

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Réseaux électriques**

## **THÈME**

**Influence de la pollution sur l'état de surface  
d'isolateur haute tension**

*Préparé par :*

**MESSABIH CHAHRAZED**

**BOUGHOUFALA SIHAM**

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>Mme.K .BELHACEL</b>	<b>MAA</b>	<b>Président</b>
<b>Mr.K.HEBRI</b>	<b>MAA</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mme .H.BOURENANE</b>	<b>MAA</b>	<b>Encadreur</b>

**PROMOTION 2018 /2019**

# Remerciements

*En premier lieu, nous tenons à remercier "Allah" qui nous a aidé pour que ce modeste travail soit achevé et pour que nous ayons réussi.*

*Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui nous ont orienté et nous ont encouragé. Nous pensons en particulier à notre encadreur " Mme. Bourenane Hayet " pour nous avoir bien suivi durant ce travail et de nous faire protégée de son savoir, ainsi que de ses conseils, et pour toute l'aide, les remarques constructives qui nous ont aidé à améliorer ce travail.*

*Nous remercions les membres de jury, chacun par son nom, qui nous ont honorés en acceptant d'examiner ce travail.*

*Nos grands remerciements aussi à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation au département de génie électrique.*

*Enfin, nous remercions nos amis pour leur aide, leur soutien et leur compréhension...*

# *Sommaire*

# Sommaire

*Nomenclature*

*Liste des figures*

*Liste des tableaux*

Introduction générale ..... 2

## **Chapitre I : Quelques travaux antérieurs sur la pollution des isolateurs**

Introduction ..... 4

I.1. Processus de contournement et caractéristiques du courant de fuite d'isolateur sous pollution désertique: ..... 4

I.1.1. Isolateur uniformément pollué ..... 6

I.1.2. Isolateur non uniformément pollué ..... 8

I.1.3. Transformée en ondelettes discrète (DWT) ..... 11

I.1.3.1. Pollution uniforme ..... 11

I.1.3.2. Pollution non-uniforme ..... 13

I.2. Mécanisme de dépôt salin et de contournement superficiel d'isolateurs extérieurs près des zones côtières ..... 15

I.2.1 Effet de la Conductivité sur le Contournement des Isolateurs ..... 16

I.2.2 Caractéristiques de Courant de Fuite sous toutes les Conditions Allumé et Allumé/Eteint ..... 16

I.2.3 Processus de décharge et de contournement sous cycle Allumé/Eteint ..... 17

I.2.4. Paramètres des caractéristiques de courant de décharge ..... 18

I.2.5.Effet de la pluie et du brouillard sur la tension de contournement ..... 20

I.2.6. Impact du niveau de pollution et du taux de mouillage sur la tension de contournement ..... 20

I.3. Analyse du courant de fuite d'un isolateur en polymère pollué par FFT ..... 22

I.3.1. Contamination des Isolateurs ..... 22

I.3.2.Courant de Fuite d'un Isolateur Propre ..... 23

I.3.3.Courant de fuite d'isolateur pollué ..... 24

I.3.3.1.Courant conducteur ..... 24

I.3.3.2.Arc à bande sèche et arc à couronne ..... 25

I.3.3.3.Arc entier avec arcs d'une bande sèche ..... 27

Conclusion ..... 28

## **Chapitre II : Quelques techniques de caractérisation de l'état de surface d'un isolateur**

Introduction ..... 30

II.1. Signal ..... 30

II.2.Classification des signaux ..... 30

II.3. Séries de Fourier ..... 31

II.3.1. Transformée de Fourier (TF).....	31
II.3.2. Application de la transformée de Fourier.....	32
II.3.3. Transformée de Fourier Discrète.....	32
II.3.4 Transformée de Fourier rapide (TFR ou FFT).....	33
II.3.5 Taux de distorsion (THD) .....	33
II.3.6. Echantillonnage .....	34
II.3.7 Transformée de Fourier à court terme (TFCT ou STFT).....	34
II.3.8. Multi résolution.....	35
II.4. Technique de la transformée en Ondelettes .....	36
II.4.1 Transformée en ondelettes Continues (CWT).....	36
II.4.2 Transformée en ondelettes Discrète (DWT).....	39
II.4.3. La famille d'ondelettes.....	40
II.4.3.1 Exemples d'ondelettes continues .....	42
II.4.3.1.1. Haar .....	42
II.4.3.1.2. Meyer.....	42
II.4.3.1.3. Morlet.....	42
II.4.3.2. Exemples d'ondelettes discrètes.....	43
II.4.3.2.1. Daubechies .....	43
II.4.3.2.2. Coiflets .....	43
II.4.3.2.3. Symlets.....	44
Conclusion .....	44

### **Chapitre III : Application de la FFT et WT**

Introduction.....	46
III.1. Dispositif expérimental .....	46
III.2. Etude de la tension de contournement .....	47
III.2.1. Influence de la largeur des bandes propres .....	47
III.2.2. Etude de l'influence du type de pollution.....	48
III.3. Courant de fuite.....	48
III.3.1. Influence de la largeur des bandes propres sur le courant de fuite .....	48
III.3.1.1. Largeur des trois bandes propres 1cm.....	48
III.3.1.2. Largeur des trois bandes propres 3cm.....	48
III.3.1.3. Largeur des trois bandes propres 5cm.....	49
III.3.2. Influence de différents types de pollution sur le courant de fuite.....	49
III.4. Analyse de la tension appliquée par la Transformé de Fourier Rapide (FFT).....	50
III.5. L'analyse spectrale du courant de fuite.....	51

III.5.1. L'influence de la tension appliquée sur le THD du courant de fuite .....	51
III.5.2. L'influence de la largeur des bandes propres sur le THD du Courant de fuite.....	57
III.5.3. L'influence de type de pollution sur le THD du Courant de fuite .....	57
III.6. Analyse par la Technique d'ondelette.....	64
III.6.1. Choix de l'ondelette mère (analysante) .....	64
III.6.2. Choix du l'ordre (nombre de niveau) de décomposition .....	64
III.6.3. Analyse de la tension appliquée par la Transformé d'Ondelette Continue .....	65
III.6.4. Analyse du courant de fuite par la transformée d'ondelette Discret (DWT).....	68
III.6.4.1. Analyse du courant de fuite pour différentes largeurs des bandes propres par DWT .....	68
III.6.4.2. Analyse du courant de fuite pour différents types de pollution par DWT.....	69
Conclusion .....	70
Conclusion générale.....	72
<i>Références bibliographiques</i>	

## Nomenclature

<b>CEI</b>	Commission Internationale d'Electrotechnique
<b>ESDD</b>	Equivalentes de Densités de Dépôts de Sel
<b>NSDD</b>	Densités de Dépôts Non Solubles
<b>If</b>	courant de fuite
<b>STD</b>	Standard déviation
	L'ondelette mère
<b>THD</b>	Taux de Distorsion Harmonique
<b>SDD</b>	Densité de Dépôt de Sel
<b>EPDM</b>	Ethylène-Propylène-Diène Monomère
<b>Na Cl</b>	Chlorure de Sodium
<b>Si-C</b>	Caoutchouc- Silicone
<b>TF</b>	Transformée de Fourier
<b>TO</b>	Transformée en Ondelettes
<b>CWT ou TOC</b>	Transformée en Ondelettes Continue
<b>DWT ou TOD</b>	Transformée en Ondelettes Discrète
<b>TFTD</b>	Transformée de Fourier à temps discret
<b>FFT ou TFR</b>	Transformée de Fourier Rapide
<b>TFD</b>	Transformée de Fourier discret
<b>f<sub>e</sub></b>	fréquence d'échantillonnage.
<b>Te</b>	Période d'échantillonnage.
<b>TFCT ou STFT</b>	Transformée de Fourier à court terme
<b>LPF</b>	Filtre Pass-Bas
<b>LPH</b>	Filtre Pass-Haut
<b>N<sub>niv</sub></b>	niveau de décomposition
<b>f<sub>s</sub></b>	fréquence du réseau
<b>Lf</b>	ligne de fuite
<b>Lbp</b>	largeur de bande propre
<b>C</b>	coefficient d'ondelette
<b>rond</b>	Arrondi



# Liste des figures

## Chapitre I : Quelques travaux antérieurs sur la pollution des isolateurs

Figure I.1. Dispositif expérimental .....	4
Figure I.2. Variation du courant de fuite par rapport au NSDD avec différentes tensions appliquées .....	6
Figure I.3. Courbe de courant de fuite pour 10 kV et différentes valeurs de NSDD, (a) 0 g/cm <sup>2</sup> , (plaque propre), (b) 0.01 g/ cm <sup>2</sup> , (c) 0.02 g/ cm <sup>2</sup> , (d) 0.03 g/ cm <sup>2</sup> , (e) 0.04 g/ cm <sup>2</sup> , (f) 0.05 g/ cm <sup>2</sup> ....	7
Figure I.4. Analyse spectral du courant de fuite pour 10 kV et différentes valeurs de NSDD, (a) 0 g/ cm <sup>2</sup> (plaque propre), (b) 0.01 g/ cm <sup>2</sup> , (c) 0.02 g/ cm <sup>2</sup> , (d) 0.03 g/ cm <sup>2</sup> , (e) 0.04 g/ cm <sup>2</sup> , (f) 0.05 g/cm <sup>2</sup> .....	7
Figure I.5. Variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs de couche polluées et NSDD (a): 0.01 g/ cm <sup>2</sup> , (b): 0.03 g/ cm <sup>2</sup> .....	8
Figure I.6. Courbe de courant de fuite pour 30 kV, 0.03 g/cm <sup>2</sup> et différents largeurs de bande de pollution, (a) couche de 5 cm, (b) couche de 10 cm, (c) couche de 15 cm, (d) couche de 20 cm, (e) couche de 25 cm.....	9
Figure I.7. Analyse spectral du courant de fuite pour 30 kV, 0.03 g / cm <sup>2</sup> et différentes largeurs de bande de pollution, (a) couche de 5 cm, (b) couche de 10 cm, (c) couche de 15 cm, (d) couche de 20 cm, (e) couche de 25 cm .....	10
Figure I.8. STD en fonction du niveau de décomposition pour différents valeurs NSDD, (a) 10 kV, (b) 30 kV .....	12
Figure I.9. Caractéristiques d'amplitude D11 pour 10 kV et différentes valeurs de NSDD, (a) 0.01 g/ cm <sup>2</sup> , (b) 0.02 g/ cm <sup>2</sup> , (c) 0.03 g/cm <sup>2</sup> , (d) 0.04 g/cm <sup>2</sup> , (e) 0.05 g/cm <sup>2</sup> .....	12
Figure I.10. STD en fonction du niveau de décomposition pour différentes largeurs de couche polluée, 30 kV et deux valeurs de NSDD, (a) 0.01 g/cm <sup>2</sup> , (b) 0.03 g/cm <sup>2</sup> .....	13
Figure I.11. Caractéristiques de l'amplitude D3 pour 30 kV, NSDD de 0.03 g/cm <sup>2</sup> et différentes largeurs de bande de pollution, (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm, (e) 25 cm .....	14
Figure I.12. Diagramme schématique de la méthode de dépôt de contamination .....	15
Figure I.13. Relation entre la tension de contournement et la conductivité .....	16
Figure I.14. Courant de fuite dans l'état Allumé .....	16
Figure I.15. Courant de fuite dans l'état Allumé/Eteint .....	17
Figure I.16. Processus de contournement d'isolateur sous cycles Allumé/Eteint .....	17
Figure I.17. Dispositif expérimental .....	18
Figure I.18. Relations entre courant de décharge, taux de mouillage et SDD .....	19
Figure I.19. Relations entre nombre pulsé Q, taux de mouillage et SDD .....	19

Figure I.20. Relations entre le taux de distorsion harmonique (THD), taux de mouillage et SDD ..	19
Figure I.21. Tension de contournement de surface avec brouillard froid et précipitations .....	20
Figure I.22. Tension de contournement de la surface à taux de mouillage constant .....	21
Figure I.23. Tension de contournement de la surface à SDD constant .....	21
Figure I.24. Dispositif expérimental .....	22
Figure I.25. Photographie d'un isolateur testé .....	22
Figure I.26.a. courant de fuite d'isolateur propre à 20 kV .....	23
Figure I.26.b. Diagramme spectral de courant de fuite d'isolateur propre à 20 kV .....	23
Figure I.27.a. Courant de fuite d'isolateur pollué à 20kV .....	24
Figure I.27.b. Diagramme spectral de courant de fuite d'isolateur pollué à 20kV .....	24
Figure I.28.a. Courant de fuite pendant un arc sur une bande sèche à 20kV .....	26
Figure I.28.b. Diagramme spectrale du courant de fuite pendant un arc sur une bande sèche à 20kV .....	26
Figure I.29.a. Courant de fuite de l'isolateur pollué contient un arc complet avec arc d'une bande sèche à 20 kV .....	27
Figure I.29.b. Diagramme spectrale de courant de fuite de l'isolateur pollué contient un arc complet avec arcs d'une bande sèche à 20 kV .....	27

## **Chapitre II : Quelques techniques de caractérisation de l'état de surface d'un isolateur**

Figure II.1. Classification des signaux .....	31
Figure II.2. Transformée de Fourier .....	32
Figure II.3. Procédé d'échantillonnage. ....	34
Figure II.4. Transformée de Fourier fenêtrée STFT .....	35
Figure II.5. Représentation temps-échelle de la transformée en ondelette et de la STFT .....	36
Figure II.6. Diverses opérations que l'on peut effectuer sur une fonction mère par transformée de Fourier à fenêtre glissante et par transformée en ondelette .....	37
Figure I.7. Etape de calcul de la transformée en ondelettes continue, (a) Comparaison de l'ondelette à une portion du signal, (b) Balayage du signal par l'ondelette, (c) Dilatation de l'ondelette et balayage du signal, (d) Répétition des étapes. ....	38
Figure I.8. Principe de la décomposition par ondelette Discrète (DWT) .....	39
Figure I.9. Représentation de l'ondelettes de Daubechies 4 .....	40
Figure I.10. L'ondelette Haar .....	42
Figure I.11. L'ondelette Meyer .....	42
Figure I.12. L'ondelette Morlet .....	43
Figure I.13. L'ondelette Daubechie .....	43
Figure I.14. L'ondelette Coiflets.....	44

Figure I.15. L'ondelette Symlets.....	44
---------------------------------------	----

### **Chapitre III : Application de la FFT et WT**

Figure III.1. Circuit d'essai .....	46
Figure III.2. Profil de l'isolateur (a), modèle plan (b) . .....	46
Figure III.3. Analyse du signal de la tension appliquée par FFT, (a) signal parfait, (b) signal avec pollution sable de mer. ....	50
Figure III.4. Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude (en bas) pour les niveaux des tensions appliquées de (a) 10kV, (b) 30kV, (c) 50kV pour $L_{bp} = 1\text{cm}$ .....	53
Figure III.5. Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude (en bas) pour les niveaux des tensions appliquées de (a) 10kV, (b) 30kV, (c) 50kV pour $L_{bp} = 3\text{cm}$ . ....	54
Figure III.6. Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude (en bas) pour les niveaux des tensions appliquées de (a) 10kV, (b) 30kV, (c) 50kV pour $L_{bp} = 5\text{cm}$ .....	56
Figure III.7. Variation du taux de distorsion harmonique en fonction de la tension appliquée .....	56
Figure III.8. Variation du taux de distorsion harmonique en fonction de la largeur des bandes propres.....	57
Figure III.9. Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude (en bas) pour les niveaux des tensions appliquées de (a) 10kV, (b) 15kV, (c) 20kV pour Sable de dune .....	59
Figure III.10. Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude (en bas) pour les niveaux des tensions appliquées de (a) 10kV, (b) 15kV, (c) 20kV pour Sable de sol.....	61
Figure III.11. Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude (en bas) pour les niveaux des tensions appliquées de (a) 10kV, (b) 15kV, (c) 20kV pour Sable de mer. ....	62
Figure III.12. Variation du taux de distorsion harmonique en fonction de type de pollution.....	63
Figure III.13. Taux de distorsion harmonique pour trois types de couches polluantes sous tensions appliqués de 10kV, 15kV, 20kV .....	63
Figure III.14. Analyse du signal de la tension appliquée par la transformée en ondelettes continue. De haut en bas, le signal de la tension appliquée, le scalogramme du signal de la tension appliquée et le coefficient de la CWT correspondant pour (a) signal parfait, (b) Sable de mer a 20 kV <sub>eff</sub> .....	67
Figure III.15. Représentation de la déviation standard pour chaque détail, pour les 3 bandes propres de 1, 3 et 5 cm de conductivité 1mS/cm sous tensions 30kV.....	68
Figure III.16. Evolution du détail D5 à 30kV <sub>eff</sub> pour une conductivité de 1mS/cm pour (a) 3 bandes propres de 1cm, (b) 3 bandes propres de 3cm, (c) 3 bandes propres de 5cm. ....	69
Figure III.17. Représentation de déviation standard pour chaque détail, pour les 3 types de pollution de sable de la dune, mer et sol sous tension 20kV. ....	70

Figure III.18. Evolution du détail D5 à  $20kV_{eff}$  pour une conductivité de  $1mS/cm$  pour (a) sable de mer, (b) sable de sol, (c) sable de dune ..... 70

# Liste des tableaux

## Chapitre I : Quelques travaux antérieurs sur la pollution des isolateurs

Tableau I.1. Équivalent NSDD et ESDD pour différentes quantités de sable. ....	5
Tableau I.2. Caractéristiques du Brouillard Froid .....	15
Tableau I.3. Conditions Pendant les Essais.....	16
Tableau I.4. Paramètres des isolateurs .....	20
Tableau I.5. Caractéristiques de l'isolateur de test .....	22
Tableau I.6. Résultat de courant de fuite et son analyse harmonique (isolateur propre) .....	25
Tableau I.7. Résultat de courant de fuite et son analyse harmonique (isolateur pollué avec un arc de bande sèche) .....	26
Tableau I.8. Résultat de courant de fuite et son analyse harmonique (isolateur pollué contient un arc complet avec arc d'une bande sèche).....	28

## Chapitre II : Quelques techniques de caractérisation de l'état de surface d'un isolateur

Tableau II.1. Familles d'ondelettes .....	41
---	----

## Chapitre III : Application de la FFT et WT

Tableau III.1. Caractéristiques de l'isolateur réel (CEI 60305/2005).....	47
Tableau III.2. Dimensions du modèle plan étudié. ....	47
Tableau III.3. Mesures de la tension de contournement avec différentes largeurs des bandes propres .....	47
Tableau III.4. Mesure de la tension de contournement des types de pollution .....	48
Tableau III.5. Mesures de la tension de contournement avec différentes largeurs des bandes propres. ....	48
Tableau III.6. Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 3cm) .....	48
Tableau III.7. Évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 5cm) .....	49
Tableau III.8. Mesures du courant de fuite (pollution avec le sable des dunes) .....	49
Tableau III.9. Mesures du courant de fuite (pollution avec le sable du sol) .....	49
Tableau III.10. Mesures du courant de fuite (pollution avec le sable de la mer).....	49

# *Introduction Générale*

L'électricité est un agent énergétique lié à la puissance. Son approvisionnement provenant des centrales exige l'installation des lignes aériennes et souterraines permettant l'alimentation des consommateurs. Les lignes aériennes qui sont conçues, réalisées, entretenues et exploitées conformément aux normes, prescription et directives de sécurité, de même qu'aux règles de l'art, sont exposées à diverses contraintes. Parmi celles-ci la pollution des isolateurs [1].

Les isolateurs sont parmi les composants les plus importants des réseaux aériens de transport et de distribution de l'énergie électrique puisqu'ils assurent à la fois le support mécanique des parties portées à la haute tension et l'isolation électrique de ces dernières avec les parties mises à la terre ou énergisées [2]. Premièrement conçus en verre et en céramique, la fabrication des isolateurs a connu, à travers des années, une évolution notable, et ceci dans le but d'accroître leurs performances quelle que soient les conditions météorologiques et environnementales auxquelles ils sont exposés [2].

En effet, une perturbation de l'isolation électrique assurée par l'isolateur peut entraîner, dans certaines circonstances, son contournement et donc un risque majeur sur la fiabilité et le fonctionnement du système de transmission de l'énergie électrique par voies aériennes. Plusieurs causes sont à l'origine de contournement électrique comme les surtensions transitoires sur les réseaux électriques (foudres, enclenchement et ouvertures des lignes, les dépôts de pollution atmosphérique ou encore dans les régions froides, les précipitations atmosphériques givrantes) [3].

Les contournements électriques des isolateurs entraînent des répercussions graves sur les réseaux aériens d'énergie électrique, car ils sont la cause de coupures électriques de durée plus ou moins longues [2].

Depuis une cinquantaine d'années, plusieurs travaux ont été menés pour comprendre les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués et se prémunir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène [2].

Ce pendant l'analyse des signaux de courant de fuite sont une source capitale pour étudier l'influence de la pollution sur l'état de surface d'un isolateur haute tension.

Afin de bien mener notre étude, nous avons subdivisé notre mémoire en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous exposons quelques travaux antérieurs sur la pollution des isolateurs, ainsi que l'analyse de courant de fuite et tension de contournement par transformée de fourier rapide (FTT), transformée d'ondelette discrète (DWT).

Dans le deuxième chapitre nous présentons quelques techniques de caractérisation de l'état de surface d'un isolateur.

Le troisième chapitre est consacré au traitement des signaux du courant de fuite par la transformée de fourier et la technique d'ondelette continue et discrète.

Notre mémoire sera clôturé par une conclusion générale et quelques perspectives.

# *Chapitre I*

*Quelques travaux*

*antérieurs sur la*

*pollution des isolateurs*

## Introduction

Le phénomène de pollution des isolateurs peut être considéré comme un déversement continu ou intermittent d'impuretés d'origines diverses. Ces impuretés peuvent provenir des flots de fumée qui s'échappent des appareils d'évacuation (pollution industrielle ou urbaine), ou alors de fines particules salines dans les régions situées au bord de la mer (pollution marine), et même de particules de sable plus ou moins fines dans les régions désertiques (pollution désertique) [4].

Dans cette partie, nous présentons quelques travaux et recherches récemment effectués dans le domaine de la pollution des isolateurs ainsi que l'étude des phénomènes liés au contournement. Une partie essentielle de ces études est fondée sur l'analyse du courant de fuite qui fournit les informations nécessaires sur l'état de surface des isolateurs.

### I.1. Processus de contournement et caractéristiques du courant de fuite d'isolateur sous pollution désertique

Les auteurs D. Maadjoudj, A. Mekhaldi et M. Tegar [5] ont effectué des essais sur un modèle plan d'isolateur Haute Tension 1512L fréquemment utilisé par la société algérienne (SONELGAZ) dans les zones désertiques. Leur dispositif expérimental est présenté par la figure I.1.

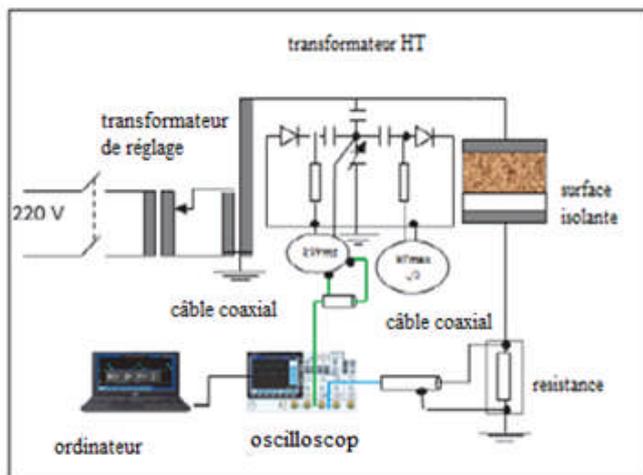


Figure I.1.a Schéma de montage expérimental



Figure I.1.b profil de modèle plan de laboratoire

Figure I.1. Dispositif expérimental.

Le sable est distribué manuellement sur le modèle expérimental en utilisant un tamis. Cette couche de pollution est humidifiée par pulvérisation d'eau distillée ( $2 \mu\text{S} / \text{cm}$ ) cinq fois, soit sur côté du modèle plan en utilisant un pulvérisateur (20 ml). Dans le cas d'une configuration non uniforme, la bande propre est recouverte par plaque de plexiglas. Le modèle de laboratoire est soigneusement nettoyé avant chaque test en utilisant de l'eau et de l'alcool pour éliminer toute impureté et traces de pollution.

Pour étudier l'influence de la quantité de sable sur le modèle d'isolateur, nous avons considéré cinq différentes quantités. Les ESDD (équivalentes de densités de dépôts de sel) et les valeurs NSDD (densités de dépôts non solubles) sont calculées selon la CEI 60815 [6]:

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

$$NSDD = \frac{W_{N-S}}{A} \quad (I.2)$$

$\sigma_{20}$ : conductivité à  $T = 20^{\circ}\text{C}$  (S/m),  $A$ : surface d'isolateur ( $\text{cm}^2$ ),  $V$ : volume de l'eau distillée ( $\text{cm}^3$ ),  $W_{N-S}$ : poids du dépôt non soluble (g).

L'équivalent NSDD et ESDD pour différentes quantités de sable sont indiquées dans le tableau I.1

**Tableau I.1.** Équivalent NSDD et ESDD pour différentes quantités de sable.

Quantité de sable (g)	NSDD ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )	ESDD ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )
15	0.01	0.35
30	0.02	0.45
45	0.03	0.75
60	0.04	1.08
75	0.05	1.5

Dans cette section, ils présentent l'analyse temporelle et fréquentielle du courant de fuite en se basant sur deux configurations :

Isolateur uniformément pollué et Isolateur non uniformément pollué avec différentes valeurs de NSDD.

En utilisant la technique FFT, ils extraient et calculent la phase et l'amplitude de différentes composantes harmoniques de l'expression suivante:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)(e^{-2j\pi kn/N}) \quad (I.3)$$

$x(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, N-1$  Est le signal dans le domaine temporel,

$X(k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, N-1$  La représentation du signal  $x(n)$  dans le domaine fréquentiel.

$N$  est le nombre d'échantillons de signal [5].

### I.1.1. Isolateur uniformément pollué

La figure I.2 montre la variation des valeurs du courant de fuite en fonction de la NSDD sous cinq niveaux de tension appliqués (5, 10, 15, 20 et 30 kV). Pour la plus faible valeur de NSDD ( $0.01\text{g/cm}^2$ ), les valeurs du courant de fuite, obtenues pour les différents niveaux de tension appliqués, sont pratiquement identiques. Pour les valeurs de NSDD supérieure à  $0,01\text{ g /cm}^2$ , les courants de fuite augmentent avec la tension appliquée. Le courant de fuite augmente avec l'augmentation des valeurs NSDD de manière non linéaire, ce qui indique la non-linéarité de l'impédance de l'isolateur.

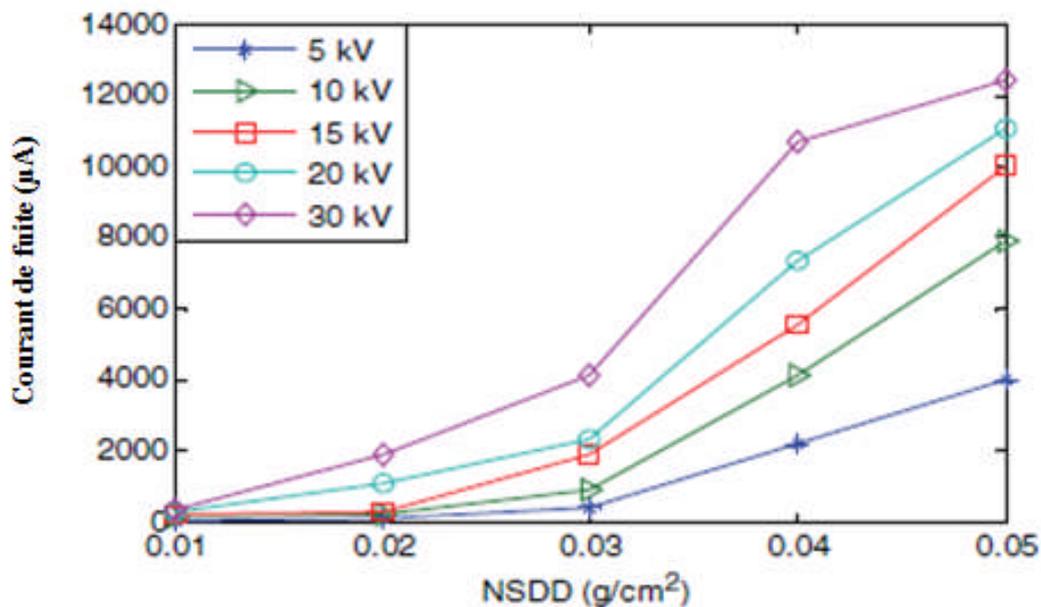


Figure I.2. Variation du courant de fuite par rapport au NSDD avec différentes tensions appliquées.

Les figures (I.3b-f) et (I.4b-f) représentent la forme d'onde du courant de fuite et leurs analyse spectral en fonction de NSDD considérée ( $0.01, 0.02, 0.03, 0.04$  et  $0.05\text{ g /cm}^2$ ), sous une tension appliquée de 10 kV [6].

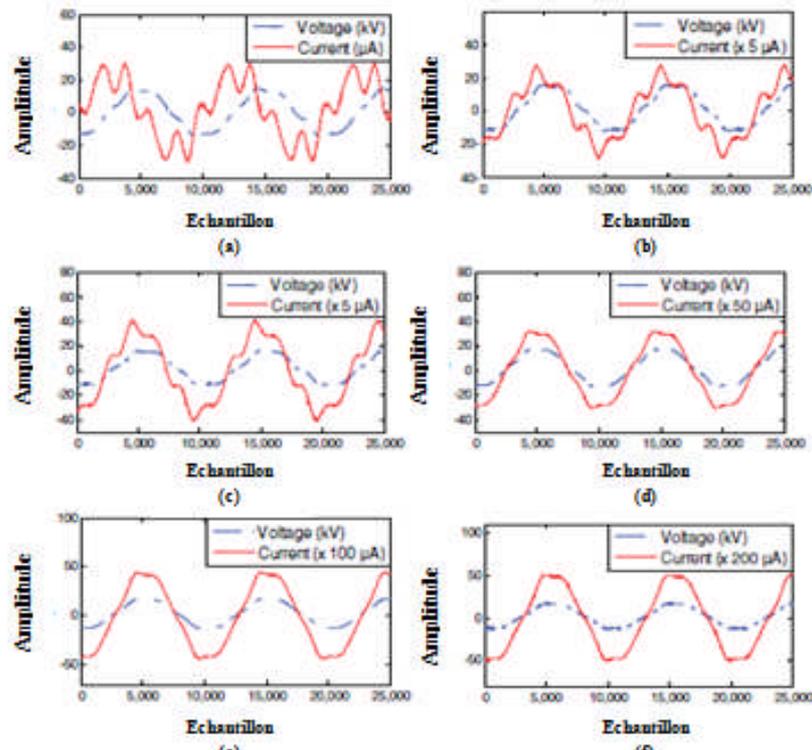


Figure I.3. Courbe de courant de fuite pour 10 kV et différentes valeurs de NSDD, (a) 0 g/cm<sup>2</sup>, (plaque propre), (b) 0.01 g/cm<sup>2</sup>, (c) 0.02 g/cm<sup>2</sup>, (d) 0.03 g/cm<sup>2</sup>, (e) 0.04 g/cm<sup>2</sup>, (f) 0.05 g/cm<sup>2</sup>.

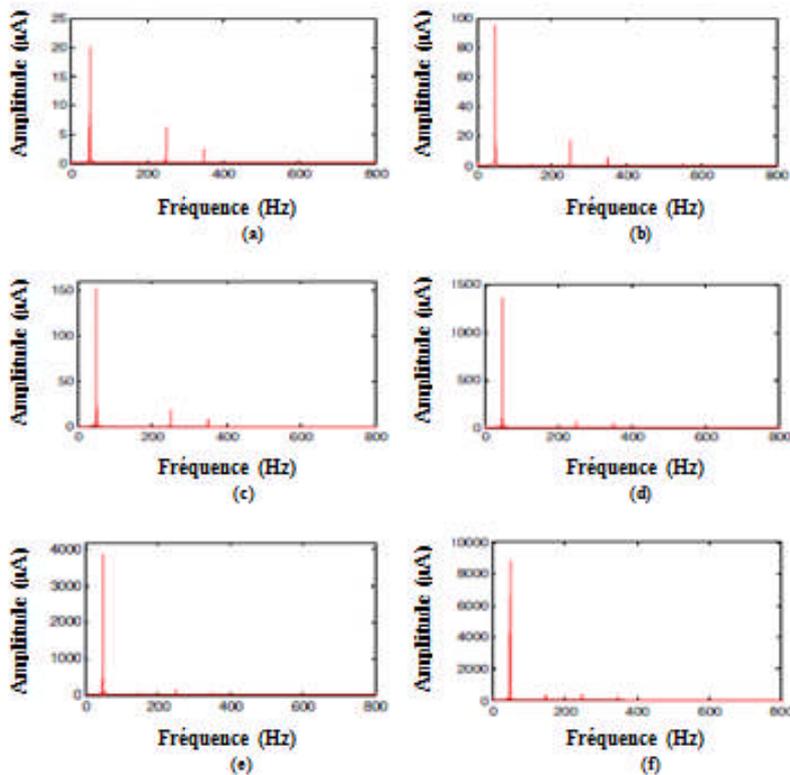
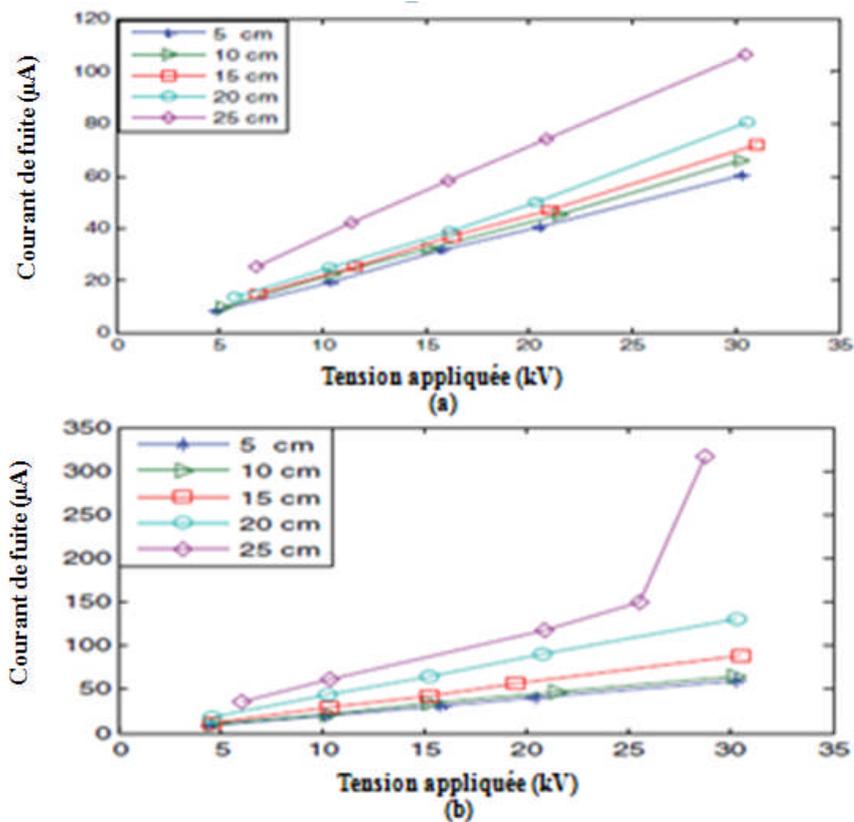


Figure I.4. Analyse spectral du courant de fuite pour 10 kV et différentes valeurs de NSDD, (a) 0 g/cm<sup>2</sup> (plaque propre), (b) 0.01 g/cm<sup>2</sup>, (c) 0.02 g/cm<sup>2</sup>, (d) 0.03 g/cm<sup>2</sup>, (e) 0.04 g/cm<sup>2</sup>, (f) 0.05 g/cm<sup>2</sup>.

### I.1.2. Isolateur non uniformément pollué

En raison du profil de l'isolateur et la direction de la pluie et du vent, les dépôts de pollution sur la surface de l'isolateur sont non uniforme. La figure I.5 montre la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs de couche polluée, pour deux valeurs de NSDD, à savoir 0.01 et 0.03 g/cm<sup>2</sup>. Dans le premier cas de NSDD (figure I.5a), le courant de fuite augmente linéairement avec la tension appliquée. C'est précieux quelle que soit la largeur de la couche polluée. Pour le second cas de NSDD (figure I.5b), le courant de fuite augmente linéairement avec la tension appliquée pour les largeurs de couche polluées comprises entre 5 et 20 cm et non linéairement pour la largeur de pollution la plus élevée (de 25 cm).



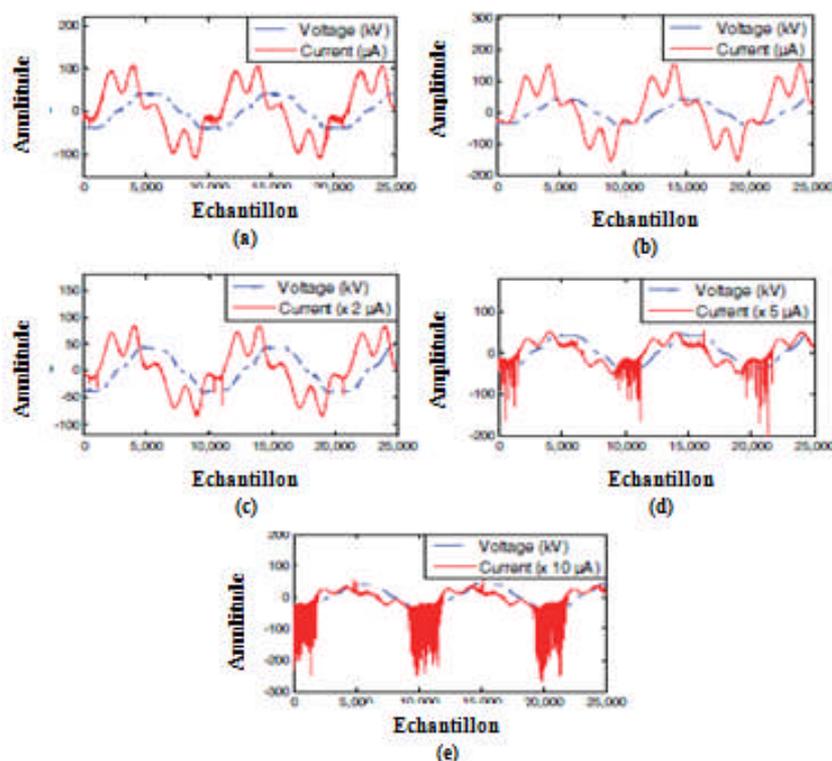
**Figure I.5.** Variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs de couche polluées et NSDD (a): 0.01 g/cm<sup>2</sup>, (b): 0.03 g/cm<sup>2</sup>.

La figure I.6 montre la forme d'onde du courant de fuite qui est déformée en raison de l'effet capacitif de la bande propre pour 0.03 g/cm<sup>2</sup> de NSDD sous une tension appliquée de 30 kV et les différentes largeurs de bande de pollution (5, 10, 15, 20 et 25 cm). Cette déformation est suivie des petites impulsions. Le nombre et l'amplitude de ces impulsions augmentent avec la largeur de la couche polluée. Ces impulsions sont faibles pour les largeurs de bande de 5, 10 cm et 15 cm et élargies pour les largeurs de 20 et 25 cm, indiquant le déclenchement de décharges partielles. Ces décharges partielles sont plus importantes dans le cas d'une largeur de bande de 25 cm.

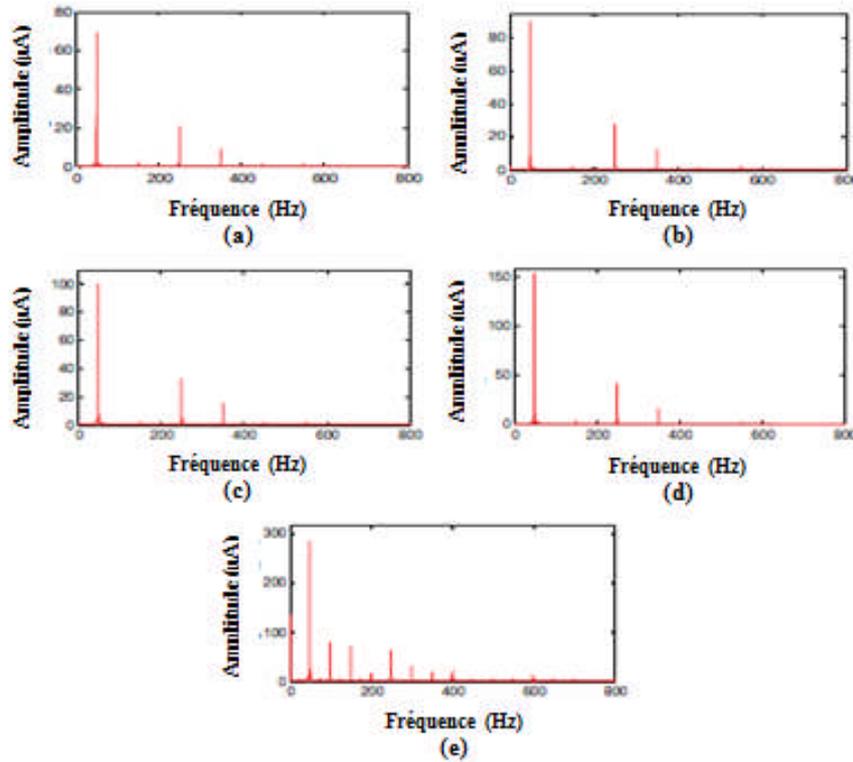
L'analyse spectrale de la figure I.7 montre les composantes harmoniques fondamentales et autres impaires contenues dans le signal de courant de fuite. Dans les cas de largeurs de pollution de 5, 10, 15 et 20 cm (Figure I.7a-d), ils ont noté l'existence de troisième (150 Hz), cinquième (250 Hz) et septième ceux (350 Hz).

L'amplitude de la cinquième harmonique est plus grande que celle des troisième et septième harmoniques. L'amplitude de ces harmoniques augmente avec la largeur de la couche polluée, surtout la cinquième.

Dans le cas de la bande polluée 25 cm, ils ont observé l'apparition de la neuvième et la onzième harmonique comme le montre la figure I.7e. Dans ces conditions, l'amplitude de la troisième harmonique est la plus importante. Plusieurs recherches [7, 8] ont montré que la présence d'arcs est à l'origine de l'augmentation considérable de l'amplitude de la troisième harmonique.



**Figure I.6.** Courbe de courant de fuite pour 30 kV,  $0.03 \text{ g/cm}^2$  et différentes largeurs de bande de pollution, (a) couche de 5 cm, (b) couche de 10 cm, (c) couche de 15 cm, (d) couche de 20 cm, (e) couche de 25 cm.



**Figure I.7.** Analyse spectral du courant de fuite pour 30 kV, 0.03 g / cm<sup>2</sup> et différentes largeurs de bande de pollution, (a) couche de 5 cm, (b) couche de 10 cm, (c) couche de 15 cm, (d) couche de 20 cm, (e) couche de 25 cm.

Ils ont conclu que :

- L'amplitude du courant de fuite représente un paramètre important pour quantifier le niveau de pollution. Elle augmente avec la NSDD, la largeur de la couche de pollution et/ou le niveau de tension appliqué.
- La technique FFT a été utilisée pour extraire le contenu des composants harmoniques dans le signal de courant de fuite. Il a été démontré que les harmoniques d'ordre impair ont été générés. Le modèle isolateur présente un caractère capacitif dans les cas caractérisés par des largeurs de pollution comprises entre 0 (plaque propre) et 20 cm, et une faible NSDD de 0.01 à 0.02 g/cm<sup>2</sup>. Dans ces conditions, le cinquième harmonique représente un indicateur d'un tel comportement capacitif. Dans une pollution uniforme avec des cas de NSDD élevés (0.03 à 0.05 g/cm<sup>2</sup>), le comportement résistif est prédominant et les composantes harmoniques sont négligeables par rapport à la composante fondamentale. L'amplitude importante du troisième harmonique pourrait représenter un bon indicateur de la présence d'arcs sur la surface isolante.

### I.1.3. Transformée en ondelettes discrète (DWT)

Dans cette section, le signal du courant de fuite a été décomposé en plusieurs composantes de fréquence à l'aide de la transformée d'ondelettes discrète et en introduisant STD (standard deviation) qui leur permet de trouver les composants les plus significatifs pour surveiller le niveau de pollution de NSDD, la largeur de la couche polluée et l'intensité des décharges électriques.

La technique multi-résolution de transformée d'ondelettes discrète divise le signal en ses composants dans les bandes de fréquences basses et hautes [9]. La transformation en ondelettes discrète est donnée comme suit:

$$DWT_{\Psi}f(m, k) = \frac{1}{\sqrt{(a_0)^m}} \sum_n x(n) \Psi\left(\frac{k-n.b_0.(a_0)^m}{(a_0)^m}\right) \quad (I.4)$$

$\Psi$  Est l'ondelette mère,  $n$  et  $m$  indiquent la localisation de fréquence et la localisation temporelle,  $(a_0)^m$  et  $n.b_0.(a_0)^m$  sont les paramètres de dilatation et de translation.

Dans ce travail, ils ont utilisé l'ondelette Daubechies 4 caractérisée par une bonne résolution en fréquence et plus adaptée aux phénomènes transitoires tels que les impulsions de décharge électrique sur le courant de fuite. Pour la décomposition du signal du courant de fuite, les bandes de fréquences sont données dans [9].

STD donne la dispersion des valeurs de détail du signal par rapport à la valeur moyenne, qui représente la distribution d'énergie de la distorsion pour différents détails [9]. STD pour les différents détails est calculé à l'aide de l'expression suivante:

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} (D_i(j) - \mu_i)^2} \quad (I.5)$$

$\mu_i$  : La valeur moyenne du détail  $D_i$  et  $N_i$  est la longueur du détail  $D_i$ .

Cette étude est basée sur deux configurations :

#### I.1.3.1. Pollution uniforme

La figure I.8 montre la variation de STD en fonction du niveau de décomposition, pour toutes les valeurs de la NSDD et pour deux tensions appliquées, 10 kV (figure I.8a) et 30 kV (figure I.8b). Ils ont noté sur cette figure que STD des détails D9 (976-488 Hz), D10 (488 - 244 Hz) et D11 (244 - 122 Hz) sont les seuls détails significatifs puisqu'ils augmentent avec la NSDD.

Le détail D10 contient la cinquième et septième harmoniques, et le détail D11 (244 - 122 Hz) contient la troisième harmonique (150 Hz). Les 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> composants harmoniques représentent les composants les plus importants de la forme d'onde If comme montre la figure I.4.

En outre, l'évolution du détail D11 en fonction de nombre d'échantillons est représentée à la figure I.9a-e pour différents Valeurs NSDD. L'amplitude du détail D11 augmente avec NSDD.

Le signal D11 devient plus déformé pour la Valeurs NSDD de 0.03 à 0.05  $\text{g}/\text{cm}^2$ . Par conséquent, le détail D11 qui contient l'évolution temporelle de la troisième harmonique représente une bonne surveillance du niveau de pollution dans terme de la valeur NSDD.

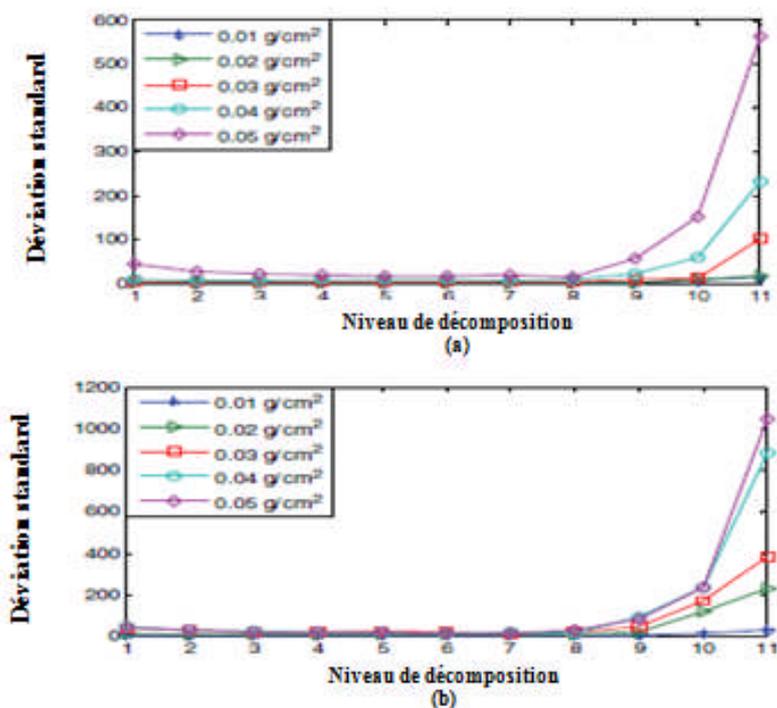


Figure I.8. STD en fonction du niveau de décomposition pour différents valeurs NSDD, (a) 10 kV, (b) 30 kV.

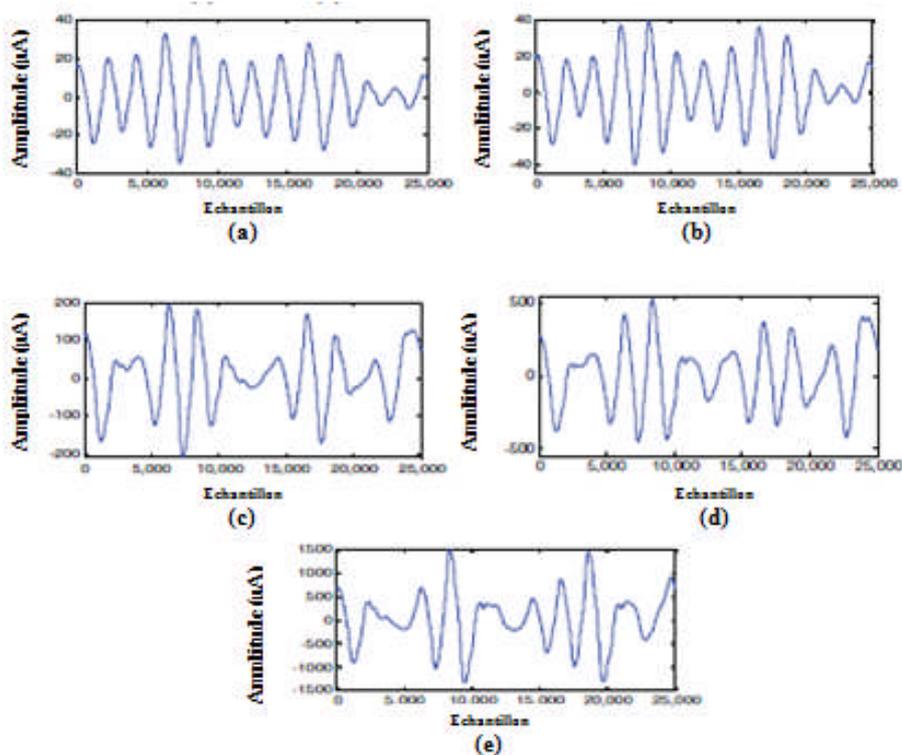


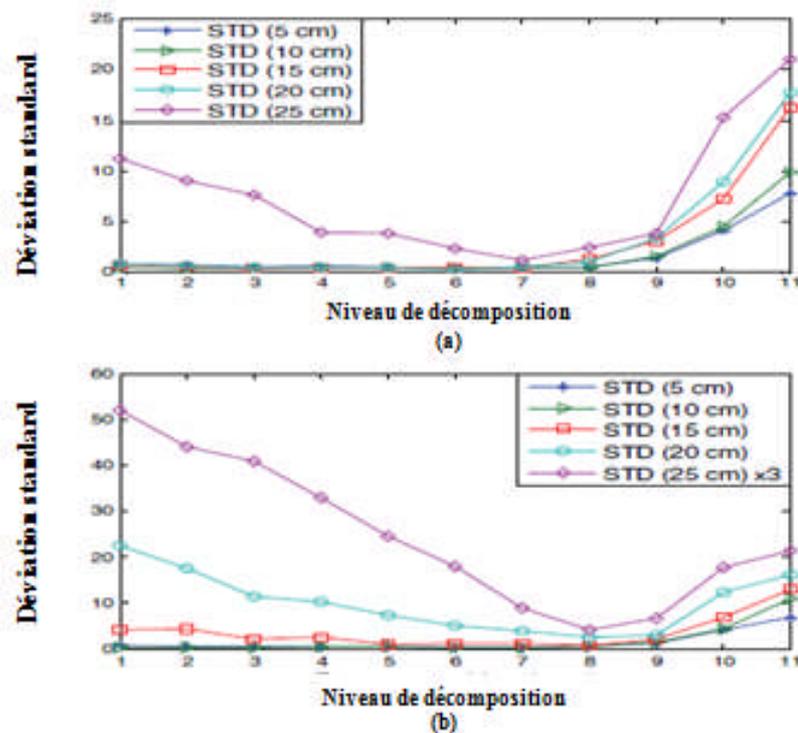
Figure I.9. Caractéristiques d'amplitude D11 pour 10 kV et différentes valeurs de NSDD, (a) 0.01  $\text{g}/\text{cm}^2$ , (b) 0.02  $\text{g}/\text{cm}^2$ , (c) 0.03  $\text{g}/\text{cm}^2$ , (d) 0.04  $\text{g}/\text{cm}^2$ , (e) 0.05  $\text{g}/\text{cm}^2$ .

### I.1.3.2. Pollution non-uniforme

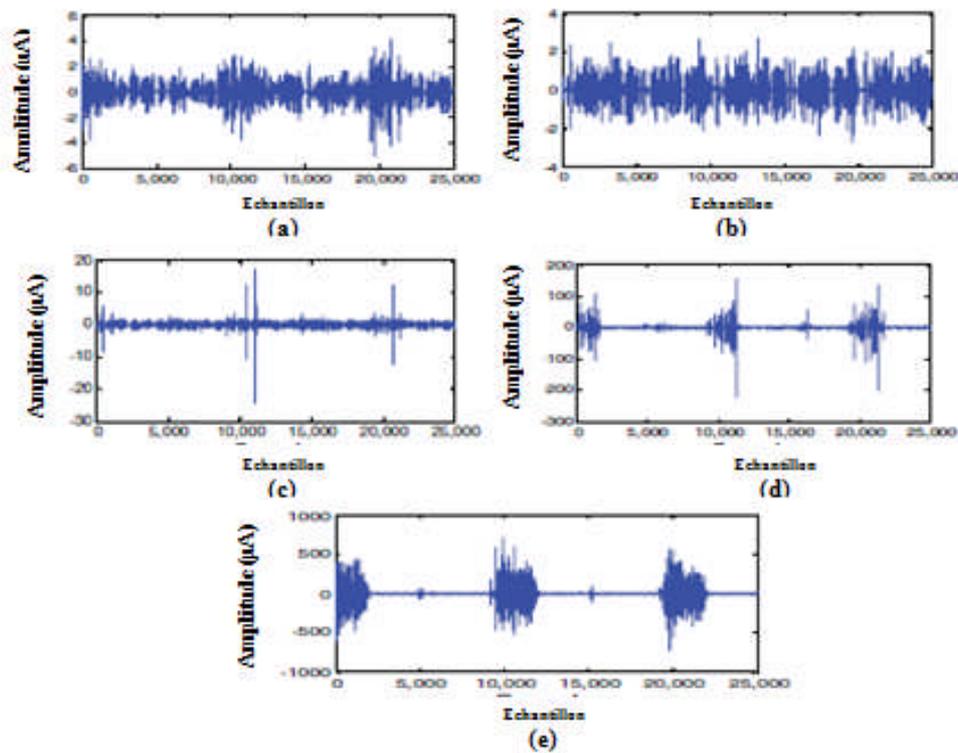
Sur la figure I.10a-b, ils ont observé l'évolution de STD en fonction du niveau de décomposition, pour toutes les largeurs de pollution et pour deux valeurs de NSDD 0.01 et 0.03 g/cm<sup>2</sup>. Pour les deux valeurs NSDD, STD des détails D10 et D11 augmente avec l'augmentation de la largeur de la couche polluée.

Ils ont observé également une augmentation significative de la STD des détails haute fréquence D1 (250-125 kHz) à D6 (7.8-3.9 kHz).

En revanche, les décharges électriques deviennent plus intenses avec l'augmentation de la largeur de pollution et/ou de la NSDD. Les signatures de telles décharges sont représentées par des impulsions dans les caractéristiques d'amplitude de D1 à D6. Afin de montrer les caractéristiques temporelles des composantes haute fréquence (D1 à D6), ils présentent le détail D3 (Figure I.11a-e) avec différentes largeurs. Les détails D1 à D6 sont efficaces pour fournir les informations sur les décharges électriques sur les signaux If et pourraient constituer un bon indicateur pour détecter l'activité des décharges électriques à la surface de l'isolateur [5].



**Figure I.10.** STD en fonction du niveau de décomposition pour différentes largeurs de couche polluée, 30 kV et deux valeurs de NSDD, (a) 0.01 g/cm<sup>2</sup>, (b) 0.03 g/cm<sup>2</sup> [5].



**Figure I.11.** Caractéristiques de l'amplitude D3 pour 30 kV, NSDD de 0.03 g/cm<sup>2</sup> et différentes largeurs de bande de pollution, (a) 5 cm, (b) 10 cm, (c) 15 cm, (d) 20 cm, (e) 25 cm.

Ils ont conclu que :

- La technique de la transformée d'ondelettes discrète donne les caractéristiques temps-fréquence de différents composants (détails), STD est étudié pour rechercher les détails les plus significatifs permettant de surveiller la surface isolante.
- La représentation de la STD des détails D10 et D11 caractérisés par des basses fréquences montre une bonne corrélation avec l'augmentation de la pollution par la NSDD dans une configuration uniforme. Sinon, D11 d'une part et D1 à D6 d'autre part sont en bonne corrélation avec l'augmentation de la largeur de la couche de pollution et ensuite avec les activités de décharges électriques dans une configuration de pollution non uniforme.

## I.2. Mécanisme de dépôt salin et de contournement superficiel d'isolateurs extérieurs près des zones côtières

Pour enregistrer les formes d'ondes de la tension appliquée, de courant de fuite, des activités des décharges et du processus de contournement des isolateurs haute tension sous l'influence combinée des dépôts salins et du brouillard froid, les chercheurs M Majid Hussain, S Farokhi, S G McMeekin [10] ont pollué des isolateurs Haute Tension en utilisant la méthode de contamination par couche sèche qui est illustrée par la figure I.12, La buse de sortie était perpendiculaire aux isolateurs d'essai conformément aux directives recommandées par la CEI 60507 et la norme IEEE 4. L'isolateur a été suspendu verticalement dans la chambre climatique et soumis à une rotation autour de son axe vertical pendant le dépôt de contamination. Un brouillard froid a été généré cinq minutes avant le dépôt de contamination.

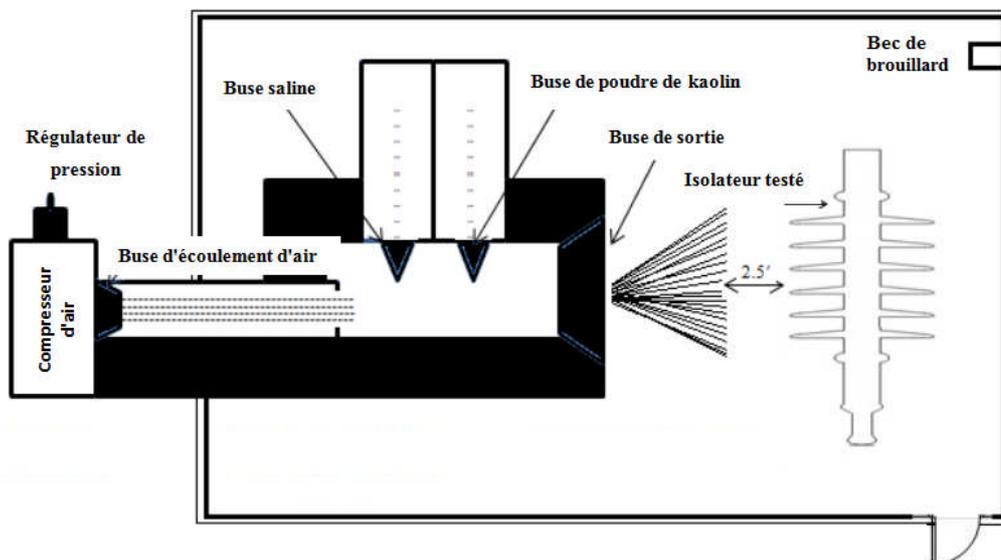


Figure I.12. Diagramme schématisé de la méthode de dépôt de contamination [10].

Les paramètres de brouillard froid sont répertoriés dans le tableau I.2.

Tableau I.2. Caractéristiques du Brouillard Froid [10].

Paramètres	Valeurs
Température	0-2 °C
Pollution	Fortement
Région touchée	0-25 km du bord de la mer avec transport de sel de mer et dépôt
Caractéristique de brouillard	Dense (visibilité inférieure à 1 m)
Taux de brouillard	0.4 kg/h/m <sup>3</sup>
Intensité des précipitations	20 mm/h (±5mm/h)

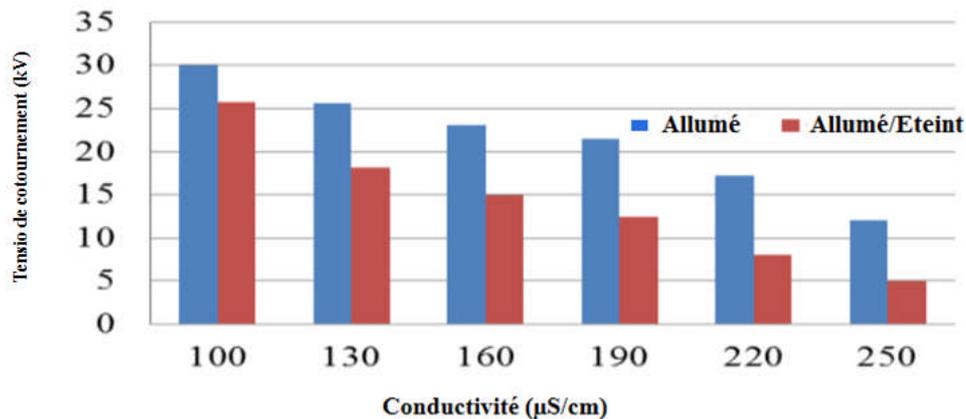
La tension d'essai était fournie par un transformateur de 10 kVA, 100 kV et 50 Hz. La tension fournie peut être modifiée manuellement ou automatiquement à une vitesse de 1 kV/s. Afin de reproduire la variation des niveaux d'humidité et de contamination près des régions littorales, le test a été réalisé dans les deux conditions (allumé et allumé/éteint) indiquées au tableau I.3 [10]. La température près du région littorales en hiver et au début du printemps se situant entre 0 °C et 2°C pour cela la température de la chambre était maintenue entre 0 et 2°C. Le débit d'air était constant à 8 m/s.

**Tableau I.3.** Conditions Pendant les Essais [10].

État Allumé	État Allumé/Eteint
La contamination et le brouillard froid se déposent en continu du début de l'essai jusqu'au contournement à une tension constante de 33 kV	La contamination et l'injection de brouillard froid sont périodiquement configurées pour allumer et éteindre l'installation en simulant les conditions climatiques naturelles près du littoral à une tension constante de 33 kV.

### I.2.1 Effet de la Conductivité sur le Contournement des Isolateurs

La figure I.13 montre que la tension de contournement est inversement proportionnelle à la conductivité de la contamination et de la conductivité de brouillard froid dans les deux cas allumé et allumé/éteint.



**Figure I.13.** Relation entre la tension de contournement et la conductivité [10].

### I.2.2 Caractéristiques de Courant de Fuite sous toutes les Conditions Allumé et Allumé/Eteint

Les figures I.14 et I.15 montrent les caractéristiques de courant de fuite des deux cas. Il a été observé que, pendant l'état "Allumé", le courant de fuite augmentait progressivement et que seuls des arcs partiels étaient produits. Pendant les cycles "Allumé/Eteint", le courant de fuite a augmenté

progressivement pendant le cycle “Allumé”, puis un contournement de surface s'est produit pendant le cycle “Eteint” lorsque la génération de brouillard a été suspendue pendant un moment.

Ces résultats permettent de conclure que les incidents de contournement près des régions littorales ne surviennent que lorsque le brouillard froid est arrêté ou suspendu pendant un certain temps [10].

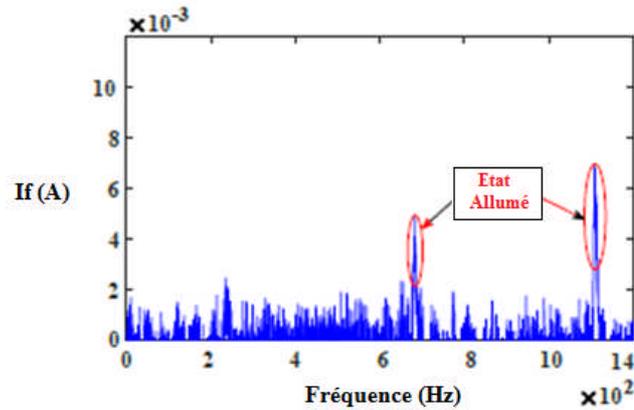


Figure I.14. Courant de fuite dans l'état Allumé.

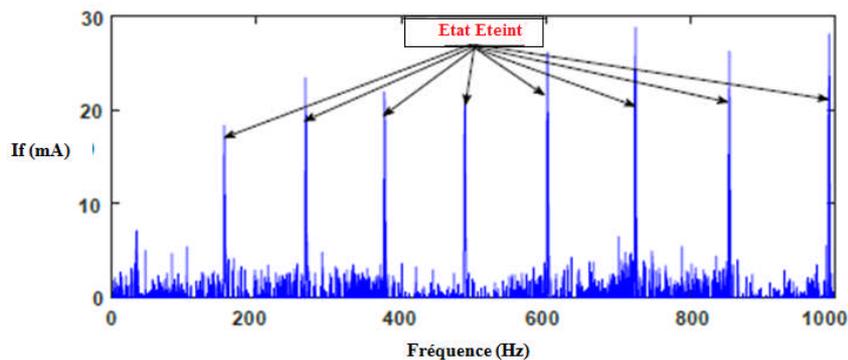


Figure I.15. Courant de fuite dans l'état Allumé/Eteint.

### I.2.3 Processus de décharge et de contournement sous cycle Allumé/Eteint

La figure I.16 montre le processus de décharge et de contournement des Isolateurs Haute Tension sous cycle Allumé/Eteint.

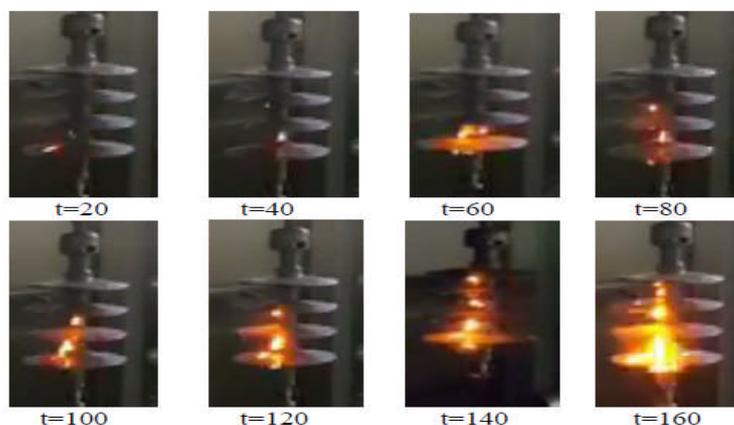


Figure I.16. Processus de contournement d'isolateur sous cycles Allumé/Eteint [10].

#### I.2.4. Paramètres des caractéristiques de courant de décharge :

Les données de courant de décharge et les paramètres caractéristiques fournissent des détails sur l'état de surface d'isolateur et les processus de dégradation. Le courant de décharge dépend de l'impédance équivalente de l'isolateur contaminé tout au long du test. Pour cela les chercheurs M Majid Hussain, S Farokhi, S G McMeekin [11] ont utilisé le dispositif expérimental de la figure I.17.

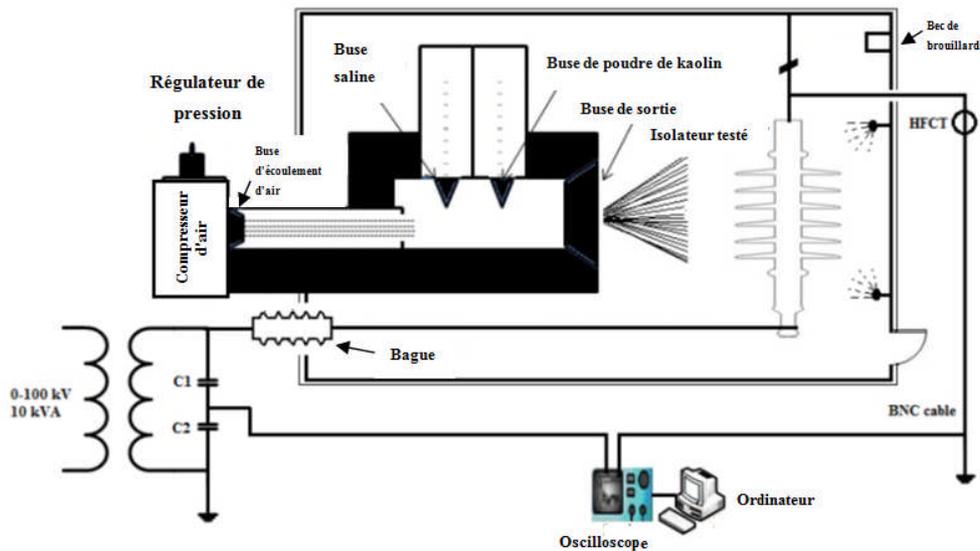


Figure I.17. Dispositif expérimental [11].

Trois paramètres caractéristiques ont été étudiés dans cet article; amplitude du courant de décharge, le taux de distorsion harmonique du courant (THD) et intensité du nombre de décharges pulsées.

$$I_a = (|i(t)_{\max}|) \quad (I.6)$$

$$Q = +(i \geq 3i_{\text{avg}}) \quad (I.7)$$

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_n I_n^2}}{I_1} \quad (I.8)$$

Où

$I_a$  : La plus haute amplitude de formes d'onde de courant de décharge.

$i(t)$ : le courant de décharge.

$i_{\text{avg}}$ : La valeur moyenne du courant de décharge.

$I_n$  : L'harmonique du nième ordre pour  $n = 2, 3 \dots 11$ .

$I_1$  : la composante fondamentale.

$Q$  : représente la décharge pulsée concentrée et la distorsion harmonique totale (THD) décrit la distorsion des formes d'onde du courant de décharge.

La figure (I.18) présente les relations entre l'amplitude de courant de décharge et taux d'humidité pour différentes valeurs de SDD, l'amplitude sous le brouillard froid est différente que celle des précipitations. À des vitesses de mouillage modérées, l'amplitude de courant de décharge pendant la pluie est beaucoup plus faible que dans le brouillard froid donc les fortes précipitations peuvent nettoyer la contamination des surfaces isolantes.

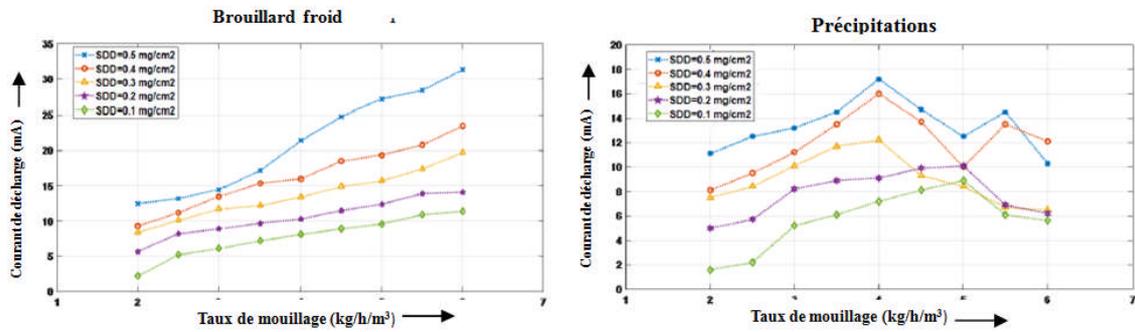


Figure I.18. Relations entre courant de décharge, taux de mouillage et SDD

La figure (I.19) montre l'augmentation de nombre pulsé Q en fonction du taux d'humidité pour différentes valeurs de SDD, tandis que la figure (I.20) représente la relation entre le taux de distorsion harmonique (THD) et le taux d'humidité pour différentes valeurs de SDD.

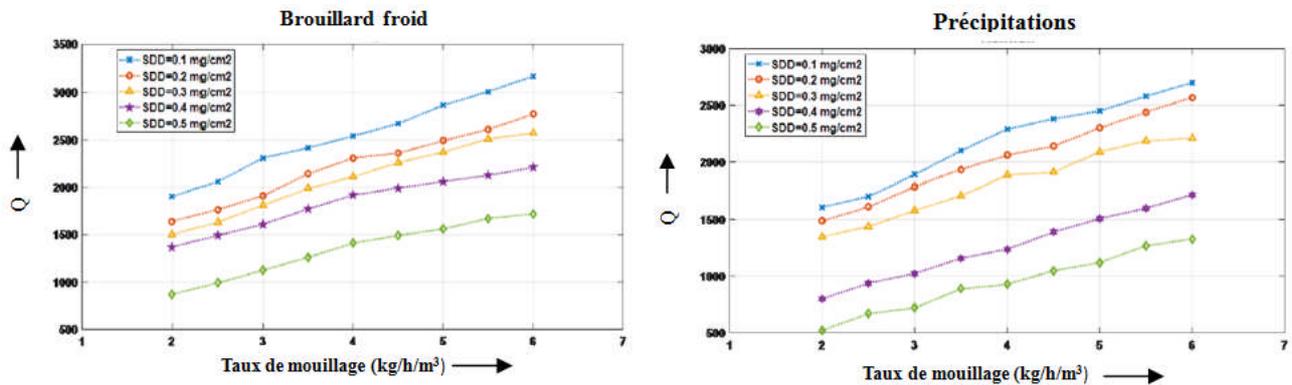


Figure I.19. Relations entre nombre pulsé Q, taux de mouillage et SDD.

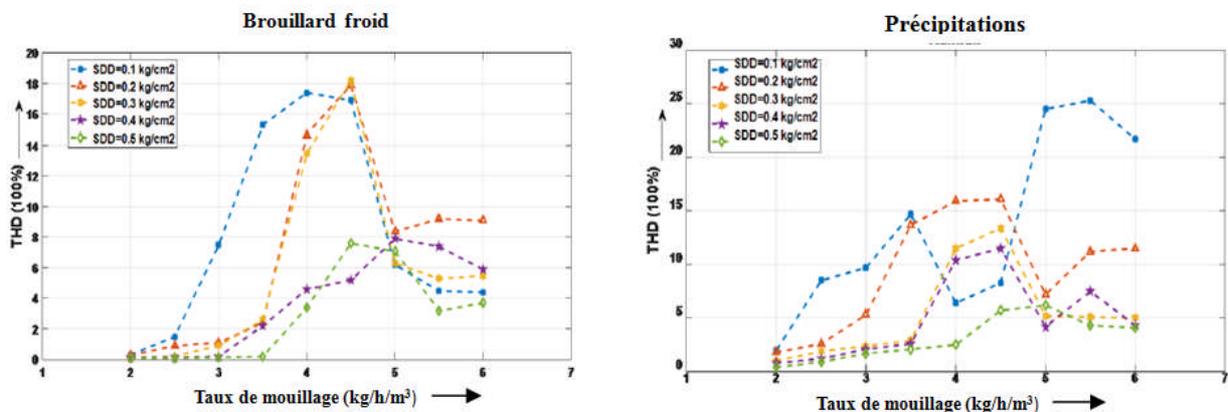


Figure I.20. Relations entre le taux de distorsion harmonique (THD), taux de mouillage et SDD

### I.2.5 Effet de la pluie et du brouillard sur la tension de contournement

La figure I.21 montre que la tension de contournement d'isolateur dans les précipitations est supérieure à celle de brouillard froid, Pour identifier la raison, l'hypothèse est de fortes pluies peuvent nettoyer la contamination des isolateurs.

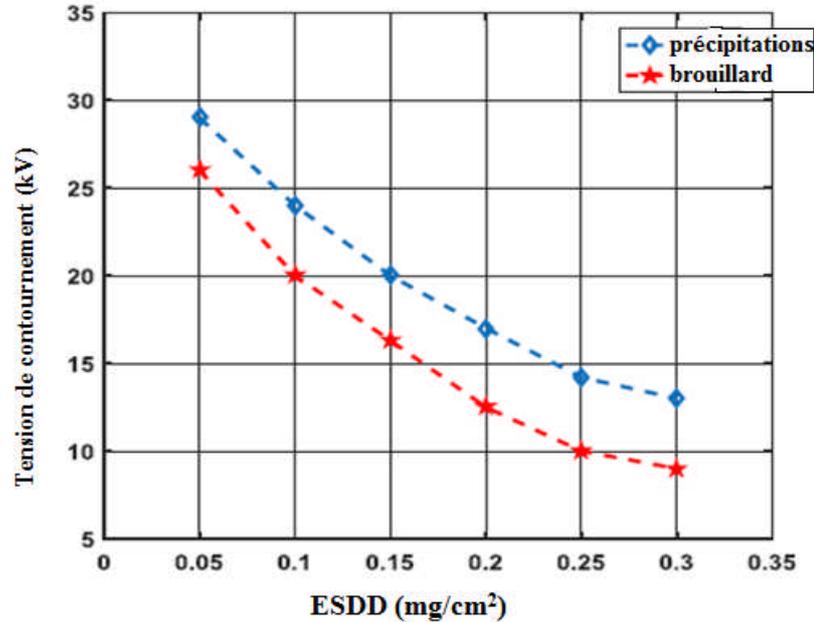


Figure I.21. Tension de contournement de surface avec brouillard froid et précipitations

### I.2.6. Impact du niveau de pollution et du taux de mouillage sur la tension de contournement

Pour étudier la relation entre le SDD et le taux de mouillage sur la tension de contournement d'isolateur, les auteurs ont réalisé des essais sur les quatre types d'isolateurs énumérés ci-dessous au tableau (I.4).

Tableau I.4. Paramètres des isolateurs [11].

Type d'isolant	distance de fuite (cm)	espacement de hangar (cm)	diamètre de hangar (cm)
Caoutchouc de silicone	30	2.5	10
EPDM	24	2	8
verre	21	1.6	11
Porcelaine	18	1.3	14

D'après la figure I.22, ils ont constaté que la tension de contournement est inversement proportionnelle à la valeur de contamination pour un taux de mouillage constant ( $2,0 \text{ kg/h/m}^3$ ) pour les quatre types des isolateurs.

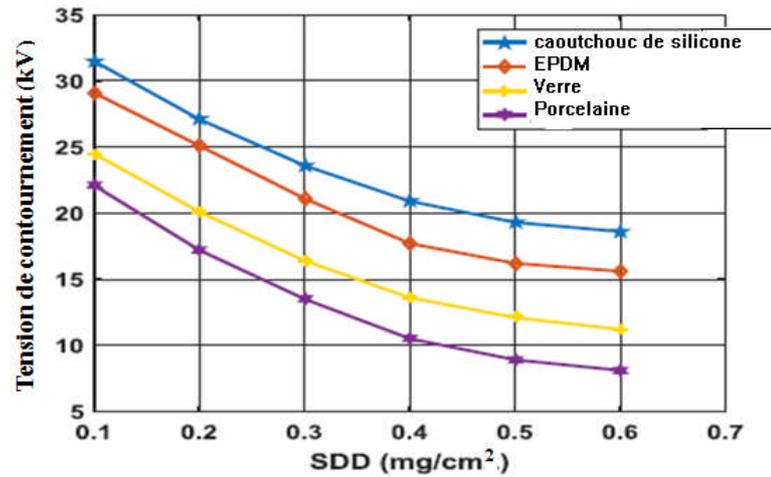


Figure I.22. Tension de contournement de la surface à taux de mouillage constant.

D'après La figure I.23, ils ont constaté que la tension de contournement est inversement proportionnelle aux taux de mouillage pour la valeur de contamination constante ( $0,3 \text{ mg/cm}^2$ ) pour les quatre types des isolateurs

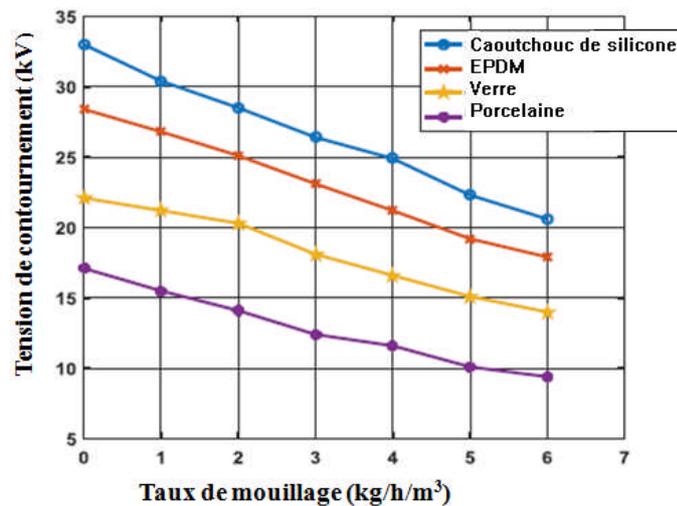


Figure I.23. Tension de contournement de la surface à SDD constant.

Ils ont conclu que :

- l'amplitude du courant de décharge dans les précipitations (pluie) est beaucoup plus faible que dans le brouillard froid.
- La tension de contournement de surface dans les précipitations est supérieure à celle dans le brouillard froid.
- Il a été observé que le SDD influait sur la tension de contournement de la surface, quel que soit le taux de mouillage.

### I.3. Analyse du courant de fuite d'un isolateur en polymère pollué par FFT

Pour étudier des effets de la pollution sur le courant de fuite et la prévention de son apparition, les chercheurs I. A. Joneidi, A. A. Shayegani, H. Mohseni, S. Mohseni, M. Jebeli-Javan [12] ont utilisé le dispositif expérimental de la figure I.24

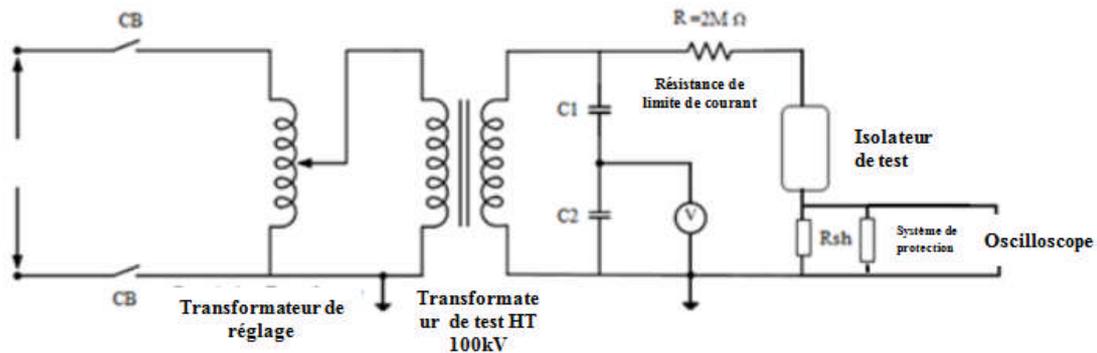


Figure I.24. Dispositif expérimental [12].

#### I.3.1. Contamination des Isolateurs

En raison de la nature hydrophobe initiale des isolateurs polymères, il est plutôt difficile d'appliquer des contaminants artificiels et de s'assurer qu'ils adhèrent à la surface pendant la durée d'essai. Une méthode d'application de la contamination artificielle sur un isolateur en polymère a été discutée dans [13]. La poudre de kaolin est déposée après avoir pulvérisé sur la surface par un fin brouillard de gouttelettes d'eau et en laissant sécher. La composition de kaolin consiste en 40 g de kaolin, 1000 g d'eau du robinet et 10 g de NaCl. Lorsque la conductivité volumique de l'eau du robinet est supérieure à 0,05 S/m, il est recommandé d'utiliser de l'eau distillée [13].

La figure I.25 montre l'isolateur réel d'essai et le tableau I.5 présente ses caractéristiques.

Tableau I.5: caractéristiques de l'isolateur de test.



Figure I.25 : Photographie d'un isolateur testé.

Spécification	Unité	Sir
Numéro d'isolant	-	1
Classe de tension	KV	20
Distance de fuite	mm	770
Diamètre de la remise	mm	100
Hauteur	mm	235
Tension mécanique résistance	KN	70

### I.3.2 Courant de Fuite d'un Isolateur Propre

Initialement, un isolateur polymère en caoutchouc de silicone de 20 kV propre a été testé avec une tension appliquée de 11,5 kV<sub>eff</sub>. Aucune décharge visuelle n'a été observée dans ces conditions d'essai.

La figure (I.26.a) montre la forme d'onde typique de courant de fuite obtenue dans cette condition de test et la figure (I.26.b) montre l'analyse spectrale de courant de fuite pendant l'état de surface propre. Il est observé que le signal de courant de fuite dans des conditions de surface propres contient les composantes harmoniques d'ordre supérieur telles que 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup>. En outre, il a été observé que, dans des conditions de propreté, la composante du 5<sup>ème</sup> harmonique était toujours supérieure à la 3<sup>ème</sup> harmonique. C'est-à-dire l'isolateur était dans son état normal. A l'état sec pollué, le contenu en harmoniques ne change pas, son aspect est propre [12].

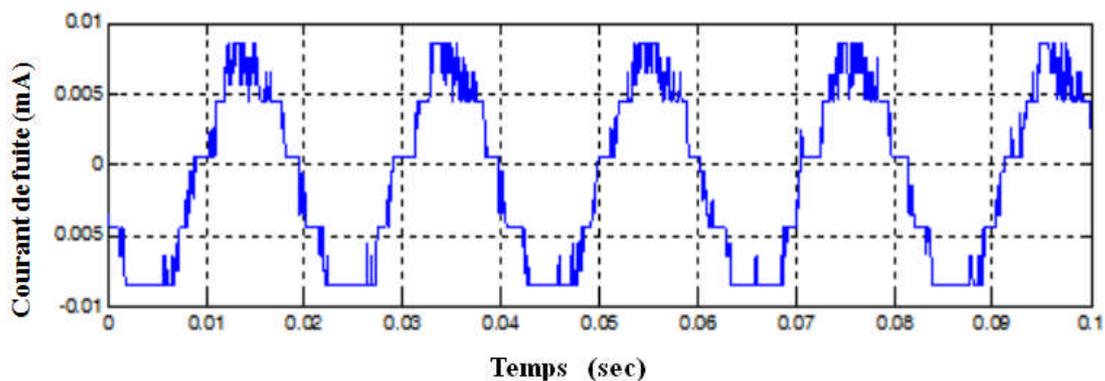


Figure I.26.a. Courant de fuite d'isolateur propre à 20 kV

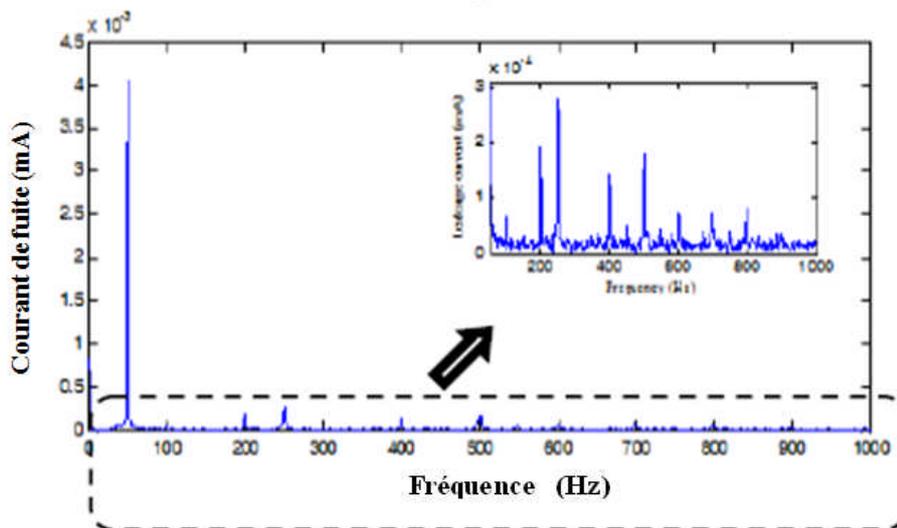


Figure I.26.b. Diagramme spectral de courant de fuite d'isolateur propre à 20 kV.

### I.3. 3. Courant de fuite d'isolateur pollué

La configuration typique du courant de fuite d'isolateur pollué a été enregistrée aux trois niveaux suivants:

#### I.3.3.1. Courant conducteur

Pour les surfaces complètement mouillées, obtenues lors des tests de contamination successifs, le If s'est également révélée être sinusoïdale, mais résistive et à un niveau supérieur (figure (I.27.a)). Dans les cas où les propriétés hydrophobes ont été soit partiellement perdues, soit qu'une faible activité de bande sèche a commencé, les motifs pourraient être résistifs et non linéaires. La figure I.27.b montre le diagramme spectral de courant de fuite lors de l'état de surface polluée et les composantes du troisième harmonique supérieures au cinquième et aux autres composantes harmoniques [12].

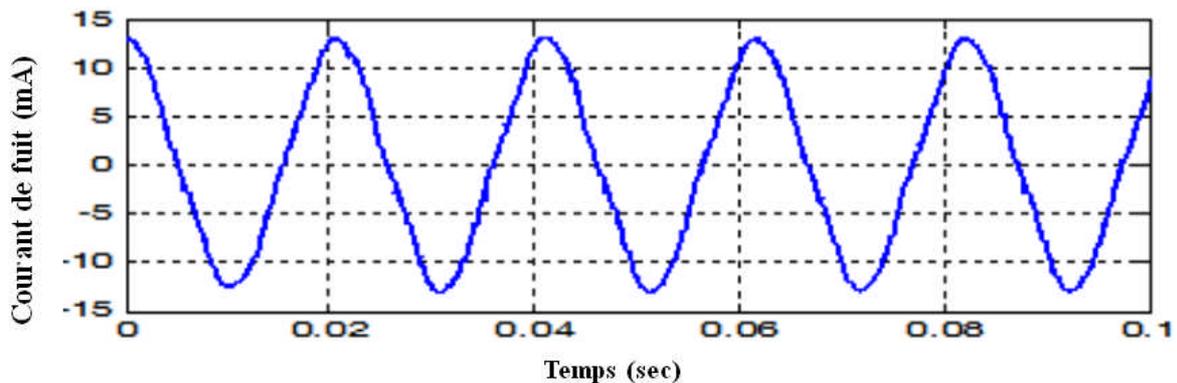


Figure I.27.a : Courant de fuite d'isolateur pollué à 20kV

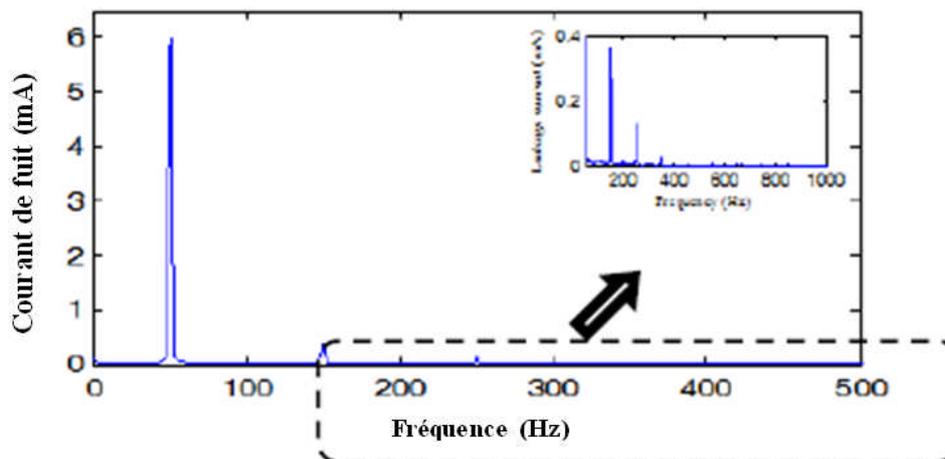


Figure I.27.b. Diagramme spectrale de courant de fuite d'isolateur pollué

Tous les résultats sont présentés dans le tableau I.6.

**Tableau I.6.** Résultat de courant de fuite et son analyse harmonique (isolateur propre)

Courant de fuite maximum (mA)	13.08
1 <sup>er</sup> harmonique (mA)	6.017
3 <sup>ème</sup> harmonique (mA)	0.3684
5 <sup>ème</sup> harmonique (mA)	0.1314
7 <sup>ème</sup> harmonique (mA)	0.03365
9 <sup>ème</sup> harmonique (mA)	0.01131
11 <sup>ème</sup> harmonique (mA)	0.01028
13 <sup>ème</sup> harmonique (mA)	0.00485

### I.3.3.2 Arc à bande sèche et arc à couronne

Ils ont observé deux types de décharges permettant d'évaluer les performances de l'isolation. L'une d'entre elles est la décharge partielle couronne qui se produit entre les gouttelettes d'eau, dans laquelle la liaison du caoutchouc - silicone (Si-C) est décomposée par l'énergie des photons car l'énergie des photons due à la décharge couronne est supérieure à l'énergie de liaison du caoutchouc silicone. L'autre est une décharge d'arc en bande sèche qui se produit entre des bandes sèches à la surface du matériau polymère [14].

Le comportement non linéaire, comme celui de la figure (I.28.a), s'est produit pendant et avant l'activité de décharge visible et par conséquent, les courants de décharge peuvent être considérés comme une pointe apparaissant sur la crête d'une forme d'onde de courant de fuite non linéaire. La figure (I.28.b) montre le diagramme spectral de courant de fuite pendant l'état de surface polluée. Ils ont observé que le signal de courant de fuite contient les composantes du 3<sup>ème</sup> harmonique très supérieures au 5<sup>ème</sup> et aux autres composantes harmoniques [12].

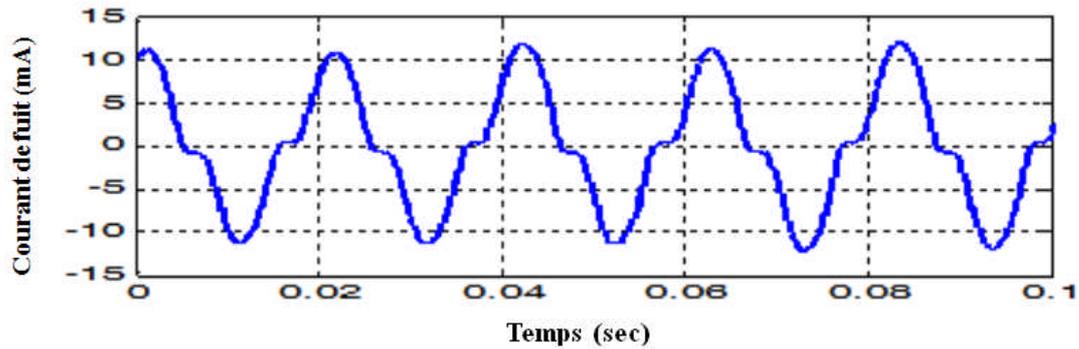


Figure I.28.a. Courant de fuite pendant un arc sur une bande sèche à 20kV.

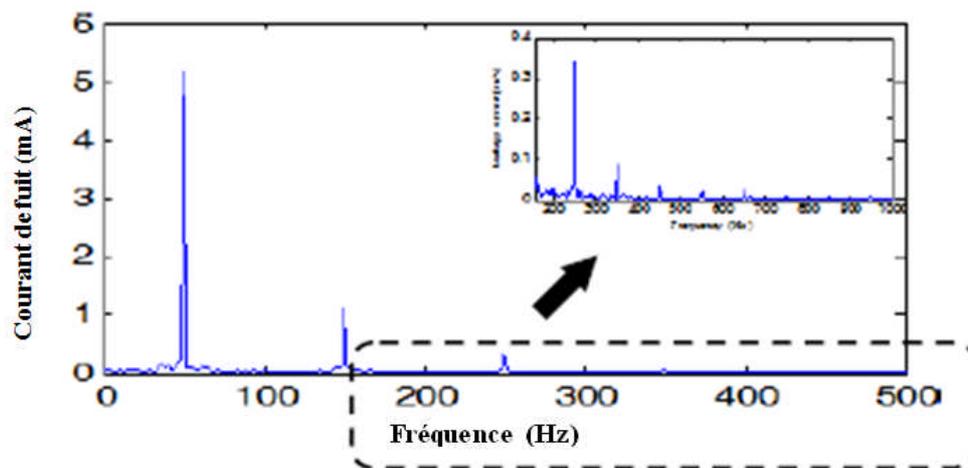


Figure I.28.b. Diagramme spectrale du courant de fuite pendant un arc sur une bande sèche à 20kV.

Tous les résultats sont présentés dans le tableau I.7.

Tableau I.7. Résultat de courant de fuite et son analyse harmonique (isolateur pollué avec un arc de bande sèche)

Courant de fuite maximum (mA)	5.167
1 <sup>er</sup> harmonique (mA)	1.131
3 <sup>eme</sup> harmonique (mA)	0.3404
5 <sup>eme</sup> harmonique (mA)	0.086
7 <sup>eme</sup> harmonique (mA)	0.03335
9 <sup>eme</sup> harmonique (mA)	0.02021
11 <sup>eme</sup> harmonique (mA)	0.02398
13 <sup>eme</sup> harmonique (mA)	5.167

### I.3.3.3 Arc entier avec arcs d'une bande sèche

Les décharges partielles s'allongeront le long de la surface et conduiront à une cambrure complète, cette condition est la phase précédente du contournement de l'isolateur. La figure (I.29.a) montre ces phénomènes. On observe que les composantes du 3<sup>ème</sup> harmonique augmentent plutôt que celles des deux étapes précédentes. La figure (I.29.b) montre le résultat [12].

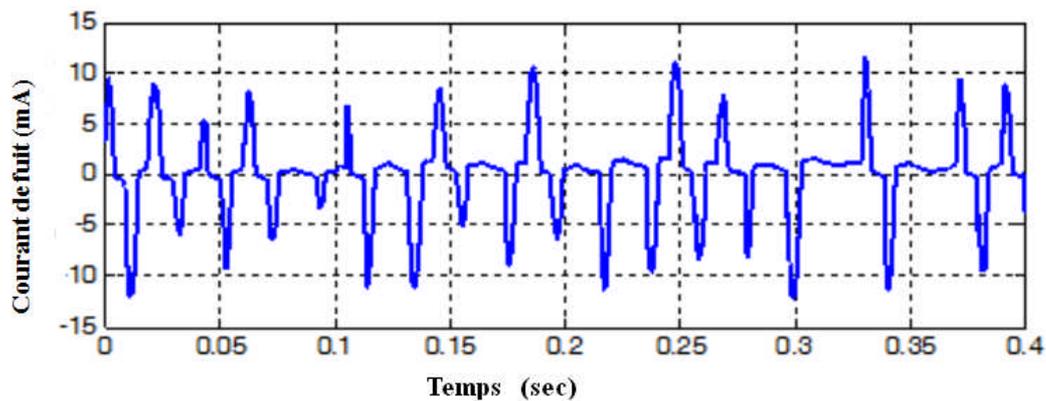


Figure I.29.a. Courant de fuite de l'isolateur pollué contient un arc complet avec arc d'une bande sèche à 20 kV.

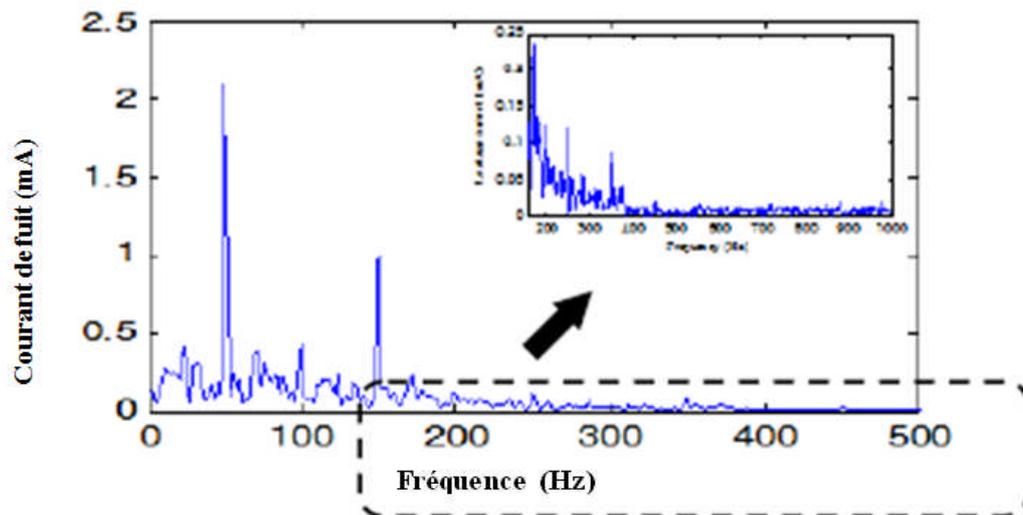


Figure I.29.b. Diagramme spectral de courant de fuite de l'isolateur pollué contient un arc complet avec arcs d'une bande sèche à 20 kV.

Tous les résultats concernant le courant de fuite et ses harmoniques du courant de fuite sont présentés dans le tableau I.8.

**Tableau I.8.** Résultat de courant de fuite et son analyse harmonique (isolateur pollué contient un arc complet avec arc d'une bande sèche)

Courant de fuite maximum (mA)	2.1
1 <sup>er</sup> harmonique (mA)	1.011
3 <sup>ème</sup> harmonique (mA)	0.1227
5 <sup>ème</sup> harmonique (mA)	0.09058
7 <sup>ème</sup> harmonique (mA)	0.01695
9 <sup>ème</sup> harmonique (mA)	0.0132
11 <sup>ème</sup> harmonique (mA)	0.0121
13 <sup>ème</sup> harmonique (mA)	2.1

Ils ont conclu que :

- Les composantes du troisième harmonique de la forme d'onde du courant de fuite sont étroitement liées à la pollution de l'isolateur.
- En conditions de propreté, il n'y a pas eu de contournement pendant les tests.
- Lorsque le 3<sup>ème</sup> harmonique est inférieur au 5<sup>ème</sup> harmonique, les isolateurs ne présentent aucune ou une très légère contamination.
- Lorsque le début de la décharge commence, l'élément de 3<sup>ème</sup> harmonique augmente évidemment plutôt que l'harmonique de fondation.
- Des décharges sur bande sèche sont observées pendant l'essai, ce qui permet d'évaluer les performances de l'isolation.
- Activité de décharge observée sous forme de pointe sur la crête de la forme d'onde en raison de la formation de bandes sèches.

### Conclusion

La synthèse bibliographique de quelques travaux antérieurs effectués dans le présent chapitre nous permet de comprendre d'une manière approfondie les mécanismes assez conduisant au contournement des isolateurs et l'application des méthodes de traitement de signal dans le domaine de la haute tension spécialement le phénomène de la pollution des isolateurs.

Enfin, les signaux constituent un outil très efficace et suffisant pour prédire le comportement de l'isolateur en service.

# *Chapitre II*

## *Quelques techniques de caractérisation de l'état de surface d'un isolateur*

## Introduction

Que ce soit en mathématique ou en physique, la transformée de Fourier a été pendant longtemps un des outils les plus utilisés pour le traitement de signal. Cette représentation, basée sur la notion physique de fréquence, est bien adaptée pour traiter des signaux stationnaires c'est-à-dire des signaux qui possèdent certaines propriétés invariantes dans le temps. Par contre, la transformée de Fourier n'est pas optimale pour la description de phénomènes transitoires et se révèle donc imparfaite pour l'analyse de la plupart signaux rencontrés en pratique.

La principale limitation de la transformée de Fourier est qu'elle ne permet pas une description locale (sur une partie finie) d'un signal. Pour remédier à ces limitations, des représentations dites temps-fréquence ont été proposées afin d'analyser un signal à l'aide d'une transformation paramétrée par deux variables : le temps (ou la position) et la fréquence (ou l'échelle) [15].

Dans la première section de ce chapitre nous présentons des rappels sur la TF en discutant la notion de localisation temporelle qui disparaît dans l'espace de Fourier. Ensuite, nous allons parler sur une transformation qui renseigne sur le contenu fréquentiel tout en préservant la localisation temporelle afin d'obtenir une représentation temps-fréquence ou espace-échelle du signal, qui est la transformée en ondelettes (TO). Après, nous discutons la notion de multi-résolution. Ensuite, nous présentons une brève théorie des transformées en ondelettes continue (TOC), transformées en ondelettes discrète (TOD) et en fin, les propriétés et les familles des ondelettes seront abordés.

### II.1. Signal

Un signal est la représentation physique de l'information, qu'il convoie de sa source à son destinataire. La description mathématique des signaux est l'objectif de la théorie du signal. Elle offre les moyens d'analyser, de concevoir et de caractériser des systèmes de traitement de l'information. [16]

### II.2. Classification des signaux

On distingue les signaux à variable continue, des signaux à variable discrète ainsi que ceux dont l'amplitude est discrète ou continue.

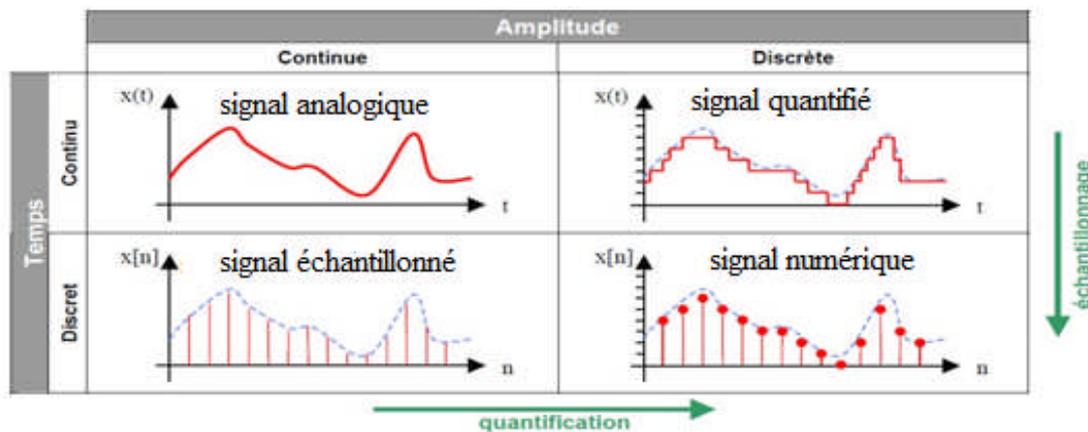


Figure. II.1. Classification des signaux

On obtient donc 4 classes de signaux :

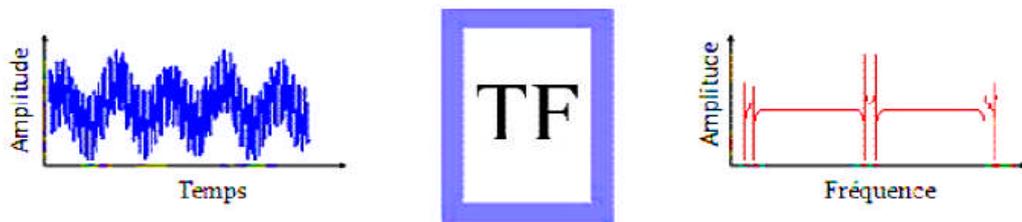
- 1\_ Les signaux analogiques : dont l'amplitude et le temps sont continus
- 2\_ Les signaux quantifiés : dont l'amplitude est discrète et le temps continu
- 3\_ Les signaux échantillonnés : dont l'amplitude est continue et le temps discret
- 4\_ Les signaux numériques : dont l'amplitude et le temps sont discrets [16]

### II.3. Séries de Fourier

Les séries de Fourier ont été introduites par Joseph Fourier en 1822, mais il fallut un siècle pour que les analyses offrent des outils d'étude adaptés : une théorie de l'intégrale pleinement satisfaisante et les premiers concepts de l'analyse fonctionnelle. Elles font encore actuellement l'objet de recherches actives pour elles-mêmes, et ont suscité plusieurs branches : analyse harmonique, théorie du signal, ondelettes, etc.

#### II.3.1. Transformée de Fourier (TF)

La transformée de Fourier permet l'analyse fréquentielle d'un signal. Elle repose sur le fait que toute fonction périodique peut être représentée comme la somme d'une série de sinus et de cosinus dont on fait varier d'une part les amplitudes en les multipliant par des coefficients, et d'autre part les phases en les décalant de manière à ce qu'elles s'additionnent ou se compensent. Le principe de la Transformée de Fourier est donné dans la figure (II.2) [17]:



**Figure II.2.** Transformée de Fourier.

Soit  $x(t)$  un signal complexe déterministe. La définition de la TF de la variable réelle  $\omega = 2\pi f$  est donnée par la formule suivante (II.1) :

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (\text{II.1})$$

La transformation inverse est donnée par :

$$x(t) = F^{-1}\{X(\omega)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad (\text{II.2}) [18]$$

### II.3. 2. Application de la transformée de Fourier

La caractérisation d'un signal par son spectre de fréquence permet notamment de mettre en évidence l'importance de l'harmonique fondamental ainsi que la décroissance plus ou moins rapide de l'amplitude des harmoniques de rang plus élevé. Il peut aussi servir à déterminer le nombre d'harmoniques nécessaires pour transmettre la quasi-totalité de l'énergie du signal [19]

### II.3.3 Transformée de Fourier Discrète

La transformée de Fourier à temps discret est un cas particulier de la transformée de Fourier, cette transformée de Fourier à temps discret ne s'applique que sur des signaux temps discret non-périodiques. La transformée de Fourier d'un tel signal est une fonction définie pour toutes les fréquences.

L'observation d'un signal pendant une durée limitée revient à le multiplier par une fenêtre rectangulaire qui vaut 1 sur un intervalle et 0 si non [18]. L'expression mathématique de la transformée de Fourier à temps discret (TFTD) d'une suite  $\{x[k]\}$  est la fonction de  $v$  s'écrit :

$$X(v) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) (e^{-2j\pi kv}) \quad (\text{II.3})$$

Où :

$v \in [0,1]$  est la fréquence normalisée. En se limitant à un nombre fini de  $L$  de valeurs de la fréquence, à savoir  $v = n / L$  avec ( $n = 0 : L - 1$ ), on aboutit à la notion de transformée de Fourier discrète.  $L$  et  $N$  ne jouent pas le même rôle.

L est le nombre de points de calcul de la TFTD et N est le nombre de points de la suite temporelle. Comme nous le verrons par la suite, L influe sur la précision du tracé du spectre, tandis que N est lié à la résolution.

### II.3.4 Transformée de Fourier rapide (TFR ou FFT)

En 1965, James Cooley et John Tukey ont publié une description d'un algorithme économique permettant de calculer la TFD, connu sous le nom de FFT de Cooley-Tukey, ou simplement de la FFT en raison de son immense popularité [20]. Une enquête ultérieure de Heideman, Johnson et Burrus [21] a révélé que l'algorithme avait en fait été découvert à plusieurs reprises sous différentes formes avant Cooley et Tukey, notamment par Gauss vers 1805 [22].

L'application principale de l'analyse FFT est la mise en évidence des périodicités du signal et le calcul de l'énergie contenue dans le signal pour chacune des fréquences. Aussi, l'analyse FFT sert à observer des signaux qui ne sont pas périodiques (aléatoires par exemple).

### II.3.5 Taux de distorsion (THD)

Parmi les harmoniques impaires analysées il n'existe pas une fréquence particulière qui présente un comportement spéciale par rapport aux autres. Notons que l'amplitude relative des harmoniques décroît avec l'augmentation de la fréquence. Cela, nous a conduits à utiliser le taux de distorsion (abrégé THD, total harmonic distortion en anglais) dans notre analyse.

Le taux de distorsion, encore appelé distorsion harmonique totale est défini comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (c'est-à-dire leur somme quadratique) à la valeur efficace de la composante fondamentale. Il peut s'appliquer soit au courant ou à la tension. Qui donne la formule suivante [23]:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} Q_h^2}}{Q_1} = \frac{Q_{HM}}{Q_1} \quad (\text{II.4})$$

Où

- $Q_h$  est la valeur efficace de l'harmonique au rang h du courant ou de la tension.
- $Q_1$  est composante fondamentale.
- $Q_{HM}$  est la valeur efficace des harmoniques de courants ou de tensions.
- h est le rang harmonique et H est le rang harmonique maximal. en théorie infini, en pratique, le plus élevé dans la bande passante. [23]

### II.3.6. Echantillonnage

L'échantillonnage consiste à prélever à des instants précis, le plus souvent équidistants, les valeurs instantanées d'un signal. Le signal analogique  $s(t)$ , continu dans le temps, est alors représenté par un ensemble des valeurs discrètes :

$$S_e(t) = S(n \cdot T_e) \quad (\text{II.5})$$

$n$ : entier.

$T_e$  : période d'échantillonnage.

Cette opération est réalisée par un échantillonneur souvent symbolisé par un interrupteur [16].

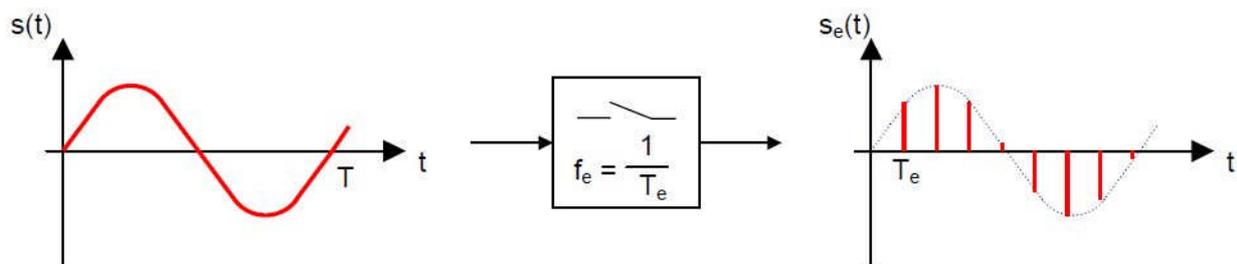


Figure II.3. Procédé d'échantillonnage

On peut utiliser la transformée de Fourier pour extraire des informations fréquentielles d'une image, toutefois le principal problème de la transformée de Fourier est son manque de résolution temporelle. Cela signifie simplement que si on est effectivement capable de détecter toutes les fréquences qui apparaissent dans un signal, on est en revanche incapable de déterminer à quel moment elles se produisent dans le signal. Il existe une transformée de Fourier plus « locale » donnant des informations mieux localisées, il s'agit de la transformée de Fourier Fenêtré (STFT).

### II.3.7 Transformée de Fourier à court terme (TFCT ou STFT)

Une nouvelle méthode d'analyse est donc introduite pour pallier le manque d'information sur le temps dans la transformée de Fourier: elle utilise une « Fenêtre glissante ». Cette méthode, pouvant être adaptée aux signaux non-stationnaires, est très proche de l'analyse spectrale : on définit une fenêtre qui sera utilisée comme masque sur le signal, et dans laquelle on considère que le signal est localement stationnaire, puis on décale cette fenêtre le long du signal afin de l'analyser entièrement. [24]

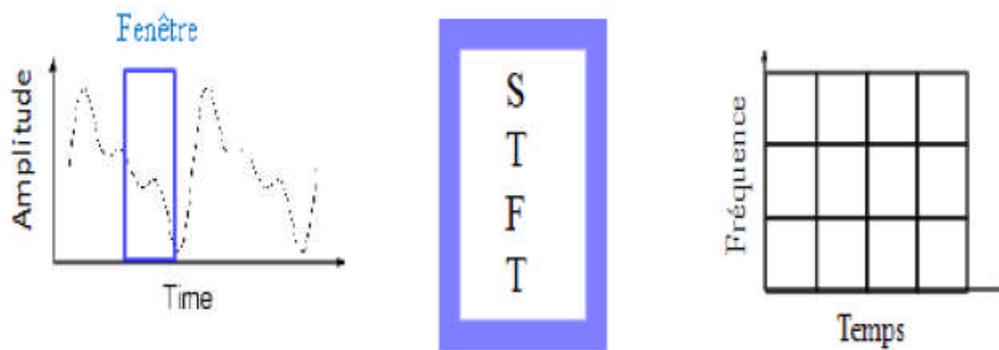


Figure II.4. Transformée de Fourier fenêtrée STFT

La transformée de Fourier fenêtrée remplace la sinusoïde de la transformée de Fourier par le produit d'une sinusoïde et d'une fenêtre localisée en temps.

La définition de la STFT est donnée par la formule suivante :

$$\text{STFT}_{(s,f)} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot g^*(t - s) e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{II. 6})$$

Où

- $x(t)$  étant le signal lui-même
- $g(t)$  est la fonction fenêtre et  $g^*$  son complexe conjugué.
- $f$  représente la fréquence.
- $s$  représente l'échelle.

Comme l'indique l'équation, la STFT du signal n'est autre que la TF du signal multiplié par la fonction fenêtre. Pour chaque valeur de  $f$  et de  $s$ , on calcule un nouveau coefficient de la STFT.

Donc la taille fixe de la fenêtre est un gros inconvénient. L'outil idéal serait une fenêtre qui s'adapte aux variations de fréquence dans le signal à analyser. Cet outil existe, il s'agit de la récente analyse en ondelettes. [17]

### II.3.8. Multi résolution

Les ondelettes s'adaptent en fonction des caractéristiques recherchées, ainsi pour les hautes fréquences (l'ondelette est très contractée) et pour les basses fréquences (l'ondelette s'étire). On parlera alors de multi résolution. La figure II.5 illustre ce phénomène et donne un aperçu sur la représentation temps-échelle de la STFT et de la transformée en ondelette. [25]

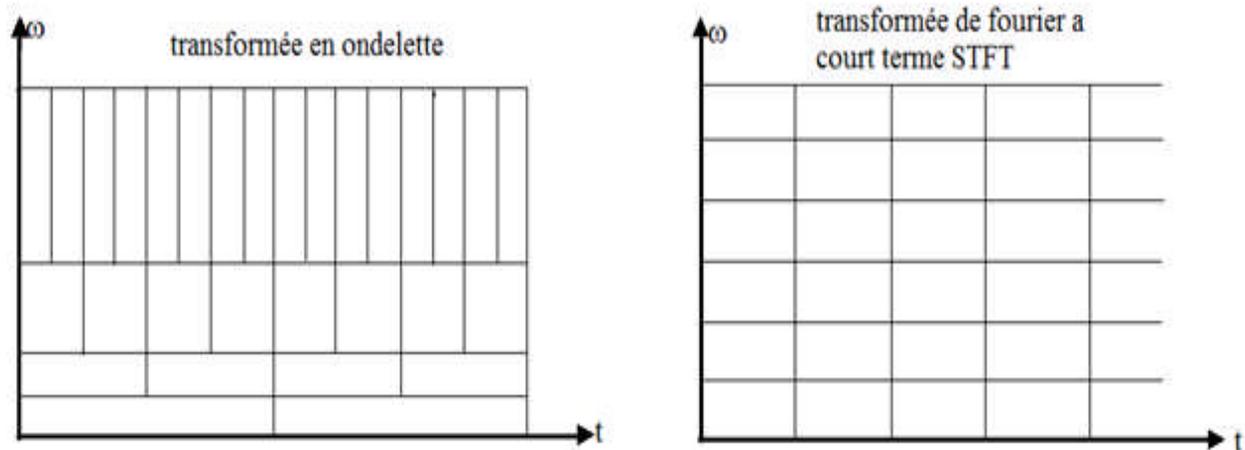


Figure II.5. Représentation temps-échelle de la transformée en Ondelette et de la STFT. [25]

## II.4. Technique de la transformée en Ondelettes

D'un point de vue historique, l'analyse par ondelettes est une nouvelle méthode, bien que ses fondements mathématiques remontent aux travaux de Joseph Fourier au dix-neuvième siècle.

Progressivement, l'attention des chercheurs fait passer de l'analyse axée sur la fréquence d'analyse comparative à l'échelle quand il a commencé à devenir clair qu'une approche moyennes fluctuations à différentes échelles de mesure pourrait être moins sensible au bruit. La première mention de ce que nous appelons maintenant une « ondelette » semble être en 1909, dans une thèse par Alfred Haar. [16]

L'objectif de cette théorie, avec ses deux formes, continue et discrète est de décomposer un signal sur une base de fonctions élémentaires: les ondelettes. Il existe de nombreuses bases d'ondelettes qui ont des propriétés différentes. Elles sont adaptées au concept d'analyse multi résolution, définie par Mallat (1989) [26]. Aujourd'hui, elle est utilisée pour la compression de données, filtrage de signaux, traitement d'images, traitement des signaux, détection de pathologies médicales et intelligence artificielle [27].

### II.4.1 Transformée en ondelettes Continues (CWT)

Le composant principal pour la transformée par ondelette est appelé la fonction d'ondelette  $\psi(t)$ . Elle est définie comme une fonction oscillante avec une moyenne nulle. Le paramètre  $(t)$  est mentionné comme la variable du temps ou de l'espace. Les ondelettes représentent un ensemble spécifique de fonctions de base. Elles sont particulièrement utiles dans la description des fonctions discontinues et non régulières que nous acquérons en traitant des objets physiques. Les fonctions de base appelées ondelettes filles sont toujours à la base de l'analyse d'ondelette.

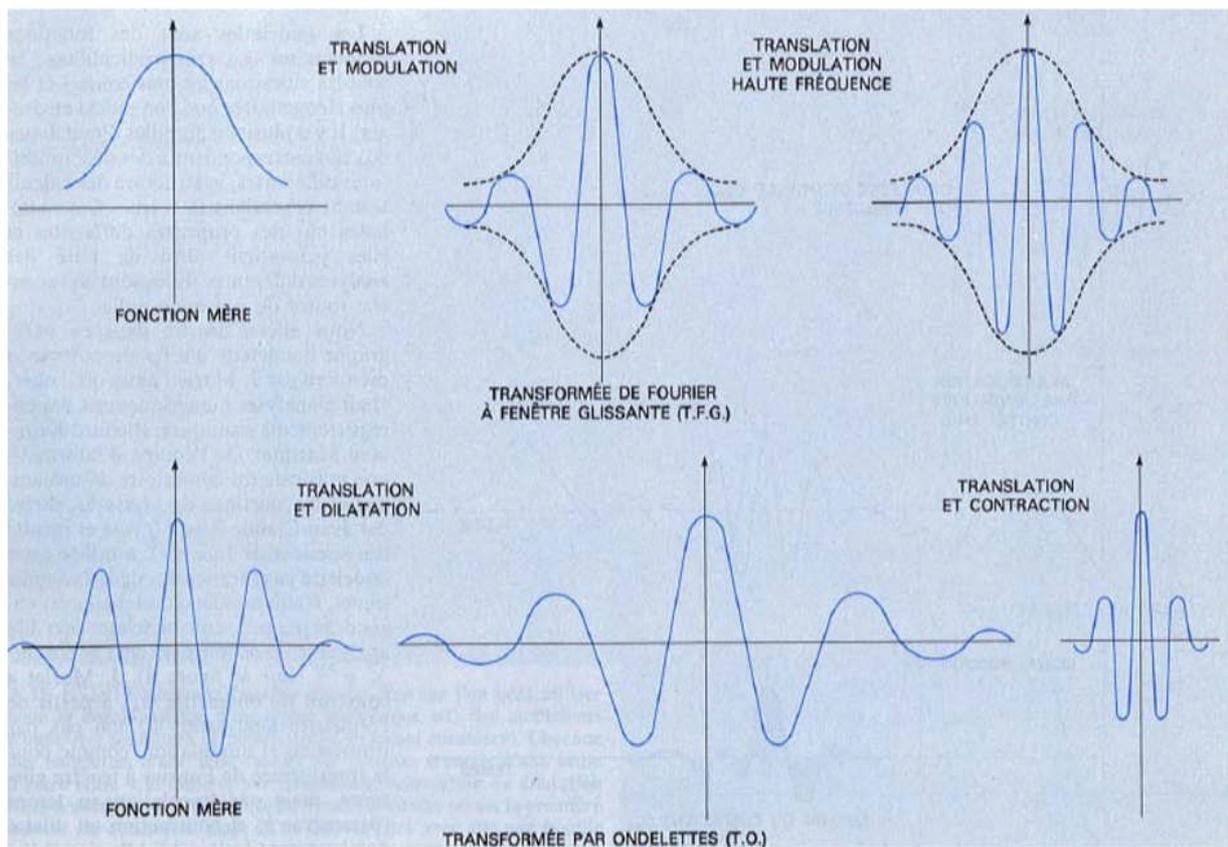
Elles sont obtenus d'une simple ondelette de prototype (appelée ondelette mère) par des dilatations et des contractions aussi bien que des translations (voir Figure II.6). La représentation d'un signal continu  $X(t)$  par une famille d'ondelettes est donnée par :

$$X(t) = \sum W(a,b)\psi_{a,b}(t) \quad (\text{II.7})$$

En introduisant les facteurs de translation  $b$  et d'échelle  $a$  on obtient l'ondelette fille ( $\psi_{a,b}(t)$ ) :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{II.8})$$

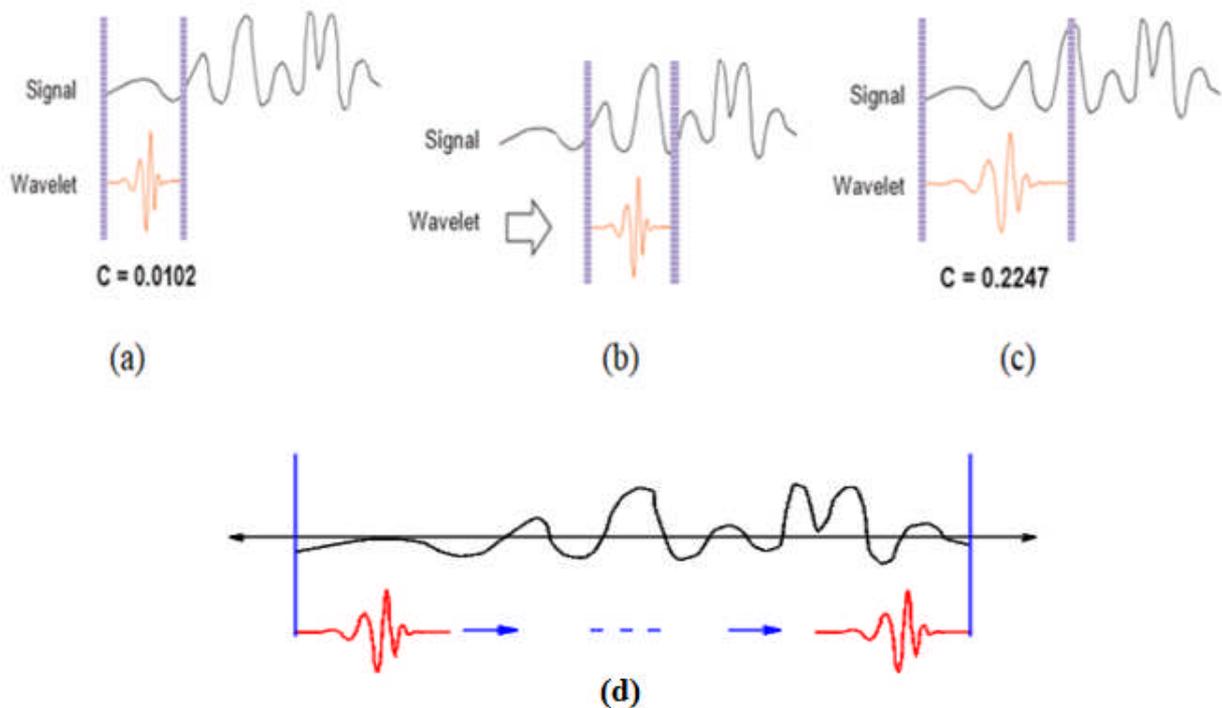
Le facteur  $\left(\frac{1}{\sqrt{a}}\right)$  est utilisé pour une normalisation énergétique aux différentes échelles [28].



**Figure II.6.** Diverses opérations que l'on peut effectuer sur une fonction mère par transformée de Fourier à fenêtre glissante et par transformée en Ondelette [28]

L'obtention d'une CWT consiste en l'application successive de cinq étapes :

1. Choisir une ondelette et comparer la à une section au début du signal original.
2. Calculer un certain nombre, C qui représente la corrélation d'ondelette avec cette section du signal. Plus C est élevé, plus la similitude est élevée.
3. Décaler continuellement l'ondelette vers la droite sur l'axe temporel et répéter les étapes 1 et 2 jusqu'à atteindre la fin du signal.
4. Dilater l'ondelette et répéter les étapes 1 à 3
5. Répéter les étapes 1 à 4 pour toutes les échelles. [29]



**Figure II.7.** Etape de calcul de la transformée en ondelettes continue, (a) Comparaison de l'ondelette à une portion du signal, (b) Balayage du signal par l'ondelette, (c) Dilatation de l'ondelette et balayage du signal, (d) Répétition des étapes.

Dans notre travail, nous utilisons l'ondelette de Morlet qui avec son enveloppe de forme gaussienne, minimise le produit des résolutions temporelle et fréquentielle, et permet par conséquent d'optimiser les résultats [15]. L'ondelette complexe de Morlet translaturée est donnée par :

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} e^{-\pi \left(\frac{t-u}{s}\right)^2} * e^{-10 * j * \pi * \left(\frac{t-u}{s}\right)} \quad (\text{II.9})$$

## II.4.2 Transformée en ondelettes Discrète (DWT)

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence de cette dernière, la TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète dyadique toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle  $u = 2^i$ . Il est clair que la transformée en ondelettes discrète est pratique en implémentation sur tout système numérique (PC, DSP, CARTE à  $\mu P$ ...).

L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière. La transformation en ondelettes discrète est donnée comme suit :

$$DWT_{\Psi} f(m, k) = \frac{1}{\sqrt{(a_0)^m}} \sum_n x(n) \Psi\left(\frac{k-n \cdot b_0 \cdot (a_0)^m}{(a_0)^m}\right) \quad (\text{II.10})$$

Où

$\Psi$  Est l'ondelette mère,  $n$  et  $m$  indiquent la localisation de fréquence et la localisation temporelle,  $(a_0)^m$  et  $n \cdot b_0 \cdot (a_0)^m$  sont les paramètres de dilatation et de translation. [30]

Le principe de la DWT peut être expliqué comme suit : La transformation en ondelettes peut aussi être considérée comme un processus de décomposition du signal en approximations et en détails. Le signal d'origine  $X(t)$  traverse une paire de filtres complémentaires, passe-haut et passe-bas, et émerge en tant que deux signaux respectivement le signal d'approximations  $A$  et le signal de détails comme le montre la figure II.8. Ce processus, étant réversible et sans perte de données, permet de compresser et de réduire l'information à niveau choisi. [31]

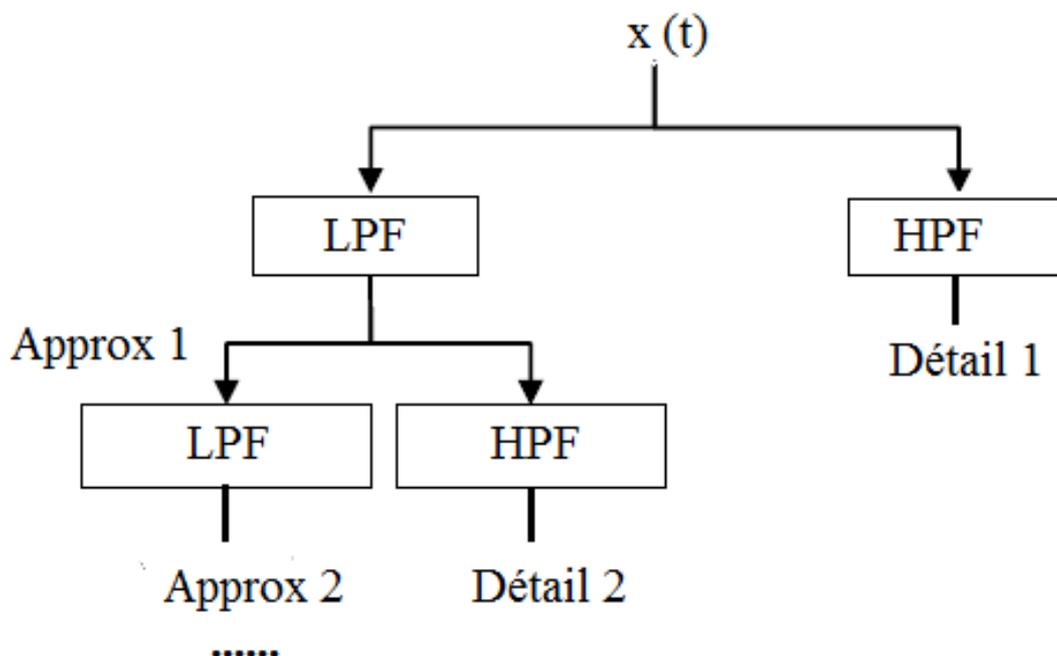


Figure II.8. Principe de la décomposition par ondelette Discrète (DWT).

Nous choisissons l'ondelette de mère complexe de Daubechies 4 (db4) pour l'analyse par ondelette discrète. On a ce choix parce que la db4 permet, en présence de pollution, de déceler les phénomènes transitoires tels que les impulsions sur le signal du courant de fuite qui sont causées par l'apparition de décharges électriques à la surface de l'isolateur.

La représentation temporelle de l'ondelette mère complexe db4 est donnée par la Figure II.9. Son expression mathématique est donnée comme suit :

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} * \left( e^{-j\omega t} - e^{-\frac{\omega^2}{2}} \right) \quad (\text{II. 11})$$

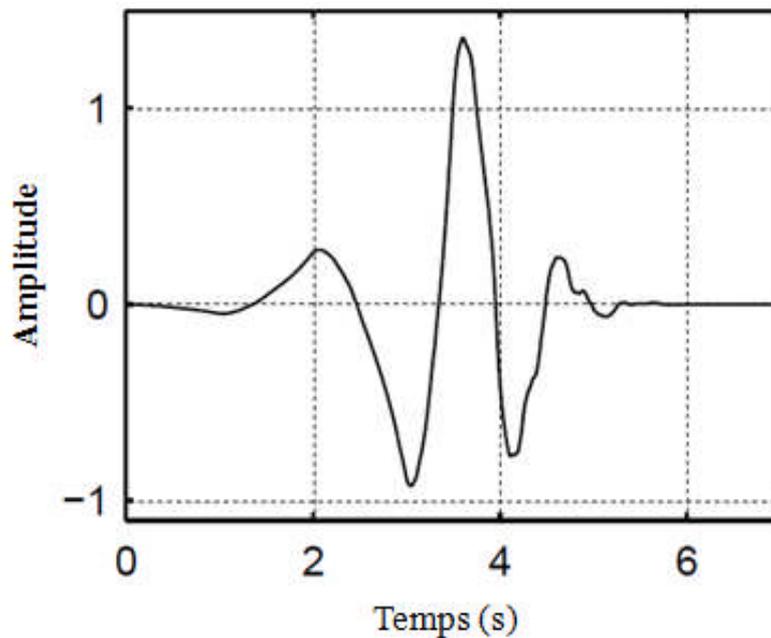


Figure II. 9. Représentation de l'Ondellete de Daubechies 4

### II.4.3. La famille d'ondelettes :

Il existe une infinité de fonctions d'ondelettes parce que toute fonction oscillante localisée est une ondelette mère possible. Toutefois, elles ne possèdent pas toutes des propriétés intéressantes. Aussi, de nombreux spécialistes des ondelettes ont construit des familles d'ondelettes possédant certaines propriétés remarquables. Le tableau (II.1) contient les familles les plus usuelles [32] suivi par leur classification en continues et discrètes.

Tableau II.1. Familles d'ondelettes [32]

Nom des familles d'ondelettes	Nom court en Matlab
Ondelette de Haar	Haar
Ondelette de Daubechies	db
Symlets	sym
Coiflets	coif
Ondelettes biorthogonales	bior
Ondelette de Meyer	meyr
Approximation discrète de l'ondelette de Meyer	dmey
Ondelettes de Battle et Lemarié btlm	btlm
Ondelettes gaussiennes	gaus
Chapeau mexicain	mexh
Ondelette de Morlet	morl
Ondelettes gaussiennes complexes	cgau
Ondelettes de Shannon complexes	shan
Ondelettes B-spline fréquentielles complexes	fbsp
Ondelettes de Morlet complexes	cmor

### II.4.3.1 Exemples d'ondelettes continues

Dans cette catégorie, nous allons présenter brièvement quelques unes d'entre elles.

#### II.4.3.1.1. Haar

Toute discussion des ondelettes commence par ondelettes de Haar, le premier et le plus simple. Ondelettes de Haar est discontinue et ressemble à une fonction en escalier. Il représente le même ondelette comme Daubechies db1. [29]

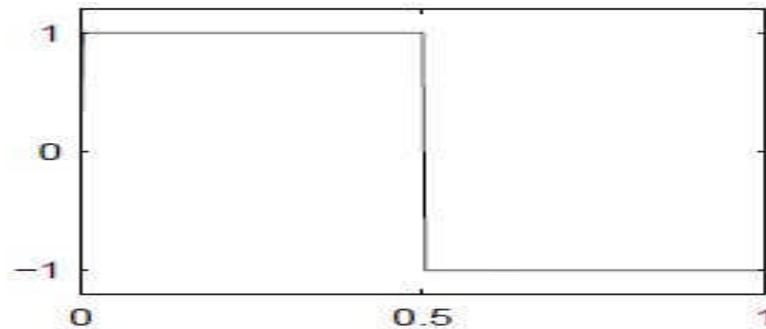


Figure II.10. L'ondelette Haar

#### II.4.3.1.2. Meyer

Les ondelettes de Meyer et mise à l'échelle de fonction sont définies dans le domaine fréquentiel. [29]

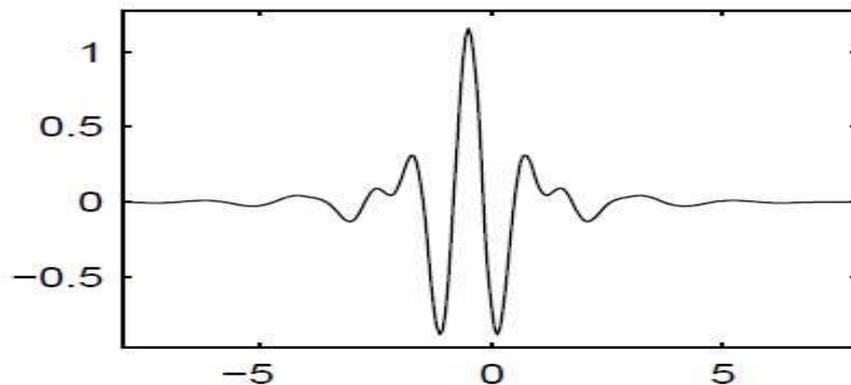


Figure II.11. L'ondelette Meyer

#### II. 4.3.1.3. Morlet

Cette Ondelettes n'a aucune fonction de mise à l'échelle, mais il est explicite. [29]

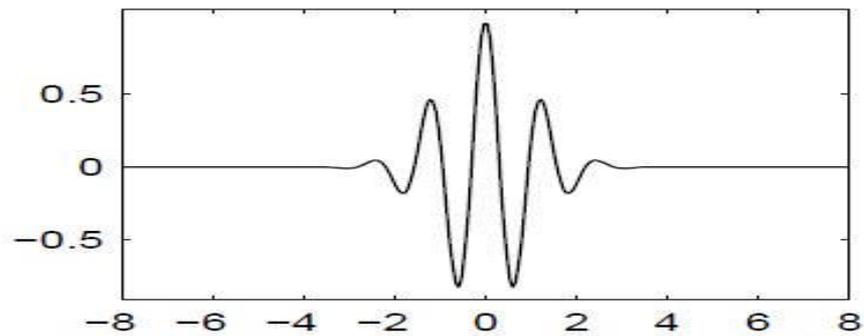


Figure II.12. L'ondelette Morlet

### II. 4.3.2. Exemples d'ondelettes discrètes

Daubechies (DbN), Coiflets (coifN) et Symlets (symN), sont des ondelettes orthogonales et bi orthogonales respectivement inventées par Ingrid Daubechies. Les propriétés de ces familles d'ondelettes sont similaires.

#### II. 4.3.2.1. Daubechies

Ingrid Daubechies, une des étoiles plus brillantes dans le monde de la recherche par ondelettes, inventé ce qu'on appelle des ondelettes orthonormale compacte pris en charge, ce qui rend l'analyse par ondelettes discrètes possible.

Les noms des ondelettes de Daubechies familiales sont rédigés db N, où N est l'ordre et le db le « nom » de l'ondelette. La figure (II.13) montre les formes des ondelettes Daubechies pour différents ordres. [29]

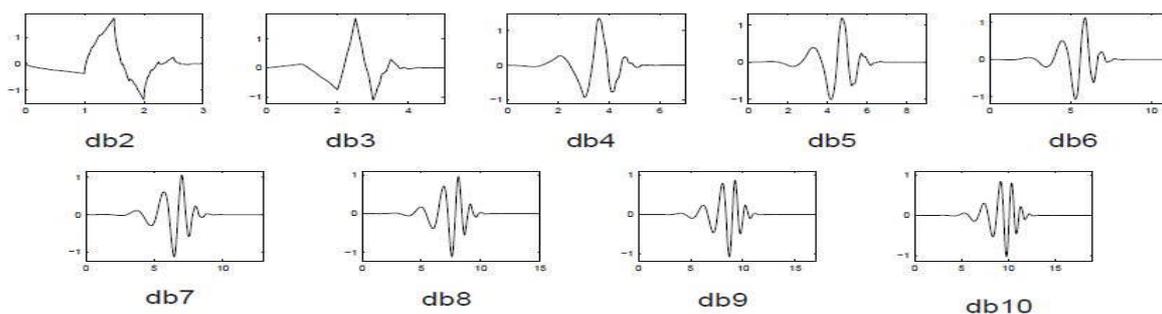
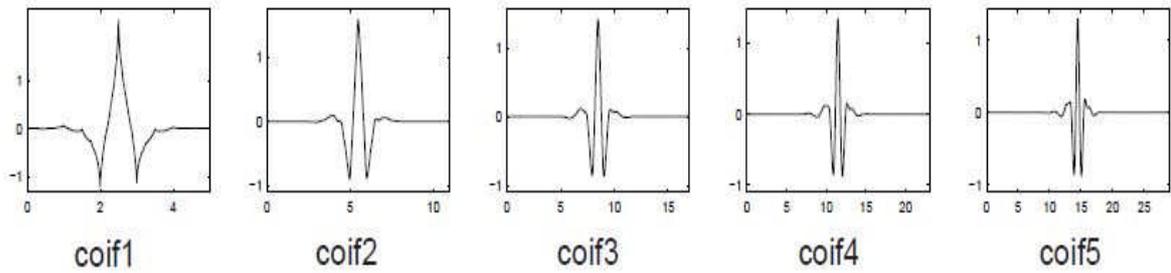


Figure II.13. L'ondelette Daubechie

#### II. 4.3.2.2. Coiflets

Construit par I. Daubechies à la demande de R. Coifman. La figure II.14 montre les formes des ondelettes Coiflets. [29]



### II. 4.3.2.3. Symlets

Les Symlets sont presque symétriques ondelettes proposés par Daubechies comme des modifications à la famille de db. Les propriétés des deux familles ondelettes sont similaires. [29]

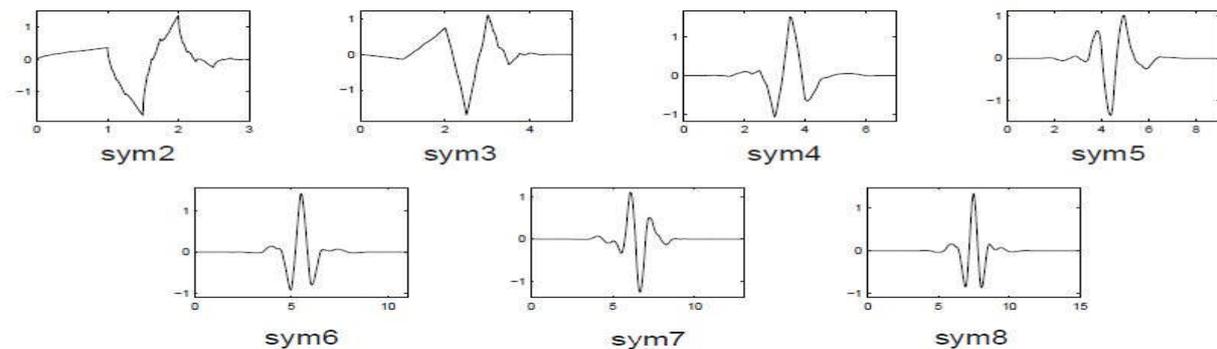


Figure II.15. L'ondelette Symlets

### Conclusion

La transformée en ondelettes présente de nombreux avantages dans le domaine du traitement du signal, elle décompose le signal sur une base de signaux élémentaires obtenus par dilatation et décalage d'une Ondelette de base. Dans ce chapitre nous avons discuté la technique de la Transformée de Fourier rapide (FFT) et la technique d'ondelette qui permettent de traiter les signaux électriques.

***Chapitre III***  
***Application de la FFT***  
***et WT***

## Introduction

Afin d'étudier l'influence de la pollution sur l'état de surface d'isolateur plat F160D\_146 DC des essais ont été effectuée au laboratoire de haute tension de l'université de Tiaret. Ce type d'isolateur a été choisi car il est utilisé par la SONELGAZ Algérienne pour les lignes de haute tension (400kV) entre BECHAR et NAAMA. Pour la pollution non-uniforme, A.Rahouani et A.Smail [18] sont intéressés à l'influence de la largeur des bandes propre et le type de pollution, sur le courant de fuite pour plusieurs niveaux de tension appliquées.

Dans ce chapitre, l'utilisation de la transformée de Fourier rapide (FFT) et la technique des ondelettes ont pour objectif de caractériser l'état de surface du modèle d'isolateur.

### III.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est illustré par la Figure III.1 :

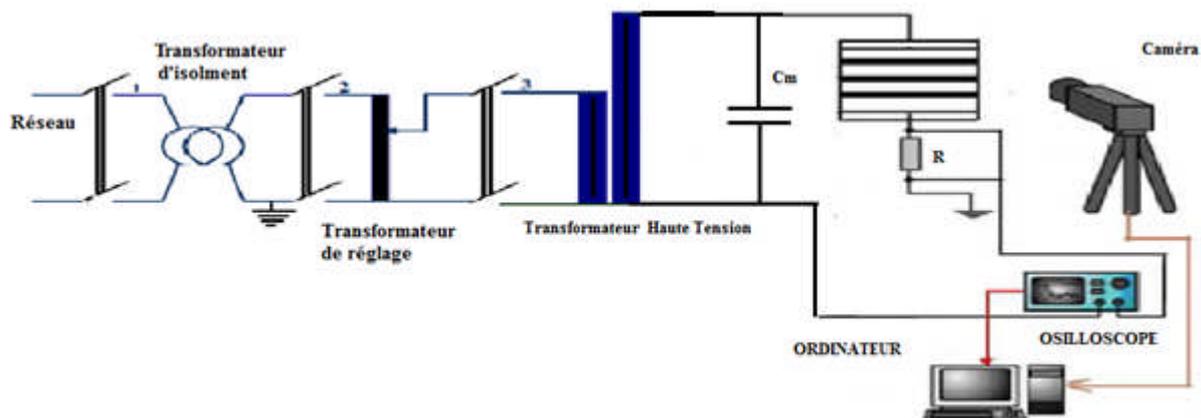


Figure III.1. Circuit d'essai.

L'objet d'essai est un modèle plan d'isolateur standard F160D\_146 DC donné par la Figure III.2.

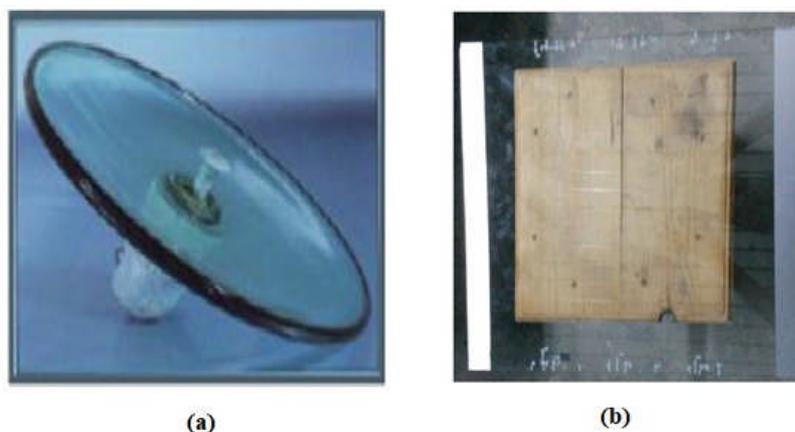


Figure III.2. profil de l'isolateur (a), modèle plan (b).

Les principales dimensions du modèle plan étudié et de l'isolateur réel **F 160 D\_146 DC** sont données dans les tableaux III.1 et III.2 après avoir mesuré les différentes grandeurs à l'aide d'un mètre ruban.

**Tableau III.1.** Caractéristiques de l'isolateur réel (CEI 60305/2005).

Caractéristiques de l'isolateur	Grandeurs
Résistance mécanique	160 kN
Diamètre du disque	420 mm
Poids approximatif	8 kg
Pas (P)	146 mm
Accrochage suivant CEI 60120	20 mm
Ligne de fuite	375 mm

**Tableau III.2.** Dimensions du modèle plan étudié.

Caractéristiques de l'isolateur	Grandeurs
Longueur de la plaque	435 mm
Largeur de la plaque	435 mm
Epaisseur de la plaque	5 mm
Distance inter-électrode à l'état propre	375 mm

### III.2. 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, avant de procéder aux enregistrements du courant de fuite ils ont mesuré la tension de contournement pour les différentes configurations de conductivité et de pollution.

#### III. 2. 1. Influence de la largeur des bandes propres

Les résultats obtenus pour les essais concernant modèles de J. Danis (trois bandes propres alternées) [33], conductivité est 1mS/cm, six pulvérisations sont données dans le tableau III.3.

**Tableau III.3.** Mesures de la tension de contournement avec différentes largeurs des bandes propres.

N° d'essai		Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Moyen
$U_c$ (kV <sub>eff</sub> )	1 cm	124	112	110	115.33
	3 cm	128	124	132	128
	5 cm	114	108	116	112.66

### III. 2. 2. Etude de l'influence du type de pollution

Le tableau III.4 montre les résultats obtenus pour les essais concernant modèles de J. Danis [33], largeur des bandes propres 1cm, six pulvérisations.

**Tableau III.4.** Mesure de la tension de contournement des types de pollution.

N° d'essai		Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Moyen
$U_c$ ( $kV_{eff}$ )	Sable de dunes	126	134	140	133.33
	Sable de sol	124	130	126	126.66
	Sable de mer	61	55	60	58.66

### III.3. Courant de fuite

#### III.3.1. Influence de la largeur des bandes propres sur le courant de fuite

##### III.3.1.1. Larguer des trois bandes propres 1cm

**Tableau III.5.** Mesures de la tension de contournement avec différentes largeurs des bandes propres.

$U_{app}$ (kV)	Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Essai N°4	$I_{fmoyen}$ ( $\mu A$ )
10	48	38	45.1	64.2	48.825
15	82	88	89.9	85.6	86.375
20	100	129	108	121	114.5
30	235	174	214	207	207.5
40	382	359	383	357	370.25
50	1190	1150	1150	1220	1177.5

##### III.3.1.2. Largeur des trois bandes propres 3cm

**Tableau III.6.** Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 3cm).

$U_{app}$ (kV)	Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Essai N°4	$I_{fmoyen}$ ( $\mu A$ )
10	45.3	43.2	41.1	41.7	42.825
20	64.6	64.6	72.8	64.2	66.55
30	82	89	84	89.7	86.175
40	112	118	118	115	115.75
50	145	144	142	142	143.25

### III.3.1.3. Largeur des trois bandes propres 5 cm

**Tableau III.7.** Évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 5cm)

$U_{app}$ (kV)	Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Essai N°4	$I_{fmoyen}$ ( $\mu$ A)
10	28	33.5	29	33.6	31.025
20	56.1	51.3	53.9	62	55.825
30	115	119	108	119	115.25
40	147	148	155	140	147.5
50	221	226	221	208	219

### III. 3. 2. Influence de différents types de pollution sur le courant de fuite

Les tableaux III.8, III.9 et III.10 montrent le courant de fuite en fonction de tension appliquée pour le sable des dunes, de sol et de la mer avec Lpb est 1 cm.

**Tableau III.8.** Mesures du courant de fuite (pollution avec le sable des dunes)

$U_{app}$ (kV)	Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Essai N°4	$I_{fmoyen}$ ( $\mu$ A)
10	61	54	58	61.8	58.7
15	69.1	64.3	65.3	69.9	67.15
20	125	124	119	111	119.75

**Tableau III.9.** Mesures du courant de fuite (pollution avec le sable du sol)

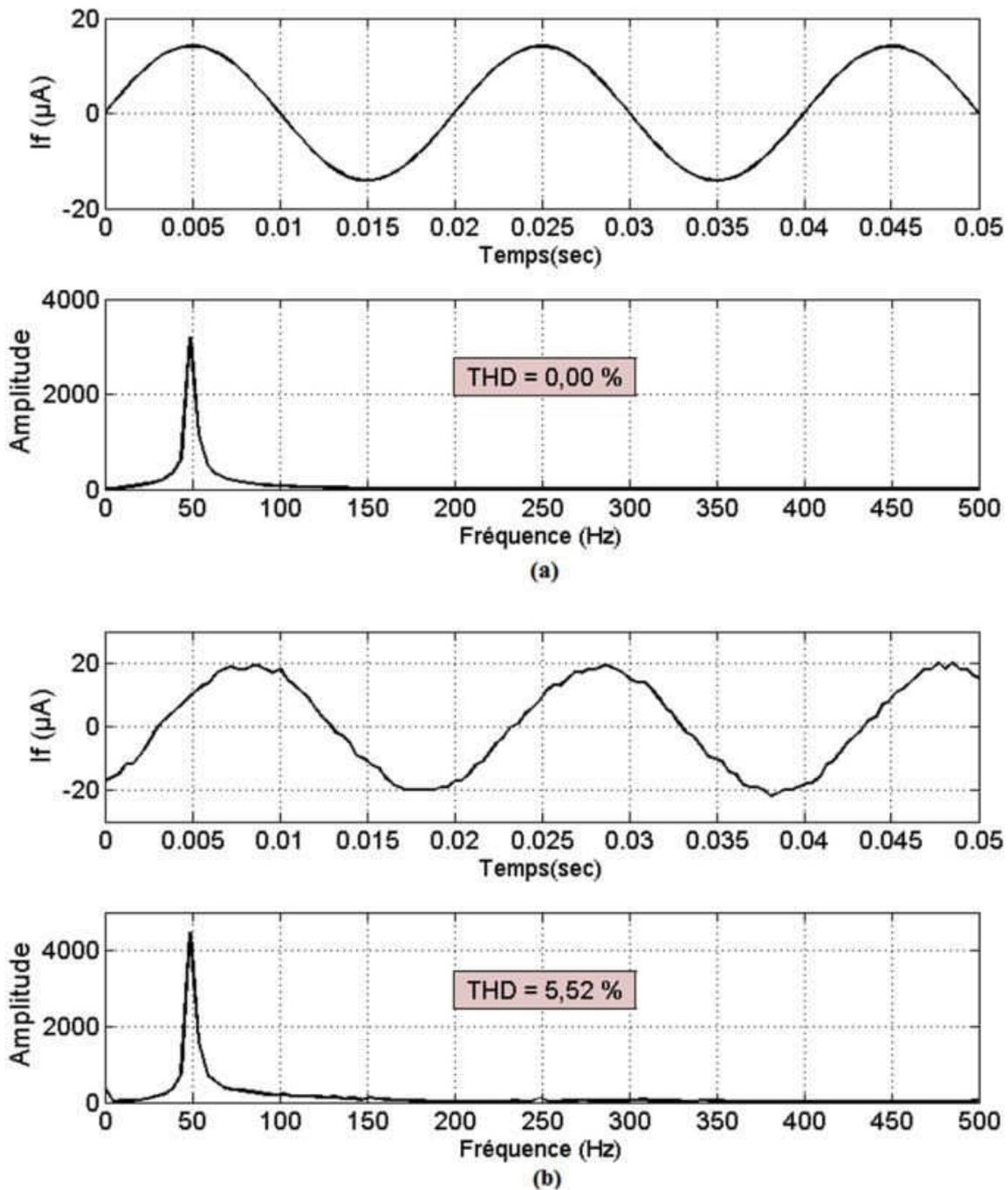
$U_{app}$ (kV)	Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Essai N°4	$I_{fmoyen}$ ( $\mu$ A)
10	120	114	109	118	115.25
15	111	123	120	123	119.25
20	134	137	134	127	133

**Tableau III.10.** Mesures du courant de fuite (pollution avec le sable de la mer)

$U_{app}$ (kV)	Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Essai N°4	$I_{fmoyen}$ ( $\mu$ A)
10	117	121	121	108	116.75
15	227	291	224	268	252.5
20	741	716	735	618	702.5

### III.4. Analyse de la tension appliquée par la Transformée de Fourier Rapide (FFT)

La figure III.3.a montre le signal parfait de la tension appliquée, sa Transformée de Fourier et son taux de distorsion qui est nul tandis que la figure III.3.b illustre le taux de distorsion de la tension appliquée dans le cas de la pollution de sable de mer qui est différent de zéro. Cela montre l'influence de la pollution sur la tension appliquée.



**Figure III.3.** Analyse du signal de la tension appliquée par FFT, (a) signal parfait, (b) signal avec pollution sable de mer.

### III.5. L'analyse spectrale du courant de fuite

Dans cette partie de notre travail, nous nous intéressons à l'analyse spectrale de courant de fuite en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT) qui nous permet de calculer le taux de distorsion harmonique (THD). Pour cela on a utilisé un programme écrit sous MATLAB.

L'objectif de cette étude est de comprendre l'influence du niveau de tension appliquée, de largeur des bandes propres et le type de pollution sur le courant de fuite. Cela a pour le but de voir l'influence de la pollution sur l'état de surface d'isolateur haute tension par le taux de distorsion harmonique.

#### III.5.1. L'influence de la tension appliquée sur le THD du courant de fuite

Les figures III.4, III.5 et III.6 montrent l'amplitude des signaux de courant de fuite en haut et leurs transformées de Fourier en bas.

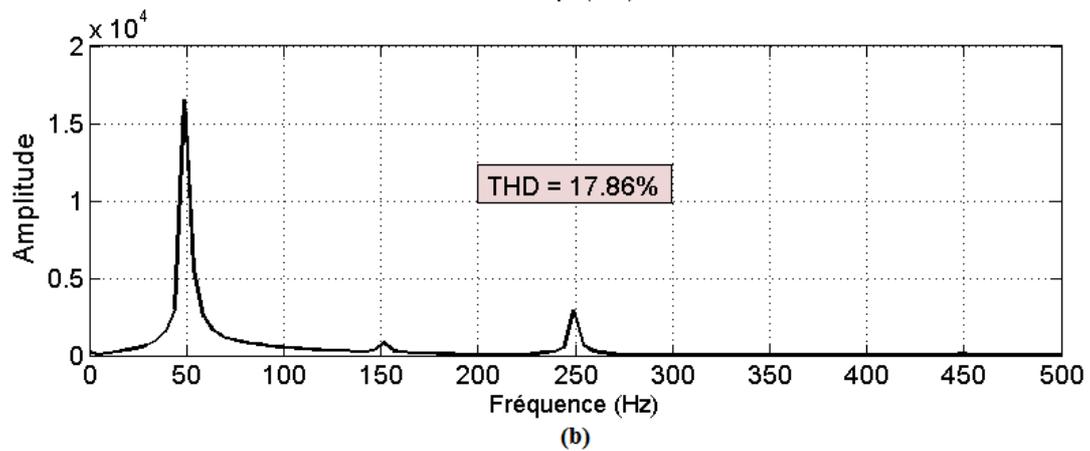
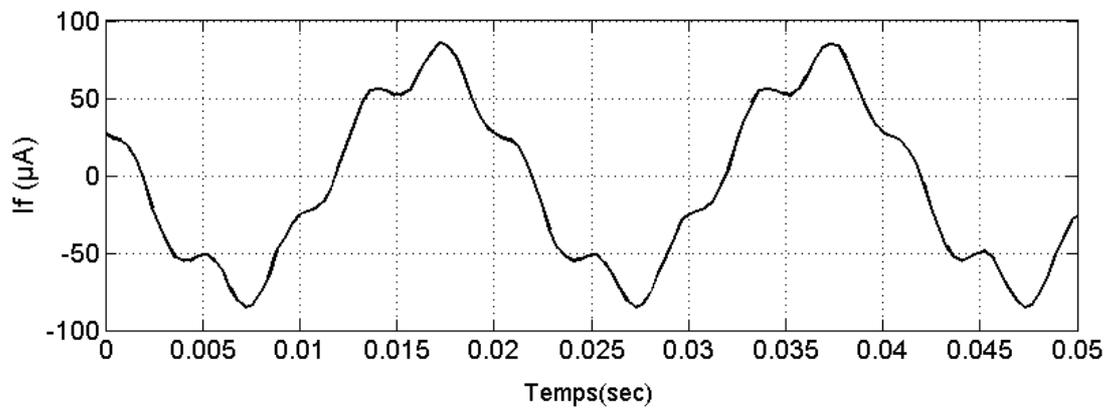
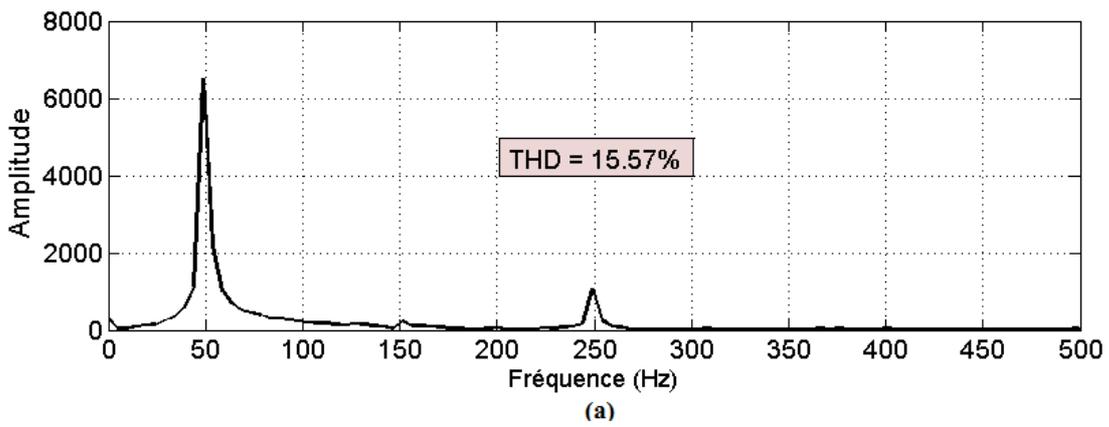
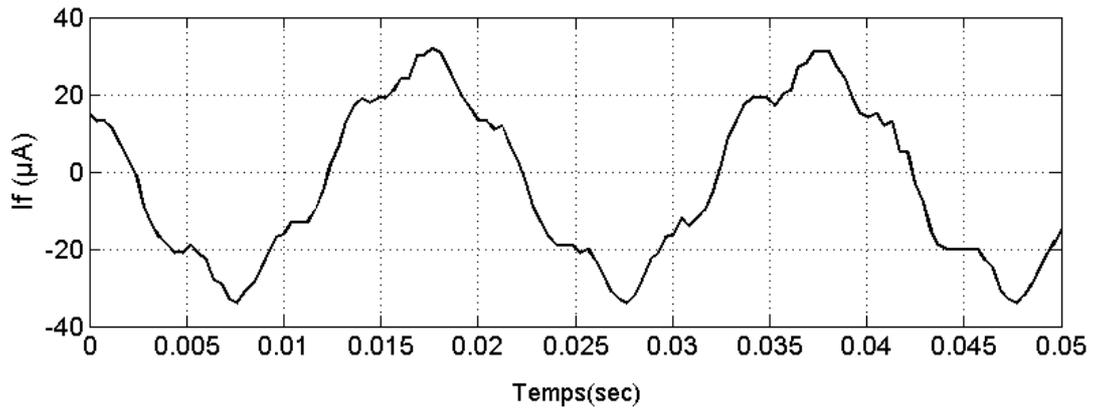
La figure III.4 (en haut) montre la forme d'onde de courant de fuite Pour  $L_{bp}$  égale à 1cm qui a un effet résistif car c'est le cas le plus pollué tandis que les figures III.5 et III.6 montrent les formes des ondes de courant de fuite qui sont déformées en raison de l'effet capacitif de la bande propre pour  $L_{bp}$  égale à 3 et 5cm.

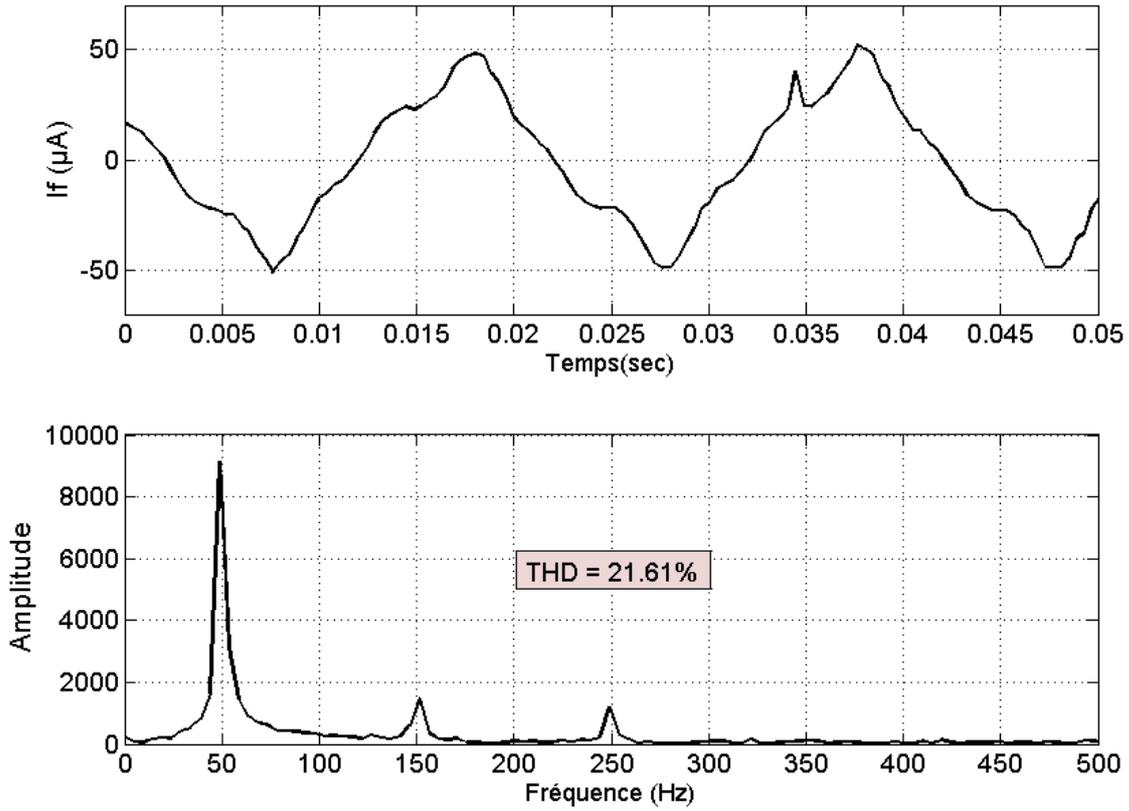
La figure III.4 montre que l'amplitude de la 5<sup>ème</sup> harmonique est plus grande que celle de la 3<sup>ème</sup> harmonique pour les tensions (10kV et 30kV) tandis que la 3<sup>ème</sup> harmonique est supérieure à celle de la 5<sup>ème</sup> harmonique pour 50kV. Plusieurs recherches [4-5] ont montrés que la présence d'arc est à l'origine de l'augmentation considérable de l'amplitude de la 3<sup>ème</sup> harmonique.

Les figures (III.5 et III.6) montrent que l'amplitude de la 5<sup>ème</sup> harmonique est toujours supérieure à celle de la 3<sup>ème</sup> harmonique et cette dernière augmente en fonction de la tension.

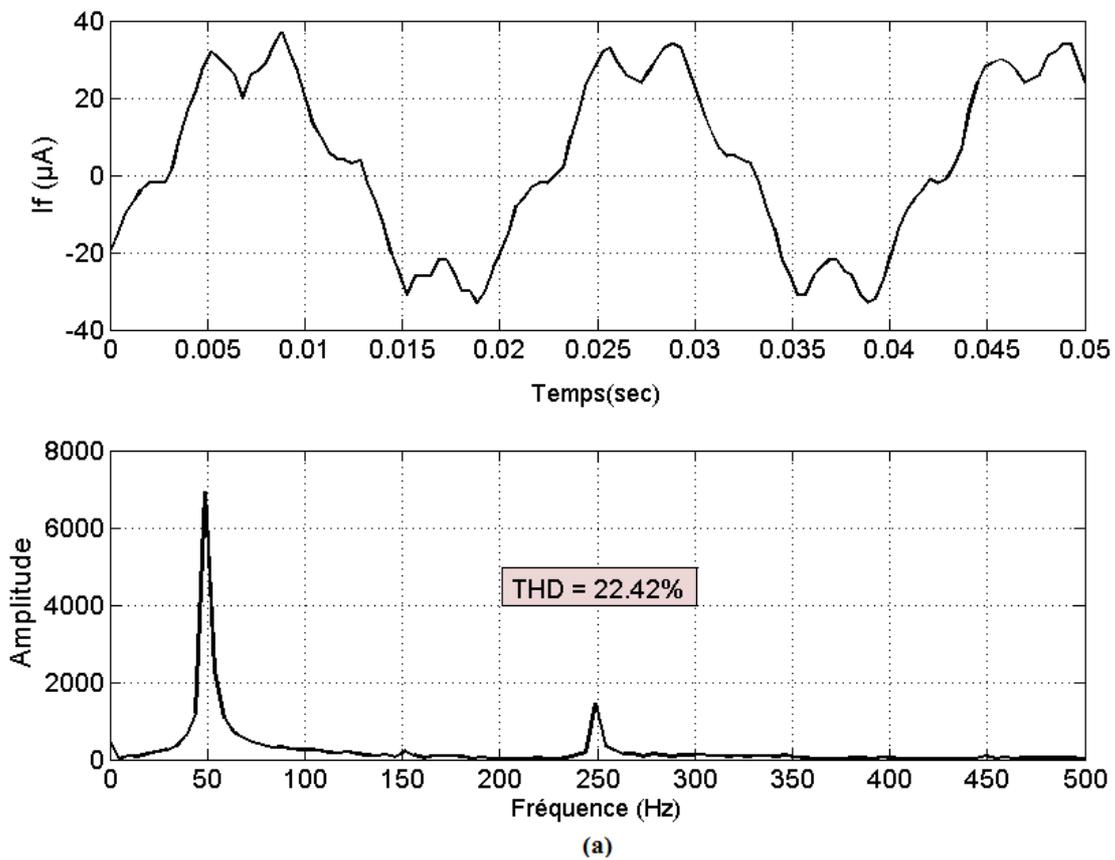
La figure III.7 montre la variation du taux de distorsion harmonique de courant de fuite en fonction des tensions appliquées (10kv, 30kv et 50kv) sous trois valeurs de largeur des bandes propres (1 cm, 3 cm et 5 cm).

D'après la figure III.7, nous remarquons que pour la largeur des bandes propres 1cm le THD est proportionnel avec la tension appliquée mais pour la largeur des bandes propres 5cm le THD est inversement proportionnel avec  $U_{app}$ . Pour la largeur des bandes propres 3cm, nous constatons que le THD au début augmente avec  $U_{app}$  ensuite il diminue donc la variation de THD n'est pas toujours corrélée avec la tension appliquée et ces résultats sont en bon concordance à ceux trouvés par N.Megrache [34].





(c)  
**Figure III.4.** Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude (en bas) pour les niveaux des tensions appliquées de (a) 10kV, (b) 30kV, (c) 50kV pour  $L_{bp} = 1\text{cm}$  ;



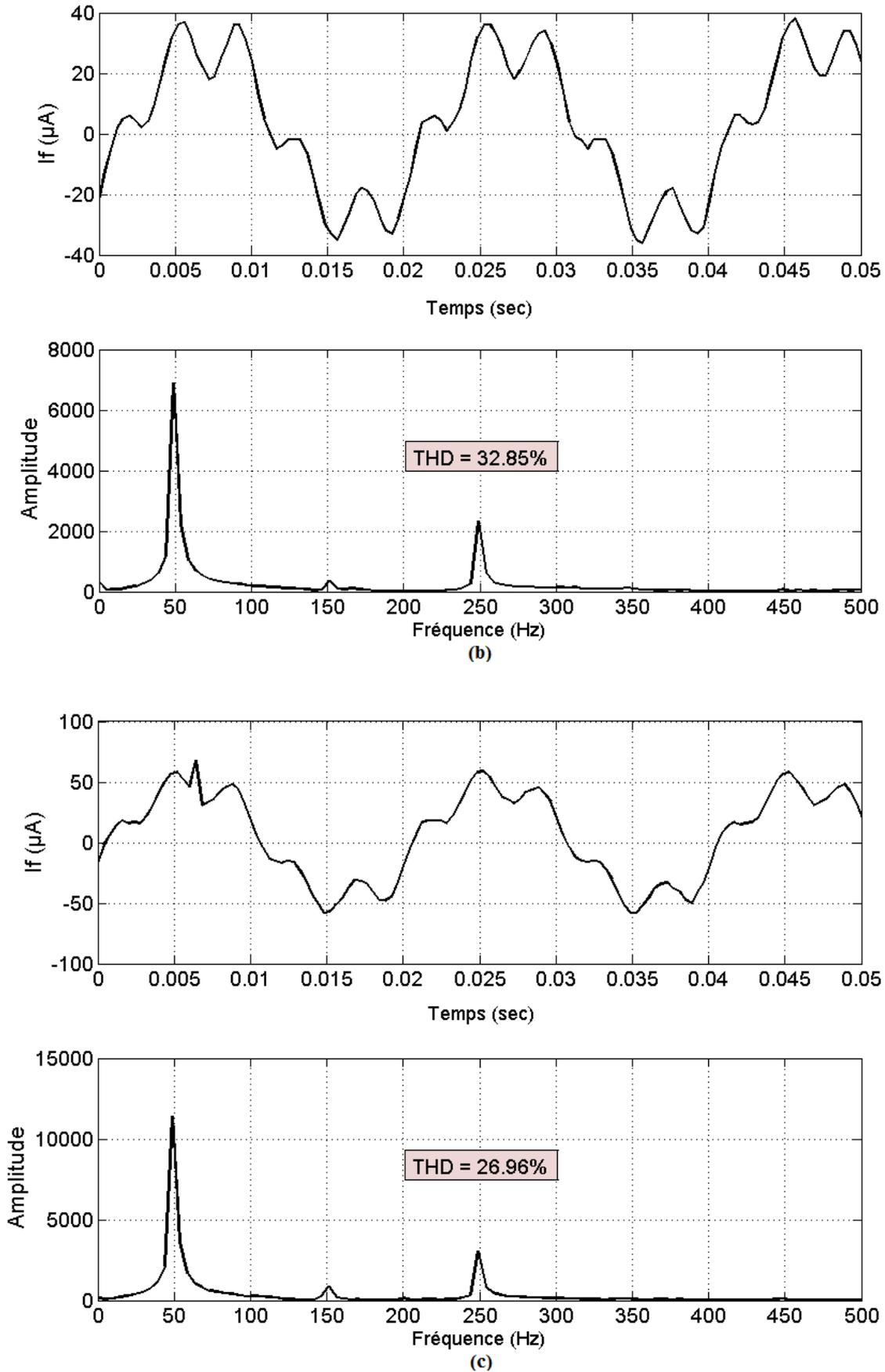
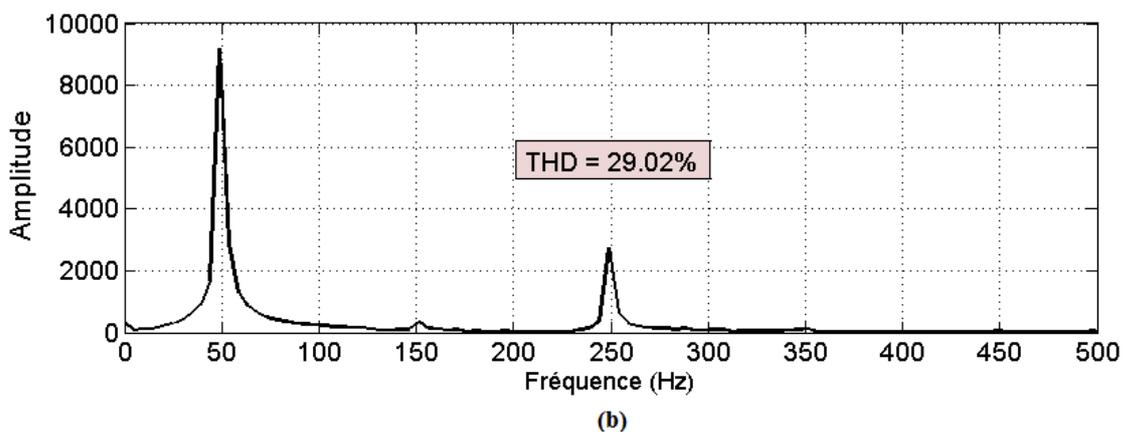
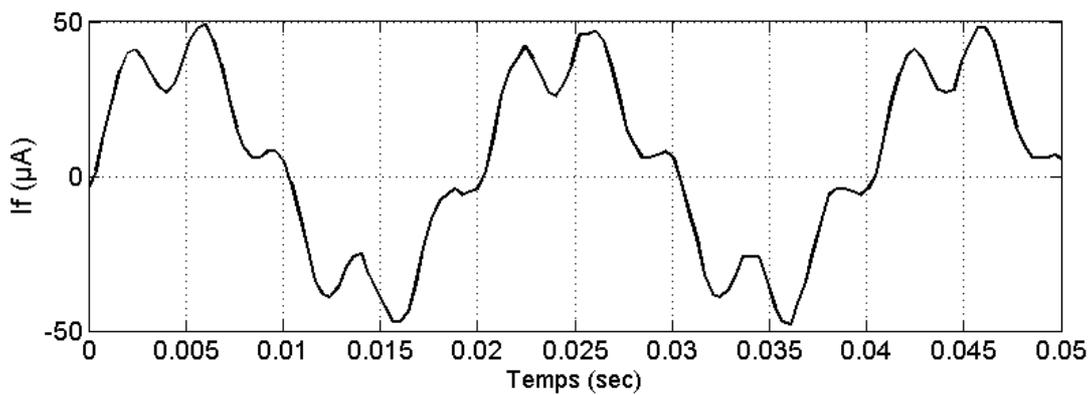
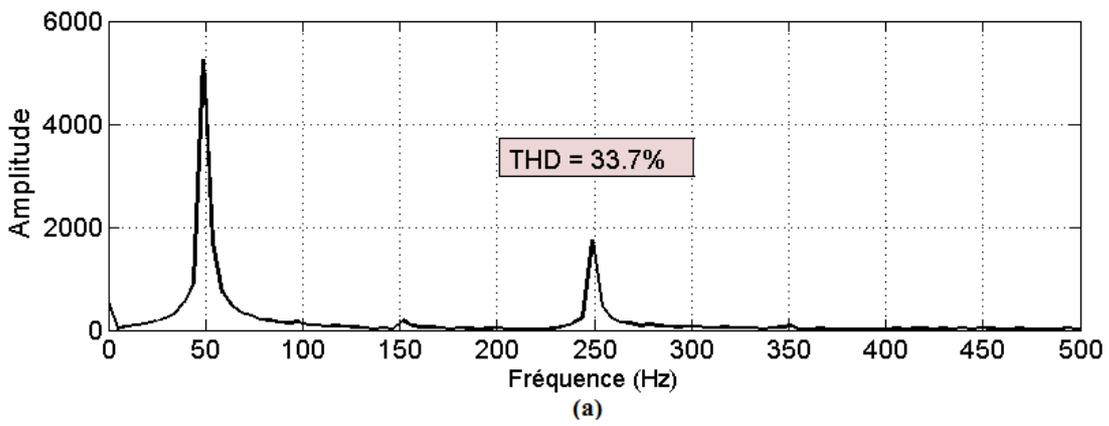
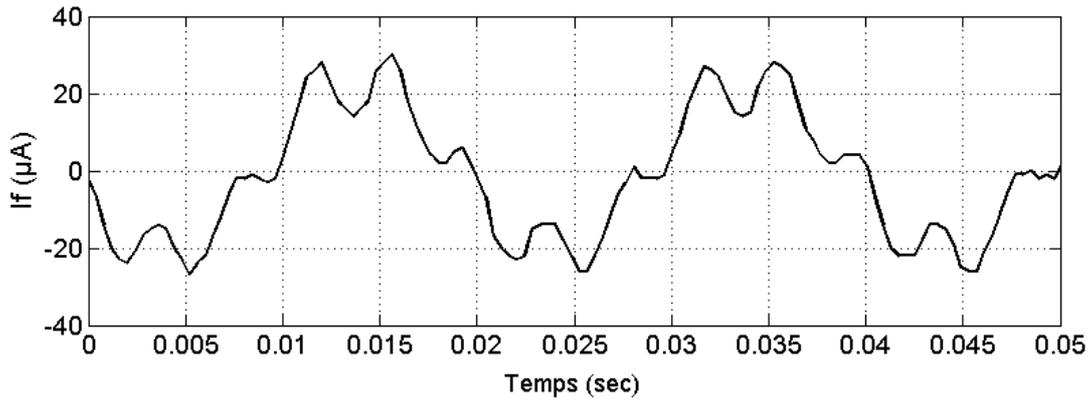


Figure III.5. Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d’amplitude (en bas) pour les niveaux des tensions appliquées de (a) 10kV, (b) 30kV, (c) 50kV pour  $L_{bp} = 3cm$ .



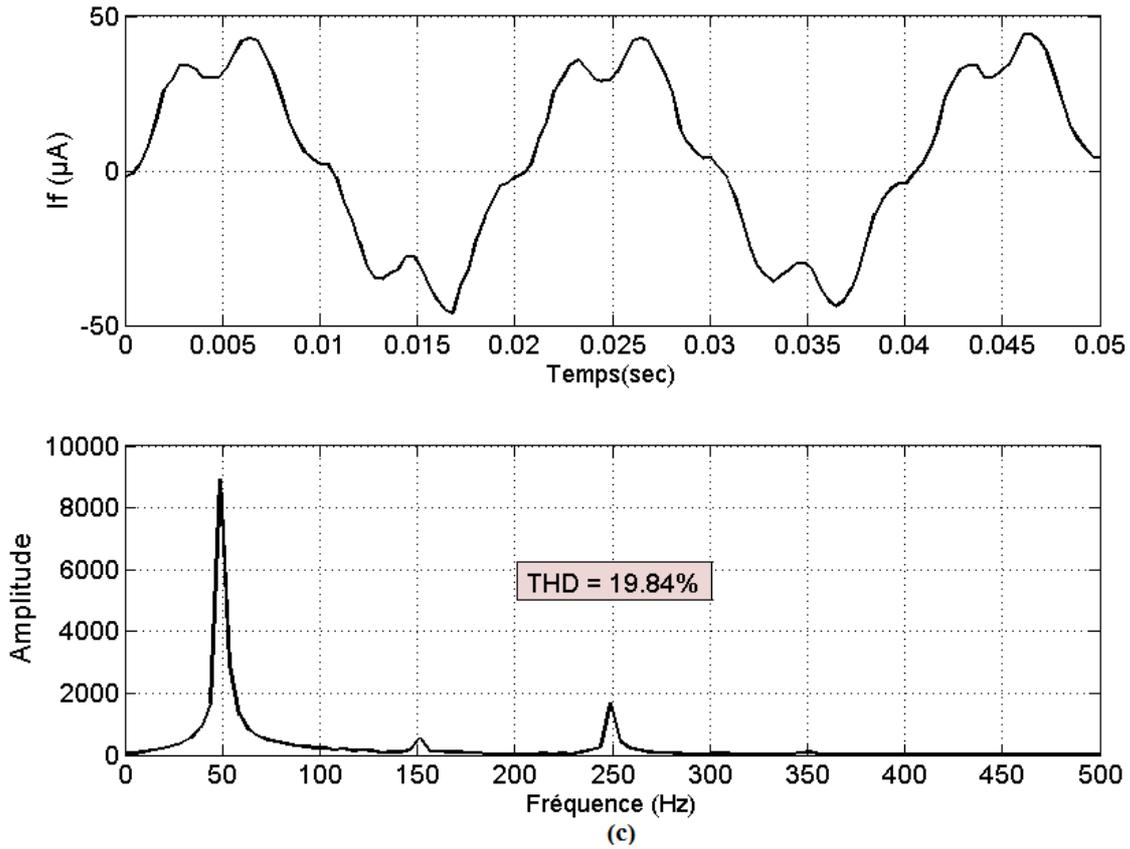


Figure III.6. Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude (en bas) pour les niveaux des tensions appliquées de (a) 10kV, (b) 30kV, (c) 50kV pour  $L_{bp} = 5cm$  ;

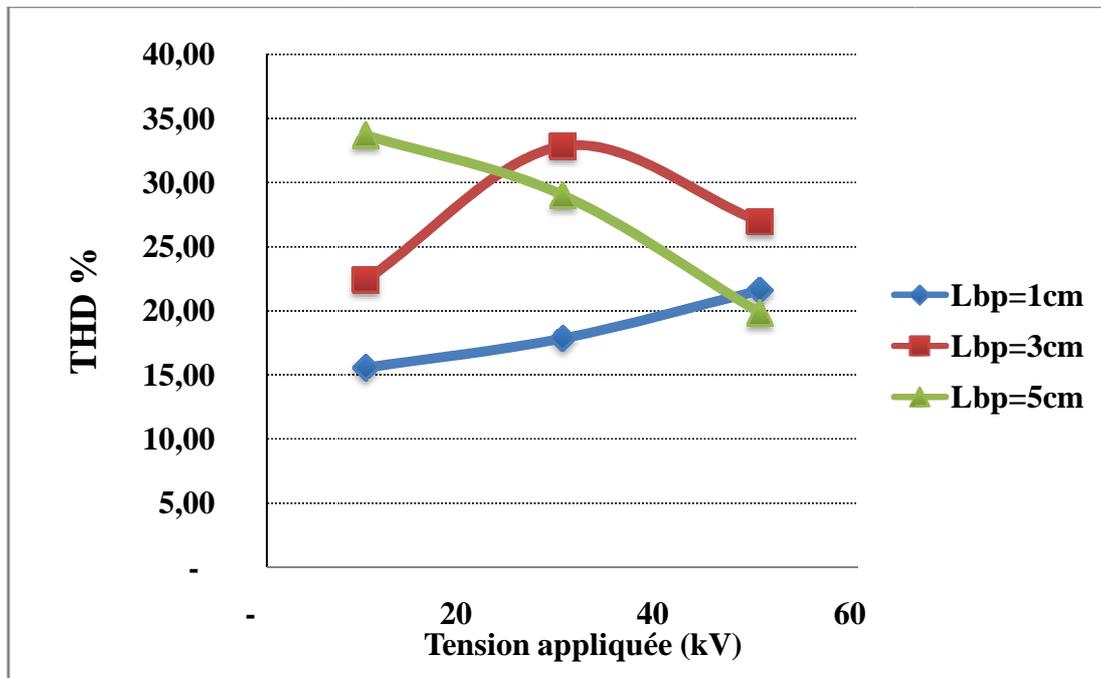


Figure III.7. Variation du taux de distorsion harmonique en fonction de la tension appliquée

### III.5.2. L'influence de la largeur des bandes propres sur le THD du Courant de fuite

La figure III.8 montre la variation du taux de distorsion harmonique de courant de fuite en fonction de la largeur des bandes propres (1cm, 3cm et 5cm), sous trois niveaux de tension appliqués (10kv, 30kv et 50kv).

D'après la figure III.8, nous remarquons que pour 10kV le THD augmente avec l'augmentation du largeur des bandes propres mais pour 30kV et 50kV, nous constatons que le THD au début augmente avec la largeur des bandes propres ensuite il diminue.

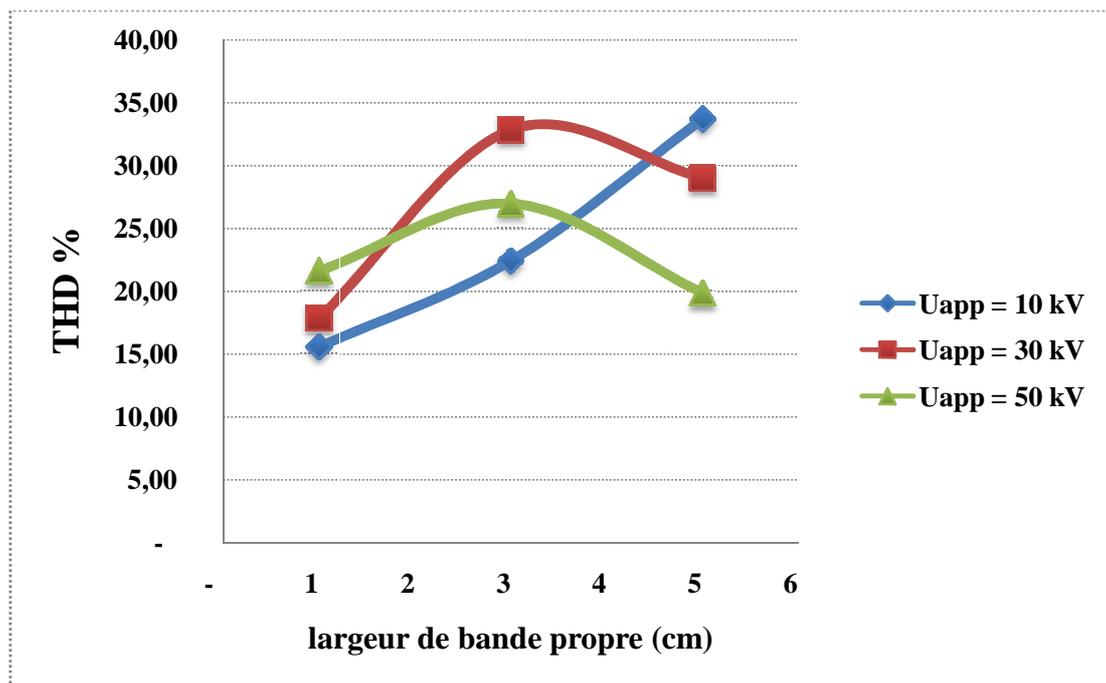


Figure III.8. Variation du taux de distorsion harmonique en fonction de la largeur des bandes propres.

### III.5.3. L'influence de type de pollution sur le THD du Courant de fuite

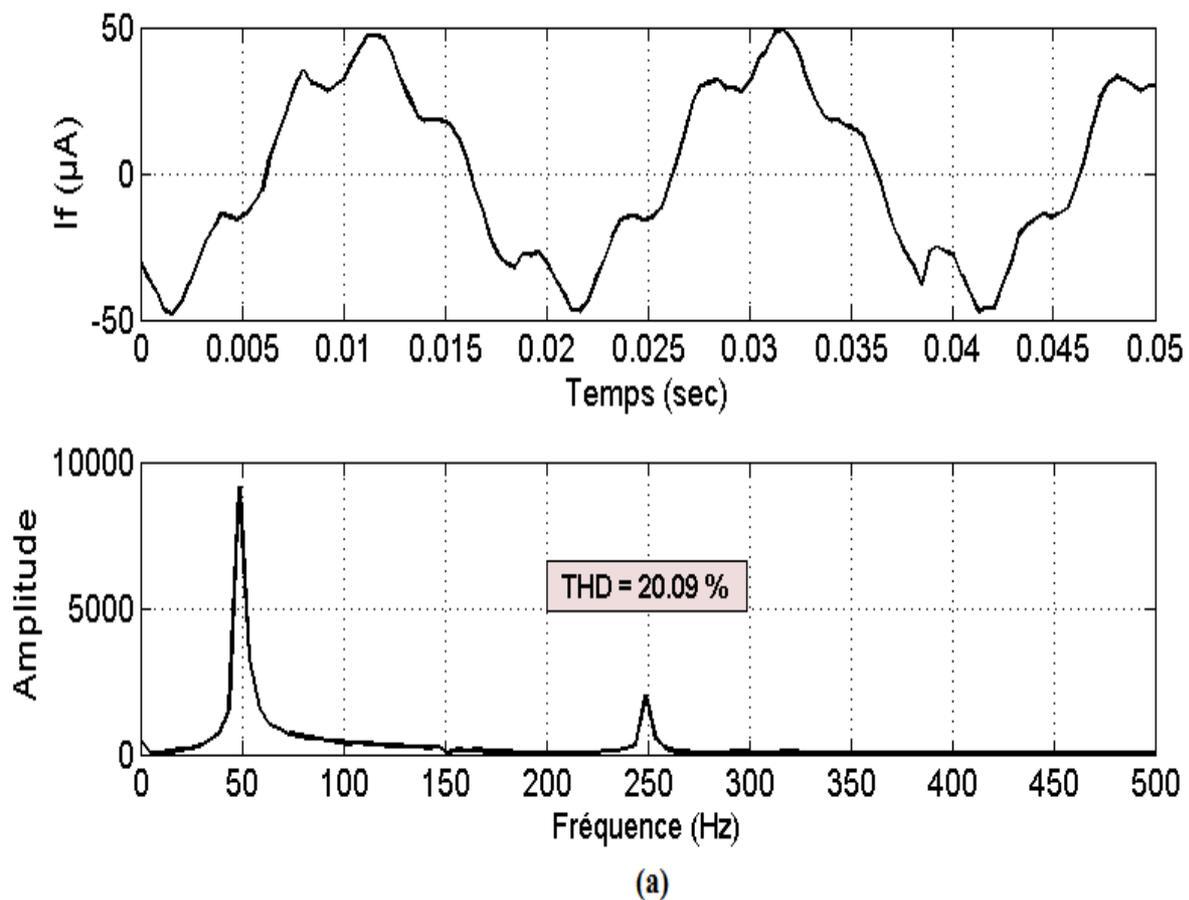
Les figures III.9, III.10 et III.11 montrent l'amplitude des signaux de courant de fuite en haut et leurs transformées de Fourier en bas.

La figure III.9 (en haut) montre la forme d'onde de courant de fuite Pour sable de dune qui a un effet capacitif tandis que les figures III.10 et III.11 montrent les formes des ondes de courant de fuite qui sont déformées en raison de l'effet résistif de deux types de pollution (sable de sol et sable de mer).

Les figures (III.9, III.10 et III.11) montrent que l'amplitude de la 5<sup>ème</sup> harmonique est toujours supérieure à celle de la 3<sup>ème</sup> harmonique et cette dernière augmente en fonction de la tension.

La figure III.12 montre la variation du taux de distorsion harmonique en fonction de tension appliqués (10kv, 30kv et 50kv) sous différent type de sable (sable de dune, sol et mer) pour une largeur de la bande propre 1 cm. D'après la figure III.12, nous constatons que la variation de THD n'est pas toujours corrélée avec la tension appliquée.

La figure III.13 représente l'allure du taux de distorsion harmonique en fonction de la nature de pollution exercée sous tensions appliquées de 10kV, 15kV, 20kV. Cette figure montre que le taux de distorsion de courant de fuite est important pour le sable de dune ensuite de sol et enfin de mer.



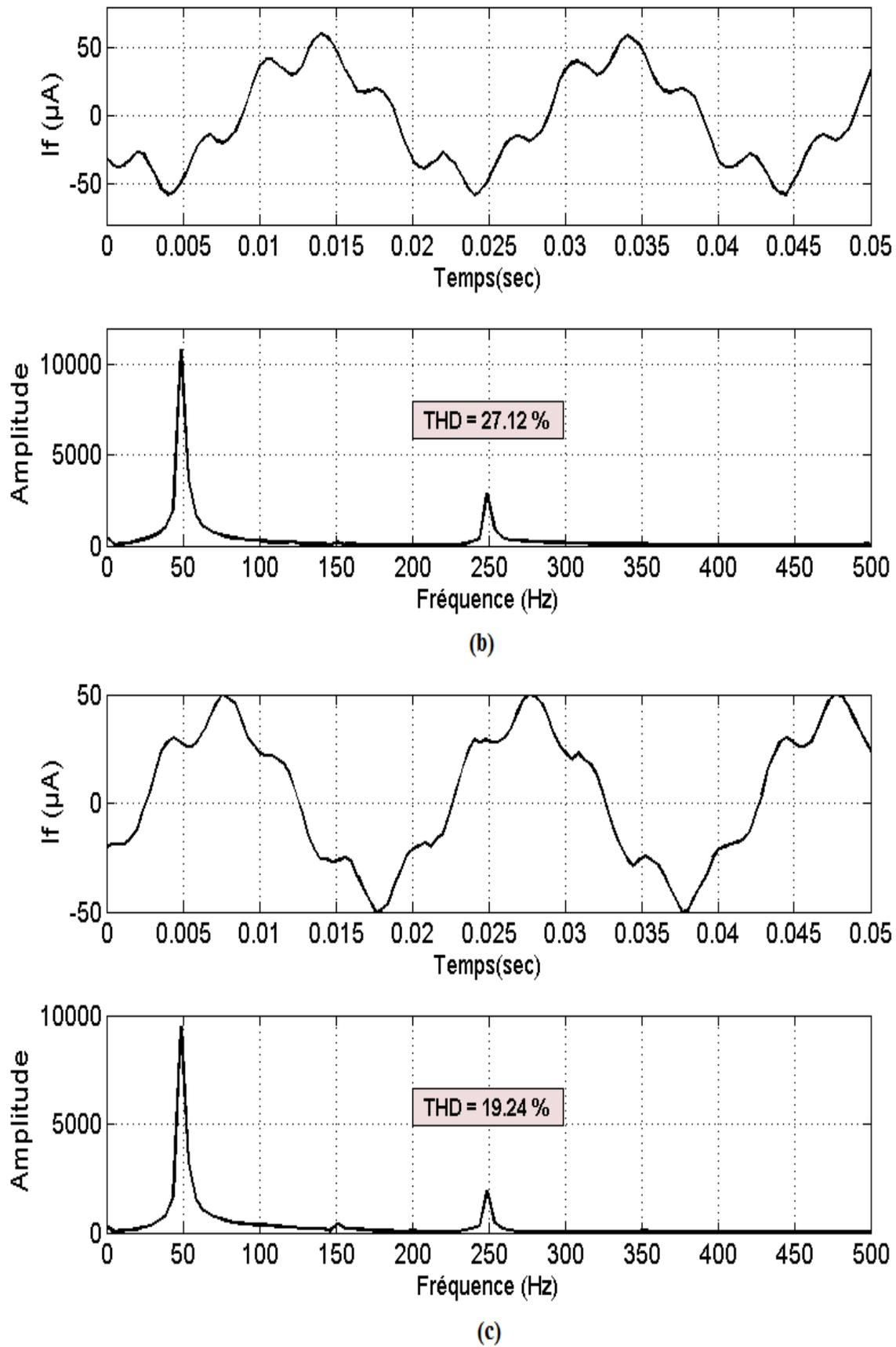
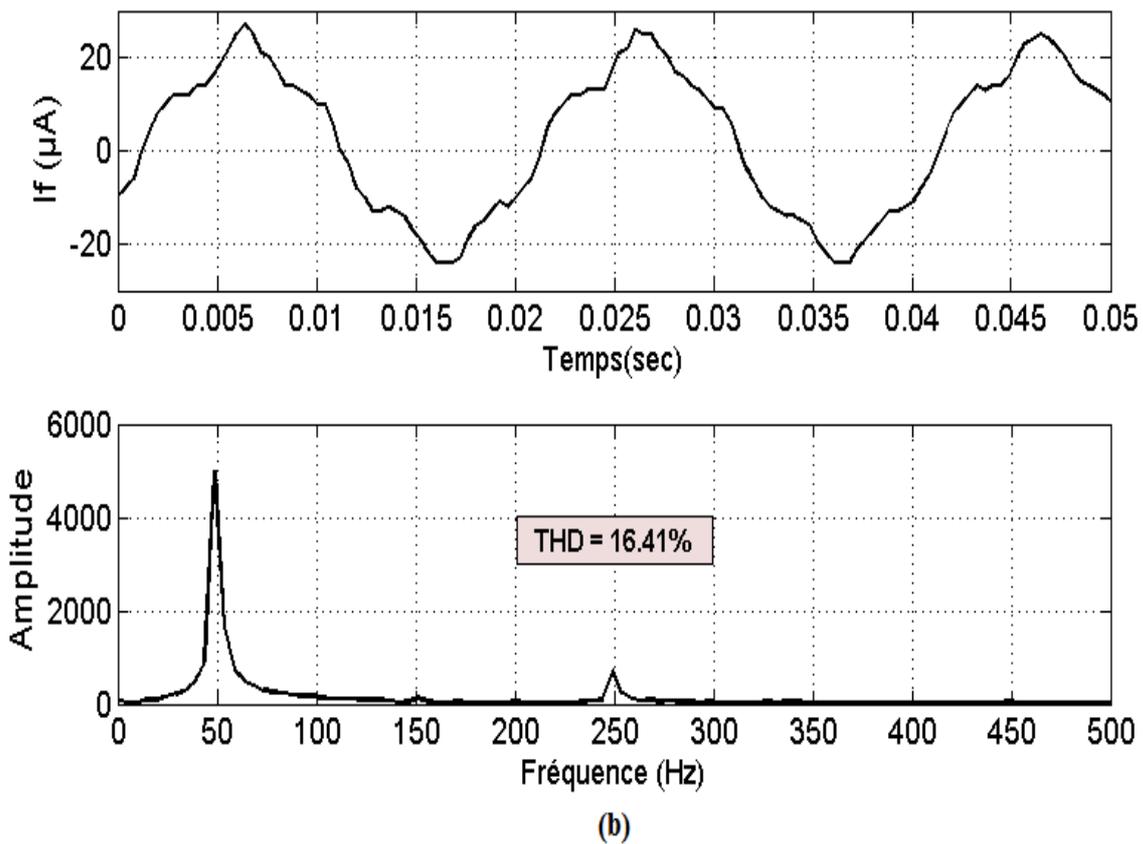
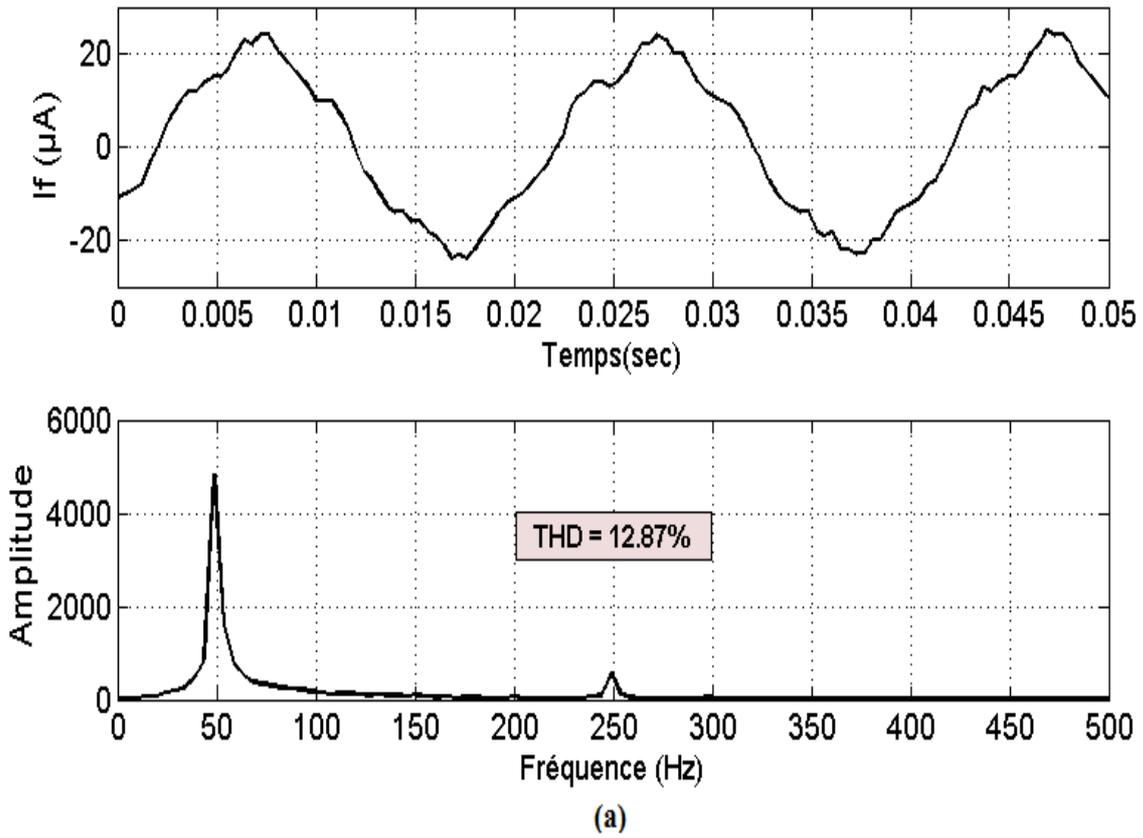


Figure III.9. Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d’amplitude (en bas) pour les niveaux des tensions appliquées de (a) 10kV, (b) 15kV, (c) 20kV pour Sable de dune.



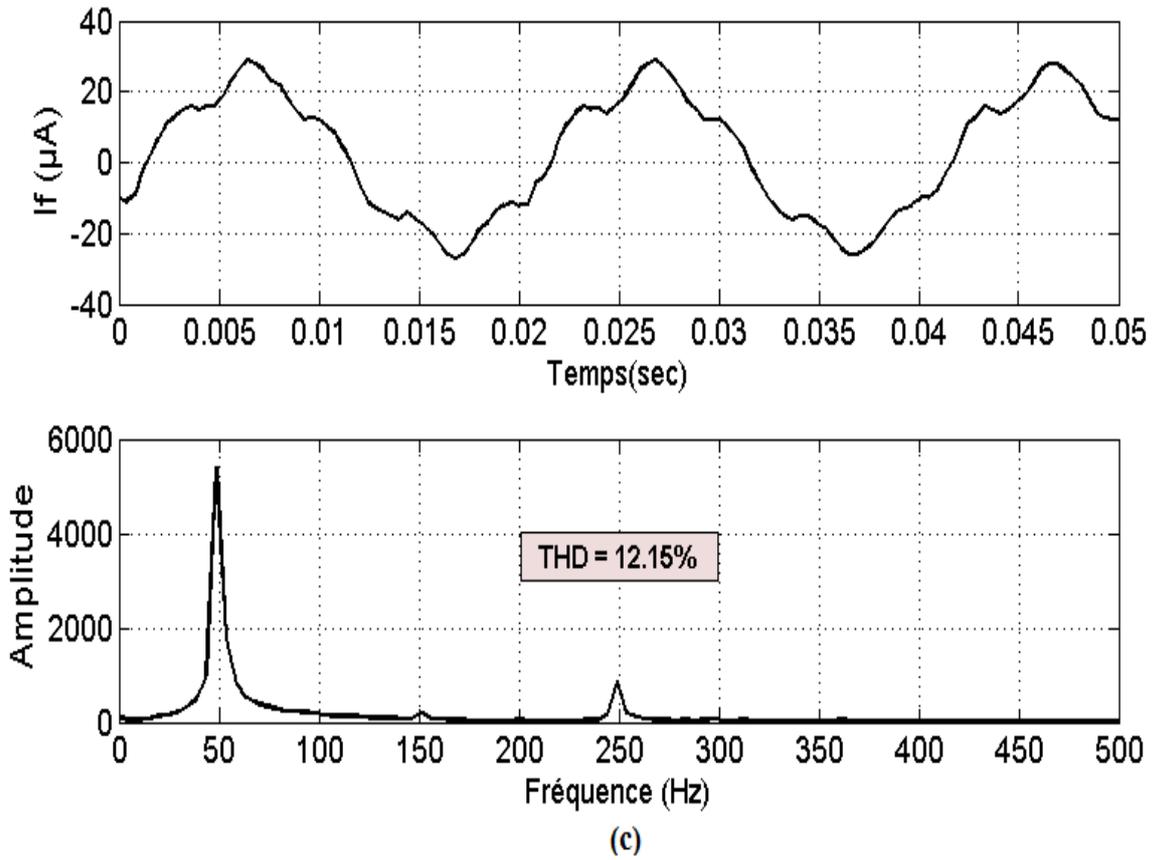
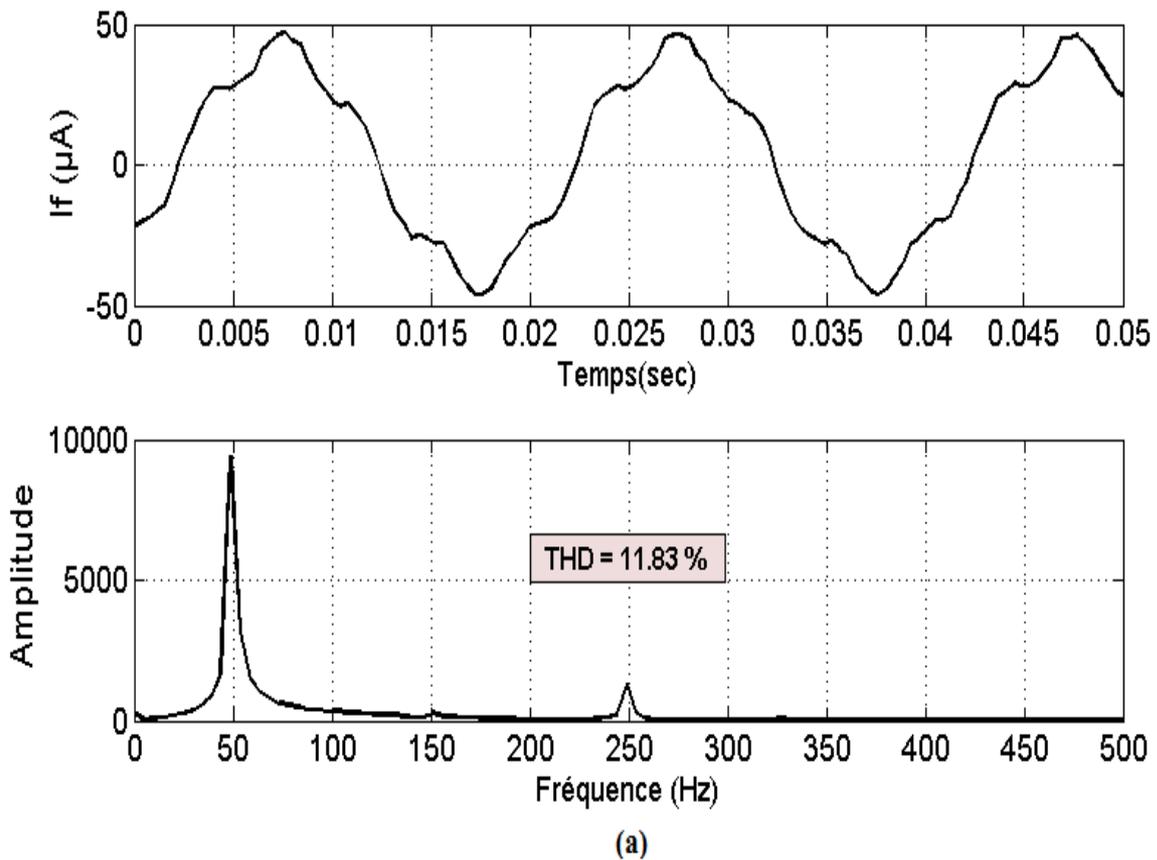


Figure III.10. Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d’amplitude (en bas) pour les niveaux des tensions appliquées de (a) 10kV, (b) 15kV, (c) 20kV pour Sable de sol.



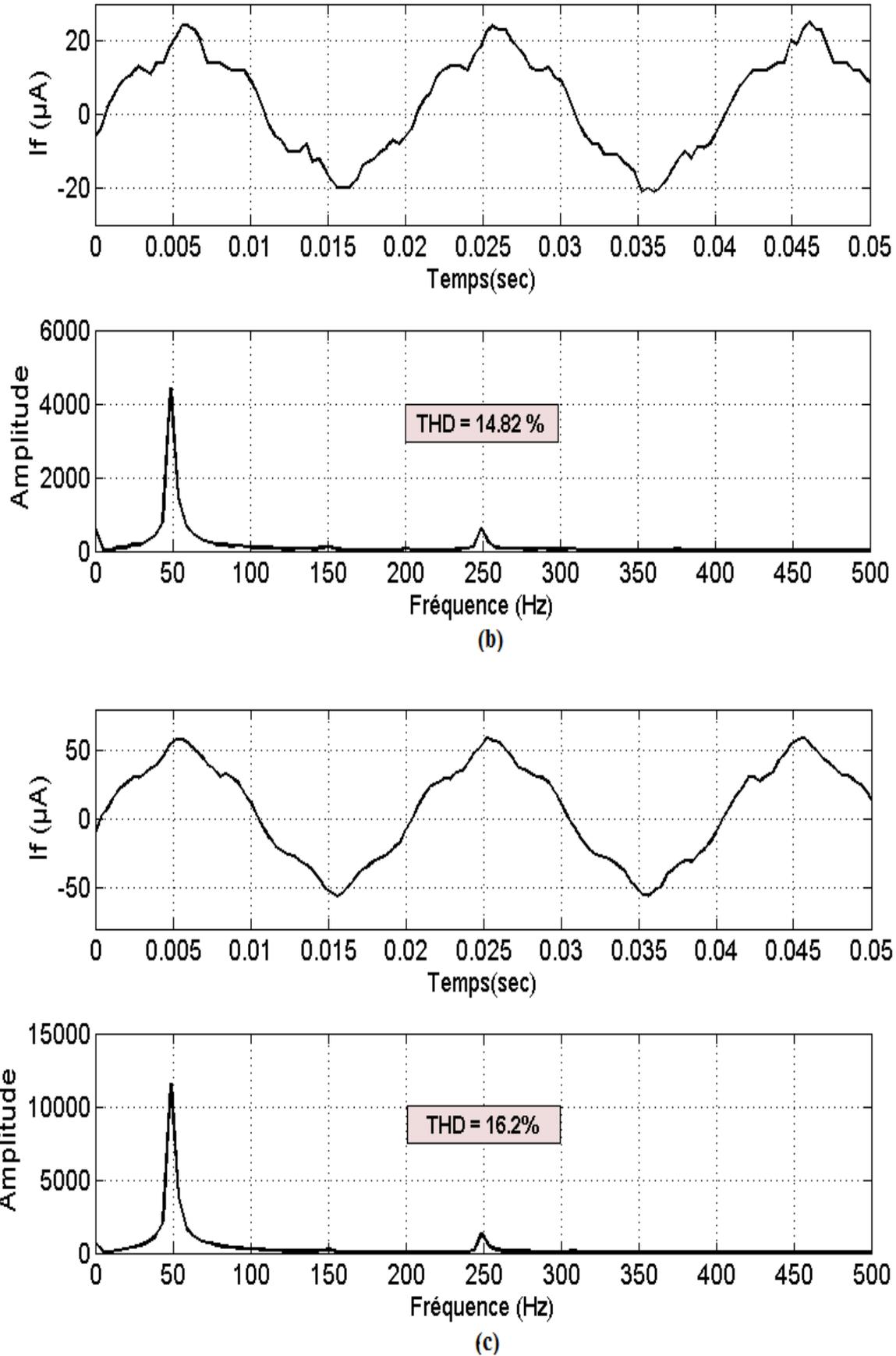


Figure III.11. Signal du courant de fuite (en haut) et le spectre d'amplitude (en bas) pour les niveaux des tensions appliquées de (a) 10kV, (b) 15kV, (c) 20kV pour Sable de mer.

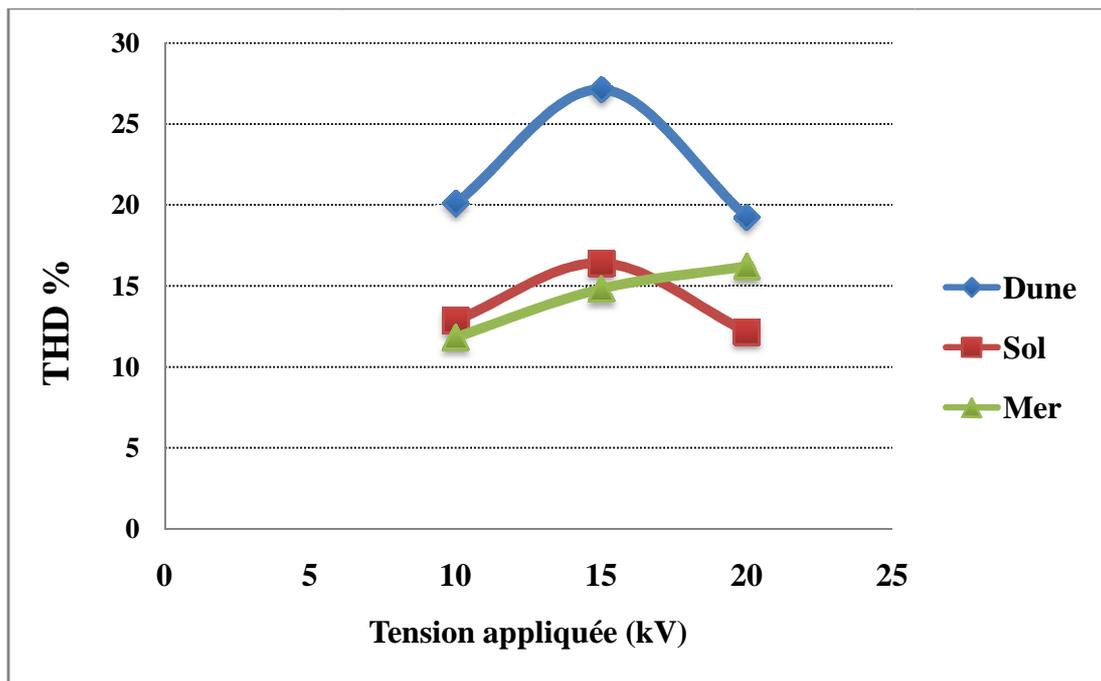


Figure III.12. Variation du taux de distorsion harmonique en fonction de type de pollution.

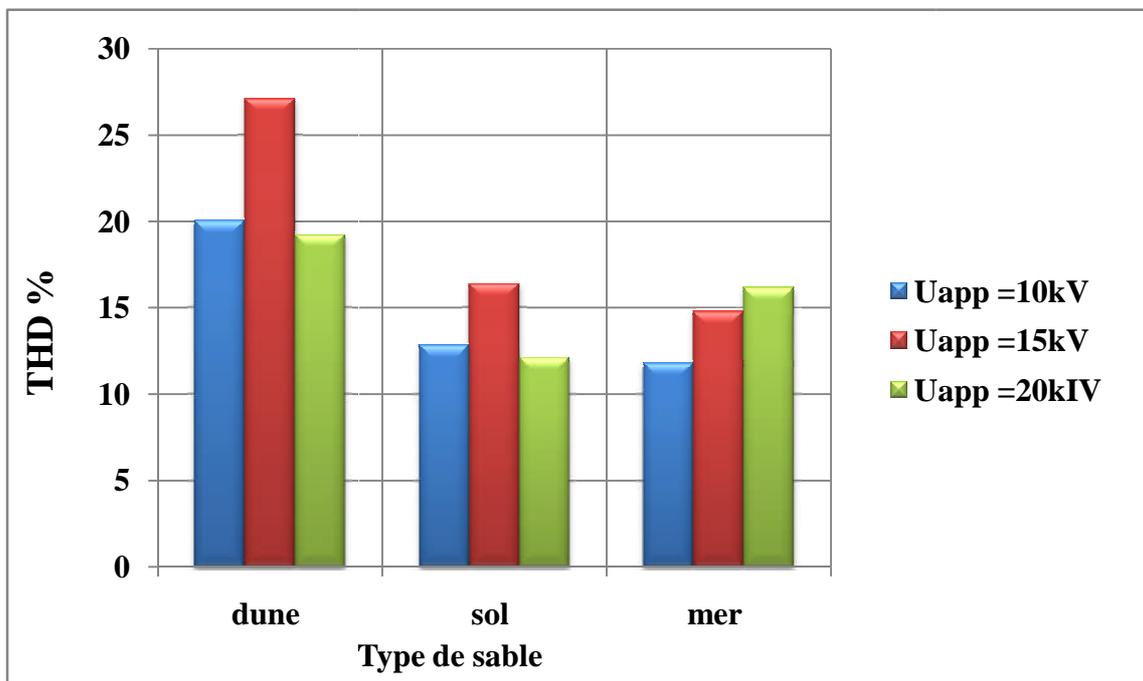


Figure III.13. Taux de distorsion harmonique pour trois types de couches polluantes sous tensions appliqués de 10kV, 15kV, 20kV.

### III.6. Analyse par la Technique d'ondelette

#### III.6.1. Choix de l'ondelette mère (analysante)

L'extraction des informations des signaux transitoires ou permanents nécessite des choix judicieux pour certains paramètres tels que le type de l'ondelette, l'ordre de l'ondelette et le niveau de décomposition.

Dans notre travail, nous choisissons d'utiliser l'ondelette de morlet pour le traitement des signaux par la CWT car elle procure une bonne résolution temporelle et fréquentielle pour le calcul des coefficients de la transformée en ondelette. Ces derniers nous renseignent sur le "degré" de corrélation qui existe entre le signal original et l'ondelette analysante à partir de leurs valeurs numériques pour des échelles données.

Le scalogramme d'un signal constitue un formidable outil pour la représentation des coefficients d'un signal dans le domaine temps-échelle et permet une meilleure étude du contenu fréquentiel du signal pour une possible interprétation du phénomène observé.

Nous choisissons l'ondelette Daubechies 4 (db4) pour l'analyse par ondelette discrète (DWT). On a ce choix pour l'appliquer sur le signal du courant de fuite qui affiche des pics de hautes fréquences pour certain niveau de tension. Cette ondelette semble adéquate pour la détermination des bandes fréquentielles qui caractérisent les perturbations de hautes fréquences via l'analyse multi-résolution. A cet effet, la détermination du niveau de décomposition est importante pour récupérer de bonnes informations sans trop de calculs.

#### III.6.2. Choix du l'ordre (nombre de niveau) de décomposition

Le nombre approprié de niveaux de la décomposition ( $N_{niv}$ ) dépend de la fréquence d'échantillonnage ( $f_e$ ) du signal à analyser. Pour chacune des approches de diagnostic basées sur la décomposition en ondelettes, le nombre de niveau doit être choisi judicieusement afin de permettre aux signaux à niveau élevé (approximation et détails) de couvrir toute la gamme des fréquences.

Le niveau de décomposition nécessaire est calculé d'après la relation:

$$N_{niv} = \text{rond} \left( \frac{\log \left( \frac{f_e}{f_s} \right)}{\log 2} \right) + 2 \quad (\text{III. 1})$$

Avec :

$f_s$  : fréquence du réseau,  $f_e$  : fréquence d'échantillonnage. Connaissant  $f_s=50\text{Hz}$  et  $f_e=2.5\text{kHz}$ , on peut calculer le nombre de décompositions appropriés qu'est égales à :

$$N_{\text{niv}} = \text{rond} \left( \frac{\log \left( \frac{2500}{50} \right)}{\log 2} \right) + 2 = 8 \text{ niveaux} \quad (\text{III. 2})$$

### III.6.3. Analyse de la tension appliquée par la Transformé d'Ondelette Continue

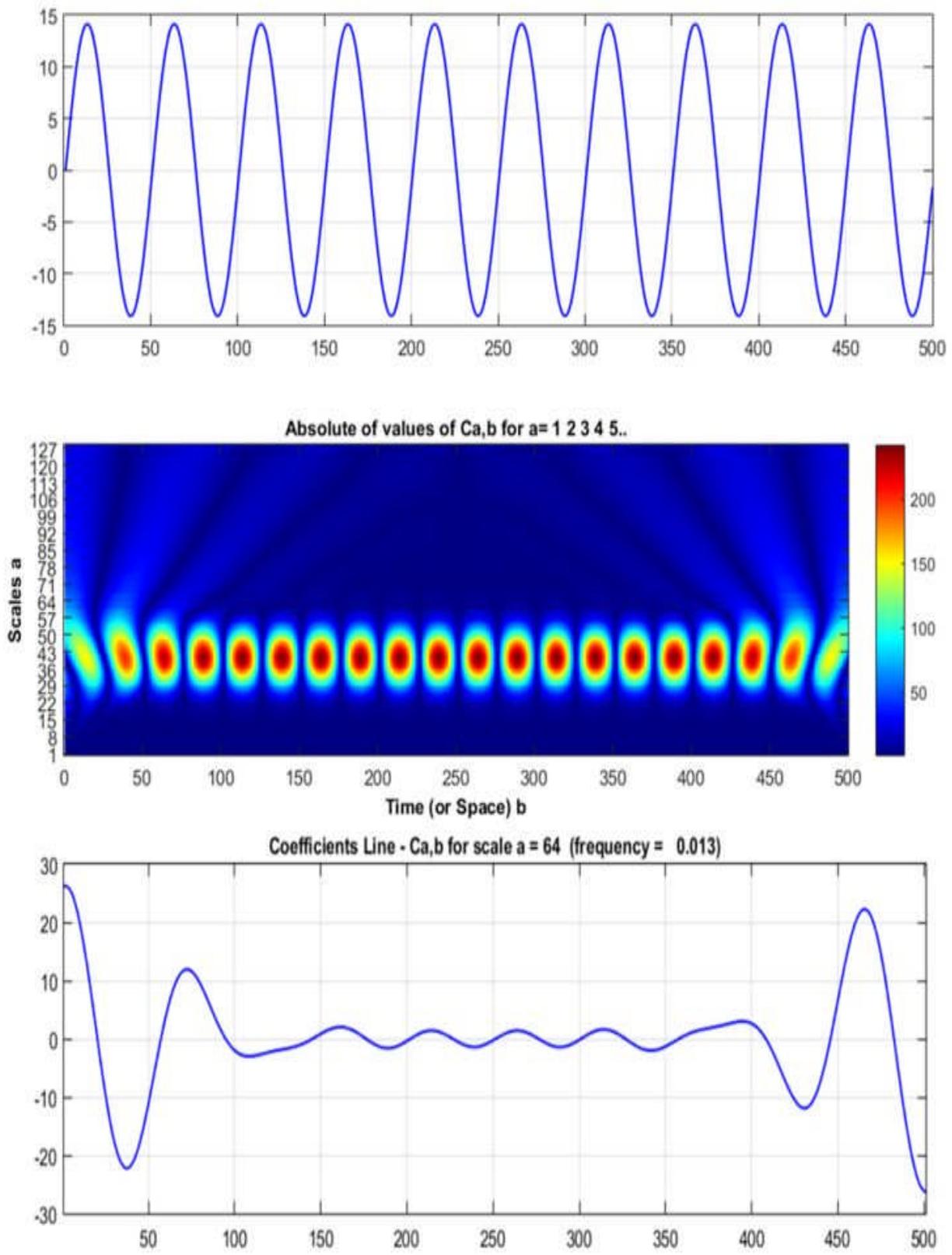
La figure III.14 montre l'analyse du signal de la tension appliquée par la transformée en ondelettes continue (CWT), De haut en bas, le signal de la tension appliquée, son scalogramme et le coefficient de la CWT pour l'échelle  $a = 64$ .

La figure III.14.a montre la tension sinusoïdale parfaite, son scalogramme indique que les coefficients ont une valeur maximale (couleur rouge intense) entre 29 et 57, cela signifie que ces perturbations oscillent à des fréquences très faibles indiquant que l'activité des décharges parallèles à la surface est moindre.

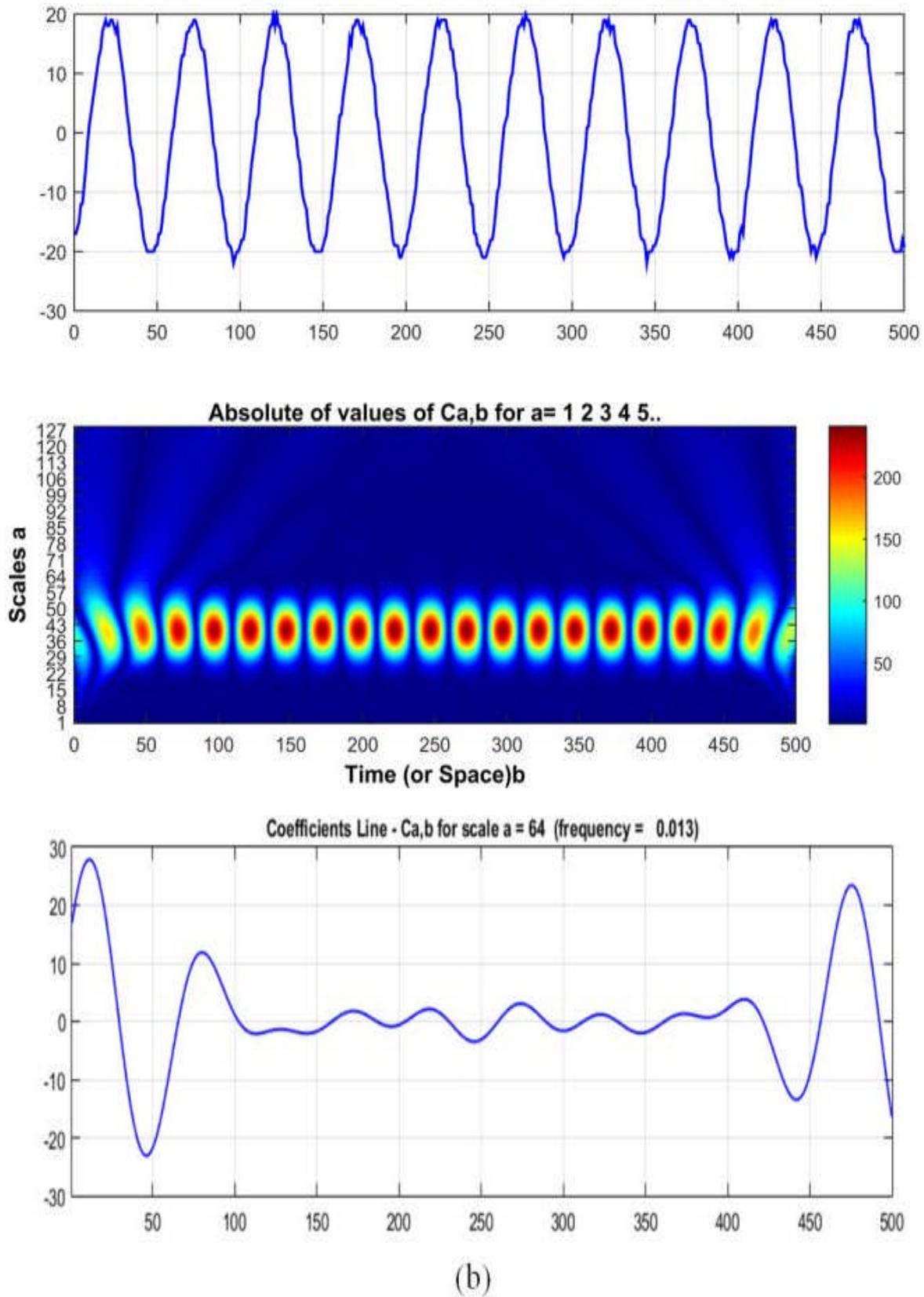
Pour le signal de tension appliquée sur un isolateur pollué par sable de mer à  $10\text{kV}_{\text{eff}}$ , son scalogramme indique que les coefficients de la CWT sont élevés pour des échelle encore plus faible que le signal parfait (entre 22 et 62), l'augmentation de la conductivité de la couche polluée (sable de mer) 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

Les coefficients de la CWT pour l'échelle  $a = 64$  montrent une corrélation de plus en plus évidente entre l'ondelette Morlet et la transformée continue de la tension appliquée.

Dans le cas de bande propre 1cm (figure III.14.b), les coefficients de la CWT à l'échelle  $a = 64$  est plus élevée que celui de signal parfait.



(a)



**Figure III.14.** Analyse du signal de la tension appliquée par la transformée en ondelettes continue. De haut en bas, le signal de la tension appliquée, le scalogramme du signal de la tension appliquée et le coefficient de la CWT correspondant pour (a) signal parfait, (b) sable de mer à 10kV<sub>eff</sub>.

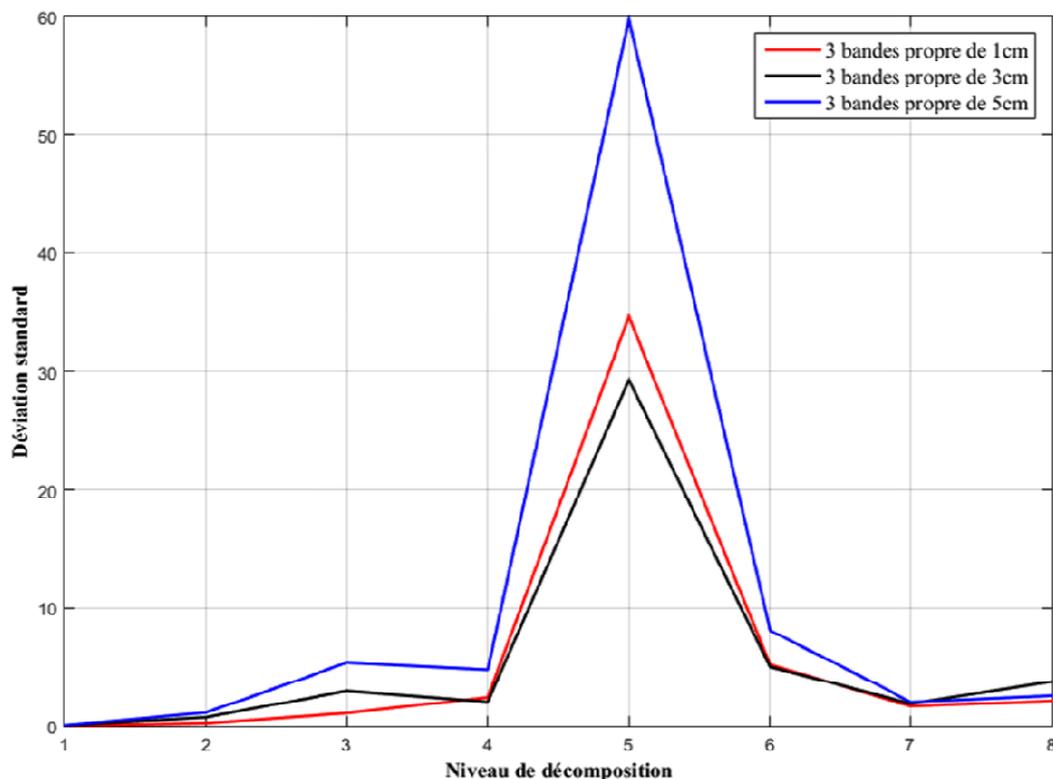
### III.6.4. Analyse du courant de fuite par la transformée d'ondelette Discret (DWT)

#### III.6.4.1. Analyse du courant de fuite pour différentes largeurs des bandes propres par DWT

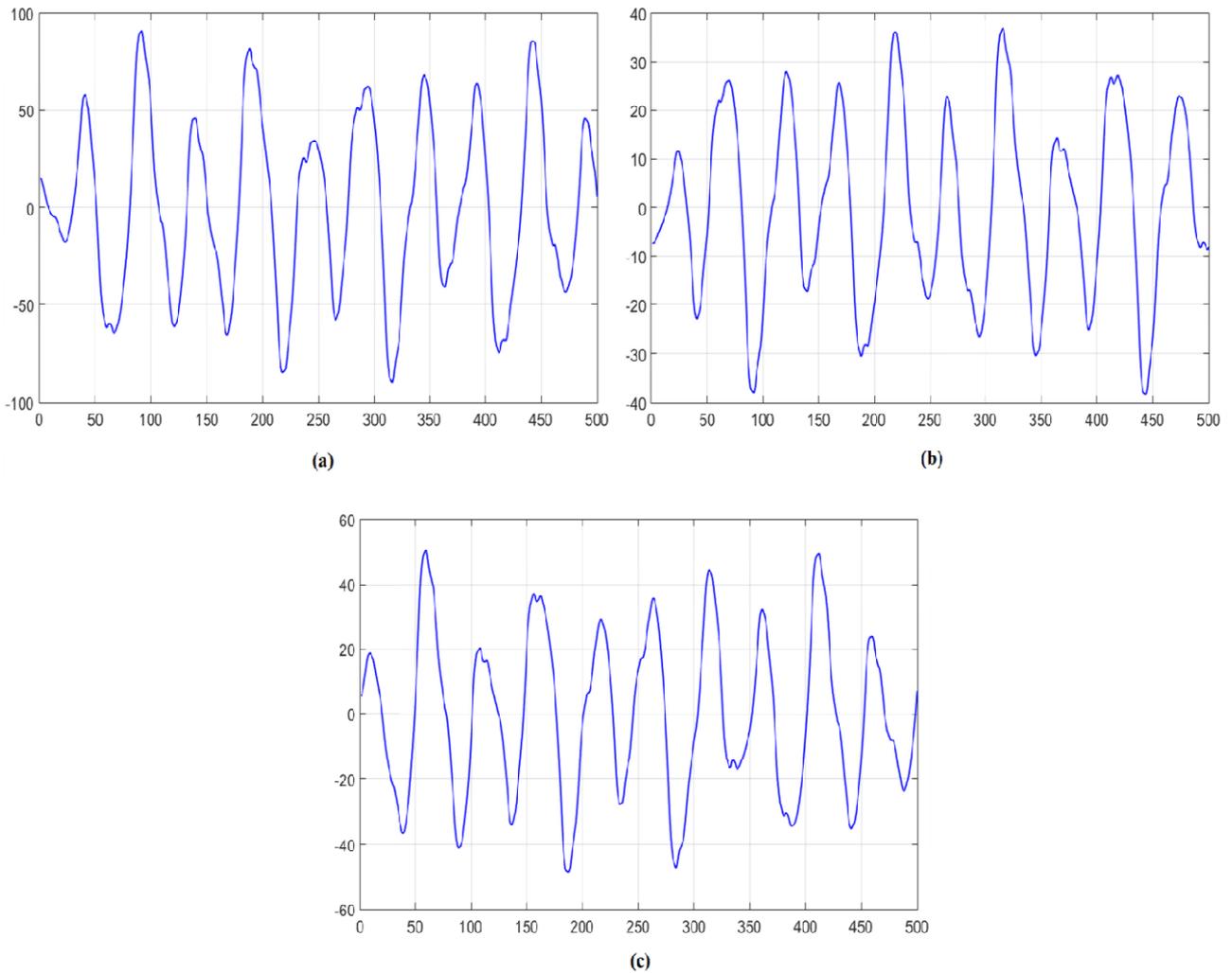
La figure III.15 représente la valeur de la déviation standard (l'énergie) pour chaque détail correspondant, pour les différentes largeurs des couches propres à 30kV. Autrement dit, cette représentation va permettre de cibler le détail intéressant pour le diagnostic. La déviation standard est calculée à l'aide du logiciel MATLAB®.

D'après la figure III.15, nous remarquons que la composante D5 à une énergie qui augmente avec l'agrandissement de la couche polluée. (Ces résultats sont en bon concordance avec ceux de Douar [35]), à l'exception du cas de la largeur des 3 bandes propre de 5cm car 15 cm supérieur à  $\frac{1}{3} L_f$  (12.5 cm) cas où le contournement se fait directement. Le détail D5 pourrait éventuellement servir au diagnostic de la pollution du modèle plan lorsque celle-ci non uniformément polluée.

Les variations du détail D5 pour chaque largeur de la couche polluée sont montrées à la Figure III.16.



**Figure III.15.** Représentation de la déviation standard pour chaque détail, pour les 3 bandes propres de 1, 3 et 5 cm de conductivité 1mS/cm sous tensions 30kV



**Figure III.16.** Evolution du détail D5 à  $30kV_{\text{eff}}$  pour une conductivité de  $1mS/cm$  pour (a) 3 bandes propres de 1cm, (b) 3 bandes propres de 3cm, (c) 3 bandes propres de 5cm.

### III.6.4.2. Analyse du courant de fuite pour différents types de pollution par DWT

Sur la figure III.17, nous observons l'évolution de la déviation standard (l'énergie ou STD) en fonction du niveau de décomposition, pour les trois types de pollution : sable de dune, de mer et du sol sous tensions 20kv. La STD de détail D5 augmente avec l'augmentation de la conductivité.

Les variations du détail D5 pour chaque sable sous tensions appliquées (10kV, 30kV, 50kV) sont montrée par la fugure (III.18),

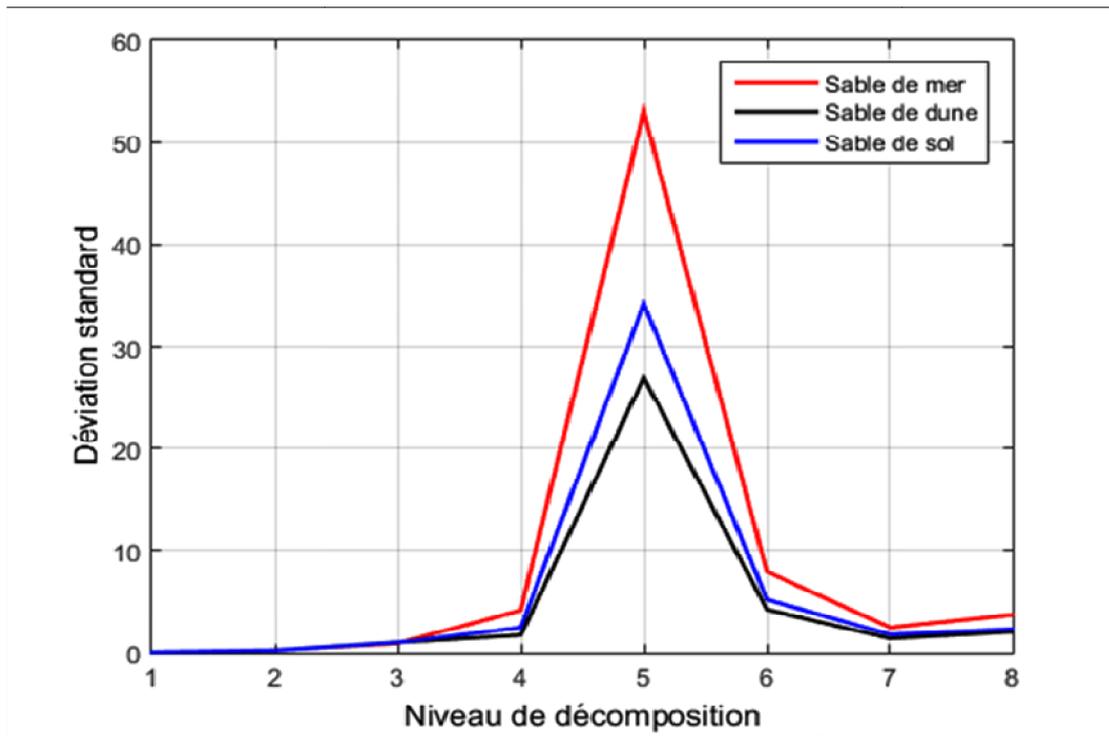


Figure III.17. Représentation de déviation standard pour chaque détail, pour les 3 types de pollution de sable de la dune, mer et sol sous tension 20kV.

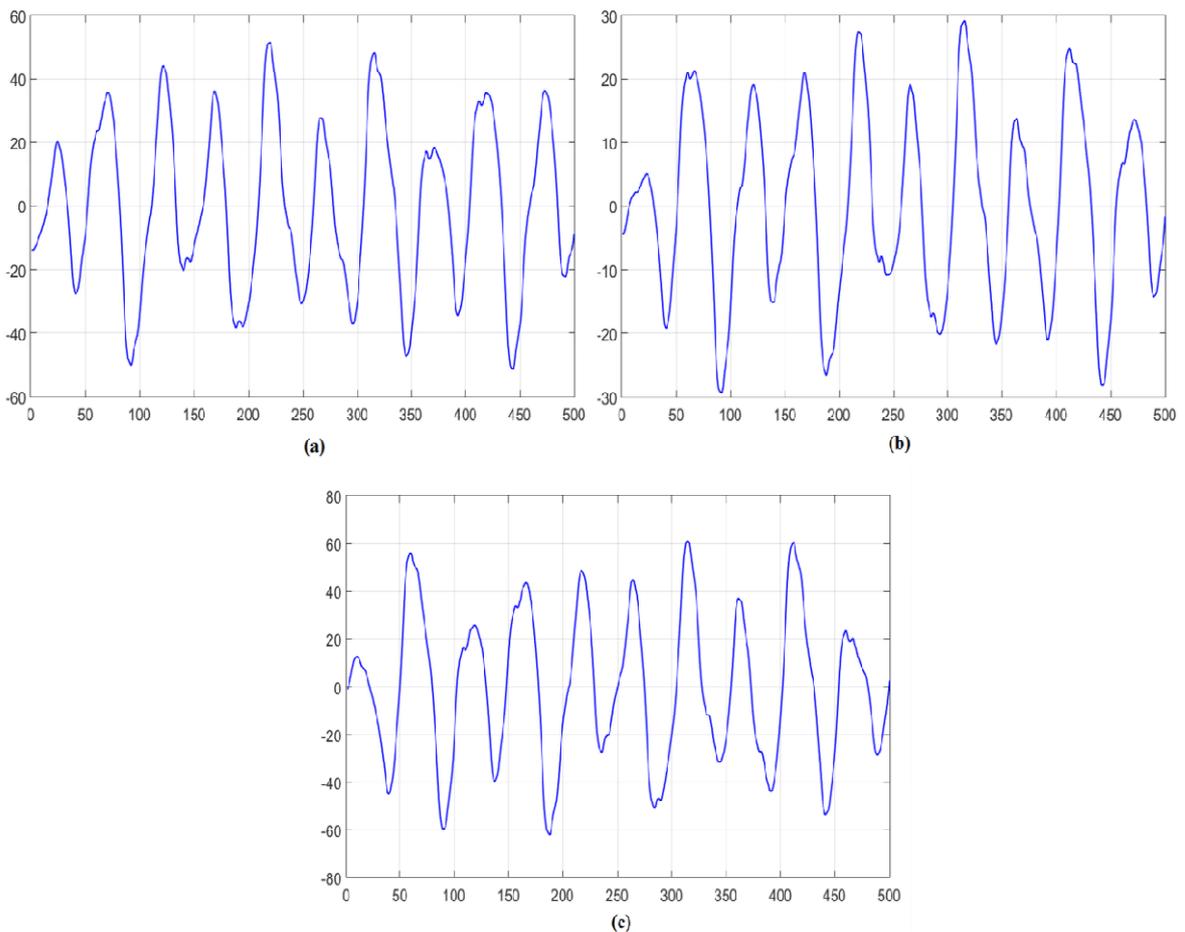


Figure III.18. Evolution du détail D5 à 20kV pour une conductivité de 1mS/cm pour (a) sable de dune, (b) sable de sol, (c) sable de mer.

**Conclusion :**

Pour surveiller l'état de surface de l'isolateur, nous avons analysé dans ce chapitre le courant de fuite et la tension appliquée par l'utilisation de la transformée de Fourier rapide (FFT) et la technique d'ondelette (TO) continue et discrète. De cela nous concluons que :

- 1) L'amplitude de courant de fuite est directement proportionnelle aux contraintes électriques, tandis que la 3<sup>ème</sup> harmonique peut être utilisée comme indicateur d'un événement d'état de surface.
- 2) La technique FFT a été utilisée pour extraire le contenu des composants harmoniques dans le signal de courant de fuite.
- 3) Le modèle plan d'isolateur présente un caractère capacitif dans les cas caractérisés par des largeurs de bande propre 3 et 5 cm et le comportement résistif est prédominant dans le cas de largeur de bande propre égale à 1cm (le cas le plus pollué).
- 4) Le Taux de distorsion ne représente pas toujours l'état de surface de l'isolateur et peut être trompeur.
- 5) l'analyse faite par la CWT sur l'onde de la tension appliquée permet le diagnostic de la sévérité de la pollution qui peut se faire soit par l'intermédiaire du scalogramme qui est une projection des coefficients calculés pour des échelles données sur un plan orthogonal, soit par l'intermédiaire des coefficients d'une échelle bien déterminée.
- 6) La décomposition du courant de fuite par la DWT a pu identifier la presque totalité de ses composantes fréquentielles pour étudier l'attitude de ces dernières vis-à-vis du type de pollution non uniforme.
- 7) L'augmentation simultanée des STD correspondant au détail D5 indique une activité intense des arcs partiels, préconisant alors sur la possibilité d'un contournement imminent.

# *Conclusion Générale*

Le phénomène de pollution des isolateurs est un réel problème puisqu'elles diminuent la fiabilité des réseaux électriques à des périodes où la demande en énergie électrique est importante et vitale pour la population. L'objectif que nous nous sommes intéressés dans ce présent mémoire est d'étudier l'influence de la pollution sur l'état de surface d'un isolateur pollué haute tension avec des méthodes peuvent être développées sous diverses méthodologies.

Dans un premier temps, nous avons exposé quelques travaux réalisés par des chercheurs sur les phénomènes de contournement.

En second temps, nous avons introduit la méthode d'analyse des signaux basé sur la Transformée de Fourier rapide (FFT), Transformée d'ondelette continue (CWT) et discrète (DWT).

D'après les résultats expérimentaux et l'application de ces méthodes, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Nous constatons que la tension de contournement diminue avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluée. Le modèle est plus rigide lorsque la couche conductrice de conductivité volumique est faible.
- L'étude du courant de fuite montre que son amplitude maximale croit avec l'agrandissement de la largeur de la couche polluée et l'augmentation de la tension appliquée.
- Le taux de distorsion de la tension appliquée dans le cas de la pollution de sable de mer est différent de zéro. Cela montre l'influence de la pollution sur la tension appliquée.
- La technique FFT a été utilisée pour extraire le contenu des composants harmoniques dans le signal de courant de fuite. Il a été démontré que les harmoniques d'ordre impair ont été générés.
- Le modèle plan d'isolateur présente un caractère capacitif dans les cas caractérisés par des largeurs de bande propre 3 et 5 cm et le comportement résistif est prédominant dans le cas de largeur de bande propre égale à 1cm.
- la présence d'arc est à l'origine de l'augmentation considérable de l'amplitude de la 3<sup>ème</sup> harmonique et ces résultats sont en bon concordance à ceux trouvés par plusieurs recherches [4-5].
- la variation de THD n'est pas toujours corrélée avec la tension appliquée et ces résultats sont en bon concordance à ceux trouvés par N.Megriche [36].
- D'après l'analyse faite par la CWT sur l'onde de tension, le diagnostic de la sévérité de la pollution peut se faire soit par l'intermédiaire du scalogramme qui est une projection des coefficients calculés pour des échelles données sur un plan orthogonal, soit par l'intermédiaire des coefficients d'une échelle bien déterminée.

- La décomposition du courant de fuite par la DWT a pu identifier la presque totalité de ses composantes fréquentielles pour étudier l'attitude de ces dernières vis-à-vis du type de pollution non uniforme.
- Après l'application de la DWT sur le signal du courant de fuite, nous constatons que la composante D5 à une énergie qui augmente avec l'agrandissement de la couche polluée et de la conductivité (sable de mer).
- L'efficacité de l'analyse des signaux de courant ou de tension pour le diagnostic et le surveillance de l'état de surface d'un isolateur pollué.

Enfin, nous laissons les portes ouvertes devant d'éventuelle recherche future. Ainsi, nous proposons nos perspectives de recherche sur :

- ❖ Modélisation expérimentale du contournement par la méthodologie des plans d'expérience.
- ❖ Prédiction de la tension de contournement par l'approche Neuro-floue.

*Références*

*Bibliographiques*

- [1] S. Flazi, «étude du contournement électrique des Isolateurs Haute Tension pollués, Critère d'élongation et dynamique de phénomène», Thèse d'état, Université PAUL SABATIER, Toulouse 1987.
- [2] S. E. I, Mebaoudj, H. Mezaour, « Prédiction de la tension de contournement d'un isolateur de haute tension en utilisant la logique floue », PFE, Université KASDI MERBAH Ouargla, 2015.
- [3] N. Mhaguen, « Développement de modèle dynamique de prédiction de la tension critique de Contournement des isolateurs recouverts de glace basés sur la méthode des éléments finis », Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence Partielle de la Maîtrise en ingénierie, 2011.
- [4] H. Benguesmia, « Etude du Comportement d'un Isolateur de Haute Tension soumis à Divers Conditions de Pollution », Mémoire de Magister, UMK de Biskra, 2011.
- [5] D. Maadjoudj, A. Mekhaldi and M. Tegar, «Flashover Process and Leakage Current Characteristics of Insulator Model under Desert Pollution», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 25, No. 6; December 2018.
- [6] Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions, IEC/TS 60815-1, 2008.
- [7] M. A. Douar, A. Mekhaldi, and M. C. Bouzidi, «Flashover process and frequency analysis of the leakage current on insulator model under non uniform pollution conditions», IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. vol.17, Nn. 4, pp. 1284-1297, 2010.
- [8] T. Suda, «Frequency Characteristics of Leakage Current Waveform of an Artificially Polluted Suspension Insulator», IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insu. vol. 8, no. 4, pp, 705- 709, 2001.
- [9] Y. Kemari, A. Mekhaldi and M. Tegar, «Experimental investigation and signal processing techniques for degradation assessment of XLPE and PVC/B materials under thermal aging», IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 24, no. 4, pp. 2559-2569, 2017.
- [10] M. M. Hussain, S. Farokhi, S. G. McMeekin, «Observation of Surface Flashover Process on High Voltage Polluted Insulators near Shoreline», IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, 10.1109/ICD.2016.754772.
- [11] M. M. Hussain, S. Farokhi, S. G., McMeekin, & M. Farzaneh, «Mechanism of saline deposition and surface flashover on outdoor insulators near coastal areas part II: impact of various environment stresses», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 24(2), 1068-1076. 10.1109/TDEI.2017.006386.
- [12] I. A. Joneidi, A. A. Shayegani, H. Mohseni, S. Mohseni, and M. Jebeli-Javan «Leakage Current Analysis and FFT Calculation on Polluted Polymer Insulator», International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 5, No. 1, February 2013

- [13] IEC Standard 60815, «Guide for Selection of Insulators in Respect of Polluted Condition», 1986.
- [14] F. F. Bologna, J. P. Reynders, and A. C. Britten, «Corona discharge activity on a string of glass cap-and-pin insulators under conditions of light wetting, light non-uniform contamination», IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy June 23-26, 2003.
- [15] J. Bigot « Analyse par ondelettes » notes de cours, Master 2 Professionnel IMAT, Université PAUL SABATIER, Toulouse III, Septembre 2009.
- [16] A. Boukar, M.Kouache, «Comportement de l'isolateur F160D/146DC pollué sous tension alternative», PFE, Université IBN-KHALDOUN-Tiaret, 2016.
- [17] S. Meziane Tani « Indexation et Recherche d'image médicale à partir de la transformée en ondelette: Applications aux images rétinienne » Thèse de Doctorat, Université ABOU-BEKR BELKAID- Tlemcen, 2016.
- [18] A. Rahouani, A Smail, « Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur pollué à l'aide des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée », PFE, Université IBN KHALDOUN Tiaret 2015.
- [19] <http://www.futura-sciences.com>.
- [20] J.W. Cooley and J.W. Tukey. « An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series », Mathematics of Computation, 19(90): 2978211; 301, 1965.
- [21] M.T. Heideman, D.H. Johnson, and C.S. Burrus, «Gauss and the history of the Fast Fourier Transform». Archive for history of exact sciences, 34(3): 2658211; 277, 1985.
- [22] F. Carl. Werke, band 3, kniglichen gesellschaft der wissenschaften, gttigen, 1866. Page 3088211; 310.
- [23] A. B. M. Boudiaf, S Agal, « Detection des phenomenes de conduction des isolateurs polluent de haute tension », Master Professionnel, Université KASDI MERBAH Ouargla, 2017.
- [24] D. Gabor, « Theory of communication », J Inst Elect. Eng., 93 :429-457, London, 1946.
- [25] T. Alani « Concepts généraux de la théorie des ondelettes » Département Informatique et Télécommunication (IT) ESIEE-Paris, 2013.
- [26] T. Ranchin, « Applications de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution au traitement des images de télédétection », Thèse de Doctorat, Université de NICE-SOPHIA Antipolis, 1993.
- [27] S. Chandrasekar, C. Kalavanan, A. Cavallini, G. C. Montanari, « Investigations on leakage Current and Phase Angle Characteristics of Porcelain and Polymeric Insulator under contaminated conditions », IEEE trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 16, No. 2, April 2009.

## *Références Bibliographiques*

---

- [28] Z. Khawaja, « Analyse des états de surfaces en science des matériaux : caractérisation multi-échelles par ondelette et détermination de l'anisotropie des surfaces », Thèse de doctorat, Université de technologie de Compiègne (Mécanique avancée), 2014.
- [29] Wavelet toolbox, for use with MATLAB.1997.
- [30] S. BOURDIM, « Méthodes ondelettes et Bayésiennes pour le diagnostic: Application aux machines asynchrones », Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS-Setif UFAS (ALGERIE), 2011.
- [31] B. Rezzoug, A. Hamiane, « Control de l'état de surface d'isolateur pollué sous tension alternative », PFE, Université IBN-KHALDOUN Tiaret, 2018.
- [32] M. Misiti, Y. Misiti, « Les ondelettes et leurs applications ». Edition Hermes, Paris 2003.
- [33] J.Danis, A stochastic pollution Flashover model. rapport 46-12-ATHnes-grece, 1986.
- [34] N.Dhahbi-Megrache, A. Beroual, « Time–frequency analyses of leakage current waveforms of high voltage insulators in uniform and non-uniform polluted conditions», article journal IET the institution of engineering and technology, 19<sup>th</sup> June 2015.
- [35] M.A. Douar, M. C. Bouzidi, « Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur pollué à l'aide des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée», PFE, ENP, Alger, 2009.

## ملخص :

في هذا العمل قمنا بدراسة شدة التلوث تحت تيار متناوب ذو توتر 50 هرتز على نموذج سطحي يمثل العازل F160D\_146DC ولهذا الغرض اجريت عدة تجارب للتلوث غير المنتظم بالمخبر عالي التوتر لجامعة ابن خلدون بتيارت [18] لتمييز حالة سطح النموذج اعتمادا على اشارة كل من تيار التسرب و التوتر المطبق. اولا ركزنا على توتر الاحاطة و سعة تيار التسرب . ثانيا قمنا بعرض نتائج معالجة اشارة كل من التوتر المطبق و تيار التسرب بواسطة تقنية تحويل فورييه السريع ، معدل التشوه التوافقي , التحويل المويجي المستمر والمنفصل.

## الكلمات المفتاحية

التلوث غير المنتظم، نموذج سطحي، تيار التسرب، توتر الاحاطة ، تحويل فورييه السريع، التحويل المويجي المستمر والمنفصل.

## Résumé :

Dans le présent travail, l'étude la sévérité de la pollution est effectuée en tension alternative 50 Hz sur le comportement d'un modèle plan qui simule l'isolateur (F160D\_146DC). Pour cela, plusieurs essais en pollution non-uniforme sont accomplis au Laboratoire de Haute Tension de l'université IBN-KHALDOUNE de TIARET 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 et à l'amplitude du courant de fuite. En deuxième lieu, nous présentons les résultats du traitement des signaux de la tension appliquée et du courant de fuite par la technique de la Transformée de Fourier Rapide (FFT), l'évolution du Taux de Distorsion Harmonique (THD), la Transformé d'Ondelette Continue et Discrète.

**Mots-clés:** Pollution non-uniforme, modèle plan, courant de fuite, tension de contournement, transformée de Fourier rapide(TFR), la transformée d'ondelette Continue et Discrète.

## Abstract:

In this work, pollution severity under 50 Hz applied voltage is studied on plan model which simulates (F160D\_146DC) outdoor insulator. Many tests at High Voltage Laboratory of the IBN-KHALDOUNE university of TIARET are carried out in 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. Secondly, we present the result of treatment of applied voltage waveforms and leakage current by the Fast Fourier Transform (FFT) technique, the evolution of the Harmonic Distortion Time (THD), Continuous and Discrete Wavelet Transform.

**Key- words:** Non-uniform pollution, plan model, leakage current, flashover voltage, Fast Fourier Transform , Continuous Wavelet Transform and Discrete Wavelet Transform.