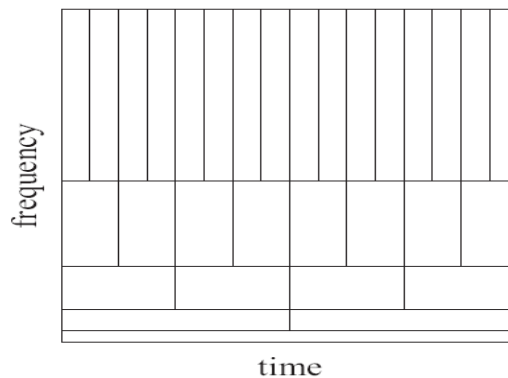


Figure II.8.1: Représentation de la multi-résolution temps-fréquence pour la transformée de Fourier Rapide.

On constate d'après la représentation temps-fréquence (Figure II.8.1) que les composantes de faibles fréquences (en bas) ont une longue évolution temporelle alors que celles de hautes fréquences apparaissent pendant un très court instant. Donc il faut utiliser de longs intervalles temporels si on veut avoir une bonne résolution pour les faibles fréquences. Par contre, pour étudier les hautes fréquences, cet intervalle temporel doit être relativement court, ce qui affecte la résolution des basses fréquences. Et donc on a un compromis temps-fréquence.

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

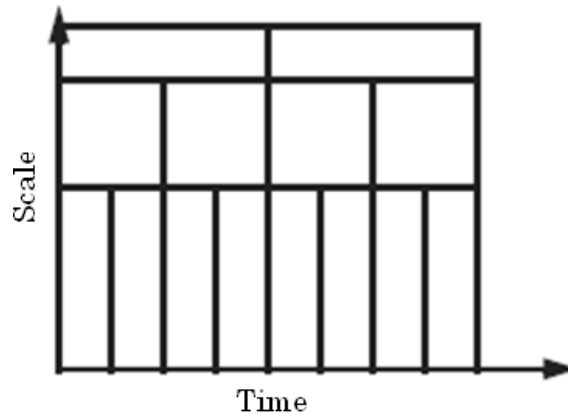


Figure II.8.2: Représentation de la multi-résolution temps-échelle pour l'analyse par les ondelettes.

II.5.1. Transformée en ondelettes continue (CWT) :

II.5.1.1. Définition [50,51]:

La transformée en ondelette continue (CWT) utilise des ondelettes dont l'enveloppe rétrécit avec l'échelle en gardant le même nombre d'oscillations. Fondamentalement, la transformée en ondelette se calcule de la même manière que la transformée de Fourier fenêtrée, autrement dit on regarde la corrélation au sens du produit scalaire entre le signal à analyser et la famille de fonction $\Psi_{a,b}(t)$

II.5.1.2. Expression mathématique [54]:

Une ondelette est une onde qui oscille à fréquence constante et qui s'annule au bout d'un instant donné (Figure II.9). La fonction analysante peut être choisie en toute liberté contrairement à la transformée de Fourier qui se restreint uniquement aux fonctions sinusoïdales.

$$\boxed{\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right)} \quad (u \in \mathbf{R}_+^*, s \in \mathbf{R})$$

Ψ : l'ondelette mère

u : l'échelle de l'ondelette

s : la translation de l'ondelette

La normalisation par le facteur $\frac{1}{\sqrt{3}}$ engendre la conservation d'énergie de l'ondelette mère durant son oscillation temporelle.

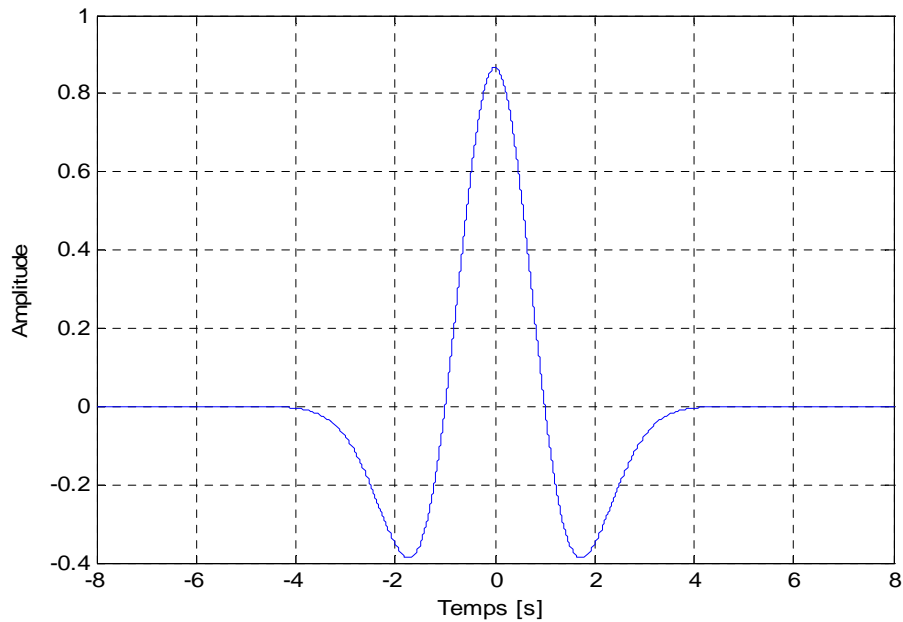


Figure II.9 : Exemple de l'ondelette chapeau mexicain.

II.5.1.3. Les conditions que doivent satisfaire les fonctions ondelettes [46]:

1. L'ondelette doit être une fonction admissible (de moyenne nulle) comme on l'a dit précédemment :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$$

2. Une ondelette doit être à énergie finie :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty$$

3. Une ondelette doit être analytique : sa transformée de Fourier doit être nulle pour $f < 0$.

Expression de la transformée en ondelette continue de la fonction \mathbf{f} pour l'échelle \mathbf{u} et la position \mathbf{s} :

Elle est calculée en associant la fréquence f_0 à une ondelette telle que :

$$W f(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt$$

La formule de **Fourier-Parseval** appliquée à l'équation nous donne :

$$W f(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_{u,s}^*(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) \hat{\psi}_{u,s}(\omega) d\omega$$

Les coefficients d'ondelette $\mathbf{W f (u, s)}$ dépendent ainsi des valeurs de $\mathbf{f(t)}$ et $\hat{\mathbf{f}}(\omega)$ dans le domaine temps-fréquence où l'énergie de $\mathbf{\Psi_{u,s} (t)}$ et $\hat{\mathbf{\Psi}}_{u,s}(\omega)$ est concentrée. Ainsi, des signaux variables dans le temps sont détectés à partir des coefficients et de l'échelle des coefficients.

II.5.1.4. Ondelette de Morlet :

Le problème traité par Morlet était celui de l'analyse de données issues de sondages sismiques effectués pour les recherches géologiques ; ces données sont particulièrement adaptées à une technique d'analyse sur son contenu fréquentiel ce qui est tout l'intérêt de ce type de transformation.

La première famille d'ondelettes présentée par J. Morlet est issue de la fonction :

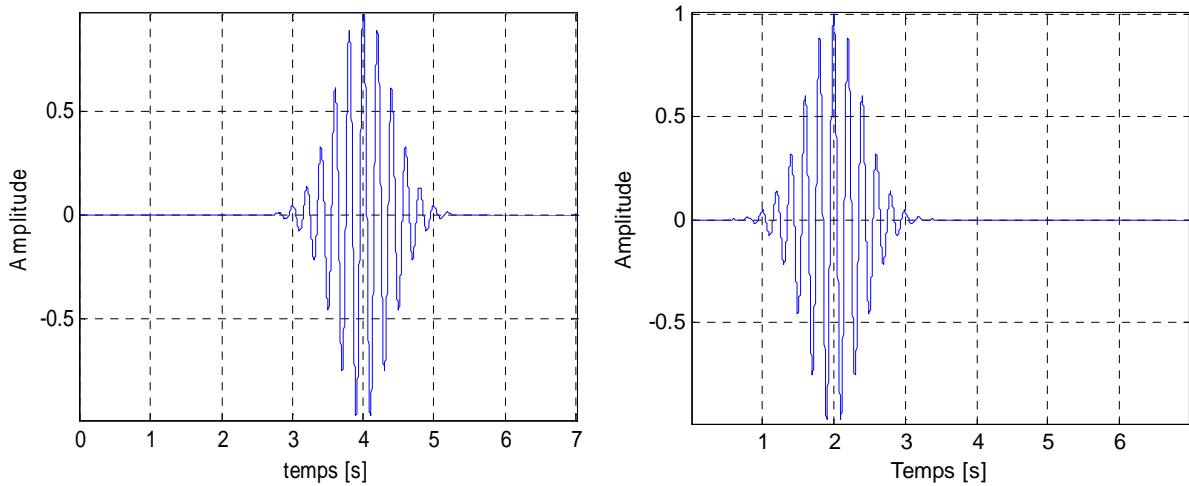
$$\psi(t) = e^{-\left(\frac{\alpha^2 \cdot t^2}{2}\right)} \cdot e^{-j2\pi f_0 t}$$

Elle est inspirée du signal élémentaire de Gabor, c'est à dire par modulation d'une gaussienne. Depuis, toutes les ondelettes $\Psi(t)$ correspondant à une modulation d'amplitude d'enveloppe $A(t)$ portée par une exponentielle complexe, s'appellent ondelettes de type Morlet.

Elle ne satisfait pas rigoureusement à la condition d'admissibilité mais le choix de f_0 a permis d'approcher cette condition. La solution de compromis retenue par Morlet consistait à imposer une valeur faible de $|\Psi(0)|$ tout en ne tolérant qu'un petit nombre d'oscillations. La famille d'ondelettes de Morlet donne un outil remarquable pour l'analyse de signaux (Figure II.10).

L'ondelette de Morlet complexe tradatée par u et dilatée par s a pour expression mathématique :

$$\Psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} e^{-\pi \left(\frac{t-u}{s}\right)^2} \cdot e^{-10j\pi \cdot \left(\frac{t-u}{s}\right)}$$



(a)

(b)

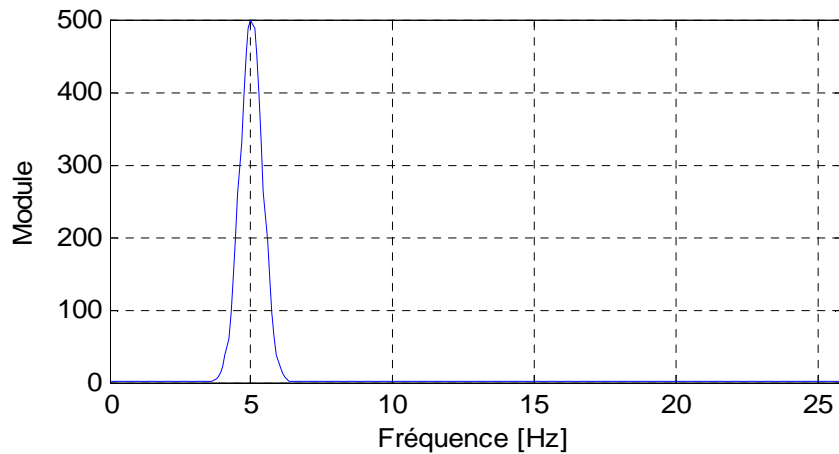


Figure II.10 : Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la translation pour $s = 1$: (a) $u = 4$, (b) $u = 2$.

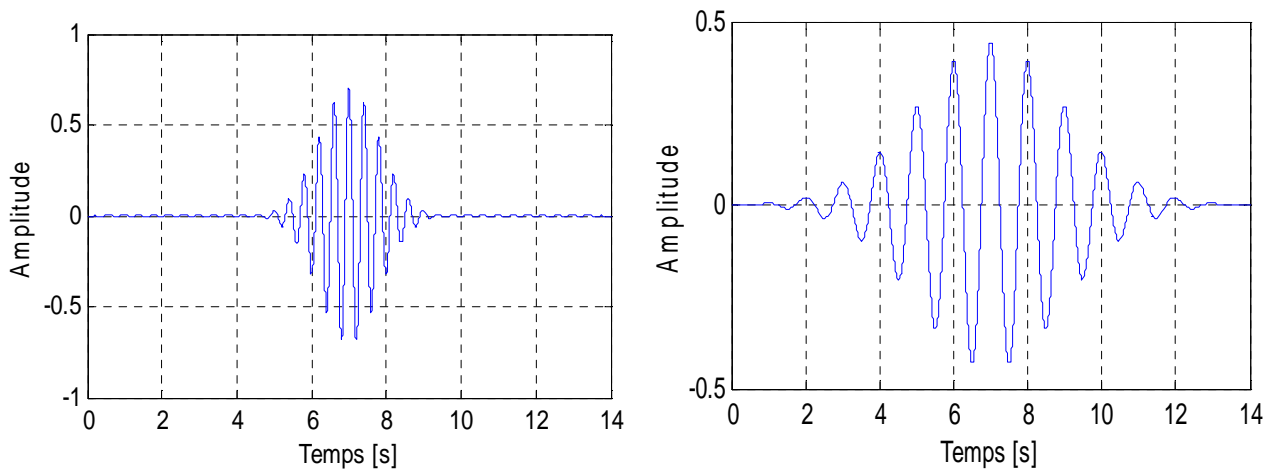


Figure II.11: Représentation temporelle de l’ondelette de Morlet sous l’effet de la dilatation pour $u=7$ (à gauche $s=3$ et à droite $s=5$).

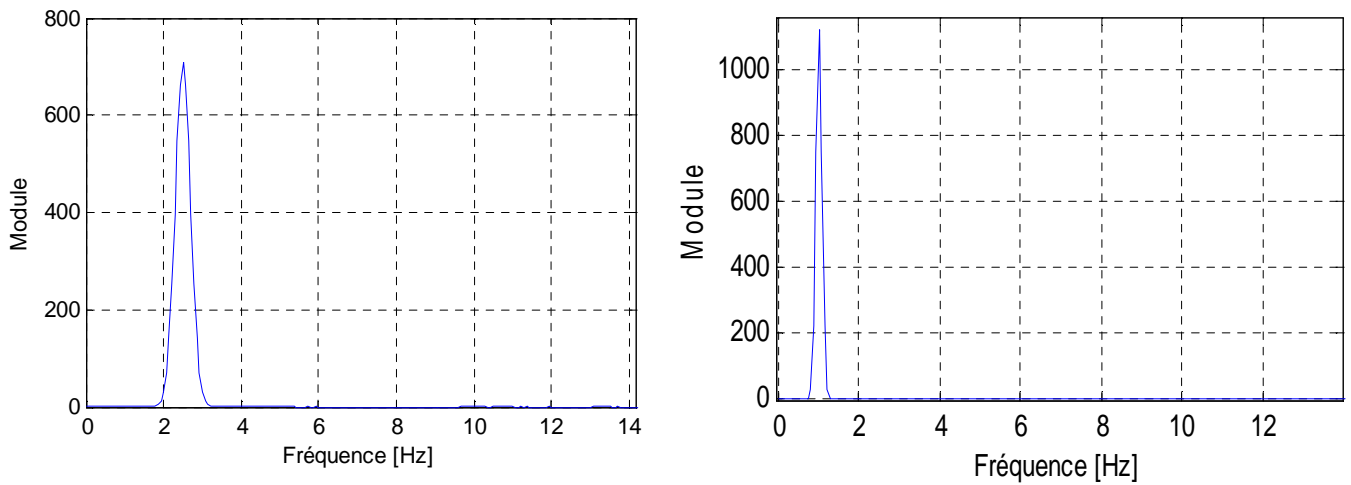


Figure II.12: Représentation fréquentielle de l’ondelette de Morlet sous l’effet de la dilatation pour $u=7$ (à gauche $s=3$ et à droite $s=5$).

II.5.1.5. Scalogramme :

En notant η le centre de fréquence de l'ondelette élémentaire, le centre de fréquence d'une ondelette dilatée est : $\xi = \frac{\eta}{b}$. Le scalogramme d'un signal est défini par :

$$P_w(b, \xi) = |w_f(a, b)|^2 = \left| w_f\left(a, \frac{\eta}{\xi}\right) \right|^2$$

Le scalogramme normalisé vaut : $\frac{\xi}{\eta} \cdot P_w f(b, \xi)$

La normalisation revient à multiplier l'expression par un facteur égal à $\frac{\xi}{\eta}$. η est le centre de fréquence de l'ondelette élémentaire qui a une énergie concentrée dans un intervalle positif centré en η/s dont la taille est donnée par $1/s$. Dans le domaine temps-fréquence de l'analyse par les ondelettes, un atome d'ondelette (Figure 13) est représenté par le rectangle de Heisenberg de largeur temporelle $s \cdot \sigma_t$ et de largeur fréquentielle $1/s \cdot \sigma_w$; σ_t et σ_w correspondent aux dimensions du rectangle de Heisenberg pour l'ondelette mère; ces dernières restent constantes pour toute la transformée car $S_{rect} = \sigma_w \cdot \sigma_t$.

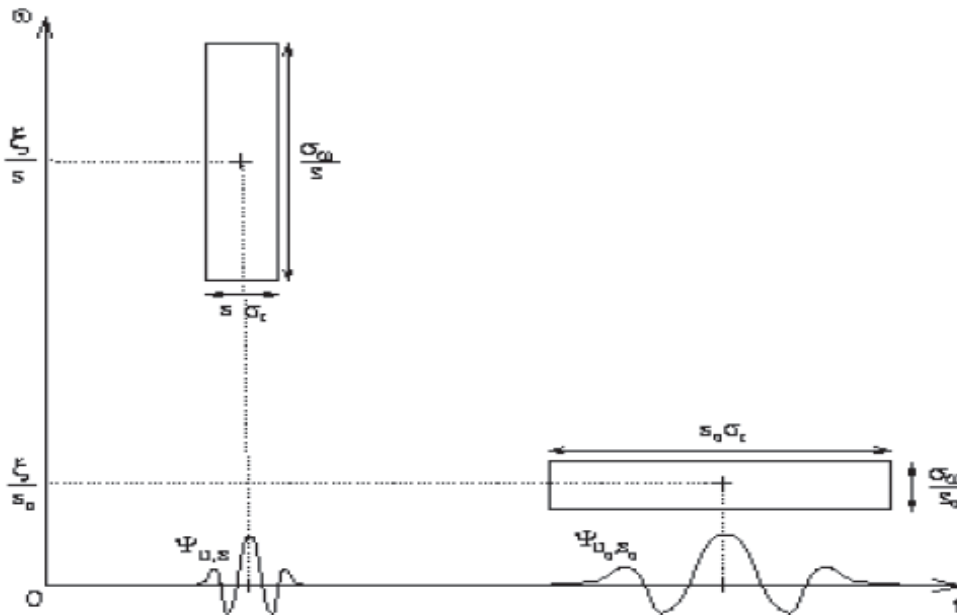


Figure II.13: Atome de la Wavelet Transform.

II.5.1.6. Calcul des coefficients de la CWT [52] :

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

- Dès le départ, on compare l'ondelette à une portion du signal (Figure II.14).
- On calcule le coefficient W qui étudie le degré de similitude entre la portion du signal et l'ondelette analysante ; celles-ci sont similaires lorsque la valeur numérique du coefficient W est élevée. Plus précisément, lorsque l'énergie du signal et celle de l'ondelette sont relativement proches, le coefficient W peut être interprété comme un facteur de corrélation.

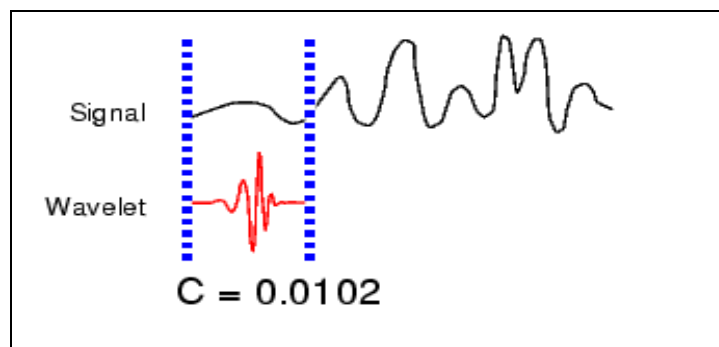


Figure II.14: Comparaison de l'ondelette à une portion du signal.

- On translate l'ondelette vers la droite jusqu'au balayage total du signal (Figure II.15).

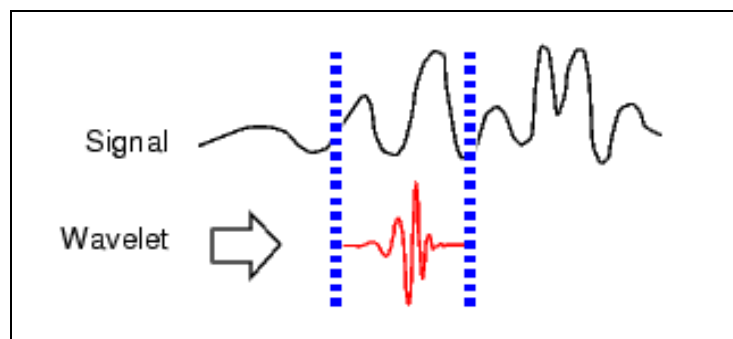


Figure II.15: Balayage du signal par l'ondelette.

- On passe ensuite à une échelle plus élevée qui induit une dilatation temporelle de l'ondelette analysante. Cela a pour effet d'augmenter la portion de comparaison (Figure II.16).

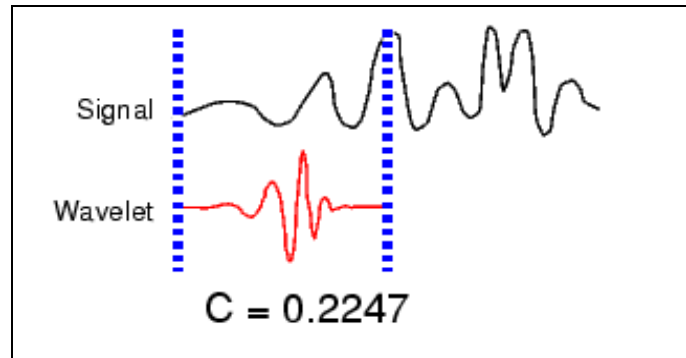


Figure II.16: Dilatation de l'ondelette et balayage du signal.

Cette opération est répétée pour chaque échelle jusqu'au calcul des coefficients pour toutes les échelles et pour différentes portions du signal. Les coefficients constituent le résultat d'une régression effectuée sur le signal original. Cette technique d'analyse nous permet d'avoir une représentation temps-échelle du signal original qui procure une vision différente par rapport à la représentation temps-fréquence de Fourier, mais qui lui est complémentaire. En effet, une petite échelle correspond à une variation temporelle rapide de l'ondelette qui se traduit par une haute fréquence ; par contre une grande échelle correspond à une variation lente de l'ondelette qui se traduit par une basse fréquence.

La relation entre l'échelle s et la fréquence f est donnée par :

$$f = \frac{f_c}{s \cdot \Delta t}$$

Δt : est la période d'échantillonnage du signal.

f_c : est la fréquence centrale de l'ondelette mère.

s : est l'échelle.

f : est la fréquence instantanée.

II.5.2. Transformée en ondelette discrète (DWT) [46,53] :

II.5.2.1. Définition :

La **transformée en ondelette discrète** (en anglais *Discrete Wavelet Transform*, ou *DWT*) est une technique utilisée dans la compression de données numériques avec ou sans perte. La compression est réalisée par approximations successives de l'information initiale du plus grossier au plus fin. On réduit alors la taille de l'information en choisissant un niveau de détail.

Cette technique permet de réduire la taille d'information numérique (qualité de l'information compressée à partir de l'information complète), mais aussi d'accélérer l'affichage d'information (qualité de l'affichage à partir d'un fichier compressé). Cette dernière utilisation est indispensable pour des documents cartographiques où la qualité et la taille de l'information nécessaire sont considérables.

II.5.2.2. Expression mathématique :

La transformée en ondelette discrète a pour expression mathématique :

$$DWT_{\psi} f(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_o^m}} \sum_n x(n) \psi\left(\frac{k - nb_o a_o^m}{a_o^m}\right)$$

Ψ est l'ondelette mère dilatée par le paramètre a_o^m et translatée via le paramètre n, b_o, a_o^m . a_o et b_o sont des valeurs fixées tel que $a_o > 1$ et $b_o > 0$; m et n sont des entiers naturels.

II.5.2.3. Algorithme de décomposition pyramidale :

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

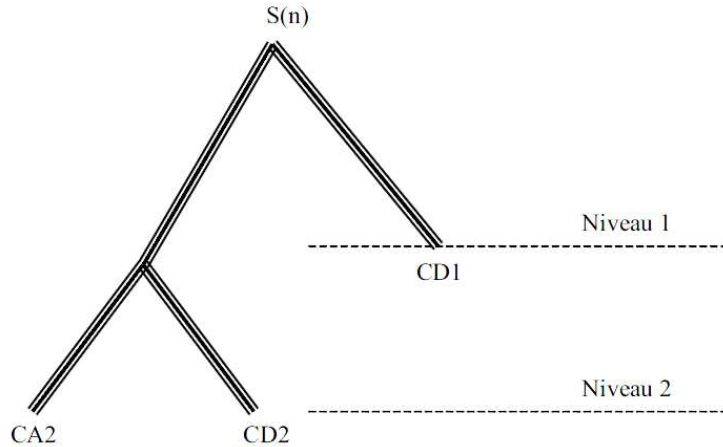


Figure II.17: Décomposition pyramidale de profondeur 2

Ce schéma (Figure 18) illustre la décomposition d’une profondeur (depth) de 2 niveaux. $S(n)$ est le signal original de taille N . CA2 est le signal basses fréquences de taille $N/2$ ainsi que CD2 les coefficients détails (hautes fréquences) au niveau 2. CD1 représente les coefficients détails du niveau de décomposition 1.

La procédure de décomposition impose un découpage systématique du signal original à chaque passage par la paire de filtres, laissant ainsi le signal sortant avec une longueur de $1/2, 1/4, 1/8, \dots, 1/N$ de celle du signal original pour les niveaux de décomposition **1, 2, 3, ..., N**.

En fait, le sous-échantillonnage est une opération qui élimine les données impaires du signal et génère un vecteur avec une dimension qui est la moitié de celle du signal. Autrement dit, sous échantillonner un signal par un facteur de **2** est équivalent à réduire de moitié la fréquence d’échantillonnage. Par conséquent, Les fréquences correspondantes aux niveaux **1, 2, 3, …, N** sont $1/2 * F_s, 1/4 * F_s, 1/6 * F_s, 1/8 * F_s, \dots, 1/(2)^N * F_s$. F_s représente la fréquence d’échantillonnage du signal original.

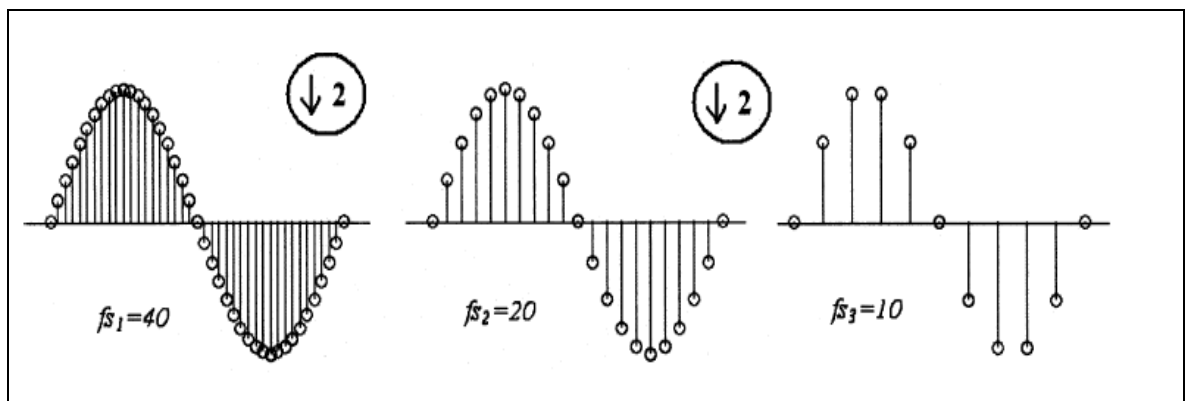


Figure II.18 : Effet du sous-échantillonnage.

II.5.2.4. Choix de l'ondelette analysante :

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

Dans notre travail, nous choisissons d'utiliser l'ondelette de Daubechies 4 pour décomposer le signal du courant de fuite afin d'en identifier les transitions pour la pollution non-uniforme, qui sont causées par des perturbations de hautes fréquences [51,52].

L'ondelette mère complexe de Daubechies (Figure II.19) a comme expression mathématique :

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

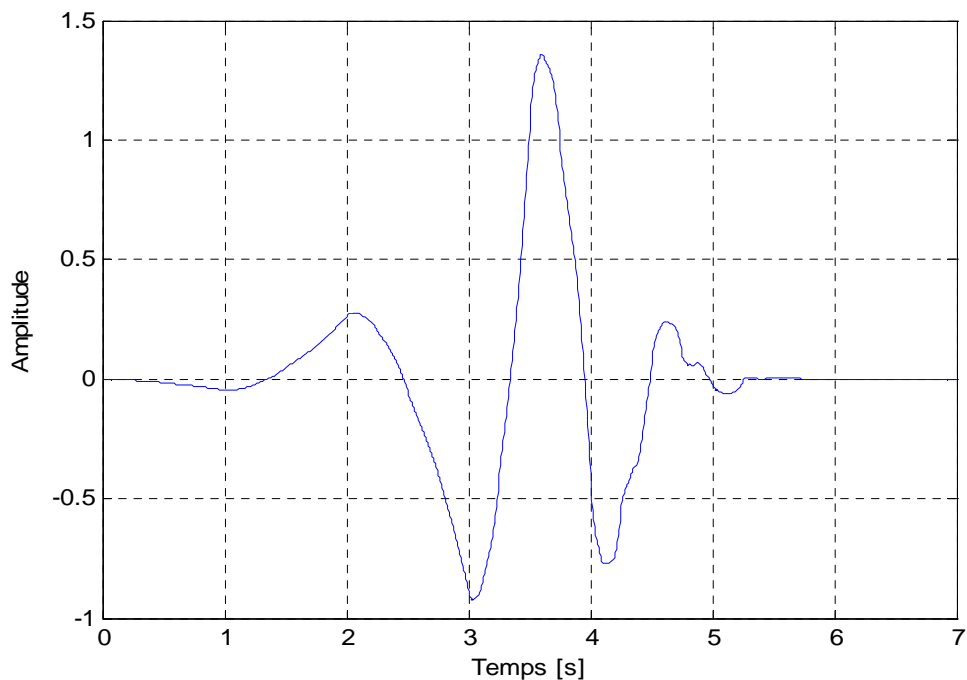


Figure II.19: Représentation de l'ondelette de Daubechies 4.

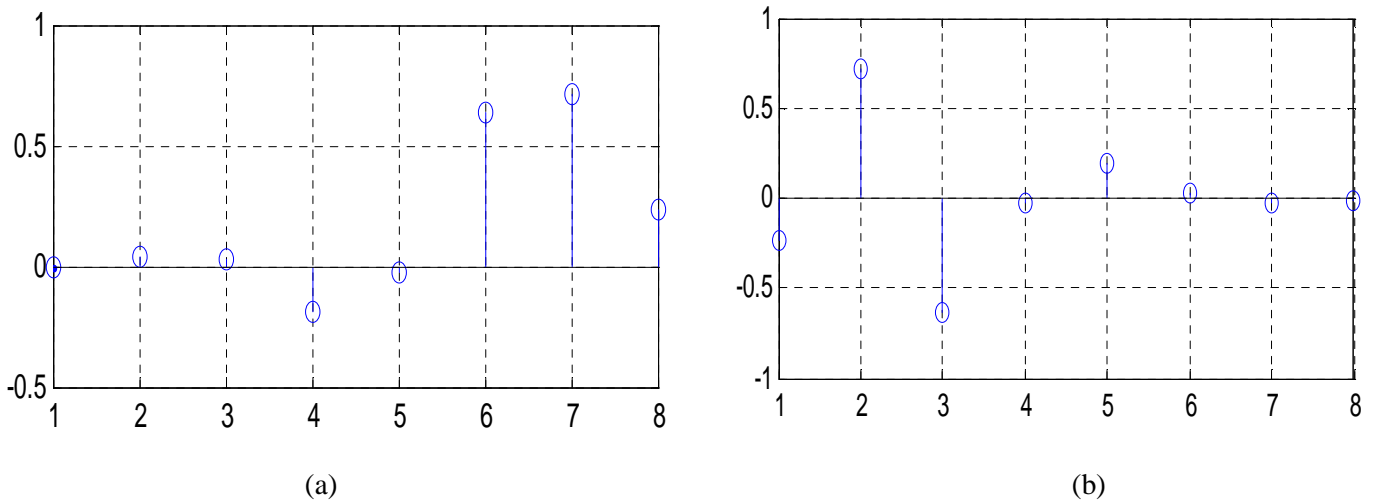


Figure II.20: Représentation des filtres de décomposition de l'ondelette de Daubechies 4 : (a) filtre passe-bas, (b) filtre passe-haut.

Conclusion :

Cette partie a été consacrée essentiellement à l'étude des ondelettes. Elle donne un aperçu rapide sur la notion échelle, les caractéristiques principales que doit vérifier une onde mère ainsi que les propriétés de cette transformée. On a aussi illustré l'architecture pyramidale.

Les ondelettes sont des outils parmi les plus récents du traitement du signal et qui datent de quelques décennies seulement. Ils permettent à l'utilisateur d'effectuer une analyse robuste et mènent à une variété d'applications.

Chapitre III :
Techniques Expérimentales

III.1. Introduction :

Afin d'étudier le comportement du modèle plan de l'**isolateur standard PSV 120B (1984 / 120KN)** dans le cas d'une pollution uniforme et d'une pollution non-uniforme, nous avons effectuée des expériences concernant les deux configurations au laboratoire de Haute Tension de l'ENP. On a choisi ce type d'isolateur car il est utilisé en Algérie par la SONELGAZ pour les lignes de haute tension (220 kV).

Pour la pollution uniforme, nous avons étudié l'influence de la conductivité et de la tension appliquée sur l'évolution du courant de fuite et de la tension de contournement.

Pour la pollution non-uniforme, nous nous sommes intéressés à l'influence de la largeur et de l'emplacement de la couche de pollution, sur la tension de contournement et le courant de fuite pour plusieurs niveaux de tension appliqués.

III.2. Dispositif expérimental :

III.2.1. Circuit d'essais du Laboratoire de l'ENP :

La station d'essai à fréquence industrielle du Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique est de marque " HAEFELY ". Cette station contient les équipements suivants (Figure III.1) :

- Un transformateur d'essai : 500V/300kV, 50 Hz
- Un transformateur de réglage : 220/500 V, 50 Hz.
- Un diviseur de tension capacitif qui est relié au secondaire du transformateur d'essai pour réduire la tension aux bornes du voltmètre, situé près du pupitre de commande. Il est composé d'une capacité $C_1=400 \mu\text{F}$ et d'une capacité variable qui permet de contrôler la tension de sortie.
- Des appareils de mesures et de protection.
- Un oscilloscope numérique « TEKTRONIX » de bande passante 500 MHz.
- Une camera numérique SONY DCR-SR45 sert à suivre le phénomène des décharges et un oscilloscope relié à un PC permet l'acquisition des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée de notre modèle.

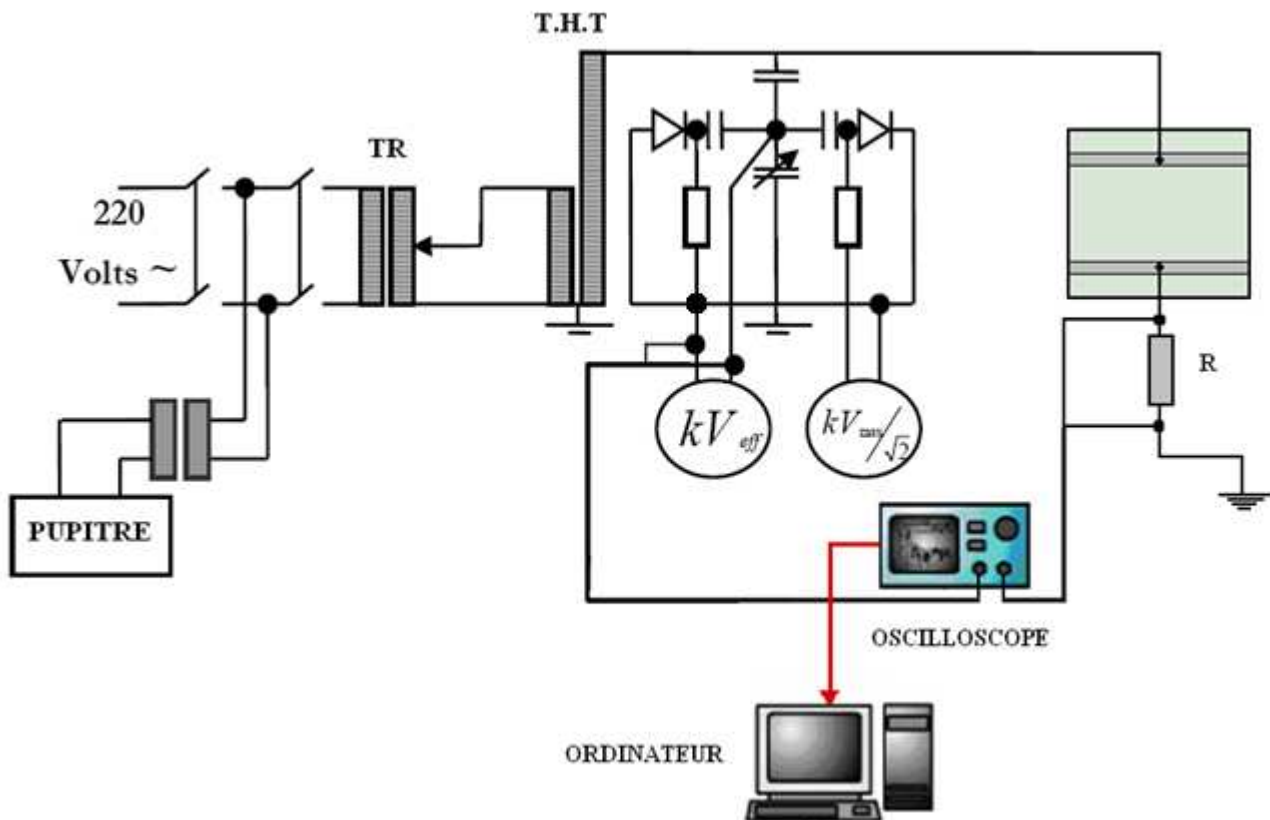


Figure.III.1 : Circuit d'essai.

III.2.2. Objet d'essai :

Les essais sont effectués sur le modèle plan-plan pour simuler l'isolateur **standard PSV 120B** (Figure III.2).

On a utilisé deux bandes conductrices en aluminium ; qu'on a découpée de manière à ne pas avoir de pointes à leurs extrémités, et on les a collés sur notre modèle plan à l'aide du gesso de manière à éviter les couches d'air qui ont tendance à se former entre le plan et les bandes conductrices, pouvant engendrer des petites décharges, ce qui risque d'erreur nos mesures pendant les expériences (Figure III.3)

Le modèle est posé à une hauteur de 175 cm du sol (Figure III.4), afin de limiter l'effet des capacités parasites qui peuvent altérer la mesure de la tension appliquée et du courant de fuite.

Les principales dimensions du modèle plan étudié et de l'isolateur réel PSV 120B sont données dans les tableaux III.1 et III.2 après avoir mesuré les différentes grandeurs à l'aide d'un mètre ruban.

Caractéristiques de l'isolateur	Grandeurs
Résistance mécanique	120 kN
Diamètre du disque	290 mm
Poids	5,7 kg
Dimensions de fixation métallique, IEC 60 120/1984.	16
Longueur de la tige	127 mm
Longueur de fuite	442 mm
Distance de contournement à sec	273 mm

Tableau III.2: Caractéristiques de l'isolateur réel (IEC 60 305/1995).

Grandeur	Longueur (mm)
Longueur de la plaque	500
Largeur de la plaque	500
Épaisseur de la plaque	5
Distance inter-électrode à l'état propre	273
Distance inter-électrode à l'état pollué	442

Tableau III.1: Dimensions du modèle plan étudié.

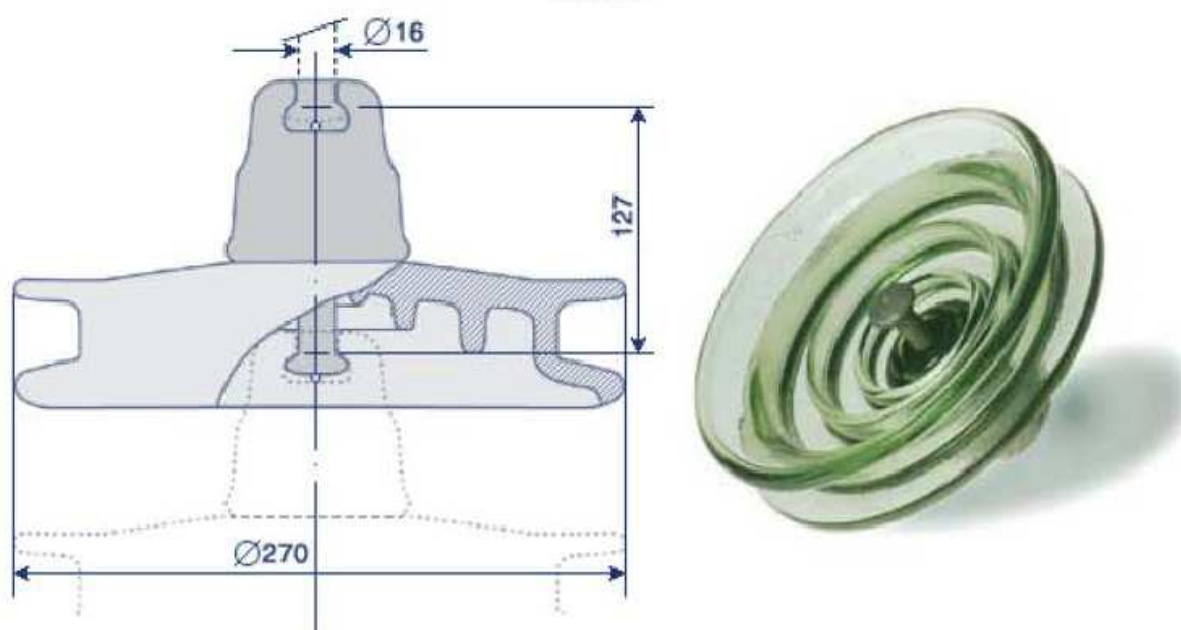


Figure III.2: Profil de l'isolateur réel.

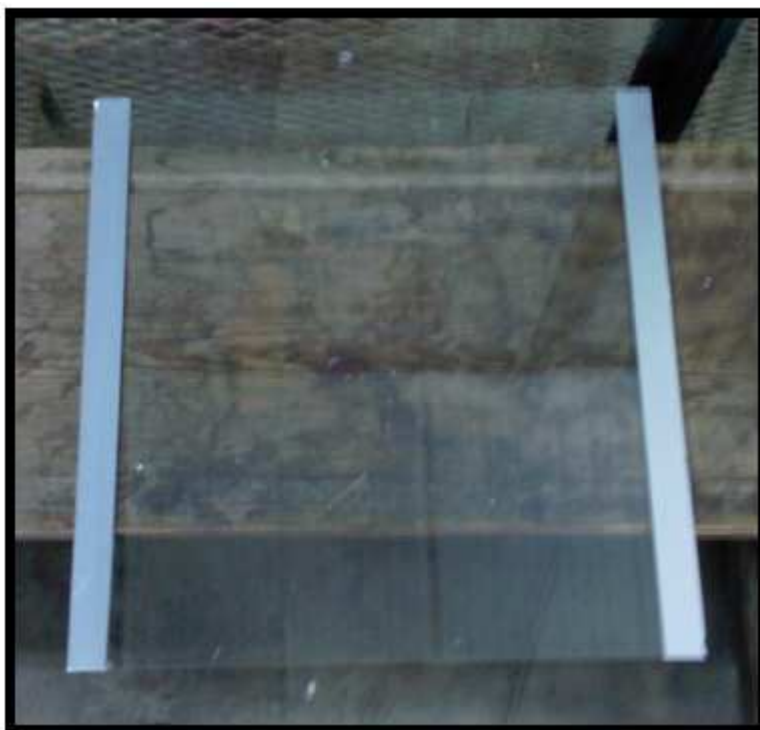


Figure III.3: Modèle plan étudié vue de haut



Figure III.4: Dispositif général du model étudiant

III.3. Le nettoyage du plan:

Le nettoyage du plan est tout d'abord fait avec de l'eau du robinet ; puis il est séché avec des serviettes en papier pour éliminer le maximum d'impuretés déposées. Un deuxième nettoyage est effectué à l'aide d'un bout de coton imbibé d'alcool chirurgical à 90⁰ afin d'assurer une propreté quasi-totale du modèle plan. Cette méthode de nettoyage est adoptée pour le cas de la pollution uniforme et la pollution non-uniforme.

III.4. Préparation des solutions polluantes :

Les solutions polluantes sont composées de différentes quantités de NaCl mélangées à de l'eau distillée, afin d'obtenir différentes conductivités volumiques (10 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 1.2 mS/cm , 6 mS/cm et 10.1 mS/cm)

On a choisi plusieurs conductivités dans le cas de la pollution uniforme, pour pouvoir étudier convenablement leurs influences sur la tension de contournement et le courant de fuite.

Pour le cas de la pollution non-uniforme, notre choix s'est porté sur la conductivité volumique 1.2 mS/cm qui nous a permis de mieux suivre l'évolution de la forme d'onde du courant de fuite à la surface du modèle plan.

III.5. Méthode de pulvérisation :

La pulvérisation est utilisée pour obtenir une couche de pollution artificielle. La méthode de pulvérisation doit être la même pour les différents essais à fin de minimiser les erreurs de mesure.

L'humidification de la surface est obtenue après dix pulvérisations de chaque côté de l'isolateur, à une distance de 0.5 m qui est gardée constante durant toute l'opération.

III .5.1. Pollution uniforme : L'isolateur est directement pulvérisé (Figure III.5)

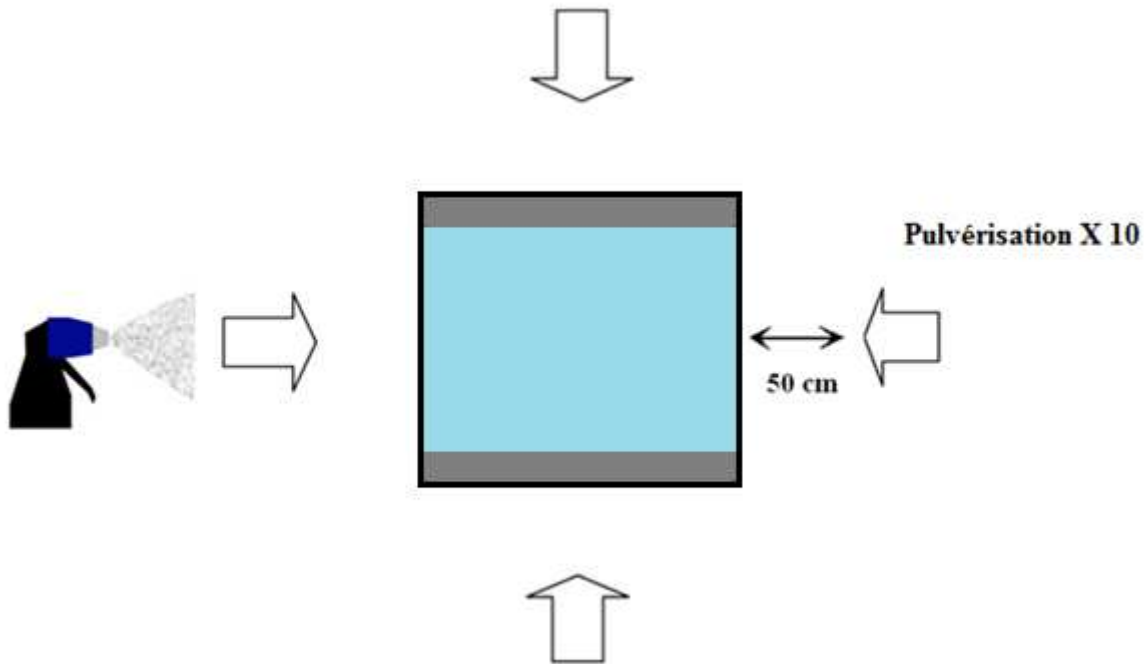


Figure III.5: Méthode de pulvérisation pour la configuration uniforme.

III.5.2. Pollution non-uniforme :

Dans l'intention de déterminer l'influence de la pollution non-uniforme sur le comportement du modèle plan du laboratoire, les essais sont effectués en variant la largeur de la couche de pollution de façon régulière ainsi que sa position (coté HT puis coté terre).

Pour ce cas de figure, l'humidification de la surface est faite en cachant l'extrémité qu'on veut garder sèche avec du nylon (Figure III.6). La méthode de pulvérisation adoptée est la même que pour la pollution uniforme.

La bande en nylon est placée du côté de l'électrode haute tension, puis du côté terre. Les couches propres sont des largeurs Y égales à 2, 4, 6, 8, 10 et 12 cm.

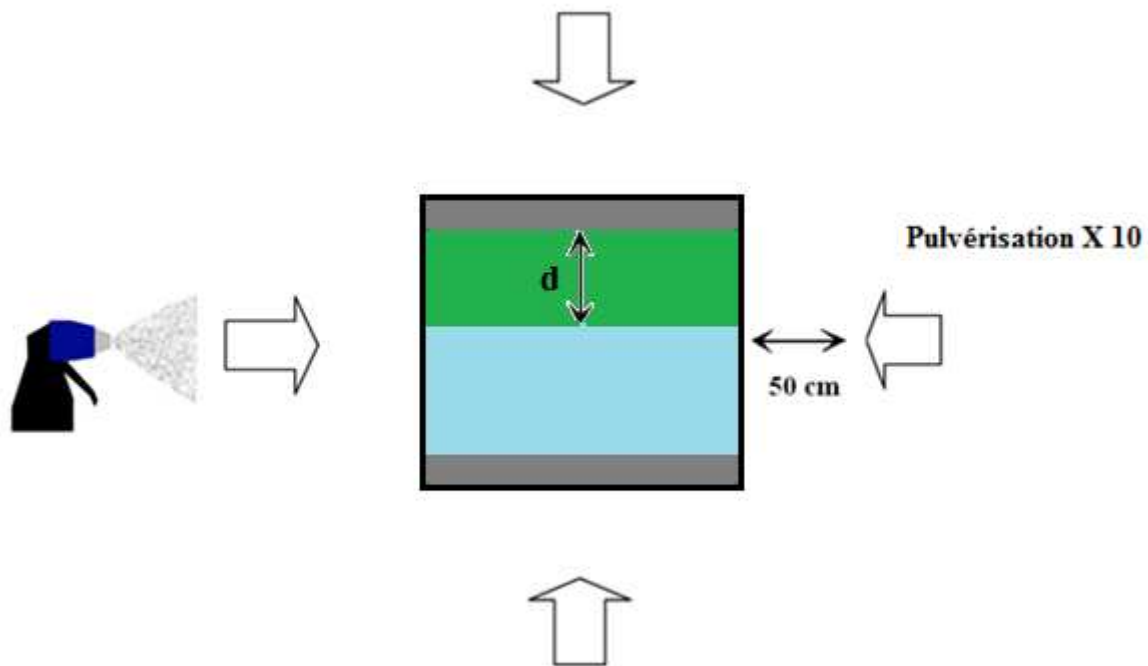


Figure III.6: Méthode de pulvérisation pour la configuration non-uniforme

III.6. Mesure du courant de fuite :

Pour les deux types de pollution (uniforme et non uniforme) de la surface du modèle, la mesure du courant de fuite a été faite en utilisant l'oscilloscope TEKTRONIX par l'intermédiaire du signal de la tension et d'une résistance $R = 1k\Omega$.

La résistance est insérée en série avec l'objet d'essai. Un câble coaxial est utilisé pour récupérer les données du courant de fuite et de la tension appliquée de la résistance vers l'oscilloscope.

La fréquence d'échantillonnage est de 100 kHz, ce choix permet d'avoir une vision plus large des ondes de tension et du courant de fuite pour les deux cas de pollution.

III.7. Mesure du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée :

La mesure du déphasage courant de fuite-tension appliquée est déterminée à l'aide de la transformée de Fourier discrète basée sur la FFT, grâce à un programme MATLAB® qui permet de calculer le déphasage entre le fondamental du courant de fuite et celui de la tension appliquée. Cette mesure est effectuée pour le cas de la pollution uniforme et pour les différentes configurations de la pollution non-uniforme.

Ce calcul a pour objectif d'étudier la progression du déphasage (tension appliqué - courant de fuite) en modifiant la valeur de la conductivité pour le cas d'une réparation uniforme de la pollution, et celle de la largeur de la couche polluée pour le cas de la réparations non-uniforme.

III.8. Conclusion :

Afin de bien réussir notre étude, nos essais sont effectués sur le modèle plan pour simuler l'isolateur réel PSV 120B dans le cas d'une pollution uniforme et d'une pollution non uniforme, le modèle plan a été choisi pour plusieurs raisons :

- Ce modèle donne des résultats très proches du modèle réel.
- L'utilisation d'une plaque isolante transparente nous permet de bien visualiser l'activité des décharges parallèles sur la surface.
- L'application de la couche de pollution uniforme et non-uniforme est facile et plus précise que sur l'isolateur réel. et le nettoyage de la plaque est simple.
- Le nettoyage de la plaque est simple.

Chapitre IV:

*Résultats des essais sur le
modèle plan.*

IV.1. Introduction :

Dans cette partie expérimentale, nous présentons les résultats obtenus durant nos essais dans le cas de la pollution uniforme et de la pollution non uniforme.

Pour le cas de la pollution uniforme, nous avons relevé les valeurs de la tension de contournement, du courant de fuite, puis nous avons calculé le déphasage entre le fondamental de ces deux derniers pour différentes conductivités.

Pour le cas de la pollution non uniforme, nous avons effectué les mêmes mesures en utilisant la couche polluante de conductivité volumique 1.2 mS/cm et pour différentes largeurs de la couche propre.

IV.2. Mode opératoire :

Le modèle est nettoyé avant chaque essai suivant la procédure expliquée dans le chapitre précédent pour éliminer le maximum d'impuretés, les électrodes sont changées après chaque essai de contournement. Enfin, le modèle est humidifié à l'aide d'un pulvérisateur contenant la solution polluante de conductivité donnée.

Pour chaque configuration, nous effectuons 5 fois la même mesure de la tension de contournement, et nous calculons les valeurs moyennes des valeurs obtenues.

IV.3. Etude de la tension de contournement :

La tension de contournement est un paramètre essentiel pour l'isolateur, elle permet de définir la rigidité diélectrique du système. Dans notre cas, on doit la connaître pour éviter les risques de contournement lors de la mesure des courants de fuite pour différents niveaux de la tension appliquée.

- La distance de contournement à l'état sec : $d = 27.3$ cm
- La distance de contournement à l'état pollué : $d = 44$ cm

IV.3.1. Identification du système d'électrodes formé par le modèle plan :

Afin d'identifier le système d'électrodes formé par notre modèle plan de l'isolateur standard **PSV 120B**, nous avons procédé à des essais de contournement à sec pour les distances inter-électrodes $d = 27.3$ cm qui est la distance de contournement à l'état sec, les résultats sont montrés dans le tableau (IV.1).

Essais	1	2	3	4	5	Moyenne
U_C (kV)	110	110	108	115	108	110.2

Tableau IV.1 : Essais de contournement pour l'état sec.

Le système d'électrode pointe-pointe est celui qui semble s'approcher le plus du modèle plan étudié. L'expression de la tension de contournement pour un système d'électrodes pointe-pointe est:

$$U_C = 3,16 d \text{ [cm]} + 14 \quad [kV_{\text{eff}}] \quad \mathbf{d}: \text{ distance inter-électrode}$$

Nous trouvons, d'après cette formule, que la tension de contournement est de **100.26 kV_{eff}** pour $d=27.3$ cm. Cette valeur est relativement proche des résultats obtenus expérimentalement qui est de 110.2.

IV.3.2. Résultats des essais pour le cas de la pollution uniforme:

Dans cette partie, nous étudions l'influence de la conductivité sur la tension de contournement du modèle plan.

Les résultats des tensions de contournements obtenus pour les différentes conductivités sont donnés sur le tableau (IV.2).

Essai	1	2	3	4	5	Valeur Moyenne	
U_C (kV _{eff})	$\gamma_{\text{vol}} = 10$ ($\mu\text{S/cm}$)	172	164	132	172	162	160.4
	$\gamma_{\text{vol}} = 720$ ($\mu\text{S/cm}$)	132	120	140	131	141	132.8
	$\gamma_{\text{vol}} = 1.2$ (mS/cm)	101	90	106	99	95	98.2
	$\gamma_{\text{vol}} = 6$ (mS/cm)	78	70	80	83	78	77.8
	$\gamma_{\text{vol}} = 10.1$ (mS/cm)	66	67	70	75	72	70

Tableau IV.2 : Essais de contournement pour les différentes conductivités.

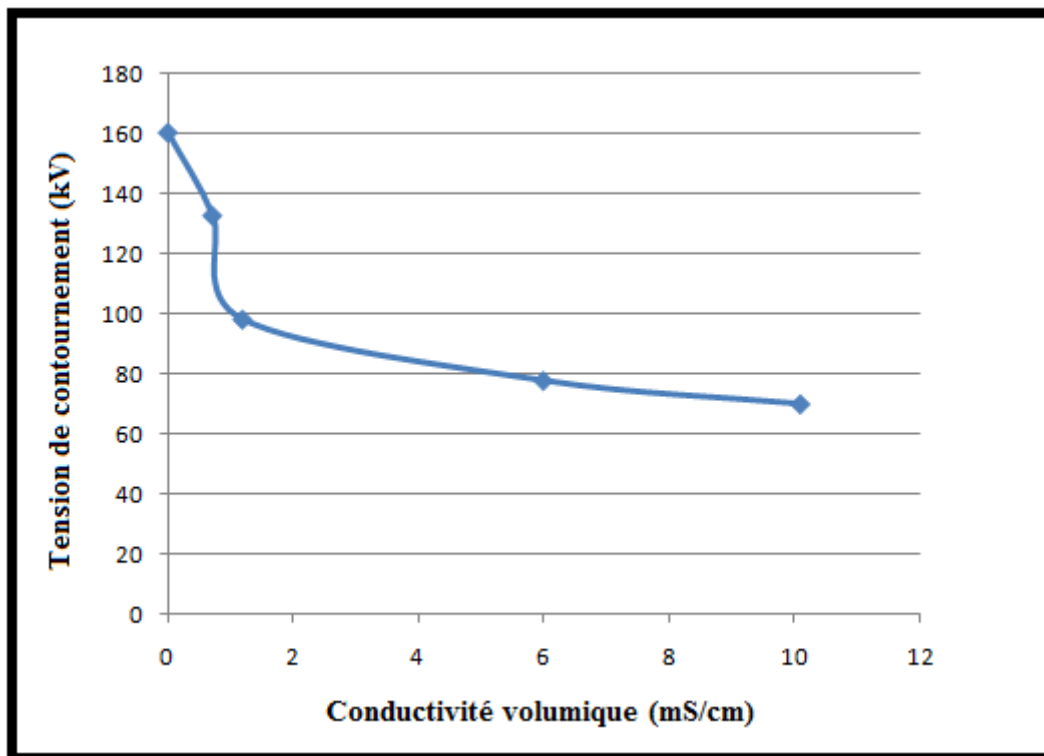


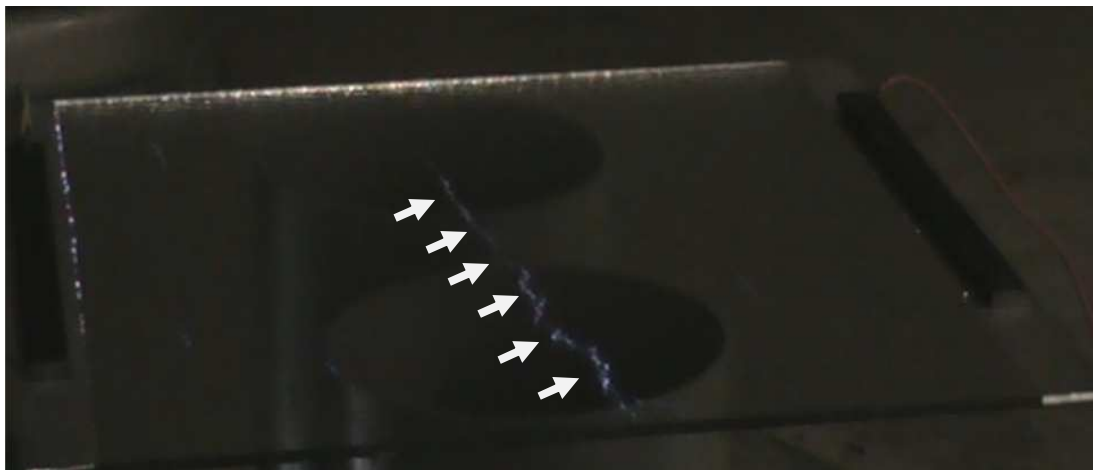
Figure IV.1: Influence de la conductivité sur la tension de contournement pour le modèle plan dans le cas de la pollution uniforme.

Nous remarquons d'après la figure (IV.1) que la tension de contournement est inversement proportionnelle à la valeur de la conductivité ; cette variation est non linéaire.

La tension de contournement est maximale pour la conductivité $\gamma = 10$ ($\mu\text{S}/\text{cm}$), et a tendance à se stabiliser à partir d'une certaine valeur (à partir de $\gamma = 1.2$ mS/cm)

Pour ce type de pollution, nous avons constaté que le contournement se fait sur plusieurs étapes, on remarque d'abord l'apparition de décharges électriques sur la surface du modèle (Figure IV.2.a). Ces décharges ont tendance à s'allonger le long de la surface (Figure IV.2.b.1 et IV.2.b.2). Ce phénomène est accompagné d'une évaporation progressive de la couche de pollution à cause de la chaleur dégagée par effet Joule. Ces décharges sont plus importantes pour les grandes valeurs de la conductivité. Cette étape est suivie par un phénomène remarquable qui est l'apparition d'arcs électriques dans les zones sèches (Figure IV.2.c), ceci est dû à l'augmentation de l'intensité du champ électrique dans ces zones asséchées. Enfin, se produit l'arc final de contournement (Figure IV.2.d).

Pour l'état sec, le contournement a lieu directement dès qu'on atteint la valeur de tension critique contrairement à l'état humidifié.



(a)



(b.1)



(b.2)



(c)



(d)

Figure IV.2 : Comportement du model plan dans le cas d'une pollution uniforme ($\gamma_{vol} = 6 \text{ mS/cm}$) :
 (a) niveau de tension 55 kV; (b) niveau de tension 65 kV; (c) tension du contournement 78 kV.

IV.3.3. Résultats des essais pour le cas de la pollution non uniforme ($\gamma_{vol} = 1.2 \text{ mS/cm}$):

IV.3.3.1. Le contournement final :

Dans cette partie, nous étudions l'influence de la largeur de la couche propre sur la tension de contournement du modèle plan.

On s'est arrêté à une largeur critique de la couche propre ($d_{critique} = 12\text{cm}$), elle représente la largeur pour laquelle le contournement à lieu directement, sans apparition préalable d'arc dans la zone sèche.

Les résultats obtenus pour les essais concernant la pollution côté HT et terre sont donnés dans le tableau (IV.3).

Essai		1		2		3		4		Moyenne	
Côté pollué		HT	terre	HT	Terre	HT	terre	HT	terre	HT	Terre
U _c (kV _{eff})	2 cm	97	101	100	97	95	95	97	98	97.2	97.7
	4 cm	97	100	100	97	97	95	102	100	99	98
	6 cm	102	104	105	110	108	106	103	108	104.5	107
	8 cm	112	111	110	107	108	108	105	111	108.7	109.2
	10 cm	115	108	110	112	112	115	115	112	113	111.7
	12 cm	117	112	115	118	112	117	116	112	115	114.7

Tableau IV.3: Essais de contournement pour la pollution du côté haute tension et du côté terre.

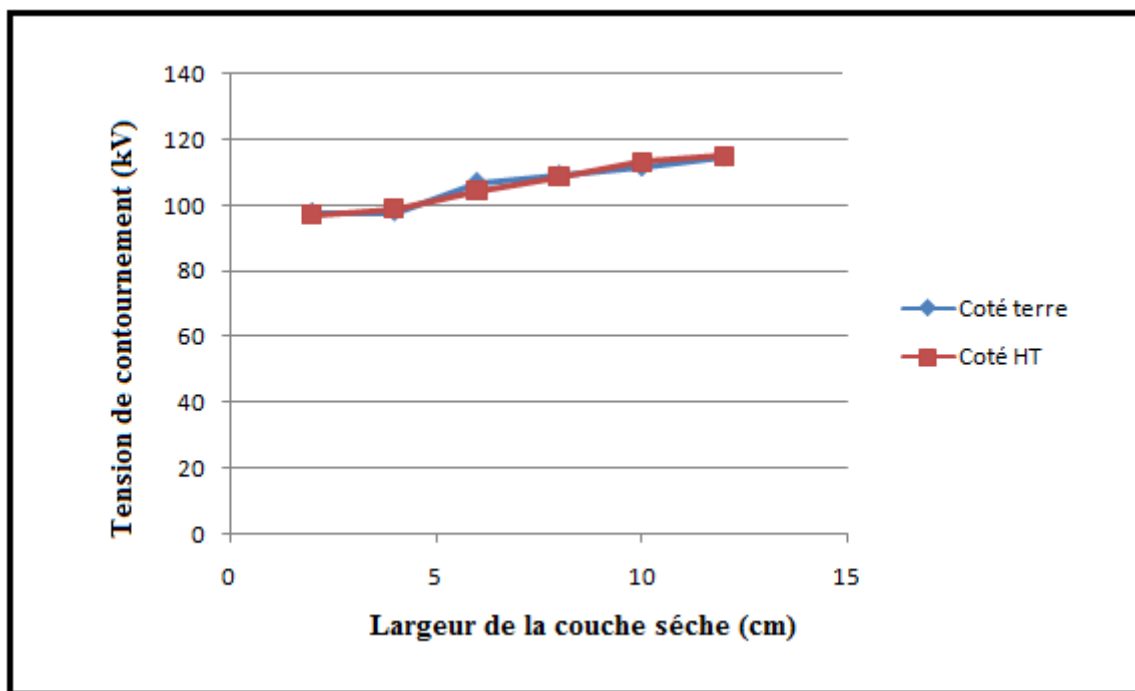


Figure IV.3 : Tension de contournement en fonction de la largeur de la couche sèche pour la pollution non uniforme côté HT et côté terre.

Nous remarquons d'après la Figure (IV.3) que la tension varie d'une manière non linéaire et de façon proportionnelle avec la largeur de la bande propre, que se soit du côté haute tension, ou du côté terre.

Nous constatons aussi que pour la même distance « d » de la bande sèche, les tensions de contournement sont pratiquement les mêmes pour les deux cas de figure (coté HT et coté terre)

Pour les largeurs inférieures à « d_{critique} », le contournement a d'abord lieu dans la zone propre où on voit clairement l'apparition d'arcs électriques (Figure IV.4.a), puis l'apparition de décharges dans la zone humidifiée (Figure IV.4.b) accompagnées du même phénomène d'évaporation que pour le cas de la pollution uniforme. L'allongement de ces décharges forme l'arc de contournement et provoque le court circuit final (Figure IV.4.c).

Pour les largeurs supérieures ou égales à « d_{critique} », le contournement a lieu directement sans qu'il y ait au préalable apparition d'arcs contournant la zone propre (Figure IV.5). Ce phénomène peut être expliqué par l'augmentation de la largeur de la couche propre qui rend l'impédance de celle-ci très grande devant celle de la couche humidifiée.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.4: Comportement du modèle plan dans le cas d'une pollution non uniforme ($\gamma_{\text{vol}} = 1.2$ mS/cm) et pour une largeur de la couche sèche $d = 2$ cm: (a) niveau de tension 52 kV; (b) niveau de tension 70 kV; (c) tension du contournement 97 kV.



Figure IV.5 : Contournement sur le modèle plan dans le cas d'une pollution non uniforme ($\gamma_{\text{vol}} = 1.2$ mS/cm) et pour une largeur de la couche sèche $d_{\text{critique}} = 12$ cm

IV.3.3 .2. Le contournement de la zone propre :

La figure (IV.6) représente les tensions de contournement des zones propres pour chaque largeur de la couche sèche pour la conductivité volumique $\gamma_{vol} = 1.2 \text{ mS/cm}$.

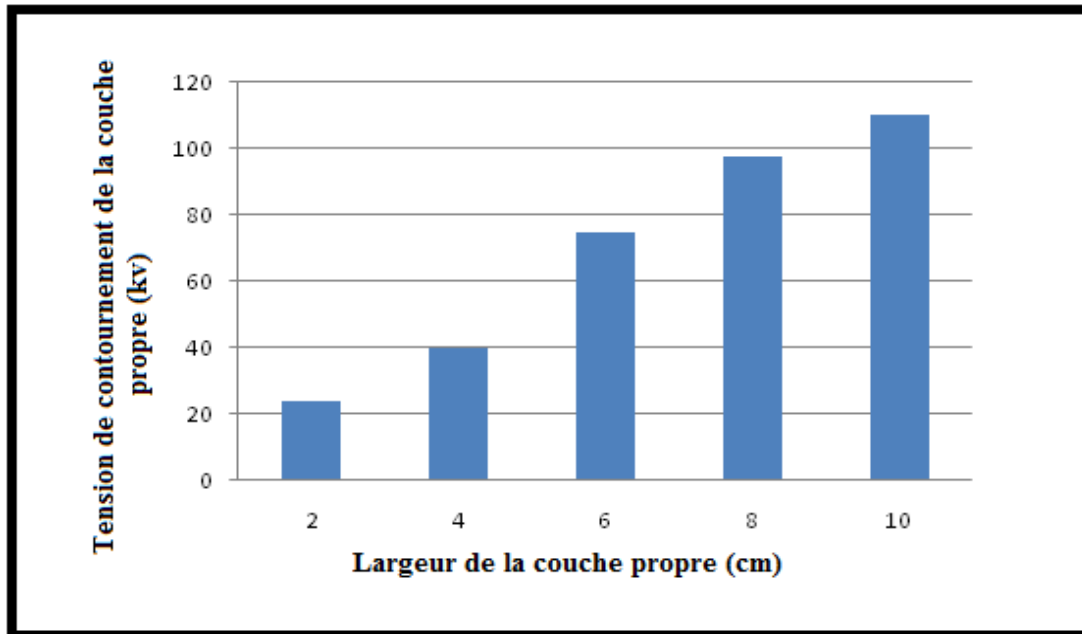


Figure IV.6 : Tension de claquage de la couche propre en fonction de sa largeur.

On remarque que la tension de contournement de la couche propre augmente en fonction de la largeur de celle-ci. Pour la largeur 2cm le contournement de la couche propre se fait à 24 kV, ce qui représente 25% de la tension de contournement totale, en effet l'impédance de la partie propre est petite devant celle de la couche polluée. Plus on augmente la largeur de la couche propre plus l'impédance de celle-ci devient importante, du coup la tension de contournement totale augmente. Pour les largeurs supérieures à 8cm, l'impédance de la zone humide commence à devenir négligeable devant celle de la zone propre, en effet le contournement de la zone propre se fait à plus de 95% de la tension de contournement totale. Arrivant à la largeur 12 cm, le contournement de la plaque se fait directement sans apparition d'arc contournant la zone propre.

IV.4. Etude du courant de fuite :

Dans cette partie ; on s'intéresse à l'évolution du courant de fuite, qui est un paramètre essentiel pour la prédiction de l'état de surface de l'isolateur.

Les tensions de contournement mesurées précédemment nous serviront à fixer le niveau maximal de la tension pour lequel on doit relever le courant de fuite en évitant tout risque de court-circuit, cette tension maximale est égale à 60% de la tension de contournement. Nous avons relevé le courant de fuite pour 5 niveaux de tension inférieurs à cette tension maximale.

IV.4.1. Résultats des essais pour l'état sec :

La mesure des valeurs efficaces du courant de fuite pour l'état sec est faite pour pouvoir comparer les résultats obtenus avec ceux de l'état de pollution uniforme et non uniforme.

Les valeurs moyennes du courant de fuite obtenues sont données sur le tableau (IV.4).

U_{app} (kV)	10	20	30	40	50
I_{eff} (μ A)	20.2	39.6	58.7	83.9	108.6

Tableau IV.4: Valeurs moyennes du courant de fuite obtenues à l'état sec pour les différents paliers de tension.

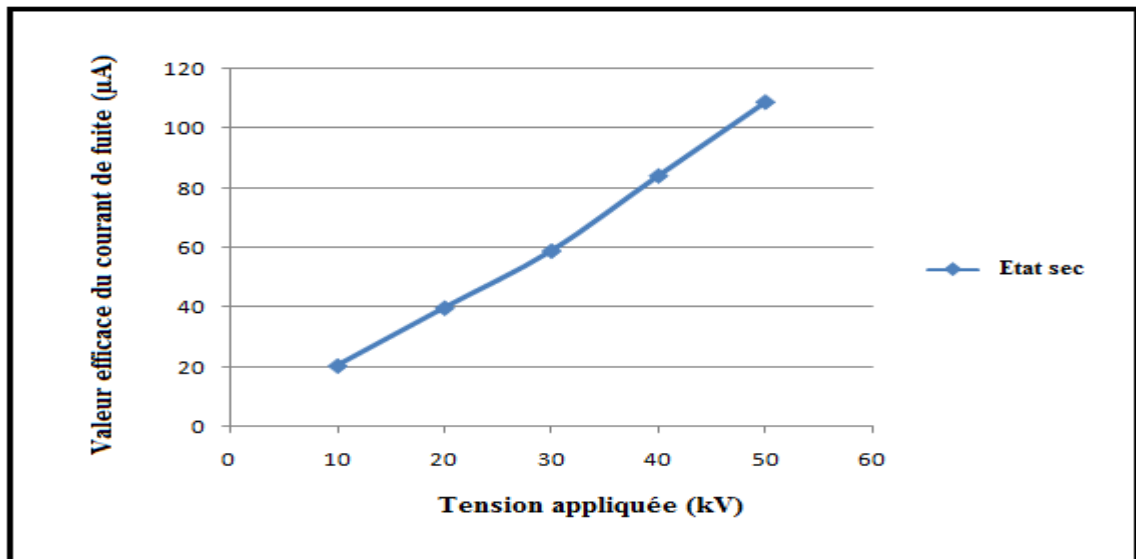


Figure IV.7 : Variation de la valeur efficace du courant de fuite pour différents niveaux de tension pour le cas sec.

Nous constatons à partir de la Figure (IV.7) que le courant de fuite augmente d'une façon presque linéaire en fonction de la tension appliquée. On remarque aussi que les valeurs du courant de fuite sont faibles à cause de l'impédance importante du milieu.

IV.4.1. Résultats des essais dans le cas de la pollution uniforme:

Pour le cas de la pollution uniforme, nous étudions la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour différentes conductivités de la couche polluante (Tableau IV.5)

U_{app} (kV)		10	20	30	35	40
I_f (μA)	$\gamma_{vol} = 10$ ($\mu S/cm$)	54.1	112.6	172	208	250.2
	$\gamma_{vol} = 720$ ($\mu S/cm$)	74.5	164	254	301	348
	$\gamma_{vol} = 1.2$ (mS/cm)	126.1	198.4	288	318	374.2
	$\gamma_{vol} = 6$ (mS/cm)	206.8	464.8	1425.6	1646	2081.2
	$\gamma_{vol} = 10.1$ (mS/cm)	347.6	1284.5	2036	3777.5	2073.3

Tableau IV.5: Valeurs du courant de fuite pour les différentes conductivités.

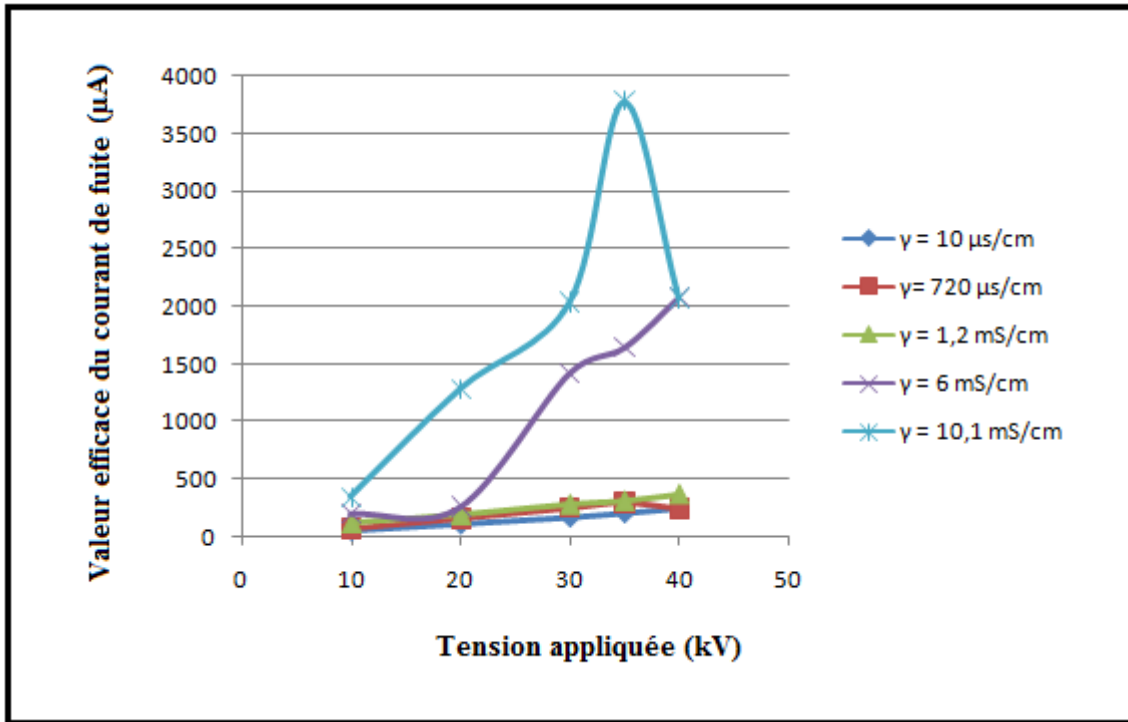


Figure IV.8: Variation de la valeur efficace du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités.

D'après la Figure (IV.8), nous constatons que le courant de fuite augmente d'une manière non linéaire en fonction de la tension appliquée pour les différentes conductivités utilisées. Nous remarquons aussi que pour le même niveau de tension, la valeur efficace du courant de fuite est proportionnelle à la valeur de la conductivité, pour $U = 30$ kV par exemple, elle est minimale pour $\gamma_{vol} = 10$ ($\mu S/cm$) et maximale pour $\gamma_{vol} = 10.1$ (mS/cm).

Pour les faibles conductivités (10 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 720 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1.2 mS/cm), cette augmentation de la valeur efficace du courant de fuite est relativement faible (de l'ordre de μA) car le niveau de tension atteint (40 kV) ne dépasse pas les 40% des tensions de contournement pour ces 3 valeurs de la conductivité, donc les décharges n'étaient pas encore intenses, ce qui peut expliquer les faibles valeurs des courants de fuites.

Pour les conductivités importantes (6 mS/cm et 10.1 mS/cm), les valeurs du courant de fuite sont nettement plus importantes (de l'ordre de mA) relativement aux autres conductivités, dès qu'on atteint le niveau de tension $U = 30$ kV. Cela est dû à l'activité des décharges qui deviennent intenses dès qu'on dépasse 50% de la tension de contournement, ce qui peut expliquer l'augmentation subite du courant de fuite.

Pour la conductivité $\gamma_{\text{vol}} = 10.1$ mS/cm , nous remarquons une baisse remarquable dans la valeur efficace du courant de fuite pour $U = 40$ kV qui représente 60% de la tension de contournement pour ce modèle, cette baisse est due au phénomène d'assèchement qui a lieu durant le temps d'application de la tension, l'eau présente sur la surface de notre modèle plan se vaporise par effet Joule menant ainsi à une augmentation de l'impédance équivalente de l'isolateur, ce qui réduit d'une manière importante la valeur du courant de fuite.

IV.4.2. Résultats des essais dans le cas de la pollution non uniforme ($\gamma_{\text{vol}} = 1.2$ mS/cm):

Pour le cas de la pollution non-uniforme, nous avons mesuré les valeurs du courant de fuite pour différents niveaux de la tension appliquée et pour plusieurs largeurs de la couche sèche située du côté HT (Tableau IV.6)

Tension (kV)		10	20	30	40	50	60
I_f (μA)	2 cm	56.9	112.9	190.8	342	456.2	616.8
	4 cm	47	101.8	169.4	256.2	338.7	431.6
	6 cm	45.7	83.9	137.9	191.6	238.6	300
	8 cm	37.6	75.9	104.7	124.2	151.4	159
	10 cm	28.8	58.9	80.4	93.2	101.5	161
	12 cm	19.6	41.7	64.7	83.6	102.1	174.2

Tableau IV.6 : Variation de la valeur efficace du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs de la couche sèche.

La variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour les différentes largeurs de la couche sèche est représentée sur la Figure (IV.9).

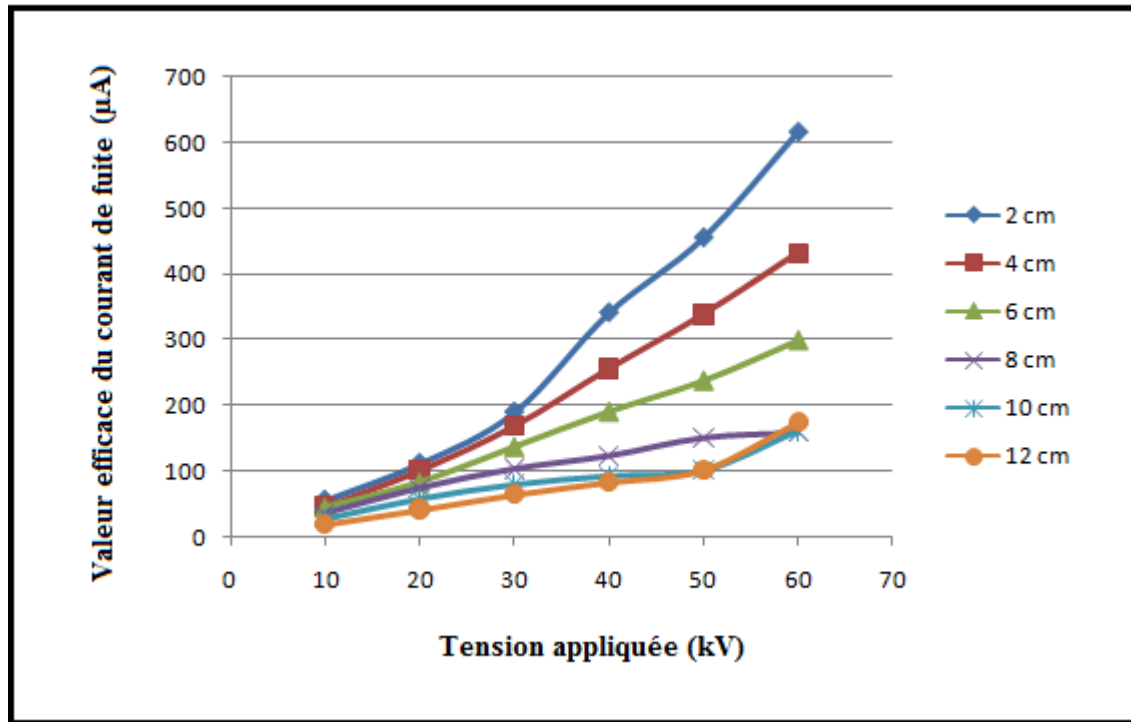


Figure IV.9: Valeurs efficace du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs de la couche propre coté HT.

D'après les résultats obtenus, la valeur efficace du courant de fuite diminue en augmentant la largeur de la couche propre jusqu'à atteindre la largeur critique pour laquelle l'impédance de la couche humide devient négligeable devant celle de la couche propre. A partir de cette largeur « d_{critique} » la valeur efficace du courant de fuite ne varie plus en augmentant la largeur de la couche sèche.

Pour « $d = 2\text{ cm}$ » on constate que la valeur du courant de fuite est maximale pour les différents paliers de tension utilisés, et ces valeurs sont très proches de celles mesurées pour la pollution uniforme avec une conductivité $\gamma_{\text{vol}} = 1.2\text{ mS/cm}$.

Comme pour le cas de la pollution uniforme, la valeur efficace du courant de fuite est proportionnelle à la tension appliquée.

IV.5. Etude du déphasage (courant de fuite – tension appliquée) :

La détermination du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée est indispensable pour comprendre le comportement de notre modèle isolant. Ceci nous a permis d'étudier l'influence de la tension appliquée et de la conductivité du milieu sur le déphasage pour le cas de la pollution uniforme, ainsi que l'influence de la largeur de la couche propre pour le cas de la pollution non uniforme.

IV.5.1. Etude du déphasage pour le cas sec :

Les résultats obtenus à partir des essais effectués sur le modèle plan à l'état sec sont représentés sur la Figure (IV.10) suivante :

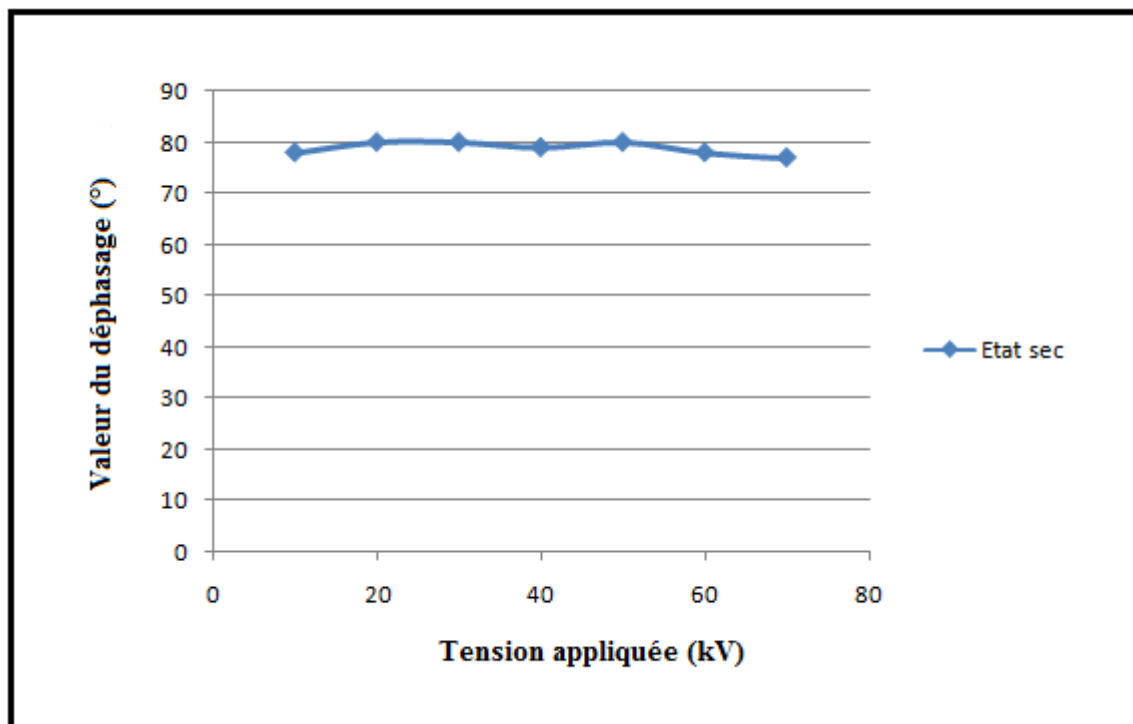


Figure IV.10 : Evolution du déphasage (courant de fuite – tension appliquée) en fonction de la tension appliquée pour le cas sec.

D'après la figure (IV.10), nous remarquons que le déphasage est pratiquement le même quelque soit la tension appliquée. La valeur du déphasage étant comprise entre 75° et 82° indique que le comportement de l'isolateur est pratiquement capacitif à l'état propre.

IV.5.2. Etude du déphasage pour le cas de la pollution uniforme :

Les résultats obtenus après calcul du déphasage courant-tension à partir des essais effectués pour le cas de la pollution uniforme et pour les différentes conductivités sont représentés sur la Figure (IV.11).

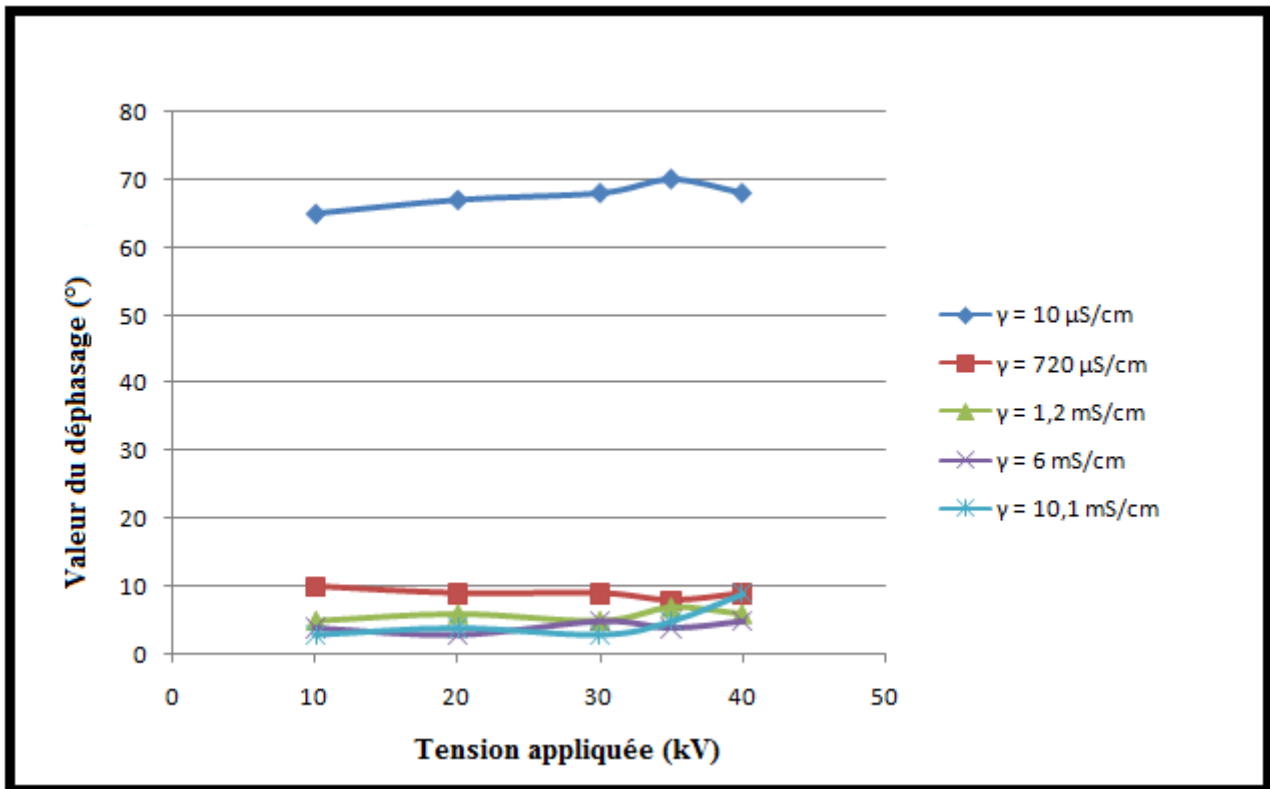


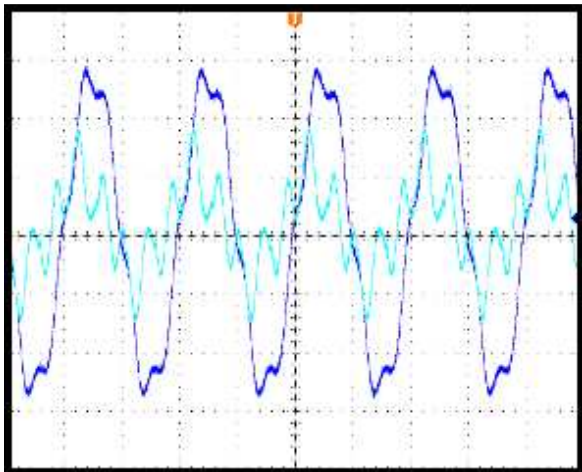
Figure IV.11 : Variation du déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités. Cas de pollution uniforme.

D'après la Figure (IV.11), nous remarquons que le déphasage (courant de fuite _ tension appliquée) a tendance à diminuer avec l'augmentation de la conductivité du milieu.

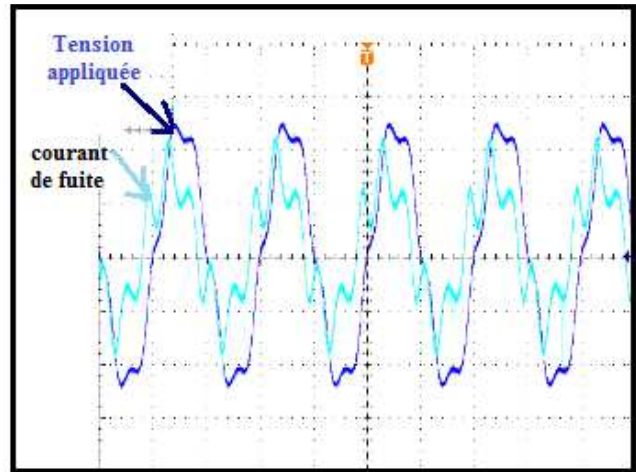
Le comportement de l'isolateur est en grande partie résistif à partir de $\gamma_{\text{vol}} = 720 \mu\text{S/cm}$, le déphasage devient inférieur à 10° .

Pour la conductivité $\gamma_{\text{vol}} = 10 \text{ mS/cm}$, nous constatons qu'il y a une augmentation du déphasage courant-tension lorsqu'on atteint $U_{\text{app}} = 30 \text{ kV}_{\text{eff}}$. Cette augmentation est due à l'activité des décharges qui devient très importante causant l'assèchement de certaines zones du plan qui ont pour effet d'augmenter l'effet capacitif de l'isolateur.

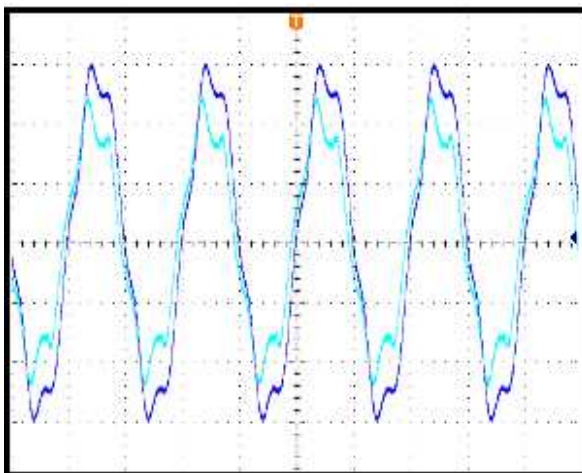
Visualisation des courbes :



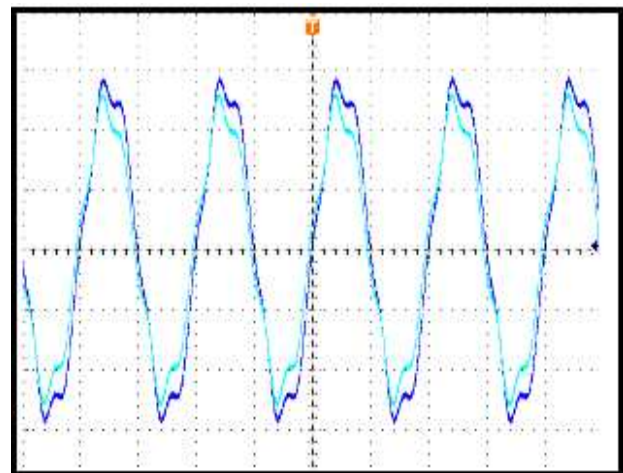
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure IV.12 : Les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'état sec et pour différentes conductivités avec le même niveau de la tension appliquée : $U_{app} = 10 \text{ kV}$.

(a): état sec (b): $\gamma_{vol} = 10 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (c): $\gamma_{vol} = 1.2 \text{ mS/cm}$ (d): $\gamma_{vol} = 10 \text{ mS/cm}$

IV.5.3. Etude du déphasage pour le cas de la pollution non uniforme ($\gamma_{vol} = 1.2 \text{ mS/cm}$):

Les résultats obtenus après calcul du déphasage du déphasage courant de fuite - tension appliquée (voir chapitre III) à partir des essais effectuées pour le cas de la pollution non uniforme et pour les différentes largeurs de la couche sèche coté HT sont représentées sur la Figure IV.13.

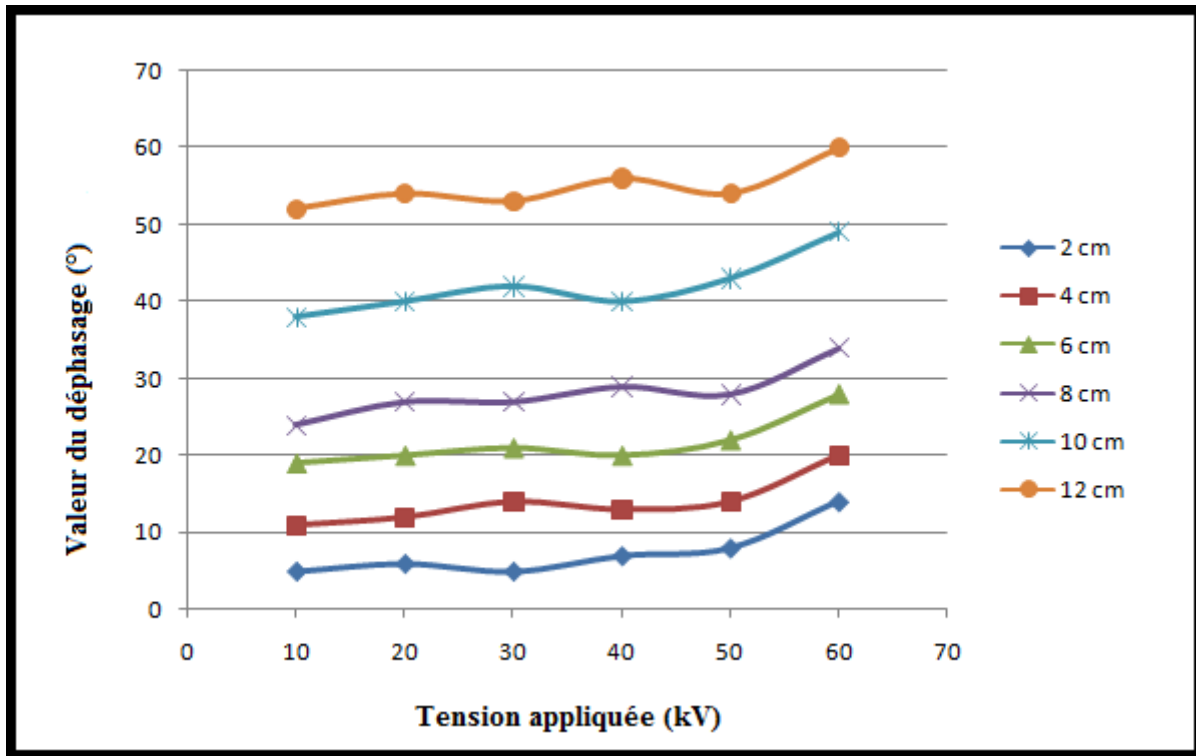


Figure IV.13 : Variation du déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs de la zone sèche.

Nous remarquons que pour tous les niveaux de tension appliquée, le déphasage est proportionnel à la largeur de la couche sèche. Sa valeur est située entre 5° et 14° pour la largeur $d = 2$ cm. Cette valeur est très proche de celle trouvée pour le cas de la pollution uniforme avec une conductivité de $\gamma_{vol} = 1.2 \text{ mS/cm}$. Ceci nous paraît normal puisque la largeur de la couche sèche est mince (elle représente 4% de la distance de fuite) et donc le modèle à un comportement plutôt résistif.

Le comportement de l'isolateur devient davantage capacitif en augmentant la largeur de la couche propre, l'impédance de cette couche devient de plus en plus importante devant celle de la couche polluée, jusqu'à atteindre la largeur critique pour laquelle le modèle se comporte d'une façon hautement capacitive.

Visualisation des courbes :

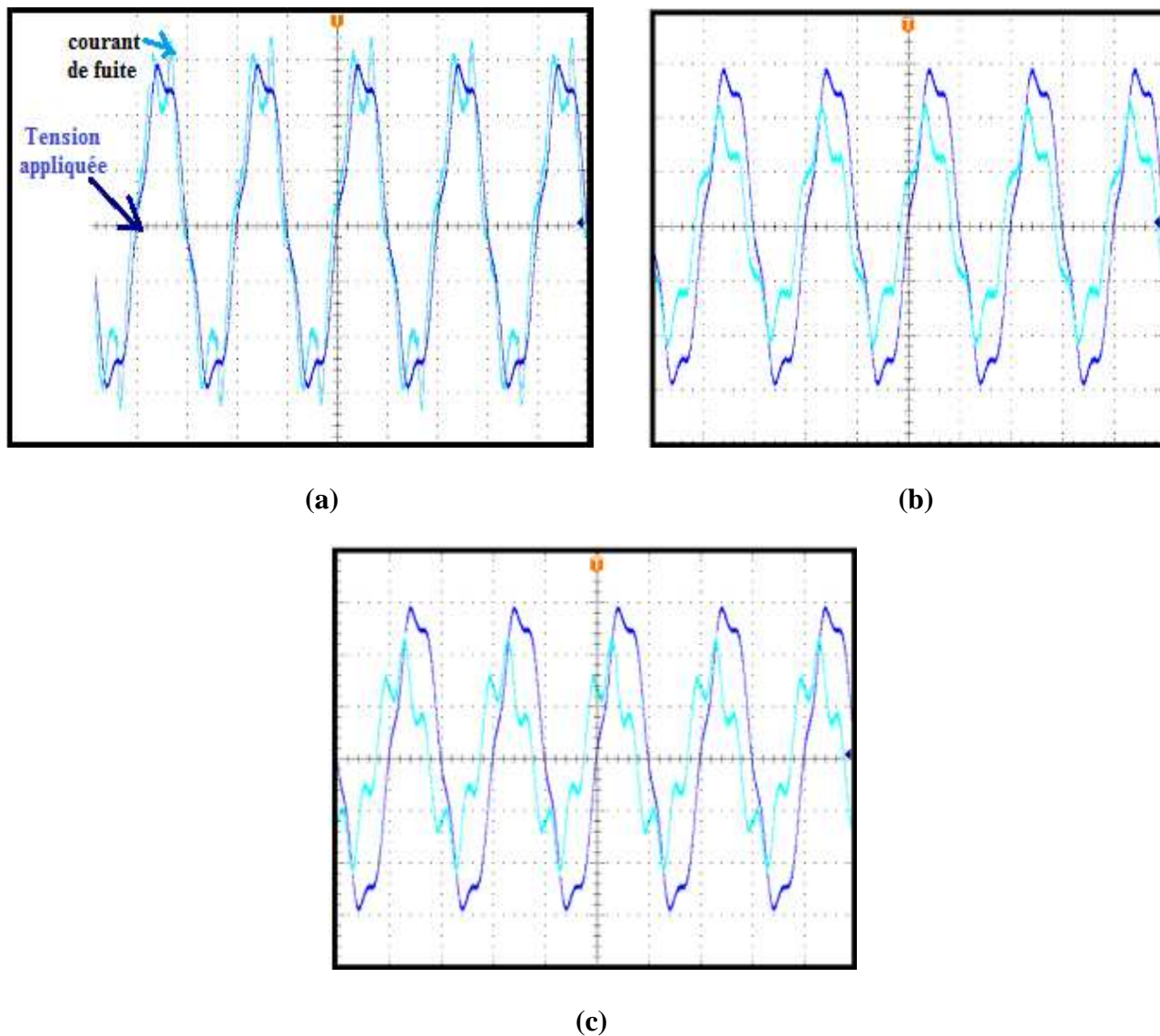


Figure IV.14 : Les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche propre et pour la même tension appliquée $U_{app} = 10$ kV.

(a): $d = 2$ cm (b): $d = 6$ cm (c): $d = 10$ cm

IV-6-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié les courbes que nous avons pu tracer à partir des résultats obtenus au laboratoire pour les différents types de pollution (uniforme et non uniforme), nous avons remarqué que :

La tension de contournement diminue avec l'augmentation de la conductivité de la surface polluée pour le cas de la pollution uniforme, et avec l'augmentation de la largeur de la couche polluée pour le cas de la pollution non-uniforme.

Pour le cas de la pollution non uniforme, la formation d'arcs contournant la zone sèche a lieu avant le contournement pour les largeurs de la couche sèche $d < d_{\text{critique}}$. Cette largeur critique est égale à 27% de la longueur de fuite. Mais pour les largeurs de la couche sèche $d > d_{\text{critique}}$ le contournement se fait directement sans apparition préalable de ces arcs.

L'étude du courant de fuite montre que la variation de sa valeur efficace est proportionnelle à la tension appliquée pour les deux cas de pollutions étudiées (uniforme et non uniforme). Pour le cas d'une pollution uniforme, sa valeur efficace augmente en augmentant la conductivité du milieu, et pour le cas de la pollution non uniforme, cette valeur efficace est inversement proportionnelle à la largeur de la zone propre.

L'assèchement de la zone polluée devient plus important pour les grandes valeurs de la conductivité volumique du milieu (1,2 mS/cm et 10,1 mS/cm), et il devient de plus en plus important en dépassant 50% de la tension de contournement.

La détermination du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée nous a permis de comprendre le comportement du circuit. Pour le cas de la pollution uniforme, la valeur du déphasage courant-tension diminue avec l'augmentation de la conductivité du milieu, et donc l'isolateur aura un comportement résistif pour les grandes valeurs de la conductivité (6 mS/cm et 10 mS/cm).

Pour les niveaux de tension importants (supérieurs à 50% de la tension de contournement), le phénomène d'évaporation engendre une augmentation importante de l'effet capacitif dans les zones asséchées, ce qui implique une augmentation du déphasage.

Pour le cas de la pollution non-uniforme, l'effet capacitif de l'isolateur augmente avec l'élargissement de la zone sèche. L'impédance de cette dernière devient très importante devant celle de la zone polluée à partir de « d_{critique} », et donc l'isolateur aura un comportement hautement capacitif.

Chapitre V:

*L'analyse des harmoniques du
courant de fuite.*

V-1-Introduction :

Dans cette partie de notre travail, nous nous intéressons à l'étude des harmoniques du courant de fuite. Pour cela nous allons calculer l'amplitude des harmoniques les plus significatifs (1^{er}, 3^{ème}, 5^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème}) à l'aide de l'analyse spectrale effectuée en utilisant un programme écrit sous MATLAB.

L'objectif de cette étude est de comprendre l'influence du niveau de tension appliquée ainsi que la conductivité de la couche de pollution sur le comportement des harmoniques du courant de fuite dans le cas de la pollution uniforme, et aussi l'influence de la largeur de la couche propre dans le cas de la pollution non uniforme. Cela a pour but de diagnostiquer la sévérité de la pollution en fonction du taux de distorsion harmonique.

V-2-L'analyse spectrale:

Pour analyser l'onde du courant de fuite, notre choix s'est porté sur le spectre d'amplitude qui est calculé à partir de la FFT du signal du courant de fuite, ce choix offre une bonne résolution fréquentielle donc une distinction facile des différents harmoniques. De plus, il nous permet de repérer et de tirer les amplitudes des harmoniques qui serviront ensuite au calcul du taux de distorsion harmonique en utilisant la formule (II.1) .

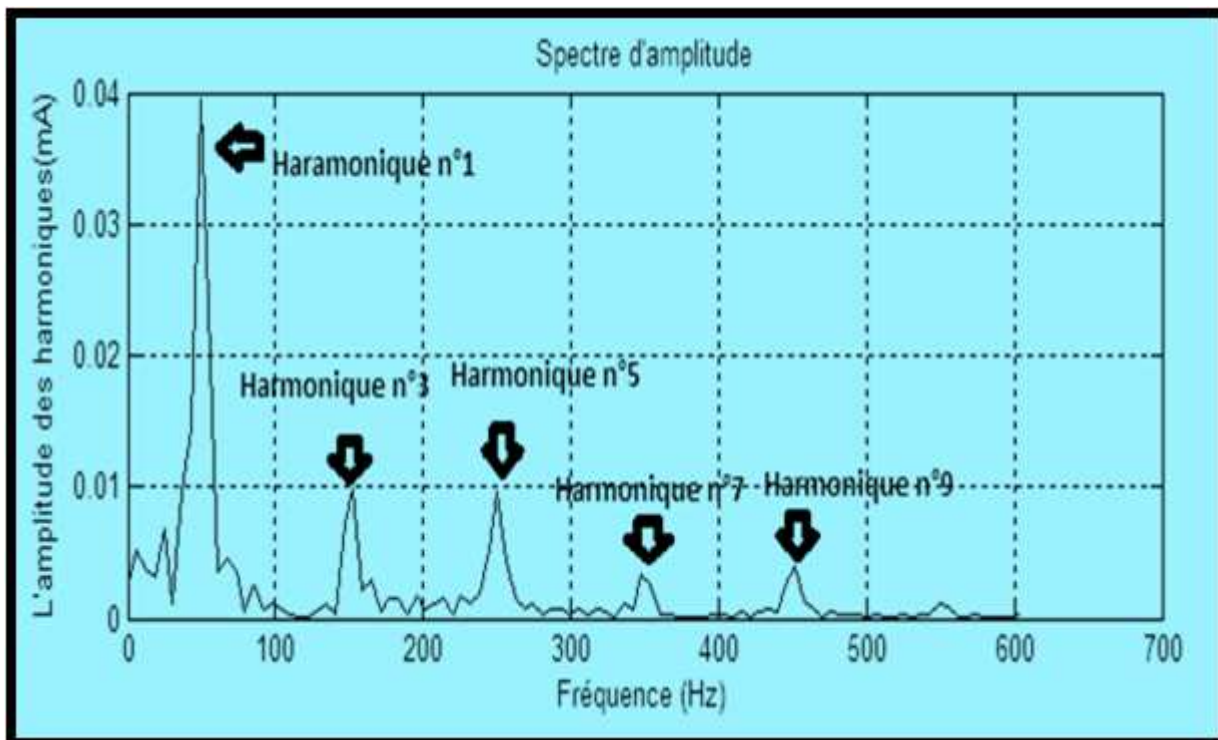
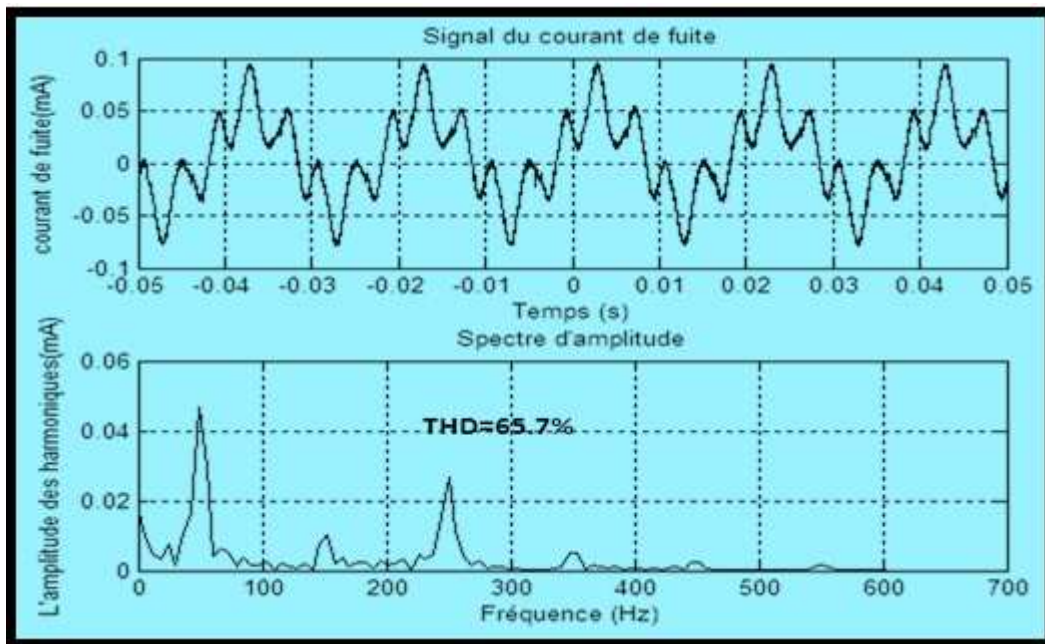


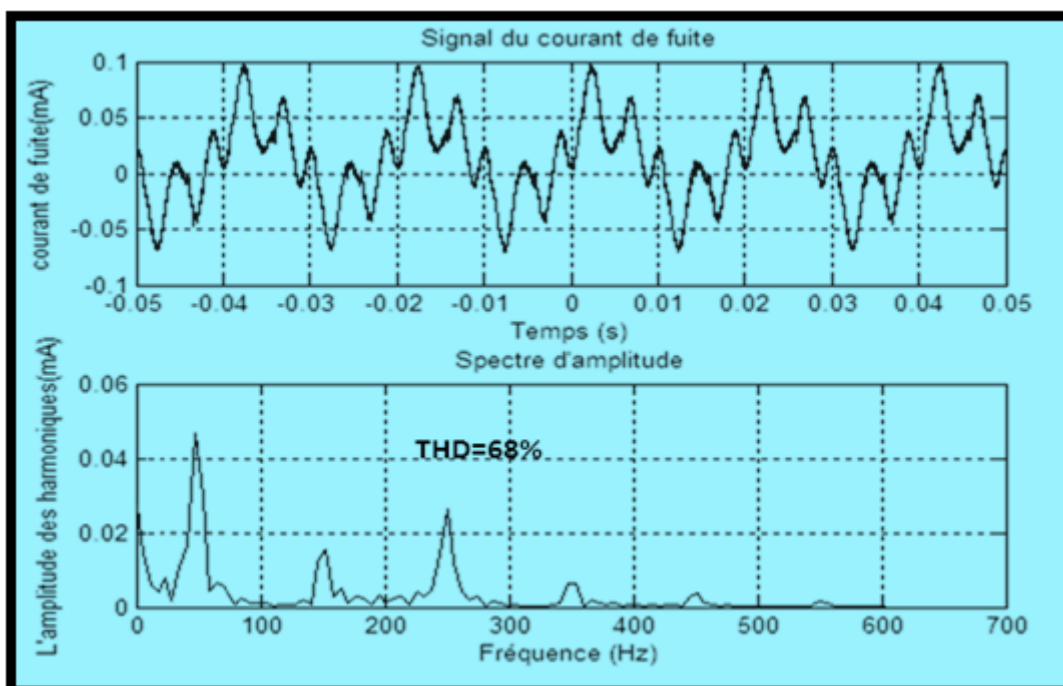
Figure V.1: Représentation du spectre d'amplitude.

V-3-Cas sec :

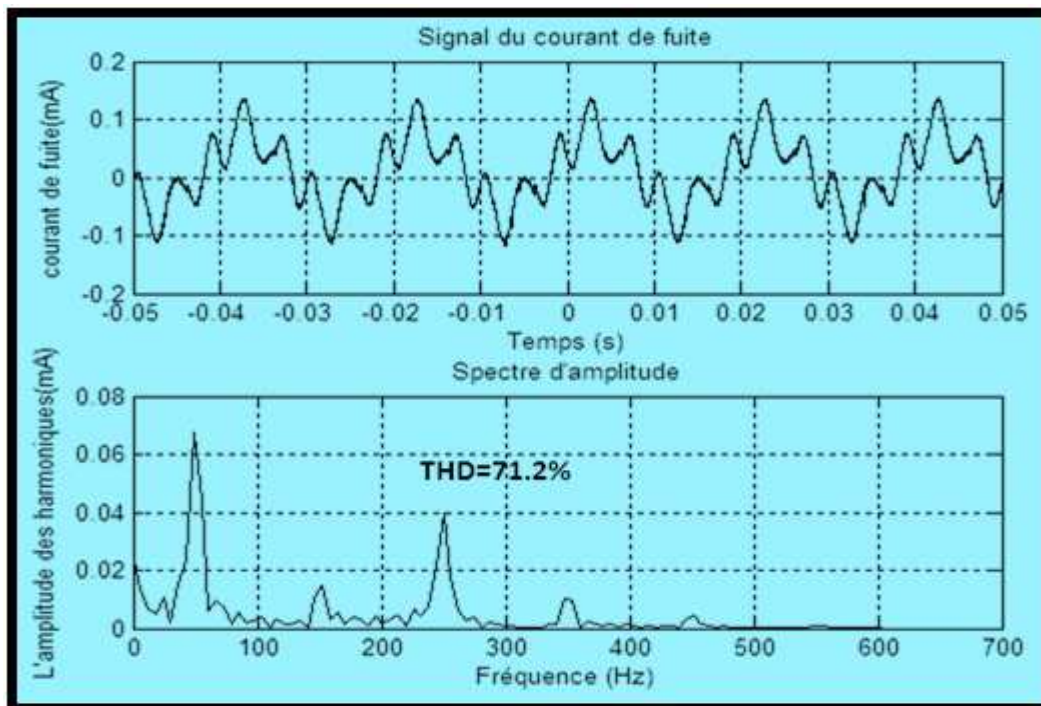
Les figures ci-dessous représentent les signaux du courant de fuite ainsi que les spectres d'amplitudes correspondants dans l'évolution du processus de contournement d'un isolateur plan à sec. Les tensions choisies sont 20kV, 30kV, 50kV et 70kV pour avoir une vision globale du processus.



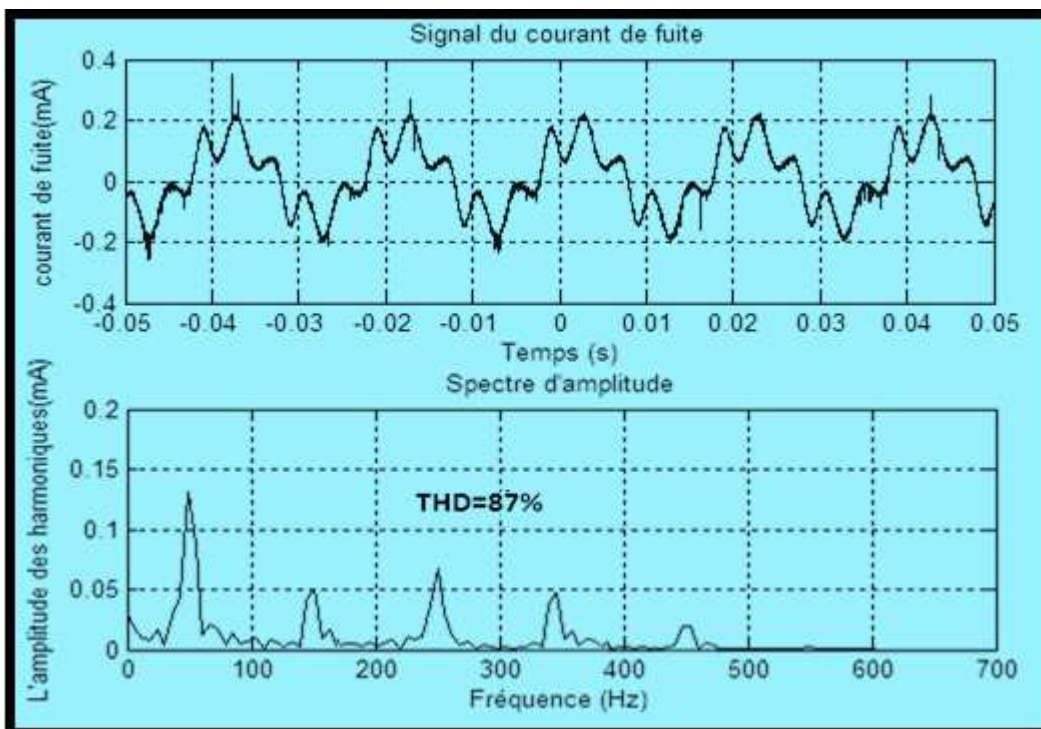
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure V.2: Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude correspondant (en bas) pour le cas sec et un niveau de tension de: (a) 20kV, (b) 30kV, (c) 50kV, (d) 70kV.

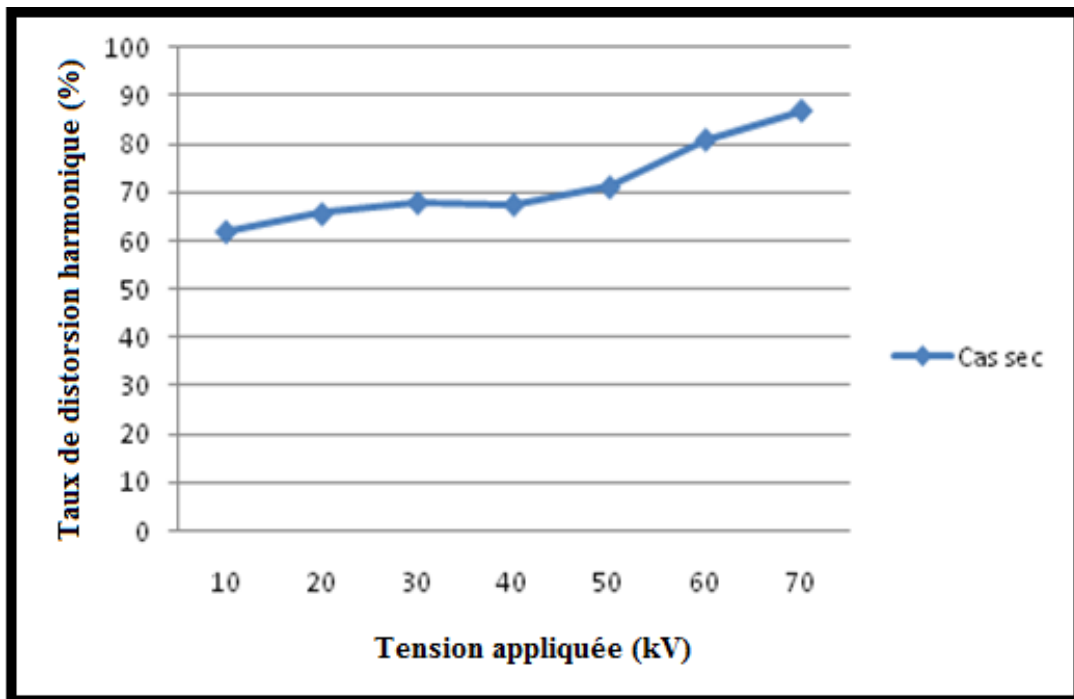
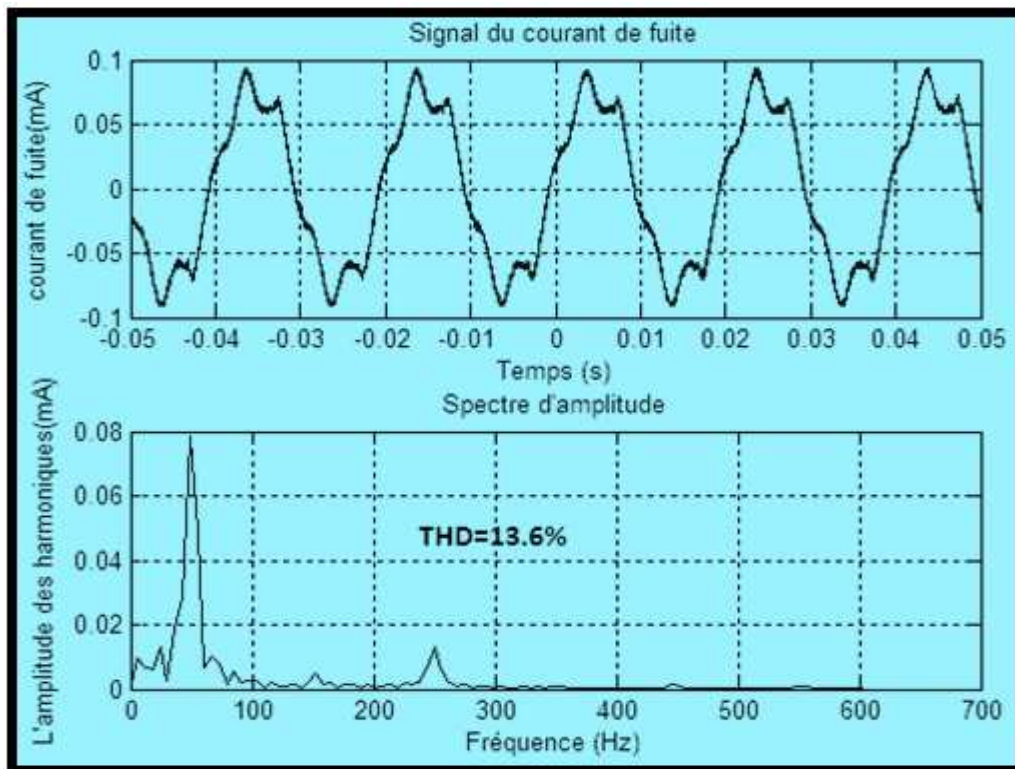


Figure V.3 : Variation du taux de distorsion harmonique en fonction de la tension appliquée pour le cas sec.

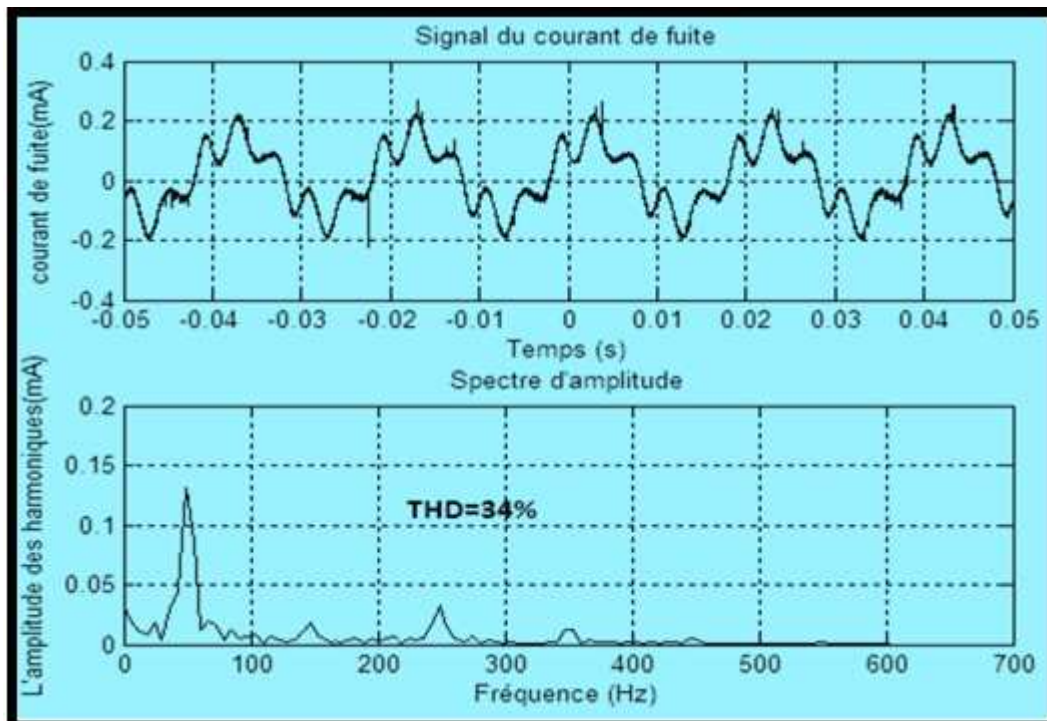
On remarque que l'onde du courant est complètement déformée avec la présence dominante de l'harmonique n°1 suivie du 3^{ème} et 5^{ème} harmonique. Cette déformation peut être expliquée par l'effet capacitif de la surface de l'isolateur qui influe sur la forme sinusoïdale du courant de fuite. Pour la tension appliquée 70 kV, on remarque une légère hausse de l'harmonique n°3 accompagnée de l'apparition de quelques pics sur le signal du courant. La présence de ces pics coïncide avec l'apparition de quelques décharges électriques sur la surface de l'isolateur. Il est à noter aussi que le taux de distorsion des harmoniques varie légèrement pour les tensions inférieures à 50kV, pour les tensions supérieures à 50kV, on remarque une augmentation du THD jusqu'à atteindre une valeur de 87% pour la tension 70kV, qui est due à la hausse de l'harmonique n°3 et l'apparition des décharges sur la surface de l'isolateur.

V-4-Pollution uniforme :

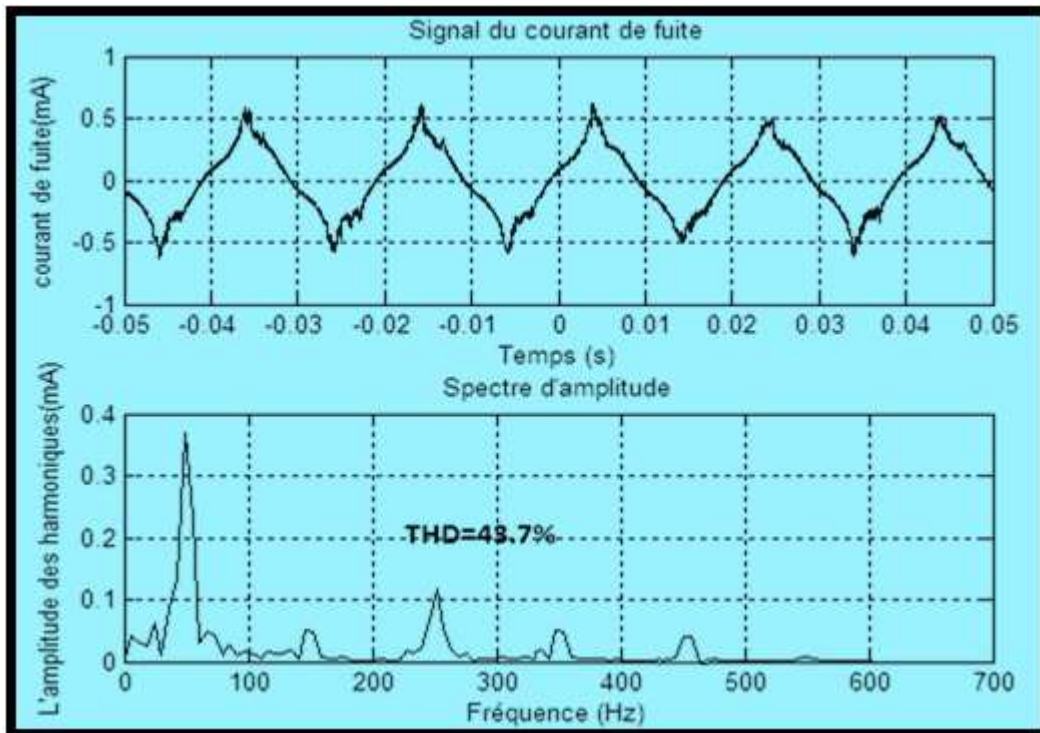
Les figures ci-dessous représentent les signaux du courant de fuite ainsi que les spectres d'amplitudes correspondants dans l'évolution du processus de contournement d'un isolateur plan sous pollution uniforme pour une couche de pollution de conductivité 750 μ S/cm (eau de robinet) et pour différents niveaux de tensions.



(a)



(b)

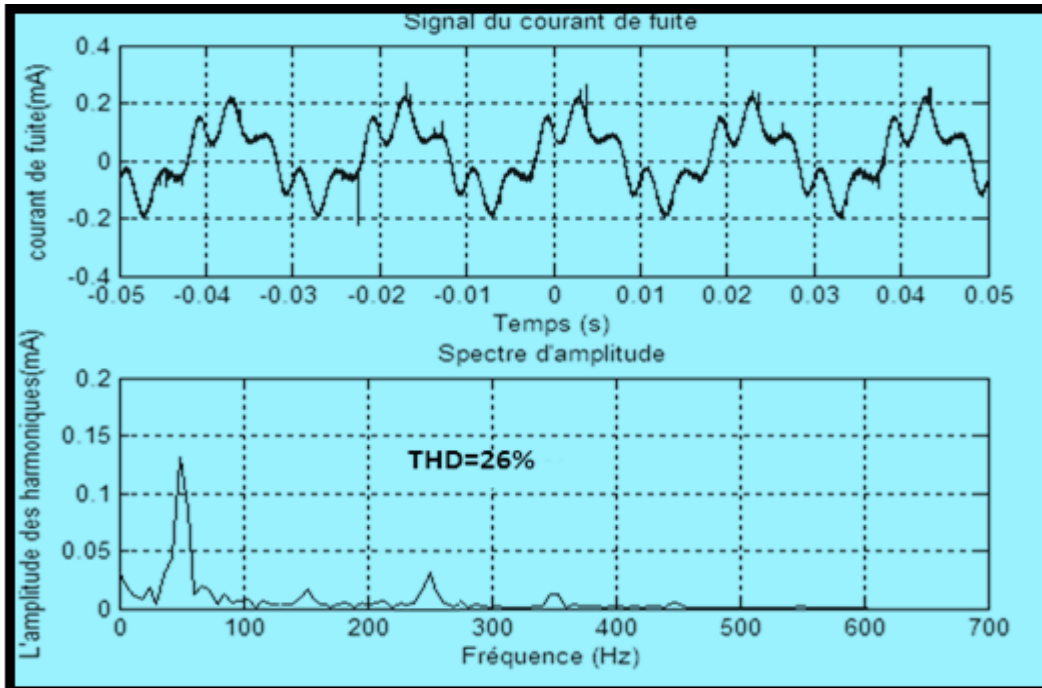


(c)

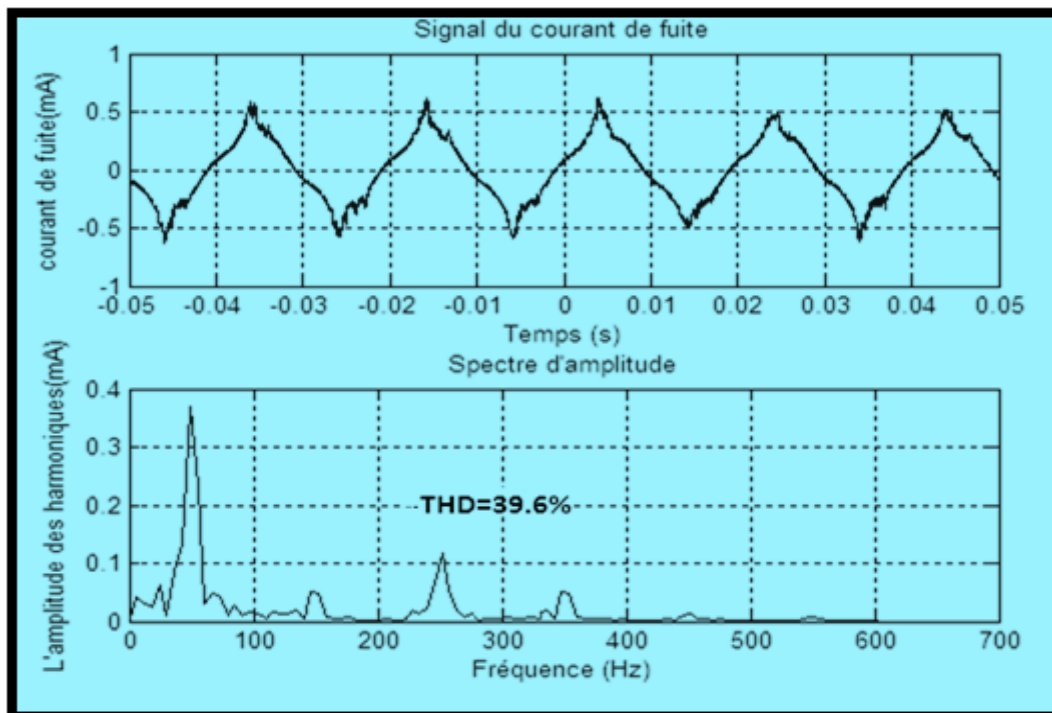
Figure V.4 : Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude (en bas) sous une pollution uniforme ($750\mu\text{S}/\text{cm}$) et un niveau de tension de: (a) 10kV, (b) 30kV, (c) 50kV.

On remarque que le signal du courant de fuite pour les faibles niveaux de tensions (jusqu'à 10kV) est peu distordu avec absence de pics (Figure V.4.a). Le spectre d'amplitude du courant de fuite montre que l'harmonique n°1 est le plus dominant. On remarque aussi la présence des harmoniques n°3 et n°5 avec de faibles amplitudes relativement à l'harmonique n°1, le taux de distorsion harmonique est alors inférieur à 15%. Cela est dû à l'absence des décharges sur la surface de l'isolateur. Pour la tension 30kV, le signal du courant est beaucoup plus distordu, en plus de l'apparition de pics sur le signal (Figure V.4.b). Le spectre d'amplitude du courant de fuite montre l'augmentation de l'harmonique n°5 à une valeur assez grande par rapport au 1^{er} harmonique, et aussi une apparition de l'harmonique n°7 avec une faible amplitude, le THD est alors égale à 34%. Pour la tension appliquée 50kV (50% de la tension de contournement), on remarque que la forme du courant de fuite est totalement déformée, cela est dû à la présence des décharges sur la surface de l'isolateur ainsi que l'apparition d'arcs électriques dans les zones sèches après évaporation de celles-ci (Figure V.4.c), cela signifie qu'on se rapproche de la zone critique. Le spectre du courant montre que le taux de distorsion harmonique a dépassé les 40%, cette augmentation est due à la présence des harmoniques 3^{ème}, 5^{ème}, 7^{ème} et le 9^{ème} harmonique avec des amplitudes considérables.

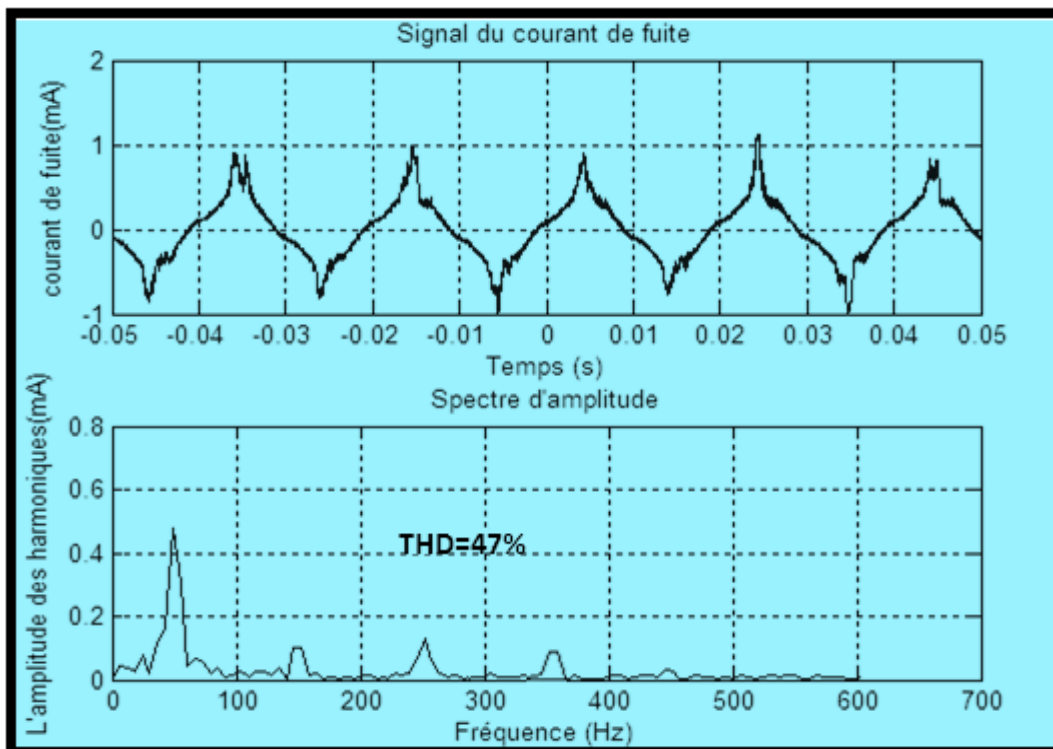
Les signaux du courant de fuite ainsi que l'amplitude des harmoniques pour la tension 40kV sont représentées dans les figures qui vont suivre afin d'illustrer l'influence de la conductivité sur la distorsion harmonique.



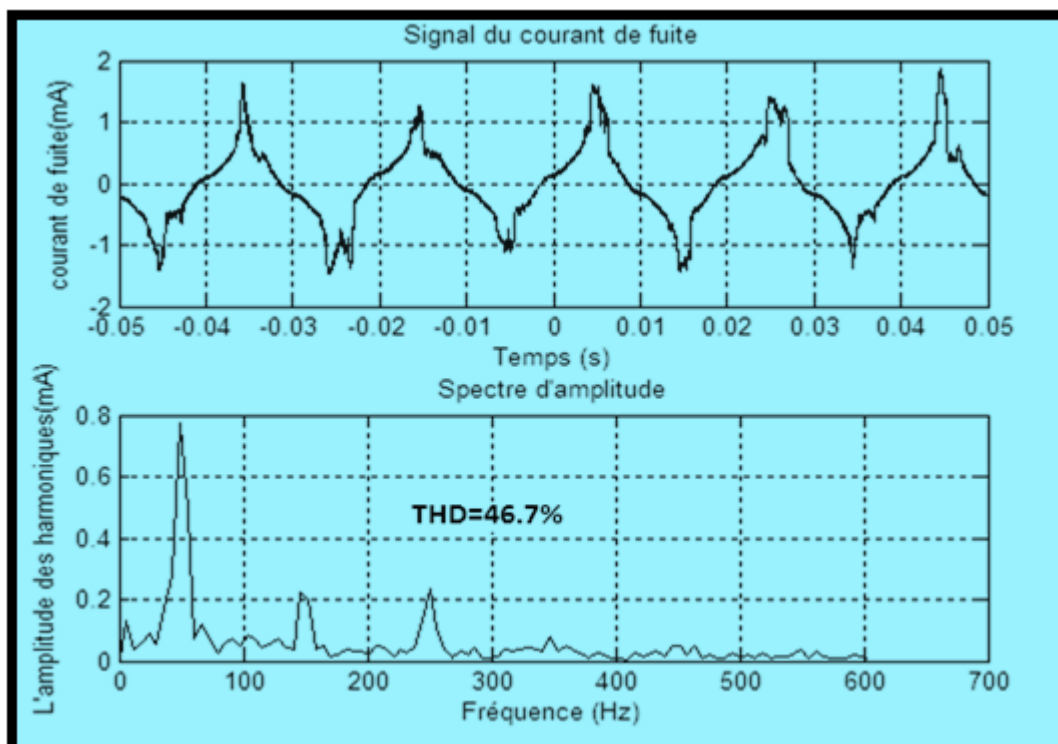
(a)



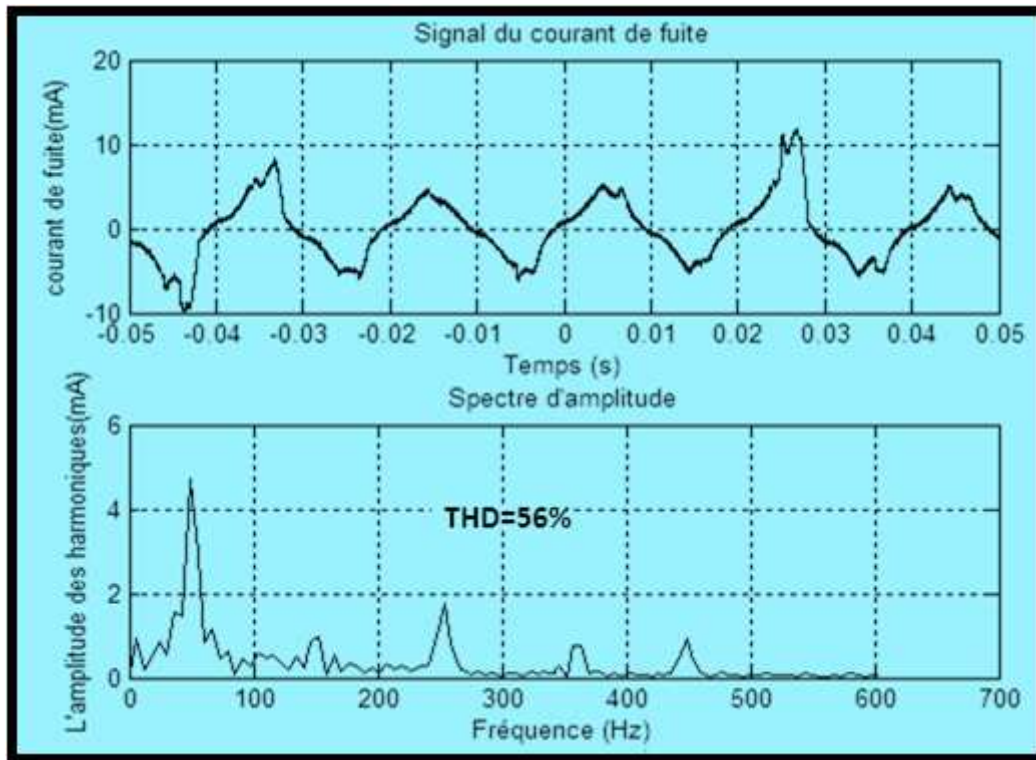
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure V.5 : Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude (en bas) pour un niveau de tension appliquée de 40kV et sous une couche de pollution uniforme de conductivité: (a) 10 μ S/cm, (b) 720 μ S/cm, (c) 1.2 mS/cm, (d) 6 mS/cm, (e) 10.1 mS/cm.

On remarque que pour la tension appliquée 40kV le signal du courant de fuite est complètement déformé avec un taux de distorsion qui diffère d'une conductivité à une autre (Figure V.5). En effet, plus la conductivité augmente, plus les déformations du signal du courant de fuite s'accroissent. Par ailleurs, les spectres d'amplitude du courant de fuite montrent bien le taux de distorsion harmonique qui augmente proportionnellement à la conductivité, avec la présence des harmoniques n°3, 5 et 7 et une domination de l'harmonique n°5. Le taux de distorsion harmonique atteint une valeur de 61% pour la conductivité 10.1 mS. En effet, pour cette conductivité on remarque que l'amplitude des harmoniques 3, 5, 7 prennent des valeurs assez grandes par rapport au fondamental et on remarque même l'apparition de l'harmonique n°9.

La figure qui suit montre l'évolution du taux de distorsion harmonique en fonction de la tension appliquée pour les différentes conductivités.

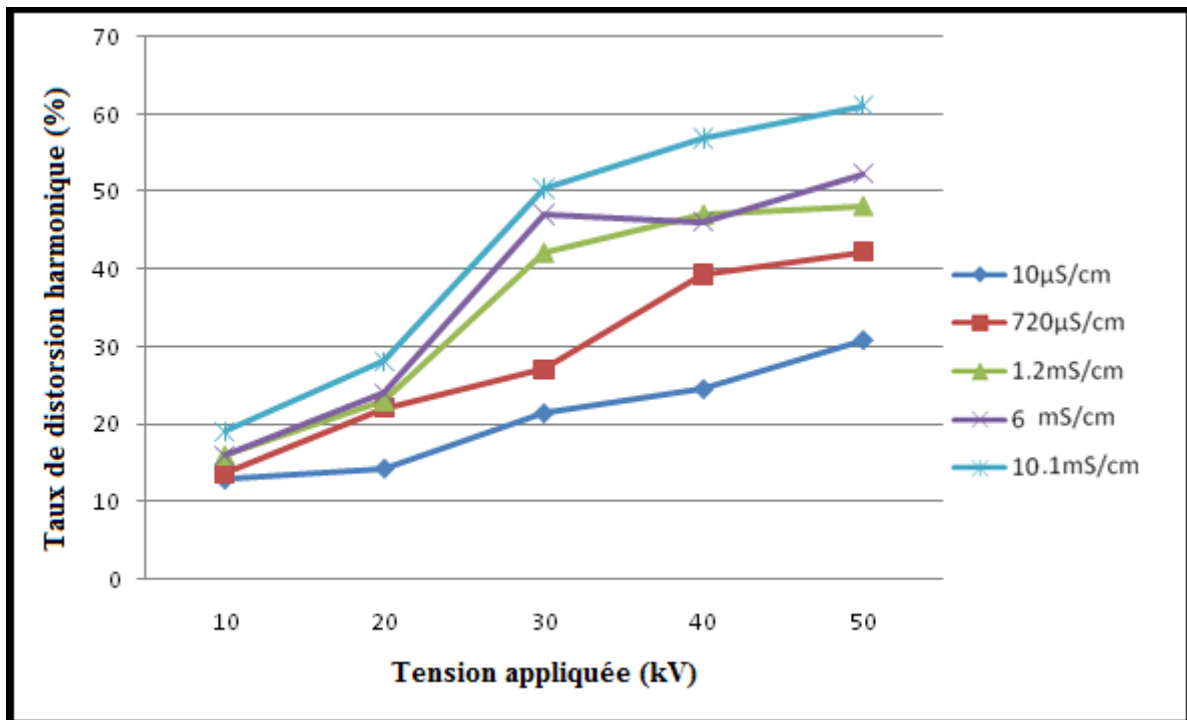
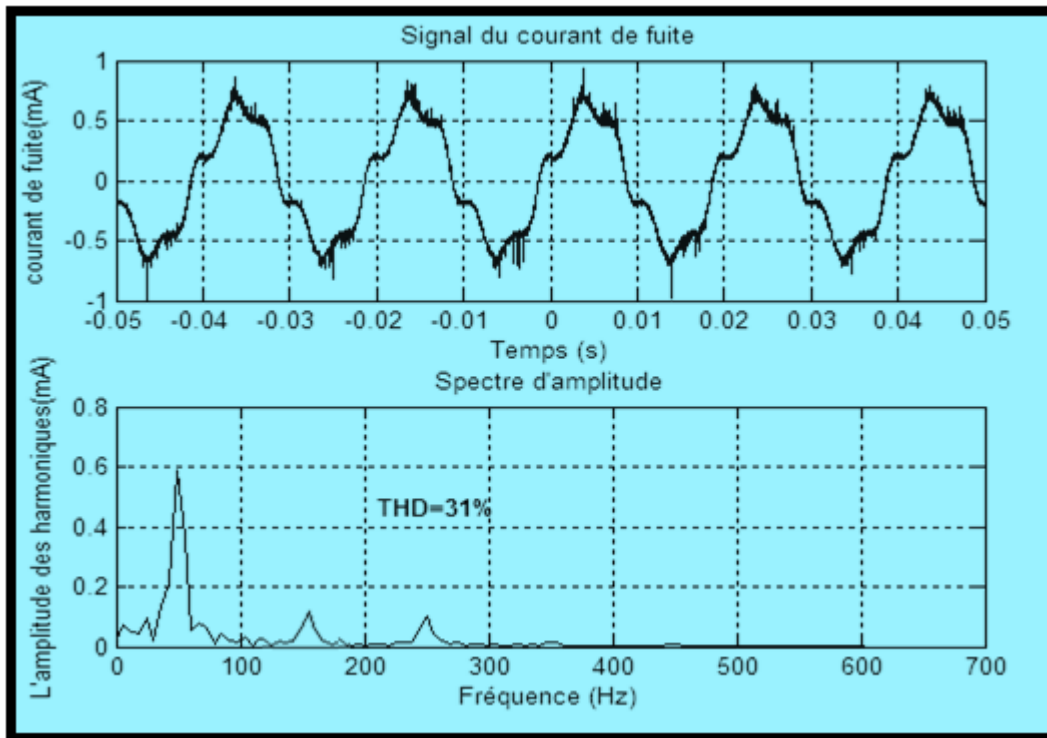


Figure V.6 : Variation du taux de distorsion harmonique en fonction de la tension appliquée pour les différentes conductivités de la couche polluante uniforme.

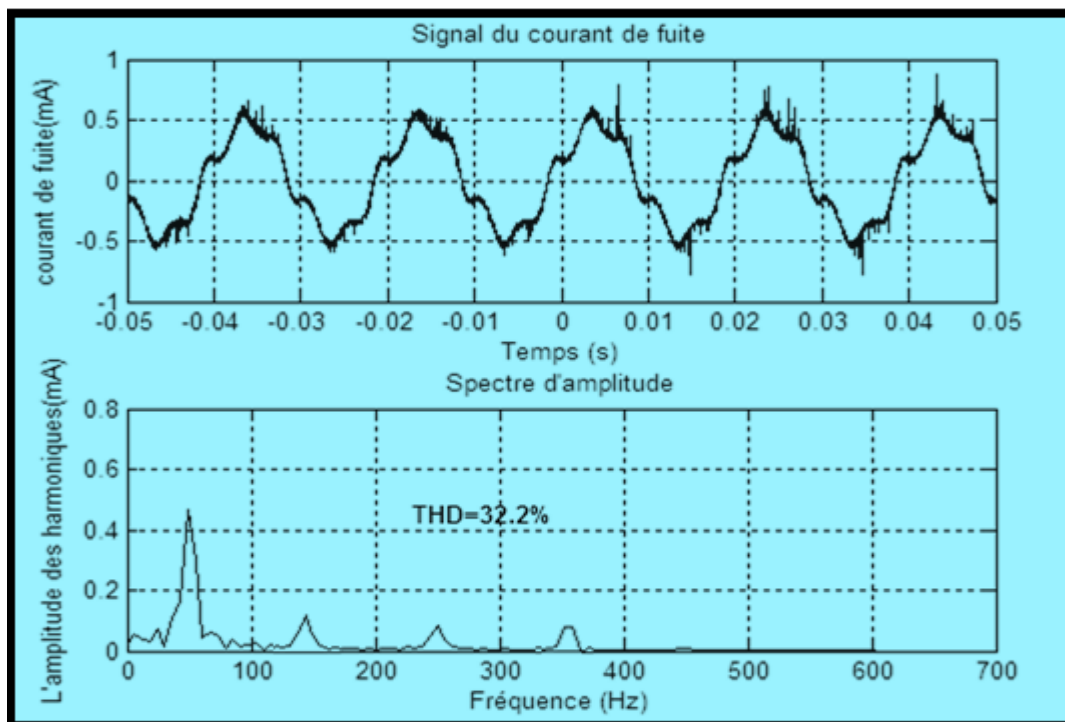
On remarque que le taux de distorsion harmonique augmente proportionnellement à la tension appliquée et cela pour les différents niveaux de la conductivité. Cette distorsion est due à la présence des harmoniques $n^{\circ}3, 5, 7$ et 9 . Pour les faibles niveaux de tension, en l'occurrence 10 et 20 kV, le taux de distorsion harmonique augmente légèrement et ne dépasse pas les 30% . L'augmentation de la tension appliquée au-delà, engendre l'apparition intensive des décharges électriques et d'arcs sur les zones sèches après évaporation de la couche polluante due à la chaleur dégagée par effet joule. Ces zones sèches présentent des capacités qui forment avec la résistance de la partie humide un circuit amplificateur, qui amplifie les harmoniques et du coup engendre l'augmentation importante du taux de distorsion harmonique qui atteint les 60% pour la conductivité 10.1 mS/cm. Par ailleurs, l'augmentation de la conductivité (quantité de sel) de la couche polluante provoque l'apparition des décharges électriques et une évaporation plus rapide des zones humides et donc un taux de distorsion harmonique plus élevé.

V-5-Pollution non uniforme

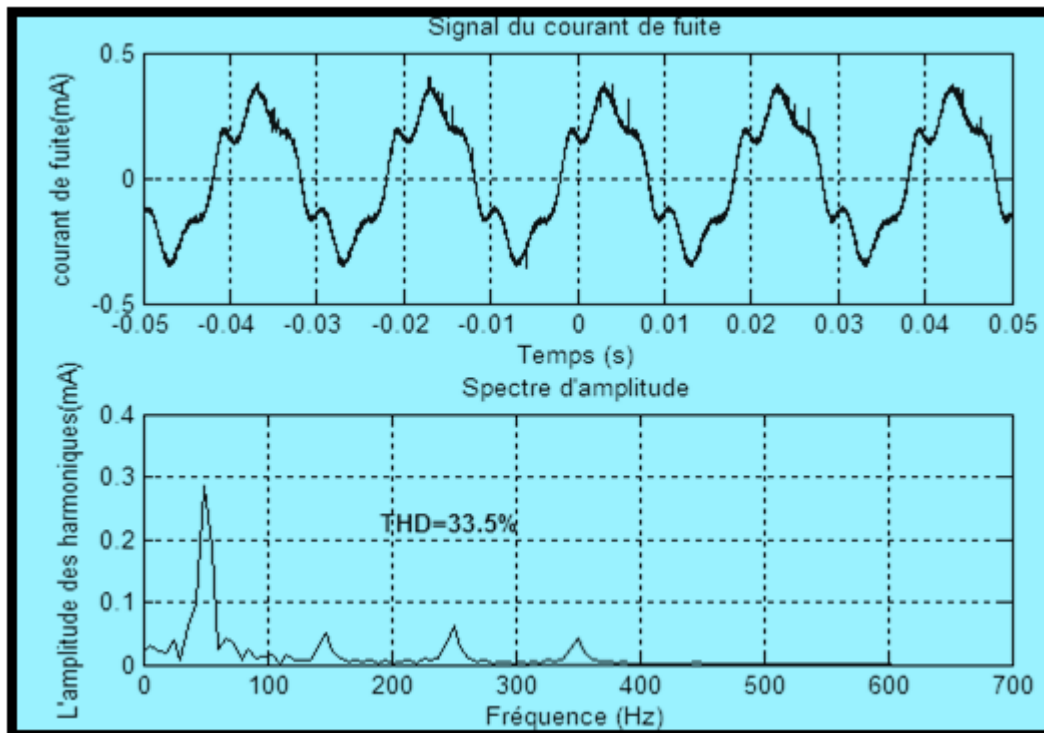
Les signaux du courant de fuite ainsi que les spectres d'amplitudes pour la tension 30 kV sont représentées dans les figures suivantes afin d'illustrer l'influence de la largeur de la couche propre sur la distorsion harmonique dans le cas de la couche polluante ayant une conductivité de 1.2 mS/cm.



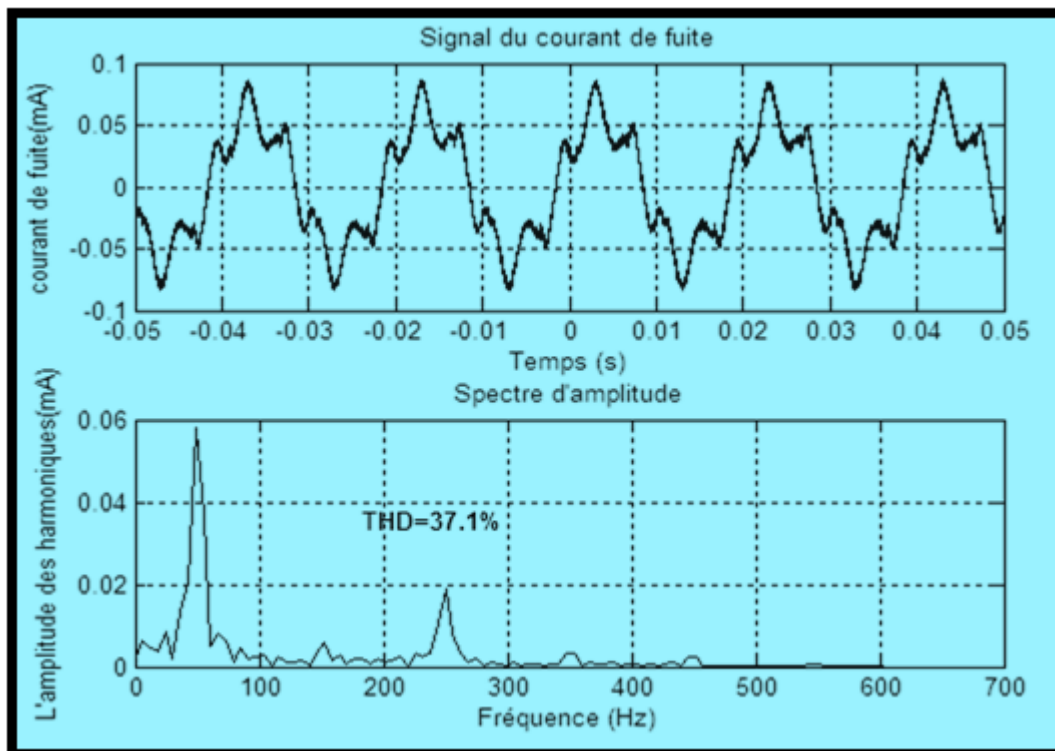
(a)



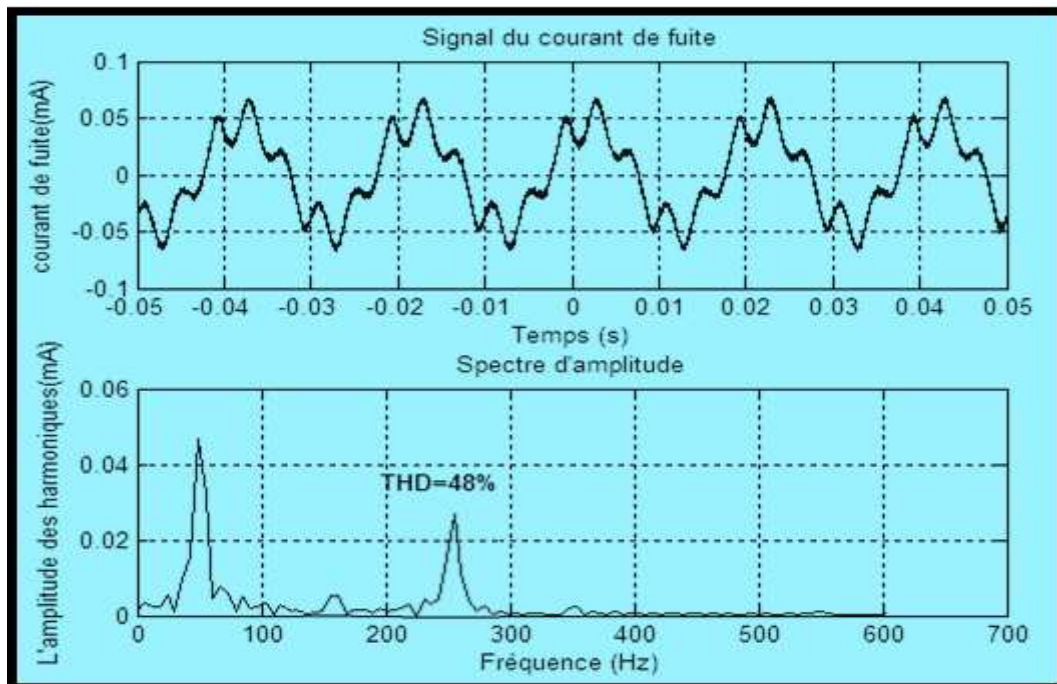
(b)



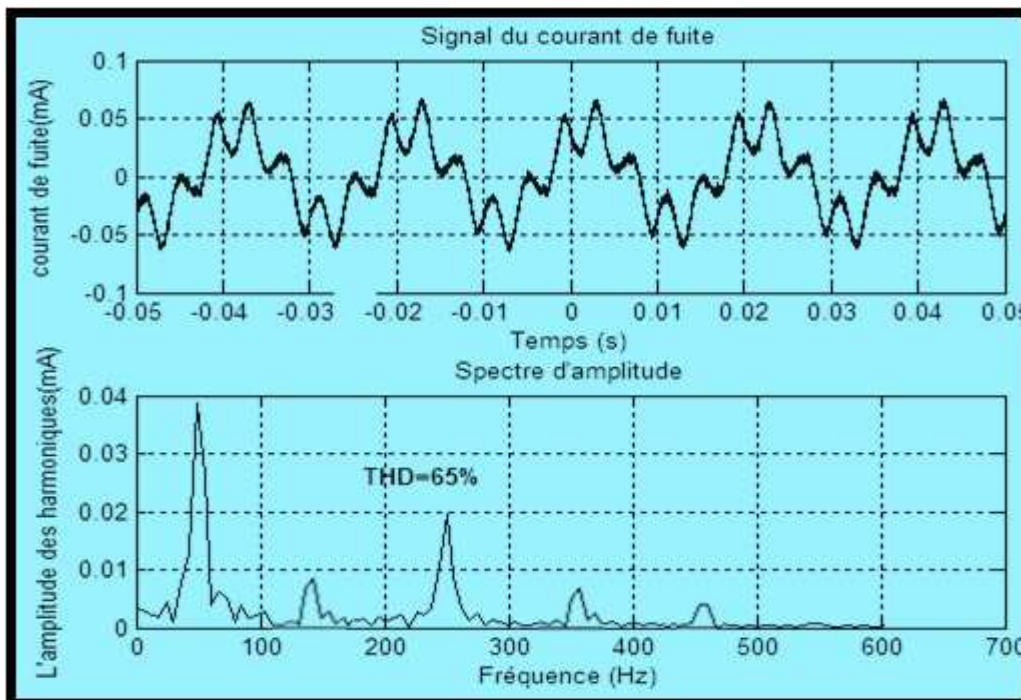
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure V.7 : Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude (en bas) pour un niveau de tension appliquée de 30kV et une largeur de la couche propre : (a) 2cm, (b) 4cm, (c) 6cm, (d) 8cm, (e)10cm, (f) 12cm.

La figure qui suit représente l'évolution du taux de distorsion harmonique dans le cas de la pollution non uniforme (couche de pollution 1.2mS/cm) en fonction de la tension appliquée pour les différentes largeurs de la couche propre.

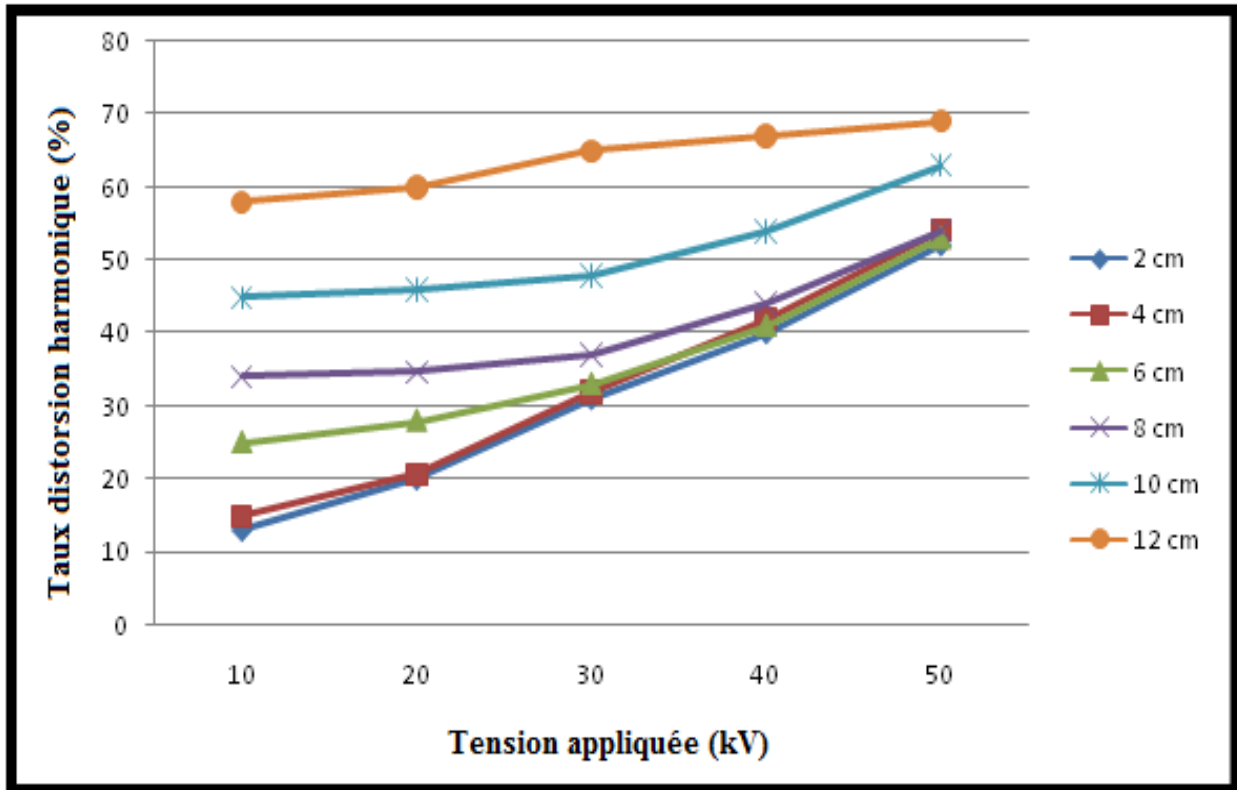


Figure V.8 : Variation du taux de distorsion harmonique en fonction de la tension appliquée pour les différentes largeurs de la couche propre.

Pour les couches propres 2 et 4cm l'effet résistif dominant donne cette forme peu déformée du signal du courant de fuite. Par ailleurs on remarque la présence intensive des impulsions sur l'onde du courant de fuite, cela est causée par l'apparition rapide des décharges électriques sur la surface de l'isolateur. En effet la figure (V.8) montre que le taux de distorsion harmonique augmente rapidement dès les petites tensions.

Plus on augmente la zone propre plus on remarque la déformation du signal du courant de fuite, en plus de la diminution des pics sur l'onde du courant. En effet plus on augmente la largeur de la couche propre, l'apparition des décharges électriques se fait pour des tensions plus élevées. La figure V.8 montre que pour les largeurs 6cm à 10cm le taux de distorsion harmonique varie légèrement pour les petites tensions et commence à augmenter rapidement à partir de 30kV, Pour la largeur 12cm, on remarque que le taux de distorsion varie très peu en fonction de la tension appliquée à cause de l'absence des décharges électriques sur la surface de l'isolateur.

Pour les largeurs 2cm, 4cm et 6cm de la couche propre, les spectres d'amplitudes montrent la présence du fondamental avec une grande amplitude suivi des harmoniques 3, 5 et 7 avec des amplitudes presque égales. Pour les largeurs 8cm, 10cm et 12cm de la couche propre, on remarque l'augmentation de l'amplitude de l'harmonique 5 et aussi une diminution des harmoniques 3 et 7.

Conclusion :

Cette étude nous a permis de comprendre le comportement des harmoniques du signal du courant de fuite ainsi que l'évolution du taux de distorsion harmonique en fonction de la sévérité de la pollution et de la tension appliquée dans le processus de contournement.

Pour le cas sec, nous avons pu constater que la déformation de l'onde du courant de fuite est reflétée spécialement par la présence de l'harmonique n°5 qui représente plus de 50% du fondamental, suivie du 3^{ème} harmonique moins important. Par ailleurs, la présence de décharges est traduite par l'augmentation remarquable de l'harmonique n°3 ainsi qu'une apparition des harmoniques n°7 et n°9, et cela pour une tension assez élevée en l'occurrence 70kV (soit 65% de la tension de contournement).

Le taux de distorsion harmonique pour le cas sec est toujours supérieur à 60% à cause de l'effet capacitif de la surface sèche. On constate aussi une augmentation légère du THD pour les tensions inférieures à 50kV, au-delà de cette valeur, l'augmentation du THD s'accroît atteignant une valeur de 87% et indiquant alors l'approche de la zone critique.

Pour la pollution uniforme, il a été constaté que pour une même conductivité de la couche de pollution, le taux de distorsion harmonique augmente en fonction de la tension appliquée, cette augmentation est reflétée par l'apparition d'impulsions sur l'onde du courant de fuite et se traduit par l'augmentation de l'amplitude des harmoniques n°3 et n°5 ainsi que l'apparition des harmoniques n°7 et n°9 avec de faibles amplitudes. L'augmentation de l'amplitude des harmoniques est due à l'apparition des zones sèches sur la surface de l'isolateur causée par l'évaporation, ce qui favorise des zones capacitives qui forment avec la résistance des parties humides un amplificateur pour les harmoniques.

Il est aussi constaté que la déformation de l'onde du courant de fuite s'accroît avec l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution, ceci est peut être due à l'augmentation de la quantité de sel présente sur la surface de l'isolateur qui favorise l'apparition des décharges électriques et engendre l'évaporation de la couche de pollution.

De plus, l'étude du taux de distorsion harmonique pour la pollution uniforme nous permet de connaître les plages de la tension appliquée où les décharges électriques deviennent intenses indiquant l'approche de la zone critique. Pour les grandes conductivités, en l'occurrence 1.2mS/cm, 6 ms/cm et 10.1 mS/cm, l'apparition de ces décharges intenses est enregistrée dès qu'on dépasse le palier des 20 kV, pour la conductivité 720µS/cm l'apparition des décharges se fait à partir de 30kV,

par contre pour l'eau distillée ($10\mu\text{s}/\text{cm}$) nous avons constaté l'absence de décharges intense dans la plage de tension choisie [0V- 50kV].

Pour la pollution non uniforme, nous pouvons conclure que l'augmentation de la largeur de la couche propre provoque certes la déformation de l'onde du courant de fuite qui se traduit spécialement par l'augmentation de l'harmonique n°5 sur le spectre d'amplitude, mais aussi diminue le nombre d'impulsions sur l'onde du courant, ce qui indique l'absence de décharges électriques sur la surface du plan même pour des tensions élevées.

Chapitre VI:

*Etude de la pollution des
isolateurs par la technique
des ondelettes*

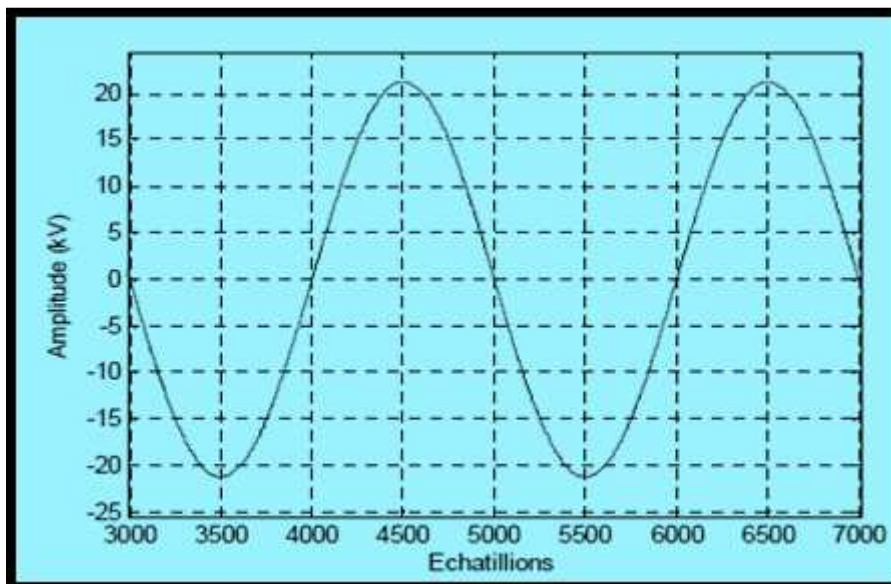
VI.1. Introduction :

Dans ce chapitre, l'utilisation de la technique des ondelettes a pour objectif de caractériser l'état de surface du modèle isolant. Nous exploitons en premier lieu le signal de la tension appliquée pour les différentes conductivités dans le cas de la pollution uniforme en utilisant la CWT qui étudie la nature fractale de cette onde pour chaque conductivité. En deuxième lieu, et pour la pollution non-uniforme, le signal du courant de fuite est décomposé par la DWT pour comprendre le comportement des composantes fréquentielles avec l'augmentation de la largeur de la couche propre. Cette étude est réalisée à partir des différentes formes d'ondes du courant de fuite pour les différentes configurations.

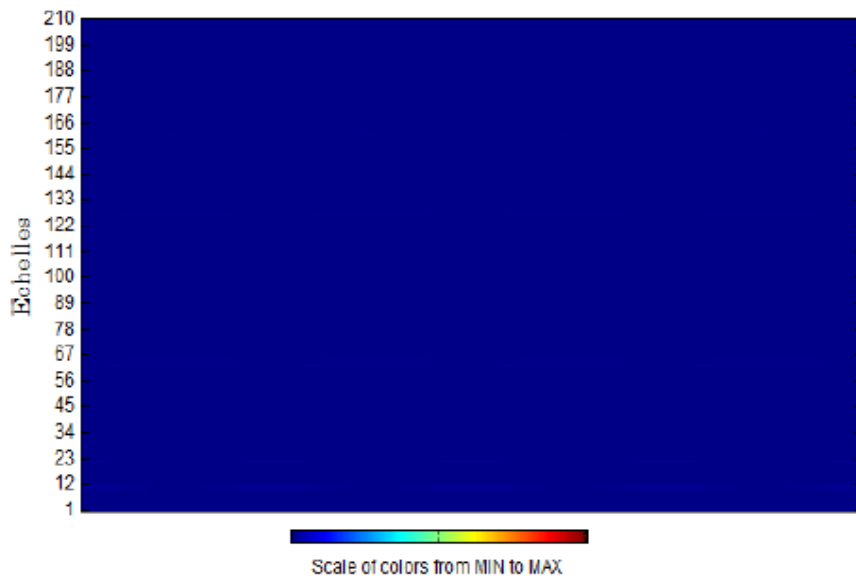
VI.2. Pollution uniforme :

Pour ce type de pollution, l'étude est réalisée pour les différentes conductivités de la couche polluante pour illustrer la sévérité de la pollution sur le comportement de l'isolateur plan. La comparaison des ondes est faite par rapport à une onde de tension parfaitement sinusoïdale et une autre déformée par les harmoniques.

La transformée en ondelette d'une sinusoïde pure et celle d'une onde de tension déformée sont représentées dans les figures VI.1 et VI.2.



(a)

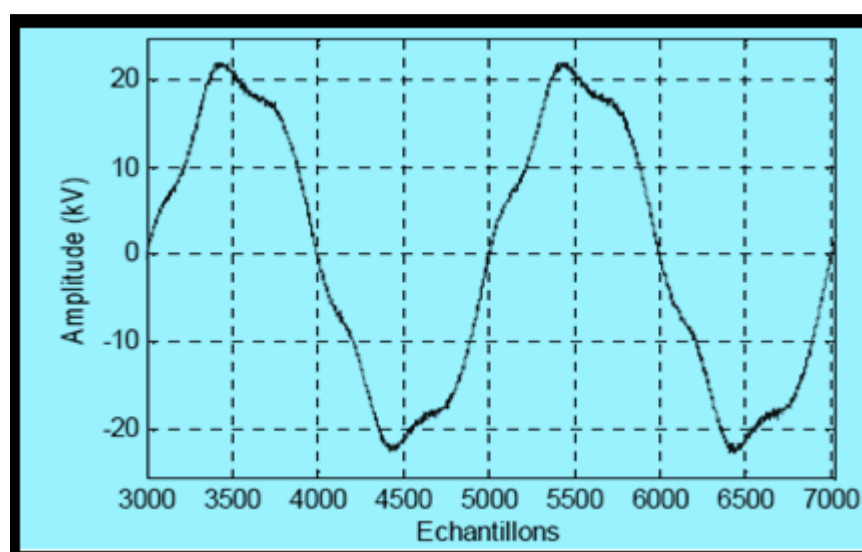


(b)

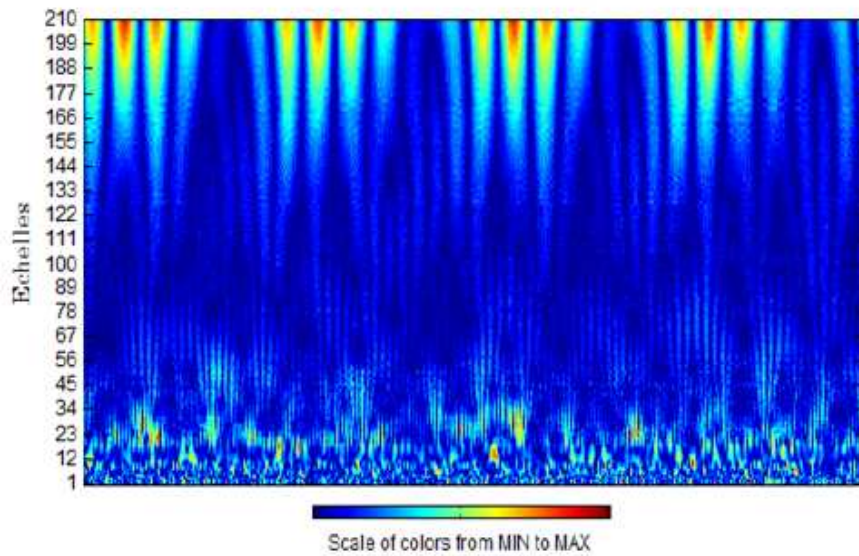
Figure VI.1: (a) sinusoïde pure (b) scalogramme de la sinusoïde pure.

Nous constatons que le scalogramme de la sinusoïde pure n'affiche aucune corrélation entre la CWT de la tension et l'ondelette de Morlet pour toutes les échelles considérées.

La sinusoïde pure est générée à l'aide d'un programme MATLAB® avec la même fréquence d'échantillonnage de l'oscilloscope et la même taille que celle du signal réel.



(a)



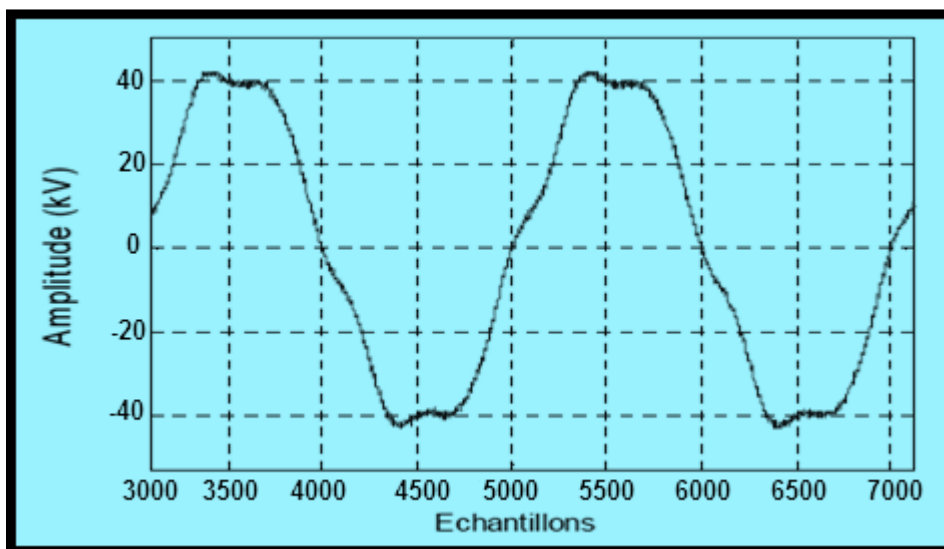
(b)

Figure VI.2: (a) tension déformée (b) scalogramme de la tension déformée.

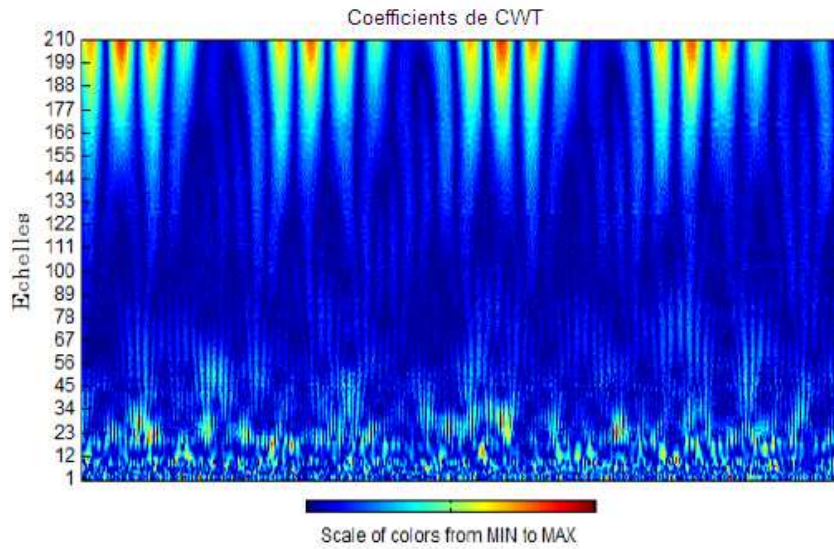
Le scalogramme de la tension déformée par l’action des décharges électriques montre qu’il existe une corrélation moyenne entre sa CWT et l’ondelette de Morlet, qui se situe au niveau des grandes échelles. Cela permet de dire que l’apparition des décharges électriques est liée à la couleur rouge intense qui indique une forte corrélation et un coefficient très élevé.

VI.2.1. Conductivité 10µS/cm :

Tension appliquée 40kV



(a)



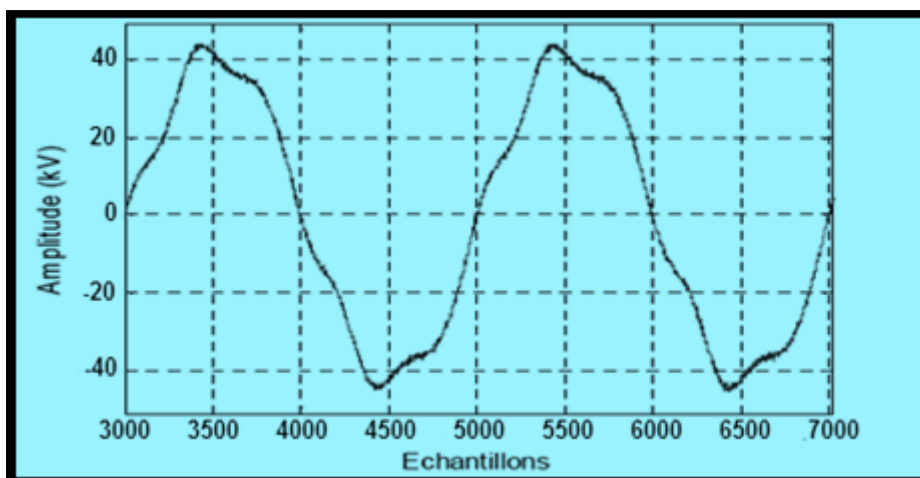
(b)

Figure VI.3 : Conductivité $10\mu\text{S}/\text{cm}$: (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 40 kV ; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 40kV.

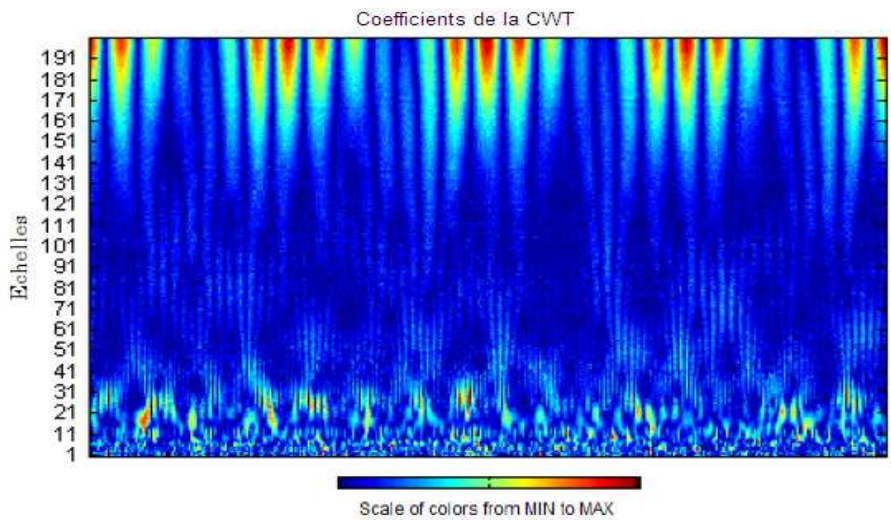
Pour ce cas, nous observons que l'onde de tension a une allure presque sinusoïdale avec des pics descendants sur la crête. Son scalogramme montre que les coefficients ont une valeur maximale (couleur rouge intense) pour de grandes échelles (de 177 à 210). Cela signifie que ces perturbations oscillent à des fréquences très faibles indiquant que l'activité des décharges parallèles à la surface est moindre.

VI.2.2. Conductivité $720\mu\text{S}/\text{cm}$:

Tension appliquée 40kV



(a)



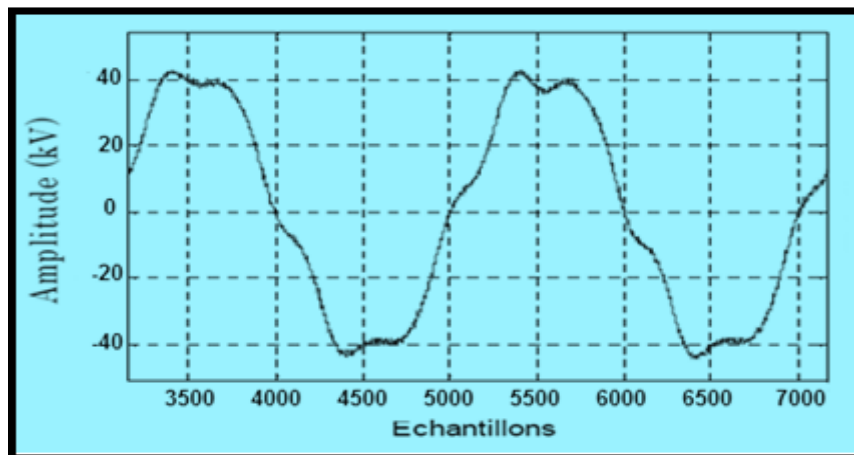
(b)

Figure VI.4 : Conductivité 720 μ S/cm : (a) Forme d’onde de la tension appliquée à 40 kV ; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 40kV.

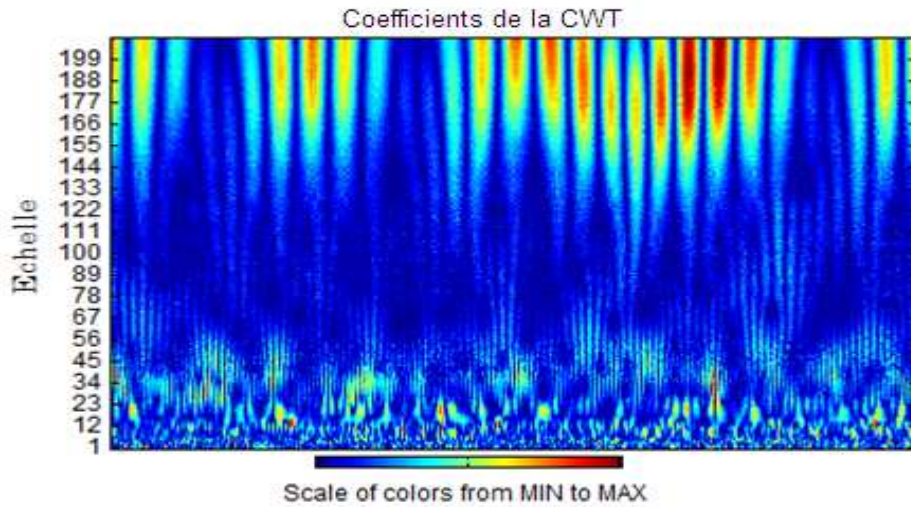
Pour cette conductivité, nous remarquons que le signal de la tension affiche quelques distorsions au niveau de la crête et au voisinage de l’axe des temps à cause d’un court-circuit partiel et brutal causé par les décharges électriques à la surface de l’isolateur. Le scalogramme correspondant à cette tension montre de manière similaire que les perturbations causées par ces décharges sont de faibles fréquences à cause de la forte corrélation entre la transformée en ondelette du signal de la tension et l’ondelette analysante pour les grandes échelles (couleur rouge intense). Néanmoins il existe une petite différence notable par rapport au cas précédent, en effet la couleur rouge intense est visible pour des échelles légèrement plus petites.

VI.2.3. Conductivité 1.2mS/cm :

Tension appliquée 40kV



(a)



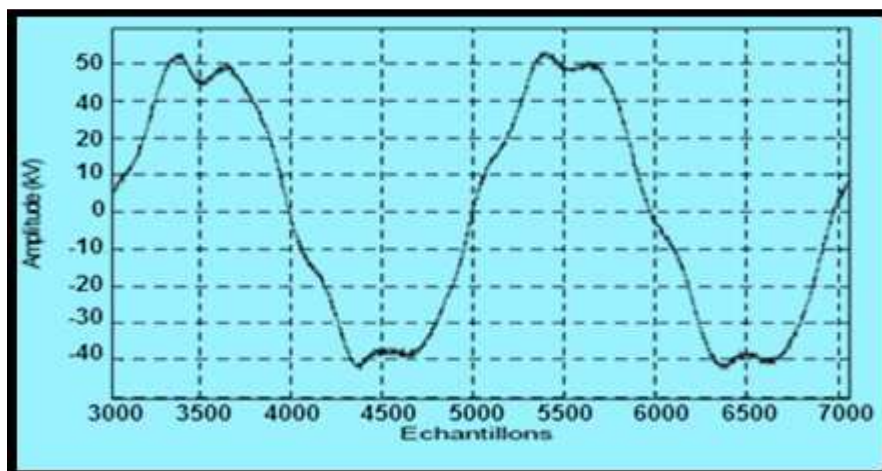
(b)

Figure VI.5 : Conductivité 1.2mS/cm : (a) Forme d’onde de la tension appliquée à 40 kV ; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 40kV.

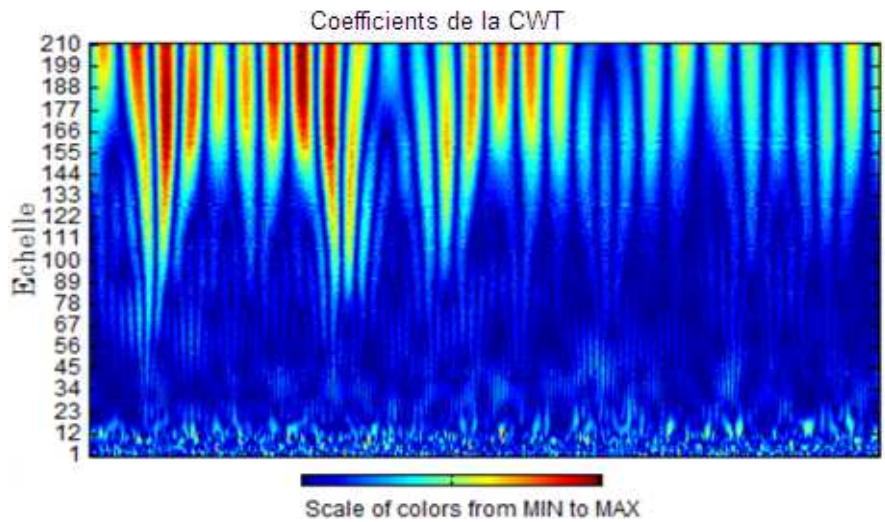
Pour cette conductivité, nous constatons que les perturbations sur l’onde de la tension appliquée s’intensifient surtout au niveau de la crête et au voisinage de l’axe des temps. Le scalogramme montre que les perturbations sont causées à des instants très rapprochés avec des coefficients très élevés pour des échelles encore plus faibles comparativement aux deux conductivités précédentes ; ce qui signifie que les décharges parallèles deviennent de plus en plus nombreuses à la surface de l’isolateur. Nous pouvons également dire que l’assèchement du modèle plan est plus rapide vue l’augmentation de l’activité des décharges électriques.

VI.2.4. Conductivité 6 mS/cm :

Tension appliquée 40kV



(a)



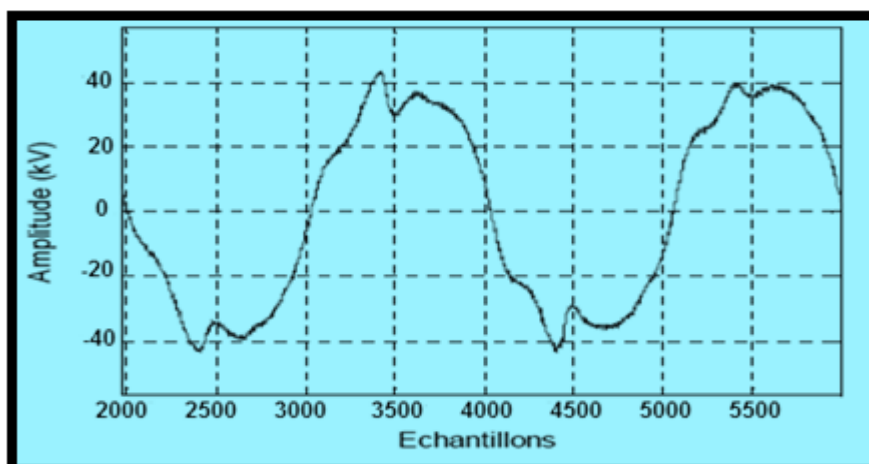
(b)

Figure VI.6 : Conductivité 6 mS/cm : (a) Forme d’onde de la tension appliquée à 40 kV ; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 40kV.

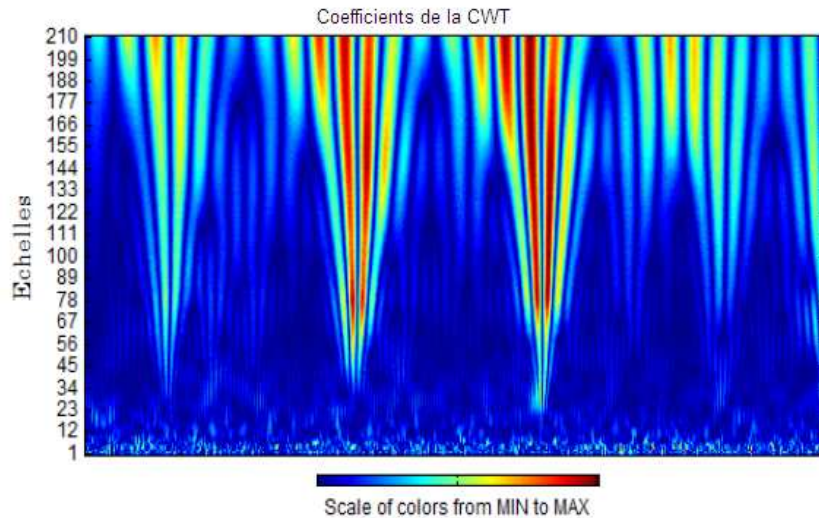
Pour cette conductivité élevée, les perturbations gagnent pratiquement toutes les régions du signal de la tension appliquée. Le scalogramme indique que les coefficients de la CWT sont très élevés pour des échelles encore plus faibles par rapport à la conductivité précédente; c'est-à-dire que des perturbations de plus hautes fréquences apparaissent en plus de celles à faibles fréquences. Ceci peut expliquer l’assèchement encore plus rapide dû à la diminution de la résistance de la couche polluée en présence d’une solution hautement conductrice.

VI.2.5. Conductivité 10.1 mS/cm :

Tension appliquée 40kV



(a)



(b)

Figure VI.7 : Conductivité 10.1 mS/cm : (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 40 kV ; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 40kV.

Pour cette très haute conductivité, la cassure de l'onde de tension est très visible pour ce niveau de tension à cause de l'assèchement ultra rapide de la plaque qui intensifie les zones sèches à la surface de l'isolateur. Le champ électrique est très élevé dans ces espaces, ce qui a pour effet de court-circuiter les micro-capacités existantes. L'analyse par le scalogramme montre que l'activité des décharges électriques induit des déformations très sévères sur le signal de la tension appliquée qui va jusqu'aux très hautes fréquences (échelle 23).

VI.2.6. Conclusion sur l'analyse par la CWT :

D'après l'analyse faite par la CWT sur l'onde de tension, le diagnostic de la sévérité de la pollution peut se faire par l'intermédiaire du scalogramme qui est une projection des coefficients calculés pour des échelles données sur un plan orthogonal.

Il a été constaté que l'augmentation de la conductivité de la couche polluée est détectée grâce aux décharges qui ont lieu à la surface de l'isolateur. Cette augmentation peut être observée par la couleur des coefficients qui spécifient leurs valeurs selon qu'elles soient faibles ou élevées. Un coefficient élevé pour une grande échelle indique une oscillation du signal à basse fréquence et donc une petites déformation de l'onde de la tension et inversement pour une échelle de plus petite valeur.

VI.3. Pollution non-uniforme :

Pour le cas de la pollution non uniforme, nous utilisons la décomposition par l'ondelette de Daubechies 4 jusqu'au niveau 10. Les bandes de fréquences correspondantes à chaque détail sont montrées au tableau VI.I.

Les valeurs de la déviation standard sont calculées pour les détails correspondants afin d'identifier les transitions d'énergie présentes dans le signal du courant de fuite pour chaque largeur de la couche polluée. La déviation standard peut être considérée comme une mesure de la quantité d'énergie présente dans un signal de moyenne nulle [55]. Elle est donnée par l'expression :

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_n - m_n)^2}{N-1}} \quad (\text{VI.1})$$

d_n : correspond à un échantillon du détail d.

δ : est la déviation standard du détail d.

m_n : est la moyenne du signal.

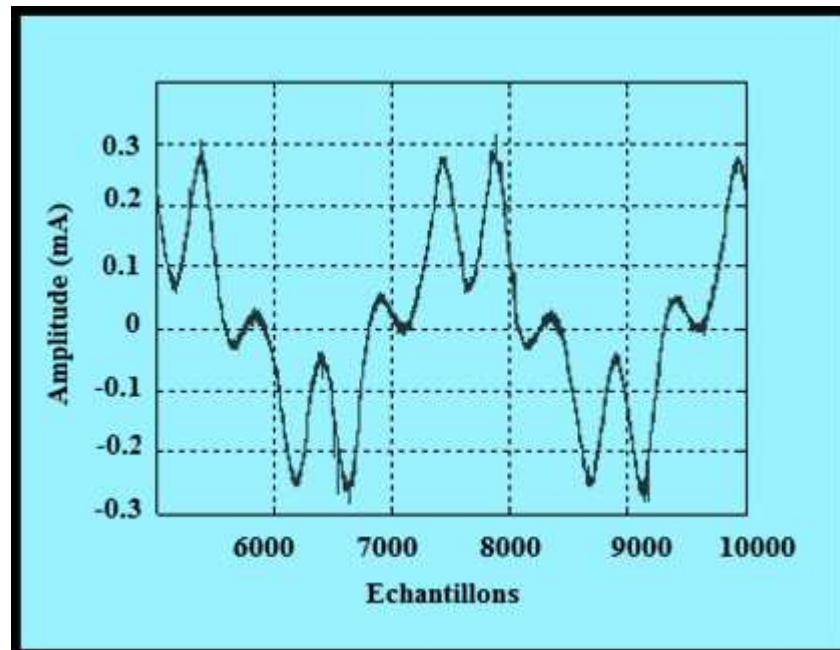
N : correspond à la taille du signal.

Détails de la décomposition par la DWT	Bande de fréquences (kHz)
D ₁	62,5 - 125
D ₂	31,25 - 62,25
D ₃	15,625 - 31,25
D ₄	7,8125 - 15,625
D ₅	3,90625 - 7,8125
D ₆	1,953125 - 3,90625
D ₇	0,765625 - 1,953125
D ₈	0,488281 - 0,765625
D ₉	0,244140 - 0,488281
D ₁₀	0,12207 - 0,244140

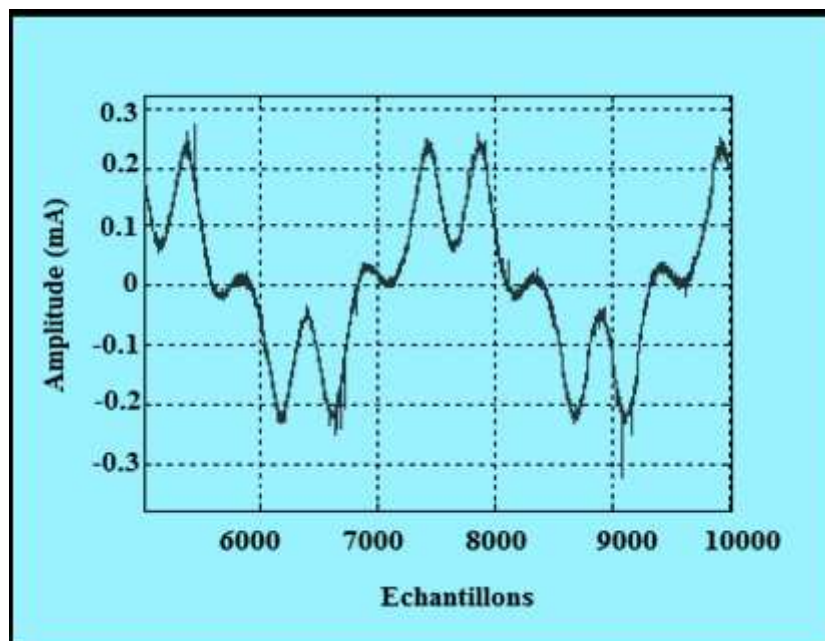
Tableau VI.I: Bandes fréquentielles des détails de la décomposition du courant de fuite par la DWT.

VI.3.1. Formes d'ondes des courants de fuites :

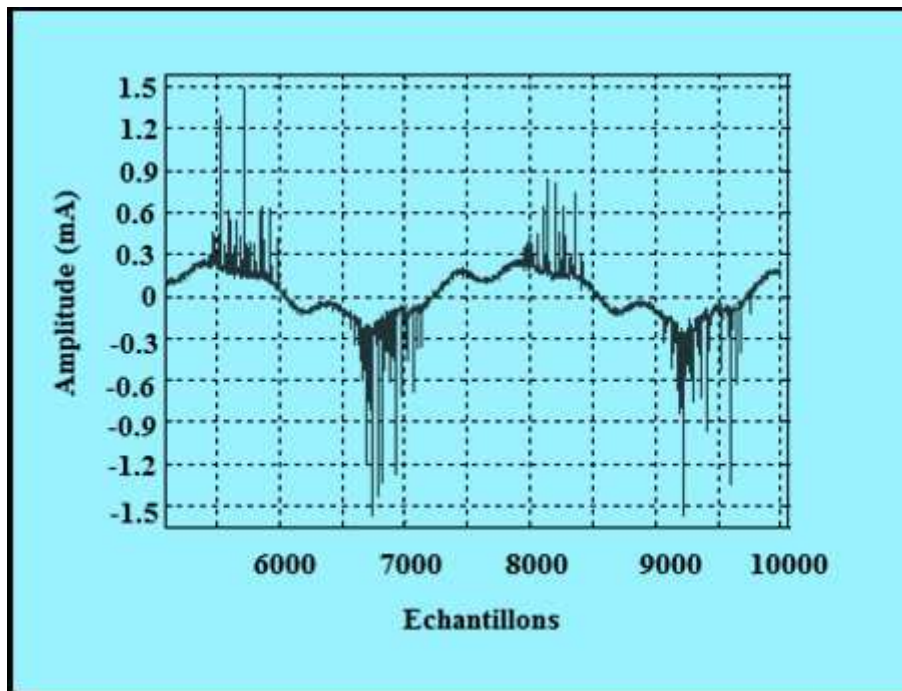
La Figure (VI.6) montre les formes d'ondes dans le cas d'une pollution non uniforme de conductivité volumique $\gamma_{vol} = 1.2 \text{ mS/cm}$ (coté terre) pour différentes largeurs de la couche propre et pour la même tension appliquée $U = 60 \text{ kV}$:



(a)



(b)



(c)

Figure VI.7: Formes d'ondes du courant de fuite dans le cas d'une pollution non uniforme ($\gamma_{\text{vol}} = 1.2 \text{ mS/cm}$) pour différente largeur de la couche sèche du côté HT à 60 kV :

(a) couche 12 cm, (b) couche 8 cm, (c) couche 2 cm

D'après la figure (IV.7), nous remarquons que la distorsion des signaux du courant de fuite est très importante dans le cas d'un isolateur partiellement pollué avec une pollution de conductivité volumique $\gamma_{\text{vol}} = 1.2 \text{ mS/cm}$.

Nous constatons également la présence de pics sur tout le signal du courant de fuite pour ce niveau de tension appliquée qui est de 60 kV; l'amplitude de ces pics augmente avec l'élargissement de la couche polluée.

Comme la tension de contournement est proportionnelle à la largeur de la bande sèche, donc pour le même niveau de la tension appliquée, les décharges sont de plus en plus intenses en diminuant la largeur de la couche sèche, ce qui déforme davantage la forme du courant de fuite et augmente l'amplitude des pics. On voit clairement sur la figure (VI.7.c), que la déformation de l'onde du courant de fuite pour la plus petite distance $d = 2 \text{ cm}$ de la couche sèche s'accroît, et que l'amplitude des pics ainsi que leurs nombres deviennent beaucoup plus importantes.

VI.3.2. La décomposition par la DWT :

La décomposition du courant de fuite par la DWT permet d'identifier les composantes fréquentielles qui peuvent servir au diagnostic de l'état de surface. La figure VI.8 représente la valeur de la déviation standard pour chaque détail correspondant. Cette déviation standard est calculée à l'aide du logiciel MATLAB.

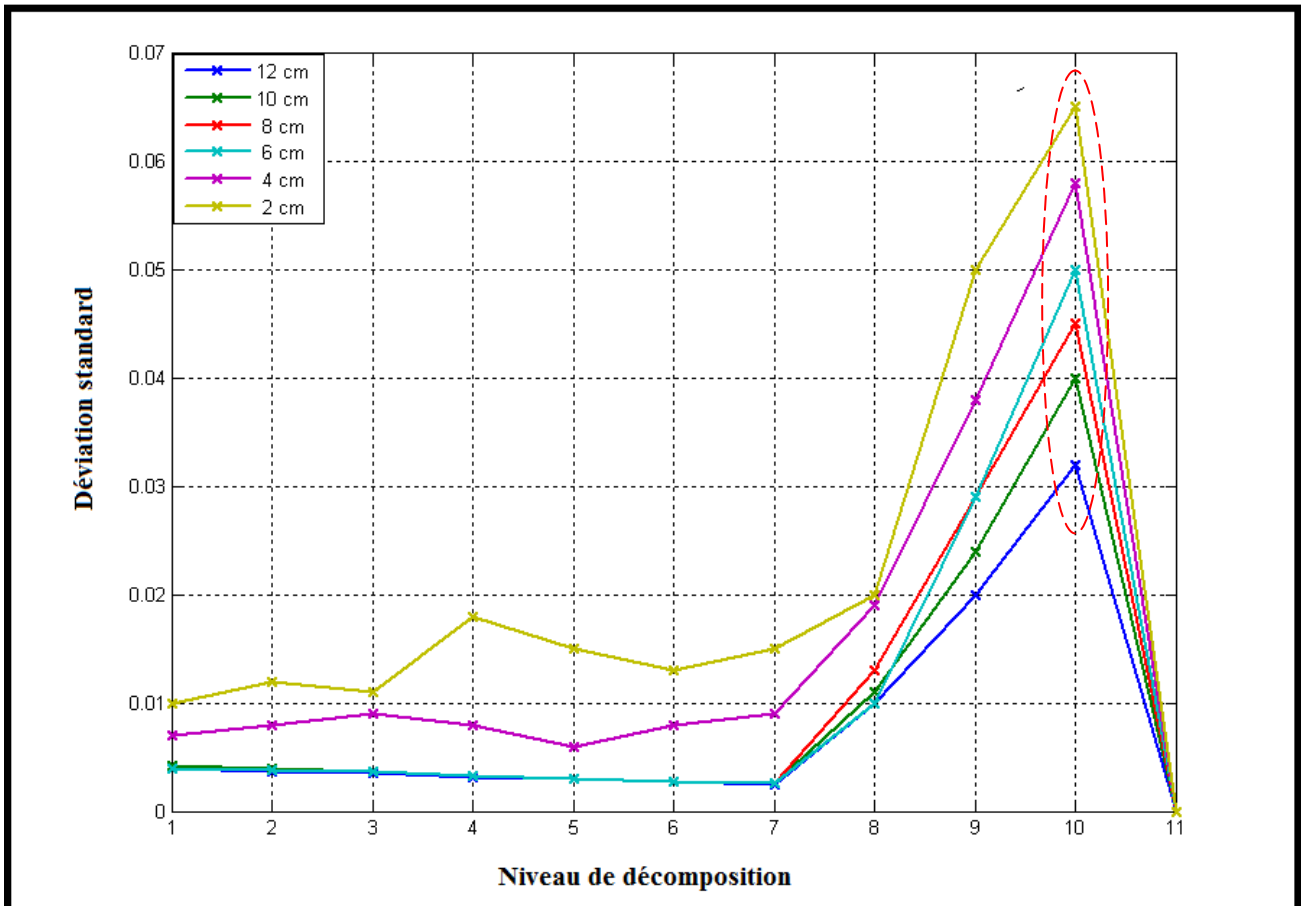


Figure VI.8: Représentation de la déviation standard pour chaque détail dans le cas de la pollution non uniforme du côté terre ($\gamma_{vol} = 1.2 \text{ mS/cm}$)

D'après la figure (VI.8) nous remarquons que la composante D_{10} a une énergie qui augmente proportionnellement avec l'augmentation de la couche polluée. Nous remarquons à partir du tableau (VI.I) que le détail D_{10} contient l'harmonique 3 qui a une grande énergie, ce qui nous informe que le phénomène des décharges est en relation avec l'harmonique 3 du courant de fuite. Ainsi, le détail D_{10} pourrait éventuellement servir à diagnostiquer la pollution lorsque celle-ci est du côté terre.

VI.3.3. Conclusion sur l'analyse par la DWT :

La décomposition par la DWT du courant de fuite nous a permis d'identifier l'attitude des composantes fréquentielles pour le cas de la pollution non uniforme.

La STD-MRA plot est une représentation de la déviation standard en fonction du niveau de décomposition qui permet d'identifier les bandes fréquentielles dont l'énergie augmente avec la largeur de la couche polluée, afin d'optimiser l'étude du courant de fuite en fonction de la largeur de la zone polluée de l'isolateur.

Pour notre cas de figure (pollution coté terre), la STD-MRA plot indique que le détail D_{10} distingue entre les différentes largeurs des couches polluées. En effet, plus la couche polluée est large, plus l'énergie du détail D_{10} augmente. Donc la représentation STD-MRA plot est une méthode intéressante pour le diagnostic de la sévérité de pollution lorsque celle-ci est du coté terre.

Conclusion générale

Le présent travail nous a permis de comprendre le comportement du modèle plan simulant l'isolateur standard PSV 120B sous différentes configurations de pollution (uniforme et non uniforme).

Dans un premier temps, l'étude de la tension de contournement pour le cas de la pollution uniforme révèle que le modèle perd de sa rigidité diélectrique au fur et à mesure que la conductivité volumique du milieu augmente. Nous constatons aussi que pour le cas de la pollution non-uniforme (conductivité volumique 1.2 mS/cm), la tension de contournement augmente avec l'élargissement de la couche propre.

L'étude du courant de fuite montre que la variation de sa valeur efficace est proportionnelle à la tension appliquée pour les deux cas de pollutions étudiées (uniforme et non uniforme). Pour le cas d'une pollution uniforme, sa valeur efficace augmente en augmentant la conductivité du milieu, et pour le cas de la pollution non uniforme, cette valeur efficace est inversement proportionnelle à la largeur de la zone propre.

La détermination du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée nous a permis de comprendre le comportement du circuit. Pour le cas de la pollution uniforme, la valeur du déphasage courant-tension diminue avec l'augmentation de la conductivité du milieu, et donc l'isolateur aura un comportement résistif pour les grandes valeurs de la conductivité (6 mS/cm et 10 mS/cm). Pour le cas de la pollution non-uniforme, l'effet capacitif de l'isolateur augmente avec l'élargissement de la zone sèche. L'impédance de cette dernière devient très importante devant celle de la zone polluée à partir d'une certaine largeur de la zone sèche « d_{critique} », et donc l'isolateur aura un comportement hautement capacitif.

L'analyse spectrale du courant de fuite nous a permis de comprendre le comportement des harmoniques du signal du courant de fuite ainsi que l'évolution du taux de distorsion harmonique en fonction de la sévérité de la pollution et de la tension appliquée dans le processus de contournement. Pour le cas sec, nous avons pu constater que la déformation de l'onde du courant de fuite est reflétée spécialement par la présence de l'harmonique n°5, suivie du 3^{ème} harmonique moins important. Pour la pollution uniforme, il a été constaté que pour une même conductivité de la couche de pollution, le taux de distorsion harmonique augmente en fonction de la tension appliquée, cette augmentation est reflétée par l'apparition d'impulsions sur l'onde du courant de fuite et se traduit par l'augmentation de l'amplitude des harmoniques n°3 et n°5 ainsi que l'apparition des harmoniques n°7 et n°9

avec de faibles amplitudes. Pour la pollution non uniforme, nous pouvons conclure que l'augmentation de la largeur de la couche propre provoque certes la déformation de l'onde du courant de fuite qui se traduit spécialement par l'augmentation de l'harmonique n°5 sur le spectre d'amplitude, mais aussi diminue le nombre d'impulsions sur l'onde du courant, ce qui indique l'absence de décharges électriques sur la surface du plan même pour des tensions élevées.

D'après l'analyse faite par la CWT sur l'onde de tension, le diagnostic de la sévérité de la pollution peut se faire par l'intermédiaire du scalogramme qui est une projection des coefficients calculés pour des échelles données sur un plan orthogonal. Il a été constaté que l'augmentation de la conductivité de la couche polluée est détectée grâce aux décharges qui ont lieu à la surface de l'isolateur. Cette augmentation peut être observée par la couleur des coefficients qui spécifient leurs valeurs selon qu'elles soient faibles ou élevées. Un coefficient élevé pour une grande échelle indique une oscillation du signal à basse fréquence et donc une petite déformation de l'onde de la tension et inversement pour une échelle de plus petite valeur.

La décomposition par la DWT du courant de fuite nous a permis d'identifier l'attitude des composantes fréquentielles pour le cas de la pollution non uniforme. Pour notre cas de figure (pollution coté terre), la STD-MRA plot indique que le détail D_{10} distingue entre les différentes largeurs des couches polluées. En effet, plus la couche polluée est large, plus l'énergie du détail D_{10} augmente. Donc la représentation STD-MRA plot est une méthode intéressante pour le diagnostic de la sévérité de pollution lorsque celle-ci est du coté terre.

*Références
bibliographiques*

- [1] M.Soufi, M.Zemirline, "Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz", Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, ENP 2004.
- [2] N. Dhahbi-Megriche, A. Beroual, «Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators Under AC Voltage », IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul, Vol.2, No 7, pp 283–289, 2000.
- [3] A.M. Rahal, C. Huraux, «Flashover mechanism of high voltage insulators » , IEEE Trans. Power Apparatus Syst.Vol.6, No.98 ,pp 2223–2231, 1979.
- [4] M.Teguar, « Modélisation d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro Géométriques.», thèse de doctorat d'état à l'ENP, Alger 2003.
- [5] Y. Liu and B. X. Du: « Recurrent Plot Analysis of Leakage Current on Flashover Performance of Rime-iced Composite Insulator », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, No. 2; April 2010.
- [6] A. Wolf, J. B. Swift and H. L. Swinney, «Determining Lyapunov Exponents from a Time Series», Physica D, Vol. 16, pp. 285-317, 1985.
- [7] B. X. Du and D. S. Dong, «Recurrence Plot Analysis of Discharge Current in Tracking Test of Gamma-ray Irradiated Polymer», IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., Vol. 15, pp. 974-981, 2008.
- [8] Y.Zhu, K.Haji, H.Yamamoto, T.Miyake, M.Otsubo,C.Honda, « Distribution of Leakage Current on Polluted Polymer Insulator Surface », Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,2006.
- [9] M. Otsubo, T. Hashiguchi, C. Honda, O.Takenouchi,T.Sakoda, Y. Hashimoto, «Evaluation of insulation performance of polymeric surface using a novel separation technique of leakage current », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 10, pp. 1053-1060, 2003.
- [10] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda and S. Tanaka, « Corona Discharge from Water Droplet on Electrically Stressed Polymer Surface »,Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45, pp. 234-238, 2006.
- [11] IEC Publication 507, pp. 1-37, 1975.
- [12] W.T.Starr, « Polymeric outdoor insulation », IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 25, pp. 125-136, 1990.
- [13] Melda Latif, «A New Method for Measuring Performance of Insulator Surface Based on Extended Fourier Transform of Leakage Current», Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, June 17-19, 2007.
- [14] M. Latif and Suwarno, «Performance of 20 kV Epoxy Resin Outdoor Insulator Under Various Environmental Conditions», Proceeding of the 8th ICPADM, vol. 1, pp.353-356, June 2006.

- [15] Suwarno, « Diagnostic of Outdoor Insulators Using Leakage Current Waveform Parameters », preprint.
- [16] T. K. Abdel-Galil, A.H.El-Hag, M.M.A. Salama, R. Bartnikas, « Enhanced partial discharge denoising technique using eigen decomposition », IEEE Intern. Sympos. Electr. Insulation, pp. 294-297, 2006.
- [17] X.Song, C.Zhou, D.M.Hepburn, G.Zhang, « Second Generation Wavelet Transform for Data Denoising in PD Measurement », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 6; December 2007.
- [18] X. Zhou, C. Zhou, and I. J. Kemp, « An Improved Methodology for Application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol.12, pp. 586-594, 2005.
- [19] H.Zhang, T.Blackburn, B.Phung, D.Sen, « A Novel Wavelet Transform Technique for on-line Partial Discharge Measurements part 1: Wavelet Denoising Algorithm », IEEE Trans Dielectr. Electr Insul., Vol. 14, pp 3-14, 2007.
- [20] Gorur, R S, E A Cherney, and J T Burnham. Outdoor Insulators. Arizona: Ravi Gorur Inc, 1999.
- [21] Fari Pratomosiwi and Suwarno, « Performance Improvement of the Ceramic Outdoor Insulators Located at Highly Polluted Environment Using Room Temperature Vulcanized Silicone Rubber Coating », International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 2, Number 1, 2010.
- [22] Devendranath, D, Channakeshava, and A D Rajkumar. «Leakage Current and Charge in RTV Coated Insulators under Pollution Conditions. » IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulations, 2002.
- [23] Kim, Seog-Hyeon, Edward A Cherney, and Ruben Hackam. «Hydrophobic Behaviour of Insulators Coated With RTV Silicone Rubber. », IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992.
- [24] R.Hackam, « Outdoor HV composite polymeric insulators », IEEE Transactions on DEI 6:262–9, 1999.
- [25] Y.Zhu et al, «Change of polymeric material exposed to dry band arc discharge», Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, 7B-13, p 655–8, 2004.
- [26] Y.Zhu et al. « Erosion resistant characteristics of ATH-filled silicone rubber Exposed to dry band arc discharge », Proceedings of 2005 international symposium on electrical insulating materials, vol. 1 No.B2-5,p. 115–8, Kitakyushu, Japan, 2005
- [27] K.Haji, Y.Zhu, M.Otsubo,T.Sakoda, « Studies on erosion of silicone rubber exposed to partial arc discharges », Polymer Degradation and Stability, pp 2214– 2221, 2008.
- [28] R.Sundararajan et al, « Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under dc voltage », IEEE Transactions on Electrical Insulation, 28(2):209–18, April 1993.

- [29] F.Rizk, « Mathematical models for pollution flashover », pp 71-103, edition Electra, 1981.
- [30] S.Nishimura, « Evaluation of the Flashover Voltage–Time Characteristics of Polluted Surface». IEEJ Transactions on Power and Energy: 52-B86 November 1977; 97-B (11):45–52
- [31] Y.Zhu et al, « Loss and Recovery in Hydrophobicity of Silicone Rubber Exposed to Corona Discharge ». Polymer Degradation and Stability: 1–7, 2005.
- [32] K. Haji et al, « Relation Between Dry Band Arc Discharge and Conductivity of the Pollution Liquid on the Polymer Material Surface », Japan–Korea joint session JK2, JK2-3, p 18, August 2006.
- [33] T. Kubono, « Theoretical Quantities of Some Parameters in the Cathode-fall region of a Copper Vacuum Arc », Journal of Applied Physics,52(6):3924–8, June 1981.
- [34] S. Nishimura, « Features of Arc Discharge Having the Electrode-Spots on a Surface of Electrolytic Solution », Journal of the Institute of Electrostatics, 13(3):207–12, Japan 1989.
- [35] S.Chandrasekar et C.Kalaivanan , « Investigations on Harmonic Contents of Leakage Current of Porcelain Insulator under Polluted Conditions», Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC), IIT Bombay, December 2008.
- [36] S.W.Jee, C.H.Lee, K.S.Lee, «Signal Analysis Methods to Distinguish Tracking Process Using Time-frequency Analysis », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 1; February 2009.
- [37] H. H. Kordkheili et al, «Determining the Probability of Flashover Occurrence in Composite Insulators by Using Leakage Current Harmonic Components», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, No. 2; April 2010.
- [38] Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on A.C. systems, IEC Standard 60507, 1991.
- [39] M.A.R.M. Fernando and S.M. Gubanski, «Analysis of Leakage Current Wave Forms for Field-aged and New Composite Insulators», IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), Minneapolis, pp. 350-353, 1997.
- [40] M.A.R.M. Fernando and S.M. Gubanski, «Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces»; IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 6, pp.688-694, 1999.
- [41] A. Rawat,R. S. Gorur, « Microstructure Based Evaluation of Field Aged and New Porcelain Suspension Insulators », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 1, February 2009.
- [42] ANSI C29.1, « American National Standards for Insulators: Wet Process and Toughened Glass-Suspension Type », 1992.
- [43] W. M. Carty, « Porcelain- Raw Materials, Processing, Phase Evolution and Mechanical Behavior », J. Amer. Ceramic Soc., Vol.81, pp. 3-20, 1998.

- [44] A.P. Mishra, R. S. Gorur, S. Venkataraman, « Evaluation of Porcelain and Toughened Glass Suspension Insulators Removed from Service », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 15, pp. 467-475, 2008.
- [45] E. A. Cherney and R. D. Hooton, « Cement Growth Failure Mechanism in Porcelain Suspension Insulators IEEE Trans.Power Delivery, Vol. 2, pp. 249-255.
- [46] Rais El'hadi BEKKA, « fondements du traitement du signal », Office des Publications Universitaires, 3^{ème} édition, 2005
- [47] S.V.Vaseghi, « *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction* », 2^{ème} édition, 2000.
- [48] Frédéric Truchetet, “Ondelettes pour le signal numérique”, EDITION HERMES, Avril 1998.
- [49] M. Misiti, Y.Misiti, G. Oppenheim, J.M.Poggi, «*Wavelets Toolbox Users Guide* ». Wavelet Toolbox for use with MATLAB®, 2000.
- [50] M.G.E. Schneiders. « *Wavelets in Control Engineering* ». Master's thesis, Eindhoven University of Technology, August 2001.
- [51] A.Bouzida, « *Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique d'ondelette* », Mémoire de Magister, ENP d'Alger 2008.
- [52] D.C.Sorensen, R.B.Lehoucq, C.Yang, K.Maschhoff, « *Five Easy Steps to a Continuous Wavelet Transform: A New Tool for Signal Analysis* », Wavelet Toolbox, Help of MATLAB®, the MathWorks, 2007.
- [53] X. Zhou, C. Zhou, and I. J. Kemp, « An Improved Methodology for Application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol.12, pp. 586-594, 2005.
- [54] A.Douar, C.Bouzidi « Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur pollué à l'aide des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée », Projet de fin d'étude, ENP d'Alger 2009.
- [55] R. Sarathi, S. Chandrasekar, « Diagnostic study of the surface condition of the insulation structure using wavelet transform and neural networks », Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 68, pp. 137-147, 2004.